

TCCS 01-2014-FRP- NUCETECH

Xuất bản lần 1

**KẾT CẤU BÊ TÔNG SỬ DỤNG THANH POLYME
CỐT SỢI - TIÊU CHUẨN THIẾT KẾ**

*Structural Concrete Using Fiber Reinforced
Polymer Bar - Design Standard*

HÀ NỘI - 2014

MỤC LỤC	trang
Lời nói đầu	5
Lời giới thiệu	6
1. Phạm vi áp dụng	7
2. Tài liệu viện dẫn	7
3. Thuật ngữ, định nghĩa	7
3.2 Kí hiệu	14
4. Thanh FRP dùng làm cốt trong kết cấu bê tông	14
4.1 Đặc tính chung và phạm vi sử dụng cốt FRP	14
4.2 Đặc trưng tiêu chuẩn chất lượng thanh FRP	15
4.2.1 Phân loại và kí hiệu nhận dạng.....	15
4.2.2 Yêu cầu và kích thước cơ bản thanh FRP	18
4.2.3 Tính chất vật lý.....	20
4.3 Đặc trưng tính toán làm việc của thanh FRP	20
4.3.1 Sự làm việc chịu kéo	20
4.3.2 Sự làm việc chịu nén	23
4.3.3 Sự làm việc chịu cắt	23
4.3.4 Sự làm việc về dính kết	24
4.3.5 Ứng xử phụ thuộc thời gian.....	24
5. Tính toán kết cấu bê tông cốt thanh FRP	29
5.1 Nguyên tắc chung	29
5.2 Các đặc trưng tính toán của vật liệu.....	29
5.3 Thiết kế cấu kiện chịu uốn	31
5.3.1 Các vấn đề chung	31
5.3.2 Cường độ chịu uốn	32
5.3.3 Khả năng sử dụng.....	37
5.3.4 Phá hủy do từ biến và môi.....	42
5.4 Thiết kế cấu kiện chịu cắt.....	43
5.4.1 Các vấn đề chung	43
5.4.2 Cường độ chịu cắt của cấu kiện đặt cốt FRP	43
5.4.3 Cấu tạo chi tiết của đai chịu cắt.....	46
5.4.4 Cường độ chịu cắt của bản bê tông cốt FRP làm việc hai phương	46
5.5 Các tính toán thiết kế kết cấu khác.....	47
5.5.1 Cốt chịu tác dụng của co ngót và biến thiên nhiệt độ	47
5.5.2 Neo cốt FRP	48
5.5.3 Chiều dài neo của thanh uốn	51

5.5.4 Chiều dài neo của cốt chịu mô men dương	51
5.5.5 Môi nối chồng chịu kéo	52
5.5.6 Bản đặt trên đất.....	52
6. Tóm tắt quy trình tính toán cốt FRP	53
6.1 Dữ liệu đầu bài ban đầu	53
6.2 Các bước tính toán.....	54
6.2.1 Kiểm tra khả năng chịu mô men uốn.....	54
6.2.2 Kiểm tra điều kiện hạn chế về vết nứt.....	55
6.2.3 Kiểm tra điều kiện hạn chế về độ võng	55
6.2.4 Kiểm tra ứng suất giới hạn cho tác động của từ biến.....	56
6.2.5 Tính toán cốt FRP chịu cắt	56
6.2.6 Kiểm tra về điều kiện neo cốt FRP.....	57

Lời nói đầu

- TCCS 01-2014-FRP-NUCETECH được xây dựng trên cơ sở biên dịch chấp nhận các nội dung chính của ACI 440.1R - 06 và ACI 440.5-08. Đây là các tiêu chuẩn của Viện bê tông Mỹ đã được áp dụng rộng rãi ở nhiều nước trên thế giới và lần đầu tiên NUCETECH biên dịch áp dụng phù hợp điều kiện Việt Nam vào các công trình xây dựng bằng bê tông có cốt là các thanh polyme cốt sợi gia cường (FRP)..

- TCCS 01-2014-FRP-NUCETECH do Ban kỹ thuật tiêu chuẩn NUCETECH biên soạn. Tiêu chuẩn đã được hoàn thiện, sau khi tiếp thu các góp ý của Hội đồng Khoa học chuyên ngành Bộ xây dựng - họp đánh giá nghiệm thu tại Bộ xây dựng ngày 24/9/2013. Tiêu chuẩn được công ty NUCETECH công bố áp dụng theo Quyết định số: 22-0614 /QĐ.NUCETECH, ngày 22 tháng 6 năm 2014.

- Song song với tiêu chuẩn này , TCCS- 02- 2014- FRP- NUCETECH , **Kết cấu bê tông sử dụng thanh polymer cốt sợi- tiêu chuẩn thi công và nghiệm thu** , cũng đã được NUCETECH phát hành, nhằm hướng dẫn thi công và nghiệm thu các công trình kết cấu bê tông cốt sợi FRP tại Việt nam

Lời giới thiệu

- Thanh polyme cốt sợi gia cường (Fiber Reinforced polymer Bar) - gọi tắt là thanh FRP, dùng làm cốt trong các kết cấu bê tông là sản phẩm dạng thanh trong đó chứa sợi (sợi thủy tinh, sợi hữu cơ aramit, sợi bazan, sợi cacbon v.v...) được bao bọc gắn kết bởi chất nền là các nhựa polime (nhựa nhiệt rắn hoặc nhựa nhiệt dẻo) hoặc nền là các dạng chất kết dính khác (vật liệu cacbon, composit gồm v.v...) mà trong các tiêu chuẩn nước ngoài thường gọi là thanh polime cốt sợi (Fiber - Reinforced polimer Bars) hoặc là thanh sợi liên tục (Continuous Fiber Rods).

- Do các đặc tính ưu việt: - Không từ tính, không dẫn điện, khả năng chống ăn mòn trong môi trường xâm thực cao, cường độ kéo lớn, nhẹ hơn thép nhiều lần, nên thanh FRP rất thích hợp để làm cốt gia cường thay thế thép trong các kết cấu bê tông đòi hỏi các yêu cầu đặc trưng nêu trên.

Về bản chất thanh FRP là vật liệu không đẳng hướng, có cường độ chịu kéo lớn theo phương của các sợi. Tính không đẳng hướng, ảnh hưởng đến cường độ cắt và cả sự dính kết. Ngoài ra vật liệu FRP không có sự chảy dẻo, nó luôn làm việc ở trạng thái đàn hồi cho đến khi phá hoại. Các đặc điểm cơ bản trên dẫn tới sự làm việc của kết cấu bê tông có cốt FRP khác với sự làm việc của kết cấu bê tông cốt thép thông thường; bởi vậy đòi hỏi phải bổ sung các cơ sở lý thuyết và tư duy thiết kế trong tính toán các kết cấu bê tông có cốt là thanh sợi FRP.

- Bản tiêu chuẩn: "**Kết cấu bê tông sử dụng thanh polime cốt sợi - tiêu chuẩn thiết kế**" này nhằm đáp ứng giải quyết đòi hỏi nêu trên. Nội dung bản tiêu chuẩn được xây dựng trên nền cơ bản biên dịch các nội dung chính của ACI 440.1R-06 Guide for the design and construction for structural concrete Reinforced With FRP Bars và ACI 440.5-08 specification for concrete Reinforced polyme, Reinforcing Bars. Đây là các tiêu chuẩn của Viện bê tông Mỹ đã được chấp nhận áp dụng rộng rãi ở nhiều nước trên thế giới - và lần đầu tiên Nucetech biên dịch áp dụng phù hợp điều kiện Việt Nam, nhằm phát triển phổ cập sản phẩm mới này vào các công trình xây dựng trong nước.

- Văn bản tiêu chuẩn Nucetech này đã được hoàn thiện, sau khi tiếp thu các góp ý của Hội đồng khoa học chuyên ngành Bộ Xây dựng, họp đánh giá nghiệm thu tại Bộ Xây dựng ngày 24 tháng 9 năm 2013. Tiêu chuẩn được Công ty NUCETECH công bố theo Quyết định số: 22-06-14 /QĐ.NUCETECH, ngày 22 tháng 6 năm 2014 và có hiệu lực áp dụng từ ngày 22 tháng 6 năm 2014.

Kết cấu bê tông sử dụng thanh polymer cốt sợi - Tiêu chuẩn thiết kế

Structural Concrete Using Fiber Reinforced Polymer Bar - Design Standard

1. Phạm vi áp dụng

1.1. Tiêu chuẩn này dùng để thiết kế các kết cấu bê tông sử dụng thanh polyme cốt sợi (sau đây gọi tắt là thanh FRP) không ứng lực trước. Tiêu chuẩn không chỉ dẫn cách sử dụng kết hợp cốt thép và cốt thanh FRP trong cùng một kết cấu bê tông.

1.2. Tiêu chuẩn không áp dụng cho thiết kế kết cấu bê tông thanh FRP ứng lực trước.

2. Tài liệu viện dẫn

Các tài liệu viện dẫn sau là cần thiết cho việc áp dụng tiêu chuẩn này. Đối với các tài liệu viện dẫn ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản được nêu. Đối với các tài liệu viện dẫn không ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản mới nhất, bao gồm cả các sửa đổi, bổ sung (nếu có).

ACI 117 Standard Specification for Tolerances for concrete construction and materials.

ACI 216R Guide for Determining the fire Endurance of Concrete Elements

ACI 318-05 Building code Requirements for structural concrete

ACI 360R Design of slabs on Grade

ACI 440.1R-06 Guide for the Design and construction of structural concrete Reinforced with FRP Bars.

ACI 440.3R-12 Guide Test methods for Fiber. Reinforced polyme (FRP) Composites for Reinforcing or strengthening concrete and Masory Structures.

ACI 440.5-08 Specification for construction With Fiber - Reinforced polymer Reinforcing Bars.

ACI 440.6-08 Specification for carbon and Glass Fiber - Reinforced polymer Materials for concrete Reinforcement.

3. Thuật ngữ, định nghĩa và kí hiệu

3.1. Thuật ngữ, định nghĩa

Các thuật ngữ trong tiêu chuẩn này được định nghĩa như sau:

3.1.1.

Thanh polyme cốt sợi (Fiber Reinforced polymer Bar) - thanh FRP.

Là vật liệu compozit dạng thanh dùng làm cốt trong kết cấu bê tông, nó gồm các sợi (sợi thủy tinh, sợi aramit, sợi các bon...) đặt theo phương dọc thanh được bao bọc thông qua chất kết dính là các nhựa polyme, tạo hình thành các thanh có tiết diện ngang khác nhau (thường là tiết diện tròn hoặc chữ nhật), bề mặt có dạng gân hoặc nhám để tăng độ dính kết với bê tông. Một số loại thanh sợi gia cường thông dụng:

- Thanh sợi thủy tinh (Glass Fiber - Reinforced polymer) - GFRP

- Thanh sợi hữu cơ Aramit (Aramid Fiber - Reinforced polyme) - AFRP

- Thanh sợi các bon (Carbon Fiber - Reinforced polymer) - CFRP
- Thanh Sợi Bazan (Bazan Fiber - Reinforced polymer) - BFRP

3.1.2.

Vật liệu composit (Composite)

Tổ hợp từ hai hay nhiều vật liệu khác nhau về hình thức hay thành phần; các thành phần này vẫn giữ nguyên bản chất của chúng nghĩa là không hòa tan hoặc hòa nhập hoàn toàn vào nhau mặc dù chúng vẫn cùng phối hợp với nhau. Thông thường các thành phần có thể nhận diện rõ ràng về vật lý và chúng có mặt phân giới với nhau.

3.1.3.

Hàm lượng sợi (Fiber content)

Lượng sợi có trong một thanh composit, thường được tính bằng phần trăm thể tích hoặc phần trăm trọng lượng của thanh composit.

3.1.4.

Tỉ phần thể tích sợi (Fiber volume traction)

Tỷ số thể tích sợi so với thể tích composit.

3.1.5.

Hàm lượng cốt FRP cân bằng (Balanced FRP reinforcement ratio)

Lượng cốt và sợi phân bố cốt trong 1 cấu kiện uốn sao cho khi thiết kế về cường độ thì cốt FRP chịu kéo sẽ đạt tới trị số biến dạng tỉ đối cực hạn đồng thời với việc bê tông vùng nén cũng đạt biến dạng tỉ đối cực hạn là 0,003.

3.1.6.

Liên kết chéo (Cross-link)

Liên kết hóa học giữa các phân tử polyme. Lưu ý: tăng số liên kết chéo cho mỗi phân tử polyme sẽ làm tăng cường độ và môđun đàn hồi nhưng làm giảm độ mềm dẻo.

3.1.7.

Lưu hóa thanh FRP (Curing of FRP bars)

Quá trình biến đổi vĩnh viễn các tính chất của chất nhựa kết dính nóng bởi các phản ứng hóa học như quá trình ngưng tụ, khép kín vòng hay phản ứng cộng thêm. Lưu ý: sự lưu hóa thanh FRP có thể thực hiện bằng cách thêm các liên kết chéo (liên kết hóa học giữa các phân tử polime) trong điều kiện có hoặc không gia nhiệt hoặc áp lực.

3.1.8.

Sự bện (Braiding)

Cách xoắn hai hay nhiều sợi theo các phương chéo nhau để tạo nên một thể thống nhất. Vật liệu bện khác với sản phẩm đan hay dệt ở cách đưa sợi vào vải và cách các sợi giao nhau.

3.1.9.

Đa thể (Hybrid)

Kết hợp hai hay nhiều loại sợi khác nhau như sợi cacbon và sợi thủy tinh hoặc sợi cacbon và sợi aramit trong một cấu trúc.

3.1.10.**Thấm đẫm** (Impregnate)

Trong polyme cốt sợi, các sợi được thấm đẫm nhựa.

3.1.11.**Tấm lưới** (Grid)

Một mảng cứng hai chiều (phẳng) hoặc ba chiều (không gian) gồm các thanh FRP liên kết với nhau tạo nên một tấm lưới tiếp giáp nhau và có thể làm cốt cho bê tông. Tấm lưới có thể được chế tạo từ các thanh liên kết toàn vẹn với nhau hoặc do từng thanh riêng lẻ liên kết bằng cơ khí.

3.1.12**Dệt** (Weaving)

Cách sắp xếp sợi theo nhiều phương. Ví dụ dệt kiểu độc cực thì các sợi cốt sẽ theo các phương chu vi, xuyên tâm và dọc trục; dệt trực giao thì các sợi sắp xếp theo hình trực giao (hệ Đê các), mọi sợi là giao nhau theo góc 90 độ.

3.1.13.**Chất nền gắn** (matrix)

Trong trường hợp polyme cốt sợi, đó là vật liệu dùng để kết dính các sợi với nhau, truyền tải đến các sợi và bảo vệ chúng chống sự xâm hại của môi trường và hư hại khi thao tác bốc xếp.

3.1.14.**Hắc ín** (Pitch)

Chất chặn đen từ việc chưng cất dầu mỏ.

3.1.15.**Chất tiền tố** (Precursor)

Đối với sợi cacbon hay graphit, đó là các sợi tơ, PAN polyacrylonitrin), hay hắc ín để từ đó làm ra các sợi cacbon và graphit.

3.1.16.**Nhựa** (Resin)

Vật liệu polyme dạng cứng hoặc bán cứng tại nhiệt độ phòng; thông thường có điểm chảy hoặc nhiệt độ chuyển hóa cấu trúc mạng lưới cao hơn nhiệt độ phòng.

3.1.17.**Nhựa nhiệt dẻo** (Thermoplastic)

Loại nhựa có trạng thái thuận nghịch có thể bị làm mềm nhiều lần bằng cách tăng nhiệt độ và rắn lại bằng cách giảm nhiệt độ.

3.1.18.**Nhựa nhiệt rắn** (Thermoset)

Loại nhựa mà khi bị lưu hóa bằng nhiệt hay bằng hóa học, sẽ chuyển hóa thành vật liệu có cấu trúc mạng lưới không thuận nghịch (không nóng chảy và không bị hòa tan).

3.1.19.**Nhựa vinyl esters** (vinyl esters)

Loại nhựa nhiệt rắn có chứa este của axit acrylic hay methacrylic hoặc cả hai, nhiều loại được chế tạo bằng nhựa epoxy.

3.1.20.**Thủy tinh E** (E. glass)

Họ thủy tinh với thành phần canxi alumina boro silicat và hàm lượng kiềm tối đa là 2,0%. Loại sợi thủy tinh này được dùng làm cốt sợi polyme.

3.1.21.**Sự lão hóa** (Aging)

Ảnh hưởng của thời gian đến tính chất của vật liệu nằm trong các môi trường khác nhau.

3.1.22.**Tính kiềm** (Alkalinity)

Điều kiện có hoặc chứa các ion hydroxyl (OH)⁻; chứa các chất kiềm. Trong bê tông, môi trường kiềm có độ pH cao hơn 12.

3.1.23.**Sự đùn kéo** (Pultrusion)

Quá trình liên tục để chế tạo composit có tiết diện là đều. Phương pháp là kéo vật liệu làm cốt sợi qua một bể chứa đẫm nhựa rồi kéo qua khuôn tạo hình để nhựa được lưu hóa sau đó.

3.1.24.**Sự xuống cấp** (Degradation)

Sự suy giảm cấu trúc hóa học, tính chất vật lý hoặc bề ngoài của một thanh cốt FRP.

3.1.25.**Giới hạn chịu đựng** (Endurance limit)

Số chu kỳ biến dạng hay chịu tải làm cho vật liệu hoặc mẫu thử hoặc cấu kiện bị hỏng.

3.1.26.**Cường độ mỏi** (Fatigue strength)

Ứng suất lớn nhất mà vật liệu có thể chịu được sau một số chu kỳ nhất định mà không bị phá hủy.

3.1.27.**Hệ số biến dạng** (Deformability factor)

Tỷ số giữa năng lượng hấp thụ (diện tích bên dưới đường cong quan hệ mômen–độ cong) của tiết diện tại mức cường độ cực hạn so với năng lượng hấp thụ tại mức ứng suất của giai đoạn sử dụng.

3.1.28.**Mô đun đàn hồi tính toán** (Design modulus of elasticity)

Môđun đàn hồi của FRP (E_f) dùng trong tính toán thiết kế và được xác định như là môđun trung bình của nhóm các mẫu thử ($E_f = E_{f, ave}$).

3.1.29.

Cường độ kéo tính toán (Design tensile strength)

Cường độ kéo của FRP (f_{tu}) được dùng trong tính toán thiết kế và được xác định là bằng cường độ kéo được bảo đảm nhân với hệ số giảm do môi trường ($C_E f_{fu}^*$).

3.1.30.

Biến dạng tỷ đối tính toán khi phá hủy (Design rupture strain)

Biến dạng tỷ đối kéo cực hạn của FRP (ϵ_{fu}) và được xác định là bằng biến dạng tỷ đối được bảo đảm khi phá hủy kéo nhân với hệ số giảm do môi trường ($C_E \epsilon_{fu}^*$).

3.1.31.

Tập trung ứng suất (stress concentration)

Sự tăng ứng suất cục bộ tại vùng có sự uốn cong, có cắt khác, rỗng, lỗ hay tạp chất so với ứng suất dự tính theo các công thức cơ học thông thường mà không xét đến các bất thường đó.

3.1.32.

Ứng suất dài hạn (sustained stress)

Ứng suất gây bởi tải trọng lâu dài không nhân thêm hệ số, bao gồm tải trọng tĩnh và phần dài hạn của hoạt tải.

3.2. Kí hiệu

A_f	=	diện tích tiết diện cốt FRP, mm ²
$A_{f, bar}$	=	diện tích tiết diện một thanh FRP, mm ²
$A_{f, min}$	=	diện tích tiết diện của cốt FRP tối thiểu cần thiết để cấu kiện uốn không bị phá hỏng khi bị nứt, mm ²
$A_{f, sh}$	=	diện tích tiết diện cốt FRP để chịu co ngót và chịu nhiệt độ, tính trên mét dài, mm ²
A_{fv}	=	diện tích tiết diện cốt FRP chịu cắt bên trong khoảng cách s, mm ²
$A_{fv, min}$	=	diện tích tiết diện cốt FRP tối thiểu chịu cắt bên trong khoảng cách s, mm ²
A_s	=	diện tích cốt thép chịu kéo, mm ²
a	=	chiều cao của biểu đồ ứng suất chữ nhật tương đương, mm
b	=	chiều rộng của tiết diện chữ nhật, mm
b_o	=	chu vi của tiết diện nguy hiểm đối với bản và đế móng, mm
b_w	=	chiều rộng của bụng dầm, mm
C	=	khoảng cách bước hay kích thước lớp bảo vệ, mm
C_E	=	hệ số giảm do môi trường đối với các loại sợi khác nhau và các tình trạng bị phơi lộ khác nhau, được cho trong bảng 10
c	=	khoảng cách từ thớ nén tại biên đến trục trung hòa, mm
c_b	=	khoảng cách từ thớ nén tại biên đến trục trung hòa trong điều kiện cân bằng biến dạng, mm
d	=	khoảng cách từ thớ nén tại biên đến trọng tâm của cốt chịu kéo, mm

d_b	=	đường kính của thanh cốt, mm
d_c	=	bề dày lớp bê tông bảo vệ đo từ thớ kéo ngoài cùng đến tâm của thanh cốt sợi hay của vùng sợi gần nhất với thớ đó, mm
E_c	=	môđun đàn hồi của bê tông, MPa
E_f	=	môđun đàn hồi tính toán hay môđun đàn hồi được bảo đảm của FRP được xác định bằng môđun trung bình của nhóm mẫu thử ($E_f = E_{f, ave}$), MPa
$E_{f, av}$	=	môđun đàn hồi trung bình của FRP, MPa
E_S	=	môđun đàn hồi của thép, MPa
f'_c	=	cường độ nén đặc trưng của bê tông, MPa
$\sqrt{f'_c}$	=	căn bậc 2 của cường độ nén đặc trưng của bê tông, MPa
f_f	=	ứng suất trong cốt FRP chịu kéo, MPa
f_{fb}	=	cường độ của phần uốn cong của thanh FRP, MPa
f_{fe}	=	ứng suất trong thanh có thể triển khai trong chiều dài chôn l_e , MPa
f_{fr}	=	ứng suất yêu cầu của thanh, MPa
$f_{f, s}$	=	mức ứng suất phát sinh trong FRP do tải trọng dài hạn, MPa
f_{fu}	=	cường độ kéo thiết kế của FRP có xét sự giảm do môi trường sử dụng, MPa
f_{fu}^*	=	cường độ kéo được bảo đảm của thanh FRP, được xác định bằng cường độ kéo trung bình của nhóm mẫu thử, trừ đi ba lần độ lệch chuẩn ($f_{fu}^* = f_{u, ave} - 3\sigma$), MPa
f_{fv}	=	cường độ kéo của thanh FRP khi thiết kế chịu cắt, lấy bằng giá trị nhỏ nhất trong các giá trị: cường độ kéo thiết kế f_{fu} , cường độ kéo của phần uốn cong của đai FRP f_{fb} hoặc ứng suất tương ứng với 0,004 E_f , MPa
f_s	=	ứng suất cho phép trong cốt thép, MPa
$f_{u, ave}$	=	cường độ kéo trung bình của nhóm mẫu thử, MPa
f_y	=	ứng suất chảy đặc trưng của cốt thép không ứng lực trước, MPa .
h	=	chiều cao toàn thể của cấu kiện uốn, mm
I	=	mômen quán tính, mm ⁴
I_{cr}	=	mômen quán tính của tiết diện đã biến đổi do nứt, mm ⁴
I_e	=	mômen quán tính hữu hiệu, mm ⁴
I_g	=	mômen quán tính của tiết diện nguyên, mm ⁴
K_1	=	tham số xét đến các điều kiện biên (phương trình 5-13)
k	=	tỷ số của khoảng cách từ thớ nén ngoài cùng đến trục trung hòa và đến cốt chịu kéo
k_b	=	hệ số phụ thuộc độ dính kết
L	=	khoảng cách giữa các khe nối trong bản đặt trên đất, mm
ℓ	=	chiều dài vượt nhịp của cấu kiện, m
l_a	=	chiều dài neo bổ sung tại gối tựa hay tại điểm uốn, mm
l_{thf}	=	chiều dài neo cơ bản của móc FRP tiêu chuẩn chịu kéo, mm
ℓ_d	=	chiều dài neo, mm
ℓ_e	=	chiều dài chôn của thanh cốt, mm

l_{thf}	= chiều dài của phần đuôi sau móc của thanh FRP, mm
M_a	= mômen lớn nhất trong cấu kiện tại giai đoạn tính toán độ võng, N-mm
M_{cr}	= mômen gây nứt, N-mm
M_n	= khả năng chịu uốn danh nghĩa, N-mm
M_s	= mômen do tải trọng dài hạn, N-mm
M_u	= mômen có nhân hệ số (còn gọi là mômen tính toán) tại tiết diện, N-mm
n_f	= tỷ số giữa môđun đàn hồi của thanh FRP so với môđun đàn hồi của bê tông
r_b	= bán kính uốn phía trong của thanh FRP, mm
s	= khoảng cách đai hay bước của cốt xoắn liên tục, và khoảng cách thanh FRP dọc, mm
T_g	= nhiệt độ chuyển hóa thủy tinh, °C
u	= ứng suất dính trung bình tác dụng trên bề mặt thanh FRP, MPa
V_c	= khả năng chịu cắt danh nghĩa tạo bởi bê tông, N
V_f	= khả năng chịu cắt tạo bởi đai FRP, N
V_n	= khả năng chịu cắt danh nghĩa tại tiết diện, N
V_s	= khả năng chịu cắt tạo bởi đai thép, N
V_u	= lực cắt có nhân hệ số (còn gọi là lực cắt tính toán) tại tiết diện, N
w	= chiều rộng vết nứt lớn nhất, mm
α	= góc nghiêng của đai hoặc của cốt xoắn (mục 5.4), hệ số điều chỉnh cho thanh trên đỉnh (mục 5.5)
α_1	= tỷ số giữa ứng suất trung bình của biểu đồ ứng suất chữ nhật tương đương so với f_c'
α_L	= hệ số giãn nở nhiệt theo phương dọc 1/°C
α_T	= hệ số giãn nở nhiệt theo phương ngang 1/°C
β	= tỷ số giữa khoảng cách từ trục trung hòa đến mặt kéo tại biên so với khoảng cách từ trục trung hòa đến tâm của cốt chịu kéo (Mục 5.3.3.1)
β_1	= hệ số lấy bằng 0,85 đối với cường độ bê tông f_c' tới 28MPa. Với cường độ lớn hơn 28MPa, hệ số này sẽ giảm liên tục với mức 0,05 cho mỗi giá trị 7MPa vượt quá 28MPa nhưng không lấy nhỏ hơn 0,65
β_d	= hệ số giảm dùng tính độ võng (Mục 5.3.3.2)
$\Delta_{(cp+sh)}$	= độ võng bổ sung do từ biến và co ngót dưới tải trọng dài hạn, mm
$(\Delta i)_{sus}$	= độ võng tức thời do tải trọng dài hạn, mm
$(\Delta/D)_{max}$	= tỷ lệ giới hạn độ võng so với nhịp (mục 5.3)
ϵ_c	= biến dạng tỷ đối của bê tông
ϵ_{cu}	= biến dạng tỷ đối cực hạn của bê tông
ϵ_f	= biến dạng tỷ đối khi đứt của cốt FRP
ϵ_{fu}^*	= biến dạng tỷ đối khi đứt được bảo đảm của cốt FRP, xác định bằng biến dạng tỷ đối trung bình lúc phá hủy của nhóm các mẫu thử trừ đi 3 lần độ lệch chuẩn ($\epsilon_{fu}^* = \epsilon_{u,ave} - 3\sigma$), mm

$\varepsilon_{u, ave}$	=	biến dạng tỷ đối trung bình lúc kéo đứt của nhóm các mẫu thử
η	=	tỷ số của khoảng cách từ thớ nén ngoài cùng đến trọng tâm của cốt kéo (d) so với bề cao toàn thể của cấu kiện uốn (h) (mục 5.3)
λ	=	hệ số nhân cho độ võng dài hạn bổ sung
μ	=	hệ số ma sát nền đất để tính toán cốt chịu co ngót và nhiệt độ của bản đặt trên đất
ξ	=	hệ số theo thời gian của tải trọng dài hạn
ρ'	=	hàm lượng của cốt thép chịu nén, $\rho' = A'_s / bd$
ρ_b	=	hàm lượng cốt thép tạo nên điều kiện cân bằng của biến dạng tỷ đối
ρ_f	=	hàm lượng cốt FRP
ρ'_f	=	hàm lượng cốt FRP chịu nén
$\rho_{f, b}$	=	hàm lượng cốt FRP tạo nên điều kiện cân bằng của biến dạng tỷ đối
$\rho_{f, ts}$	=	hàm lượng cốt của FRP do nhiệt độ và chịu co ngót
ρ_{min}	=	hàm lượng cực tiểu đối với cốt thép
σ	=	độ lệch chuẩn
φ	=	hệ số giảm cường độ

4. Thanh (FRP) dùng làm cốt trong kết cấu bê tông

4.1. Đặc tính chung và phạm vi sử dụng cốt FRP

Khi xác định xem cốt FRP có thích hợp với một kết cấu nào đó, cần xét các đặc trưng vật liệu của FRP. Bảng 1. liệt kê một số điều lợi và bất lợi của cốt FRP cho bê tông khi so sánh với cốt thép truyền thống.

Bảng 1 – Các ưu điểm và bất lợi của cốt FRP

Ưu điểm của cốt FRP	Bất lợi của cốt FRP
Cường độ kéo theo phương dọc là lớn (thay đổi tùy theo dấu và phương của tải trọng so với các sợi)	Không có chảy dẻo trước khi phá hủy đột ngột
Sức kháng chịu ăn mòn (không phụ thuộc lớp phủ) tốt cho các kết cấu nằm trong môi trường xâm thực mạnh.	Cường độ chịu lực theo phương ngang là thấp (thay đổi tùy theo dấu và phương của tải trọng so với các sợi)
Không có từ tính	Môđun đàn hồi thấp (thay đổi tùy theo loại sợi làm cốt)
Độ bền chịu mài cao (thay đổi tùy theo loại sợi làm cốt)	Nhựa polyme và các sợi dễ bị hư hại trong khi bị phơi lộ trong bức xạ cực tím
Trọng lượng nhẹ (khoảng 1/5 đến 1/4 khối lượng riêng của thép)	Một số loại sợi thủy tinh và aramit kém bền trong môi trường kiềm
Độ dẫn nhiệt và dẫn điện thấp (đối với sợi thủy tinh và aramit)	Hệ số giãn nở nhiệt theo phương vuông góc với các sợi là cao so với bê tông
	Có thể bị cháy tùy theo loại chất nền gắn và bề dày lớp bê tông bảo vệ

Khả năng chịu ăn mòn của FRP là lợi thế đáng kể cho những kết cấu nằm trong môi trường xâm thực mạnh như đê biển và công trình biển khác, mặt cầu và kết cấu cầu ở môi trường không khí chứa muối.

- Cốt FRP không có từ tính là vật liệu tốt cho những kết cấu đỡ, đặt thiết bị chụp ảnh cộng hưởng từ hay các thiết bị nhạy cảm với trường điện từ.

- Cường độ chịu kéo lớn và khối lượng nhẹ của thanh FRP so với thép là lợi thế cho sử dụng nó trong các kết cấu bê tông thay cho cốt thép.

- Do chưa đủ kinh nghiệm sử dụng, không nên dùng cốt FRP cho khung chịu mômen mà cần phân phối lại mômen.

Cốt FRP không nên dùng để chịu nén. Nhiều dữ liệu đã chứng tỏ môđun nén của thanh FRP thấp hơn môđun kéo. Do môđun nén thấp hơn môđun kéo, đồng thời môđun kéo của FRP cũng thấp hơn so với thép, nên sự tham gia tối đa của cốt FRP nén vào sự ép vỡ của bê tông (tại $\varepsilon_{cu} = 0,003$) là nhỏ. Do đó, cốt FRP ít dùng làm cốt cho cột hay cho cấu kiện nén, cũng không dùng làm cốt chịu nén trong cấu kiện uốn. Có thể chấp nhận để cốt FRP kéo sẽ chịu lực nén gây bởi mômen đảo chiều hoặc tải trọng thay đổi. Tuy nhiên nên bỏ qua cường độ nén của cốt FRP. (Lĩnh vực này cần được tiếp tục nghiên cứu).

4.2. Đặc trưng tiêu chuẩn chất lượng thanh FRP.

Thanh FRP được chế tạo từ các sợi liên tục (sợi thủy tinh, sợi bazan, sợi hữu cơ aramit, sợi các bon v.v...) đặt theo phương dọc trục thanh, được bao bọc liên kết bởi nhựa polyeste hoặc vinyl este; theo phương pháp chế tạo đùn kéo, hoặc dệt, hoặc bện, do đó bản chất của thanh là không đẳng hướng. Bề mặt thanh là nhám hoặc có gân để tăng bám dính với bê tông. Gân tạo bằng các sợi quấn bên ngoài hoặc lớp phủ tạo nhám bằng cát hoặc các gân riêng rẽ. Tiết diện thanh có nhiều loại: vuông, chữ nhật, tròn, đặc, rỗng. Tùy theo chế tạo, tiêu chuẩn chất lượng thanh FRP được thể hiện cụ thể bởi các đặc trưng:

4.2.1. Phân loại và kí hiệu nhận dạng.

4.2.1.1. Phân loại

Thanh FRP được phân loại theo các tiêu chí cơ bản:

a- Theo thành phần loại sợi: - Sợi thủy tinh (G), sợi hữu cơ Aramit (A), sợi cacbon (C), sợi bazan (B), sợi đa thể (H) - ví dụ: (sợi bazan + sợi các bon) môđun biến dạng cao.

b- Theo cấp cường độ kéo và cấp môđun đàn hồi.

Thanh FRP làm cốt cho bê tông có nhiều cấp khác nhau theo cường độ kéo và môđun đàn hồi. Cấp cường độ kéo được phân loại dựa trên cường độ kéo của cấp thấp nhất là 60ksi (414MPa). Gia số cường độ giữa các cấp được lấy là 10ksi (69MPa); ví dụ một số cấp có tên như sau:

- Cấp F60, tương ứng với $60\text{ksi}(414\text{MPa}) \leq f_{fu}^* < 70\text{ksi}(483\text{MPa})$

- Cấp F70, tương ứng với $70\text{ksi}(483\text{MPa}) \leq f_{fu}^* < 80\text{ksi}(552\text{MPa})$

- Cấp F290, tương ứng với $290\text{ksi}(1999\text{MPa}) \leq f_{fu}^* < 300\text{ksi}(2069\text{MPa})$

Khi thiết kế, người kỹ sư cần chọn một cấp nào đó giữa F60 và F290, mà không chọn một loại thanh FRP riêng biệt nào đó trên thị trường.

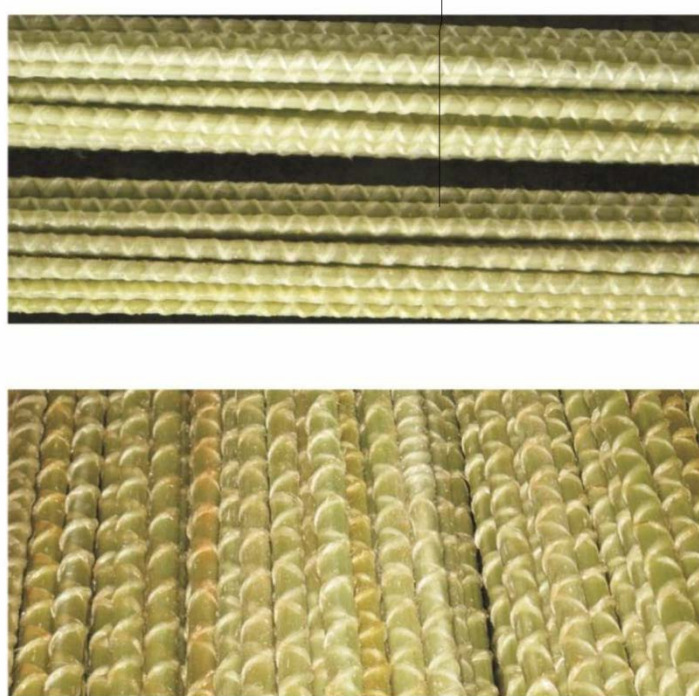
Môđun đàn hồi của các thanh FRP khác nhau được tóm tắt trong Bảng 2. Với mọi loại thanh FRP này, biến dạng tỷ đối khi đứt không được dưới 0,005 cm/cm. Cấp môđun đàn hồi được xác lập tương tự như cấp cường độ. Với mỗi cấp môđun đàn hồi, giá trị nhỏ nhất được quy định tùy thuộc loại sợi. Khi thiết kế, người kỹ sư cần chọn một cấp môđun đàn hồi nhỏ nhất tương ứng với loại sợi đã chọn cho cấu kiện hoặc cho công trình đó. Ví dụ một thanh FRP với môđun cấp E5.7 có nghĩa là môđun của thanh phải ít nhất là 5700ksi(39,3GPa). Nhà sản xuất chế tạo ra thanh FRP với môđun đàn hồi vượt quá giá trị cực tiểu đã định sẽ có những thanh FRP cao cấp hơn khiến có thể tiết kiệm lượng cốt FRP dùng cho một trường hợp riêng nào đó.

Bảng 2 –Môđun đàn hồi cực tiểu của thanh FRP tương ứng với loại sợi

	Cấp môđun $\times 10^3$ ksi(GPa)
Thanh FRP thủy tinh	E5.7 (39,3)
Thanh FRP aramit	E10.0 (68,9)
Thanh FRP cacbon	E16.0 (110,3)

c- Theo hình dạng bề mặt ngoài thanh FRP

Thanh FRP được chế tạo theo nhiều phương pháp khác nhau. Mỗi phương pháp sản xuất sẽ tạo ra các loại bề mặt khác nhau. Các đặc trưng bề mặt của thanh FRP là quan trọng đối với sự dính kết cơ học với bê tông. Hình 1 là các thanh FRP do Công ty CP cốt sợi Polyme Việt Nam sản xuất.



Hình 1– Thanh FRP do Công ty cốt sợi Polyme Việt Nam sản xuất

d- Theo kích cỡ thanh FRP

Tương tự như thanh cốt thép tiêu chuẩn của ASTM, cỡ thanh FRP được chỉ bằng một con số là số lần một phần tám inch của đường kính thanh. Có 10 cỡ tiêu chuẩn cho ở Bảng 3, kèm theo chuyển đổi sang hệ mét.

Đường kính danh nghĩa của thanh có gân là đường kính của thanh tròn trơn tương đương có cùng diện tích tiết diện với thanh gân. Khi thanh FRP không phải là hình tròn đặc (ví dụ chữ nhật hoặc rỗng) thì đường kính ngoài của thanh hoặc là kích thước ngoài lớn nhất của thanh sẽ được ghi thêm vào đường kính danh nghĩa tương đương. Đường kính danh nghĩa của các thanh khác thường này là đường kính một thanh tròn trơn tương đương có cùng diện tích tiết diện.

4.2.1.2. Ký hiệu nhận dạng thanh FRP

Thanh FRP được ký hiệu nhận dạng với đầy đủ các thông tin sau:

- Tên cơ sở sản xuất;
- Chữ cái để chỉ loại sợi (như là G cho sợi thủy tinh, A cho sợi aramit, C cho sợi cacbon, H cho loại đa thể), theo sau là con số ứng với cỡ đường kính danh nghĩa của thanh;
- Dấu hiệu chỉ cấp cường độ;
- Dấu hiệu chỉ môđun đàn hồi của thanh;
- Trường hợp thanh khác thường (thanh có tiết diện không tròn hoặc rỗng), ghi thêm đường kính ngoài hay kích thước bao ngoài lớn nhất.

Bảng 3 – Thanh cốt theo tiêu chuẩn ASTM (tham khảo)

Cỡ thanh		Đường kính danh nghĩa, in (mm)	Diện tích in ² (mm ²)
Tiêu chuẩn	Chuyển đổi hệ mét		
Số 2	Số 6	2x1/8 = 0.250 (6,4)	0.05 (31,6)
Số 3	Số 10	3x1/8 = 0.375 (9,5)	0.11 (71)
Số 4	Số 13	4x1/8 = 0.500 (12,7)	0.20 (129)
Số 5	Số 16	5x1/8 = 0.625 (15,9)	0.31 (199)
Số 6	Số 19	6x1/8 = 0.750 (19,1)	0.44 (284)
Số 7	Số 22	7x1/8 = 0.875 (22,2)	0.60 (387)
Số 8	Số 25	8x1/8 = 1.000 (25,4)	0.79 (510)
Số 9	Số 29	9x1/8 = 1.128 (28,7)	1.00 (645)
Số 10	Số 32	10x1/8 = 1.270 (32,3)	1.27 (819)
Số 11	Số 36	11x1/8 = 1.410 (35,8)	1.56 (1006)

Ví dụ một ký hiệu nhận dạng là :

XXX – G#4 – F100 – E6.0

Trong đó

XXX = Tên cơ sở sản xuất;

G#4 = thanh FRP thủy tinh số 4 (đường kính danh nghĩa ½ in hay 12,7 mm);

F100 = cấp cường độ bé nhất là 100ksi ($f_{fu}^* \geq 100$ ksi hay 689MPa);

E6.0 = cấp môđun bé nhất 6000ksi (41 GPa).

Trường hợp thanh rỗng hay thanh có hình khác thường, phải thêm vào cuối ký hiệu nhận dạng một số nữa. Số này là kích thước bao ngoài lớn nhất của thanh và chỉ để kiểm tra, bảo đảm chất lượng. Người kỹ sư đã quy định rõ hình dạng đặc biệt này trong thiết kế.

XXX – G#4 – F100 – E6.0 – 0.63

Trong đó 0.63 = kích thước bao ngoài lớn nhất của thanh là 5/8 in (16 mm).

Các dấu hiệu nhận dạng nêu trên được ghi trên sản phẩm trước khi xuất xưởng và dùng trên công trường để kiểm tra loại thanh, cấp và cỡ, và hình dạng của thanh khi đưa vào sử dụng trong công trình xây dựng.

4.2.2. Yêu cầu và kích thước cơ bản thanh

4.2.2.1 Thanh thẳng

Các thanh thẳng được cắt đến chiều dài đã định từ thanh dài hơn trong kho của cửa hàng của hãng chế tạo hoặc của nhà máy sản xuất.

4.2.2.2 Thanh uốn cong

Việc uốn cong thanh FRP làm từ nhựa nhiệt rắn phải thực hiện trước khi nhựa lưu hoá hoàn toàn. Sau khi thanh đã được lưu hoá, chúng rất cứng không thể uốn hay thay đổi hình dạng, nên không cho phép làm nóng thanh vì sẽ làm phân giải nhựa và do đó làm giảm cường độ thanh FRP.

Với cùng một loại sợi, cường độ của thanh uốn cong biến đổi rất nhiều, vì nó tùy thuộc vào kỹ thuật uốn và vào loại nhựa. Vì vậy, cường độ của đoạn uốn thông thường nên được xác định bằng các thử nghiệm làm theo phương pháp của ACI 440.3R. Thanh mà nhựa chưa lưu hoá hoàn toàn có thể uốn được nhưng phải tuân theo chỉ dẫn của nhà sản xuất và phải chuyển tiếp từng bước, tránh những góc nhọn làm hư hại các sợi.

4.2.2.3. Các quy định bổ sung đối với thanh FRP thủy tinh và cacbon

Tiêu chuẩn ACI 440.6-08 có các điều khoản riêng cho vật liệu của thanh FRP cacbon và thủy tinh, được trích yếu và tóm tắt như dưới đây.

a- Vật liệu

a.1- Sợi. Sợi ở dạng sợi thô đơn phương (sợi thủy tinh) hoặc sợi dẹt đơn phương (sợi cacbon) với cỡ và khối lượng nhất định. Loại sợi và lượng sợi quyết định tính chất vật lý và cơ học của thanh FRP.

Hàm lượng sợi được xác định theo ASTM D3171 hoặc D2584. Nếu áp dụng ASTM D3171 thì hàm lượng sợi theo thể tích không được ít hơn 55%. Nếu áp dụng ASTM D2584 thì hàm lượng sợi không được ít hơn tỷ phần khối lượng tương ứng với hàm lượng sợi theo thể tích là 55%.

a.2- Nền nhựa. Có thể dùng các hệ thống nhựa vinyleste và epoxy nếu sản phẩm cuối cùng đáp ứng yêu cầu cơ lý và độ bền lâu quy định (có thể sử dụng phối trộn nhựa vinyleste và epoxy). Chất polyme gốc trong hệ thống nhựa không được chứa polyeste. Có thể thêm styren vào nhựa polyme trong lúc chế tạo. Lượng styren thêm vào không được quá 10% khối lượng nhựa polyme và phải được thông báo.

a.3- Chất độn và phụ gia. Chất độn vô cơ có trên thị trường như cao lanh, cacbonat canxi, trihydrat alumina được dùng với lượng không quá 20% khối lượng của thành phần nhựa polyme. Có thể sử dụng các chất phụ gia khác như chất chống dính khuôn, phụ gia co ngót cấp thấp, chất mồi, chất thúc, chất làm rắn, chất xúc tác, chất màu, chất làm chậm cháy, chất hấp tia cực tím. Phụ gia co ngót được sử dụng ở mức ít hơn 10% khối lượng nhựa polyme. Có thể sử dụng tấm lưới hay màn không dệt, vô cơ hoặc hữu cơ, có trên thị trường để phủ bề mặt.

b- Cỡ thanh

b.1- Khi dùng thanh FRP có tiết diện tròn đặc hoặc elip, cỡ các thanh phải nhất quán với thanh cốt tiêu chuẩn cho trong ASTM A615/A615M và được liệt kê ở bảng 3 và bảng 4.

b.2- Đường kính tính toán của thanh FRP là đường kính thanh tròn trơn tương đương có cùng diện tích với thanh FRP, xem bảng 4

b.3- Khi thanh FRP có tiết diện elip, cần ghi thêm kích thước ngoài lớn nhất và nhỏ nhất của tiết diện vào đường kính tính toán. Đường kính tính toán của thanh FRP elip là đường kính của thanh tròn đặc tương đương có cùng diện tích tiết diện.

b.4- Đường kính danh nghĩa của thanh FRP dùng để gọi tên và để thiết kế phải bằng với đường kính tính toán. Nếu đường kính tính toán không trùng với giá trị danh nghĩa nào cho ở Bảng 4 thì sẽ dùng đường kính danh nghĩa nhỏ hơn gần nhất của bảng.

Bảng 4- Cỡ và sai lệch cho phép của thanh FRP do Công ty CP cốt sợi Polyme Việt Nam sản xuất

<i>Thanh cốt sợi thủy tinh</i>	<i>Đường kính ngoài (mm)</i>	<i>Diện tích mặt cắt ngang (mm²)</i>	<i>Khối lượng (g/m)</i>
GFRP - 4	4±0,5	7,06	26±8%
GFRP - 6	6±0,5	19,62	40±8%
GFRP - 8	8±0,5	33,16	72±8%
GFRP - 10	10±0,5	56,71	110±6%
GFRP - 12	12±0,5	86,54	184±6%
GFRP - 14	14±0,5	122,65	252±5%
GFRP - 16	16±0,5	165,04	320±5%
GFRP - 18	18±0,5	188,59	430±5%
GFRP - 20	20±0,5	240,40	530±5%
GFRP - 22	22±0,5	329,89	662±5%
GFRP - 24	24±0,5	397,40	820±4%
GFRP - 26	26±0,5	471,19	946±4%
GFRP - 28	28±0,5	510,44	1073±4%
GFRP - 30	30±0,5	637,61	1217±4%

c- Uốn cong

c.1- Bán kính uốn cong. Chỉ uốn cong thanh FRP làm bằng nhựa nhiệt rắn và khi nhựa đang ở trạng thái lỏng. Bán kính trong nhỏ nhất tại chỗ uốn của thanh FRP tạo trong nhà máy được quy định ở Bảng 5.

Bảng 5 – Bán kính uốn cong nhỏ nhất của thanh uốn

<i>Cỡ thanh</i>	<i>Bán kính uốn (mm)</i>
GFRP - 4	12,7
GFRP - 6	19,0
GFRP - 8	22,9
GFRP - 10	28,6
GFRP - 12	35,2
GFRP - 14	41,7
GFRP - 16	47,6
GFRP - 18	54,2
GFRP - 20	60,6

c.2-. Cường độ chũ uốn. Cường độ chũ uốn đợc xác định để nhằm mục đích chứng nhận sản phẩm toàn diện (tức là giá trị đợc bảo đảm). Cường độ chũ uốn đợc xác định theo mục 5.2.1 của tiêu chuẩn này. (dùng tối thiểu 5 mẫu uốn 90 độ, với bán kính uốn lấy tỷ lệ theo đường kính thanh nhỏ nhất).

Khi có thể cắt đợc một đoạn thẳng đủ dài ở sau chũ uốn, đoạn đũa này phải đợc thử nghiệm theo tiêu chuẩn Cường độ của mẫu này không đợc nhỏ hơn cường độ đợc bảo đảm của thanh có cùng đường kính, xem bảng 8 và bảng 9.

4.2.3 Tính chất vật lí

4.2.3.1 Khối lượng riêng. Thanh FRP có khối lượng riêng từ 1,25 đến 2,1 g/cm³, tức là khoảng một phần sáu đến một phần tư của thép (Xem Bảng 6). Trọng lượng nhỏ làm giảm chi phí vận chuyển và làm thao tác bốc xếp trên công trường đợc dễ dàng.

Bảng 6 – Khối lượng riêng điển hình của thanh FRP (g/cm³)

Thép	GFRP (thủy tinh)	CFRP (cacbon)	AFRP (aramit)
7,90	1,25 đến 2,10	1,50 đến 1,60	1,25 đến 1,40

4.2.3.2 Hệ số giãn nở nhiệt. Hệ số giãn nở nhiệt của thanh FRP khác nhau theo phương dọc và phương ngang, tùy thuộc loại sợi, nhựa và tỷ phần thể tích sợi. Hệ số giãn nở nhiệt theo phương dọc thì đợc quyết định bởi tính chất của các sợi còn hệ số giãn nở nhiệt theo phương ngang đợc quyết định bởi nhựa. Bảng 7 liệt kê các hệ số giãn nở nhiệt của thanh FRP điển hình và của thép. Lưu ý là hệ số giãn nở nhiệt âm có nghĩa là vật liệu co lại khi tăng nhiệt độ và giãn ra khi giảm nhiệt độ. Để tham khảo, bê tông có hệ số giãn nở nhiệt biến đổi từ $7,2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ đến $10,8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ và thường đợc giả thiết là đẳng hướng.

Bảng 7 – Hệ số giãn nở nhiệt điển hình của thanh FRP

Phương	Hệ số giãn nở nhiệt $\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$			
	Thép	GFRP(thủy tinh)	CFRP (cacbon)	AFRP(aramit)
Dọc, α_L	11,7	6,0 đến 10,0	-9,0 đến 0,0	-6 đến -2
Ngang, α_T	11,7	21,0 đến 23,0	74,0 đến 104,0	60,0 đến 80,0

4.3 Đặc trưng tính toán của thanh FRP

4.3.1 Sự làm việc chịu kéo. Khi chịu lực kéo, thanh FRP không thể hiện sự chảy dẻo trước khi đứt. Ứng xử kéo của thanh FRP gồm một loại sợi là đợc đặc trưng bởi quan hệ ứng suất– biến dạng đàn hồi tuyến tính cho đến khi phá hủy. Tính chất chịu kéo của thanh FRP do Công ty cổ phần cốt sợi Polyme Việt Nam sản xuất đợc nêu ở Bảng 8.

Bảng 8 – Tính chất chịu kéo của thanh FRP do Công ty CP cốt sợi Polyme Việt Nam sản xuất

Cỡ, loại thanh FRP	Lực kéo đứt (N)	Cường độ kéo đứt không nhỏ hơn (MPa)	Mô đun đàn hồi không nhỏ hơn (GPa)	Biến dạng tỷ đối cực hạn (%)
GFRP - 4	6.208	800	39,3	1,0
GFRP - 6	15.696			
GFRP - 8	26.528			
GFRP - 10	45.368			
GFRP - 12	69.232			
GFRP - 14	98.120			
GFRP - 16	132.032			
GFRP - 18	150.872			
GFRP - 20	192.320			
GFRP - 22	263.912			
GFRP - 24	317.920			
GFRP - 26	376.952			
GFRP - 28	408.352			
GFRP - 30	510.088			

Cường độ kéo và độ cứng kéo của thanh FRP phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Do các sợi của thanh FRP là thành phần chịu tải chính nên tỷ số của thể tích sợi trên thể tích toàn bộ của FRP (gọi là tỷ phần thể tích sợi) có ảnh hưởng lớn đến tính chất chịu kéo của thanh FRP. Cường độ kéo và độ cứng kéo sẽ biến động trong các thanh có tỷ phần thể tích sợi khác nhau, ngay dù thanh có cùng đường kính, cùng hình dạng và cùng thành phần. Tốc độ lưu hóa, quá trình chế tạo và việc kiểm tra chất lượng chế tạo cũng ảnh hưởng đến đặc trưng cơ học của thanh.

Khác với thép, cường độ kéo đơn vị của thanh FRP có thể biến đổi theo đường kính. Ví dụ thanh FRP thủy tinh có thể giảm cường độ kéo tới 40% khi đường kính thanh tăng theo tỷ lệ từ 9,5 đến 22 mm. Nhưng đối với thanh FRP cacbon bền xoắn thì sự thay đổi tiết diện như vậy dường như không ảnh hưởng đến cường độ của sợi. Còn đối với thanh FRP aramit đùn kéo đơn phương có thêm các sợi aramit quấn bọc bề mặt thì cường độ kéo giảm 7% khi đường kính tăng từ 3 đến 8 mm. Phải liên hệ với nhà sản xuất để có giá trị cường độ riêng cho từng loại thanh FRP.

Việc xác định cường độ của thanh FRP bằng thử nghiệm là khá phức tạp do sự tập trung ứng suất tại các điểm neo có thể đưa đến phá hủy sớm. Bàn kẹp mẫu thử đúng sẽ khiến mẫu thử đứt ở giữa. Phương pháp thử nghiệm được quy định theo ACI 440.3R-12 Guide Test methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or strengthening concrete and Masonry Structures.

Các kết quả tính chất chịu kéo của một thanh FRP riêng lẻ có thể lấy từ nhà sản xuất. Thông thường, người ta giả thiết một sự phân phối chuẩn (Gauss) cho cường độ của tập hợp mẫu thử. Nhà chế tạo phải đưa ra một cường độ kéo được bảo đảm f_u^* , xác định bằng cường độ kéo trung bình của nhóm mẫu, trừ đi 3 lần độ lệch chuẩn ($f_u^* = f_{u, ave} - 3\sigma$) và cũng đưa ra biên dạng tỷ đối đứt được bảo đảm ε_u^* ($\varepsilon_u^* = \varepsilon_{u, ave} - 3\sigma$) và môđun đàn hồi đặc trưng E_f ($E_f = E_{f, ave}$). Các giá trị được bảo đảm này cho một xác suất 99,87% trường hợp các giá trị đã cho sẽ bị vượt quá bởi các thanh FRP tương tự, với điều kiện là phải thử ít nhất 25 mẫu. Nếu thử số mẫu ít hơn 25 hoặc dùng luật phân phối khác phân phối chuẩn thì phải minh chứng được độ tin cậy của phương pháp và độ tin cậy của kết quả thử. Trong mọi trường hợp, nhà sản xuất phải mô tả phương pháp đã dùng để có được các tính chất kéo đã đưa ra.

Không thể uốn một thanh FRP sau khi nó đã được chế tạo (trừ phi là một thanh FRP bằng nhựa nhiệt dẻo có thể tạo hình lại bằng cách gia nhiệt và áp lực). Tuy nhiên có thể chế tạo thanh FRP uốn cong. Trong thanh FRP có uốn cong, cường độ kéo ở phần uốn có thể giảm đi 40% đến 50% do các sợi bị uốn và do tập trung ứng suất.

Tiêu chuẩn ACI 440.6-08 có quy định bổ sung về cường độ kéo và môđun đàn hồi của các thanh FRP cacbon và thủy tinh như sau:

1- Cường độ kéo được bảo đảm phải được xác định nhằm mục đích chứng nhận toàn diện sản phẩm. Việc này được thực hiện theo ACI 440.3R-12 Guide Test methods for Fiber Reinforced polyme (FRP) Composites for Reinfocing or strengthening concrete and Masory Structures. trên ít nhất 25 mẫu gồm 5 nhóm, mỗi nhóm 5 mẫu của các lô sản xuất khác nhau. Bảng 9 cho giá trị nhỏ nhất của cường độ kéo được bảo đảm. Xác định cường độ kéo để kiểm tra chất lượng và để khẳng định chất lượng sản phẩm cho khách mua được thực hiện theo ACI 440.3R-12 Guide Test methods for Fiber Reinforced polyme (FRP) Composites for Reinfocing or strengthening concrete and Masory Structures. với ít nhất 5 mẫu cho mỗi lô sản phẩm. Cường độ của mỗi mẫu phải được báo cáo và không được nhỏ hơn cường độ bảo đảm đã được thông báo bởi nhà sản xuất.

2- Môđun đàn hồi phải được xác định nhằm mục đích chứng nhận sản phẩm (tức là giá trị danh nghĩa). Giá trị danh nghĩa của môđun đàn hồi kéo của thanh FRP thủy tinh phải ít nhất là 5700ksi(39,3 GPa) không phụ thuộc cỡ thanh hay hình dạng. Môđun đàn hồi kéo của thanh FRP cacbon phải ít nhất là 18000ksi(124,2 GPa) không phụ thuộc cỡ thanh hay hình dạng. Môđun đàn hồi được xác định theo ACI 440.3R-12 Guide Test methods for Fiber Reinforced polyme (FRP) Composites for Reinfocing or strengthening concrete and Masory Structures. với số lần và số lượng thanh giống như đối với cường độ kéo được bảo đảm.

3- Biên dạng tỷ đối cực hạn. Biên dạng tỷ đối cực hạn phải được tính toán nhằm mục đích chứng nhận sản phẩm (tức là giá trị danh nghĩa). Biên dạng tỷ đối cực hạn danh nghĩa tính bằng cường độ kéo được bảo đảm chia cho môđun đàn hồi danh nghĩa. Giá trị tính được đối với thanh FRP cacbon và FRP thủy tinh phải lần lượt ít nhất là 0,5 và 1%.

Bảng 9 (tham khảo) – Giá trị tối thiểu của cường độ kéo được bảo đảm đối với các thanh FRP thủy tinh và cacbon

Cỡ thanh	Cường độ kéo được bảo đảm tối thiểu	
	FRP thủy tinh, ksi(MPa)	FRP cacbon, ksi(MPa)
2	110 (759)	210 (1449)
3	110 (759)	190 (1311)
4	100 (690)	170 (1173)
5	95 (655)	160 (1104)
6	90 (621)	160 (1104)
7	85 (586)	Không áp dụng
8	80 (552)	Không áp dụng
9	75 (517)	Không áp dụng
10	70 (483)	Không áp dụng

4.3.2 Sự làm việc chịu nén

Mặc dù được khuyến nghị là không để thanh FRP chịu ứng suất nén, dưới đây vẫn sẽ giới thiệu đầy đủ đặc trưng làm việc của thanh FRP.

Các thử nghiệm trên thanh FRP có tỷ lệ chiều dài trên đường kính là từ 1:1 đến 2:1 cho thấy cường độ nén thấp hơn cường độ kéo. Cách phá hủy của thanh FRP chịu nén dọc có thể kèm theo sự phá hủy do kéo ngang, do sự oằn vi lượng của các sợi và phá hủy do cắt. Cách phá hủy tùy thuộc loại sợi, tỷ phần thể tích và loại nhựa. Các thanh FRP thủy tinh, FRP cacbon và FRP aramit có cường độ nén giảm so với cường độ kéo lần lượt là 55%, 78% và 20%. Nói chung, cường độ nén càng lớn khi thanh có cường độ kéo càng lớn, ngoại trừ trường hợp thanh FRP aramit thì các sợi ứng xử phi tuyến khi nén tại mức ứng suất tương đối thấp.

Môđun đàn hồi nén của thanh FRP nhỏ hơn môđun đàn hồi kéo. Kết quả thử nghiệm trên mẫu chứa 55% đến 60% tỷ phần thể tích của sợi thủy tinh trong nền nhựa vinyleste hay polyeste cho thấy môđun đàn hồi nén là từ 35 GPa đến 48 GPa. Cũng theo các báo cáo, môđun đàn hồi nén so với môđun đàn hồi kéo của cùng loại sản phẩm là vào khoảng 80% đối với FRP thủy tinh, 85% đối với FRP cacbon và 100% đối với FRP aramit. Giá trị môđun đàn hồi nén có thấp hơn đôi chút có thể là do sự phá hủy sớm khi thử gây bởi sự cọ xát ở hai đầu và sự oằn vi lượng ở các sợi bên trong khi chịu lực nén.

Hiện tại chưa định ra phương pháp thử tiêu chuẩn để xét đặc trưng ứng xử nén của thanh FRP. Nếu cần biết các tính chất chịu nén của một thanh FRP riêng biệt nào đó thì phải lấy từ nhà sản xuất. Nhà sản xuất cần mô tả phương pháp thử đã dùng để nhận được các tính chất nén đã đưa ra.

4.3.3 Sự làm việc chịu cắt

Phần lớn composit của thanh FRP là có khả năng chịu cắt các lớp đan xen tương đối yếu vì nằm giữa các lớp sợi là các lớp nhựa không có cốt. Do thông thường không có cốt đi qua các lớp nên cường độ cắt lớp đan xen được quyết định bởi chất nền gắn polyme tương đối yếu. Nếu hướng các sợi theo phương lệch khỏi trục để đi ngang qua các lớp sợi thì sẽ tăng sức kháng cắt, tùy theo độ lệch trục. Đối với thanh FRP, việc này có thể thực hiện bằng cách bện

hay quấn các sợi theo phương ngang với sợi chính. Các sợi lệch trục cũng có thể được thêm vào trong quá trình đùn kéo bằng cách đưa một tấm sợi đan nhỏ vào giá ống sợi thô. Hiện tại chưa định ra phương pháp thử tiêu chuẩn để xét đặc trưng ứng xử cắt của thanh FRP. Nếu cần biết các tính chất chịu cắt của một thanh FRP riêng biệt nào đó thì phải lấy từ nhà sản xuất. Nhà sản xuất cần mô tả phương pháp thử đã dùng để nhận được các tính chất cắt đã đưa ra.

Tiêu chuẩn ACI 440.6-08 có quy định bổ sung về cường độ cắt (vuông góc với thanh) của các thanh FRP cacbon và thủy tinh như sau:

Cường độ cắt phải được xác định nhằm mục đích chứng nhận toàn diện sản phẩm (tức là giá trị được bảo đảm). Cường độ cắt được bảo đảm của thanh FRP không được nhỏ hơn 18ksi(124MPa) bất kể đường kính và hình dạng thanh. Có thể dùng phương pháp thử của ACI 440.3R với số lần và số lượng mẫu thử giống như đối với cường độ kéo được bảo đảm (Mục 4.3.1).

4.3.4 Sự làm việc về dính kết

Chỉ tiêu dính kết của một thanh FRP phụ thuộc hình dạng của nó, quá trình chế tạo, tính chất cơ học của bản thân thanh và các điều kiện môi trường. Khi neo một thanh cốt vào trong bê tông, lực dính có thể truyền bởi:

- Lực dính của mặt phân cách, cũng được gọi là sự dính kết hóa học.
- Lực ma sát ở mặt phân cách chống lại sự trượt.
- Lực cản cơ học do mặt phân cách gồ ghề.

Trong thanh FRP đã có giả định là lực dính được truyền qua nhựa đến sợi cốt và lực dính sẽ có thể bị mất khi lớp nhựa bị phá hủy do cắt. Khi một thanh cốt có gân chôn vào bê tông chịu lực kéo tăng dần, sự dính giữa thanh và bê tông chung quanh bị giảm đi đồng thời các gân trên bề mặt thanh gây nên lực tiếp xúc nghiêng giữa thanh và bê tông bao quanh. Ứng suất tại bề mặt thanh tạo bởi thành phần lực theo phương của thanh có thể được coi là ứng suất dính giữa thanh và bê tông.

Đã có rất nhiều nghiên cứu về tính chất dính của thanh FRP như thử nghiệm kéo tuột, thử nghiệm mối nối và dầm công xôn, xác định chiều dài chôn bằng công thức kinh nghiệm, v.v...

Tiêu chuẩn ACI 440.6-08 có quy định bổ sung về cường độ dính của các thanh FRP cacbon và thủy tinh như sau:

Cường độ dính phải được xác định nhằm mục đích chứng nhận sản phẩm (tức là giá trị được bảo đảm). Cường độ dính được bảo đảm của thanh FRP không được nhỏ hơn 1,3ksi(9MPa) và được xác định bằng phương pháp do nhà sản xuất đề xuất và được người mua chấp nhận (có thể làm theo ACI 440.3R-12 Guide Test methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or strengthening concrete and Masonry Structures. nhưng chỉ để biết ứng xử tương đối của vật liệu chứ không thể dùng trong thiết kế)

4.3.5 Ứng xử phụ thuộc thời gian

4.3.5.1 Sự phá hủy do từ biến

Thanh FRP chịu tải trọng không đổi dài hạn có thể bị phá hỏng sau một khoảng thời gian, được gọi là thời gian giới hạn chịu đựng. Hiện tượng này được gọi là phá hủy do từ biến (hay mỏi tính). Khi tỷ số giữa ứng suất kéo dài hạn so với cường độ ngắn hạn của thanh FRP tăng lên thì thời gian giới hạn chịu đựng giảm đi. Thời gian giới hạn chịu đựng của phá hủy từ biến cũng sẽ giảm không hồi phục trong điều kiện môi trường bất lợi như nhiệt độ cao, phơi lộ trước

bức xạ cực tím, độ kiềm cao, nhiều chu kỳ khô và ướt. Do thiếu nhiều dữ liệu về vấn đề này, do chưa có các phương pháp tiêu chuẩn để thử nghiệm nên việc thiết kế hiện nay đều áp dụng các tiêu chí thiết kế thiên về an toàn.

Nói chung, sợi cacbon ít bị ảnh hưởng với phá hủy từ biến, sợi aramit thì nhạy cảm vừa phải còn sợi thủy tinh là nhạy cảm nhất. Một số thí nghiệm cho thấy có mối quan hệ tuyến tính giữa cường độ phá hủy từ biến với lôgarit của thời gian, khi thời gian lâu tới 100 giờ. Tỷ số của mức ứng suất lúc phá hủy từ biến so với cường độ ban đầu của các thanh FRP thủy tinh, FRP aramit và FRP cacbon sau 500 000 giờ (trên 50 năm) được ngoại suy tuyến tính lần lượt là 0,29; 0,47 và 0,93.

Các đặc trưng từ biến của thanh FRP có thể xác định kết quả công bố sản phẩm của tiêu chuẩn này. Các khuyến nghị về giới hạn ứng suất dài hạn để tránh phá hủy từ biến được cho trong các chương về thiết kế của tiêu chuẩn này.

4.3.5.2 Môi

Rất nhiều nghiên cứu và thử nghiệm về ứng xử môi của vật liệu FRP được thực hiện trong 30 năm qua, với các loại mẫu khác nhau, điều kiện gia tải và môi trường khác nhau. Dưới đây là một số kết quả chung.

a- Trong mọi loại composit được áp dụng cho kết cấu hạ tầng, FRP cacbon được cho là ít bị nhất phá hủy do môi. Trên đồ thị ứng suất và lôga của số chu kỳ lúc phá hủy (đường cong S-N), độ dốc đi xuống trung bình của dữ liệu FRP cacbon thường là vào khoảng 5% đến 8% của cường độ ban đầu sau mười năm của vòng đời công trình tính theo thang lôga. Sau 1 triệu chu kỳ, cường độ môi thường vào khoảng 50% và 70% của cường độ tĩnh ban đầu và ít bị ảnh hưởng của độ ẩm và nhiệt độ của kết cấu bê tông, trừ phi nhựa hoặc mặt phân cách nhựa-sợi bị xuống cấp rõ rệt bởi môi trường.

Một số nghiên cứu về thanh FRP cacbon cho thấy các kết quả sau:

Cường độ môi của thanh FRP cacbon chôn trong bê tông sẽ giảm đi khi nhiệt độ môi trường tăng từ 20°C đến 40°C. Giới hạn chịu đựng thì tỷ lệ nghịch với tần số gia tải. Khi tần số gia tải càng cao, từ 0,5Hz đến 8 Hz thì nhiệt độ của thanh cũng cao lên do sự ma sát trượt. Như vậy, giới hạn chịu đựng ở 1Hz có thể lớn hơn 10 lần giới hạn ở 5 Hz. Trong một khảo sát, đã lấy tỷ số ứng suất (tức là ứng suất nhỏ nhất chia cho ứng suất lớn nhất) là 0,1 và ứng suất lớn nhất là bằng 50% cường độ ban đầu và cho chịu nhiều hơn 400 000 chu kỳ với tần số gia tải 0,5 Hz. Sau khi thí nghiệm như vậy mẫu đã không bị mất cường độ kéo theo yêu cầu.

Giới hạn chịu đựng của thanh FRP cacbon cũng phụ thuộc vào ứng suất trung bình và vào tỷ số ứng suất biến đổi chu kỳ cực đại so với cực tiểu. Ứng suất trung bình càng lớn hoặc tỷ số ứng suất (cực tiểu chia cho cực đại) càng thấp thì sẽ làm giảm giới hạn chịu đựng.

b- Một vài loại sợi riêng lẻ thuộc thủy tinh E, thủy tinh S ít bị phá hủy môi, tuy nhiên chúng có thể bị phá hủy môi do sự phá hủy dần bởi ứng suất do các rạn nứt bề mặt lớn lên dần bởi tác động của lượng độ ẩm dù rất nhỏ của môi trường thử nghiệm. Khi nhiều sợi thủy tinh được chôn trong nền nhựa gắn để tạo nên composit FRP, ảnh hưởng của sự môi khi chịu kéo có chu kỳ đã làm giảm 10% khả năng chịu lực tĩnh ban đầu sau mười năm của vòng đời theo thang lôga. Ảnh hưởng môi này được cho là do tương tác sợi với sợi và không phụ thuộc vào cơ chế phá hủy dần bởi ứng suất như đối với sợi riêng lẻ. Các yếu tố môi trường có vai trò quan trọng đối với ứng xử môi của sợi thủy tinh vì chúng nhạy cảm với độ ẩm, độ kiềm và dung dịch axit.

Mặc dù FRP thủy tinh là yếu hơn thép về cắt, thí nghiệm cho thấy thanh cốt FRP thủy tinh không dính kết có ứng xử mỗi tương tự như thanh cốt thép chịu tải cắt lên tới 10 triệu chu kỳ.

c- Sợi aramit ứng xử mỗi tương tự như sợi cacbon và thủy tinh. Cường độ mỗi khi kéo của thanh dùng sợi aramit là rất tốt. Sự giảm cường độ sau mỗi thập kỉ của lôga vòng đời chỉ xấp xỉ 5% đến 6%. Dựa trên các kết quả nghiên cứu, đã có đề nghị là đối với FRP aramit, ứng suất tối đa được lấy là 54% đến 73% cường độ kéo ban đầu. Sợi FRP aramit riêng lẻ tỏ ra bị hỏng bởi một quá trình đứt do từ biến với biến dạng tỷ đối giới hạn. Điều kiện phá hủy này sẽ bị đẩy nhanh hơn đối với các thanh FRP aramit trong môi trường phơi lộ và khi độ ẩm, nhiệt độ cao.

d- Thêm sần, vỏ bọc và các loại gân trên bề mặt thanh sẽ làm tăng sự dính kết của thanh FRP nhưng sẽ tạo ra ứng suất tập trung cục bộ làm ảnh hưởng đáng kể đến tính năng mỗi của thanh. Ứng suất tập trung cục bộ làm giảm khả năng chịu mỗi do có ứng suất nhiều trục làm phá hoại nền nhựa, và tùy thuộc cấu tạo của thanh.

Ảnh hưởng của mỗi đến sự dính kết của thanh FRP thủy tinh đã được nghiên cứu chi tiết cho thấy cường độ dính kết có thể tăng lên, giảm đi hoặc giữ nguyên tùy theo chu kỳ gia tải. Do chưa có nghiên cứu đầy đủ về ứng xử dính-mỗi nên đã khuyến nghị áp dụng các tiêu chí thiết kế thiên về an toàn, dùng cho mọi thanh FRP trên thị trường. Các tiêu chí thiết kế nêu ở mục 5.

Còn về đặc trưng mỗi của thanh FRP, người thiết kế dựa vào phương pháp thử nghiệm nêu trong tiêu chuẩn này, Người thiết kế cần luôn luôn tham vấn nhà sản xuất về các tính năng ứng xử mỗi.

4.3.6 Tác động của nhiệt độ cao và lửa

Không nên dùng cốt FRP trong kết cấu khi mà điều kiện tiên quyết về việc sử dụng kết cấu chủ yếu do khả năng chống cháy. Cốt FRP được chôn bê tông thì không thể cháy vì thiếu oxy nhưng polyme thì sẽ bị mềm do quá nóng. Nhiệt độ mà polyme bị mềm được gọi là nhiệt độ chuyển hóa thủy tinh T_g . Vượt quá T_g , môđun đàn hồi của polyme bị giảm đáng kể do có thay đổi trong cấu trúc phân tử của nó. Giá trị T_g phụ thuộc loại nhựa nhưng thường ở trong khoảng 65°C đến 120°C.

Tiêu chuẩn ACI 440.6-08 có quy định nhiệt độ chuyển hóa thủy tinh không được nhỏ hơn 100°C. Nhiệt độ chuyển hóa này được đo tại một mẫu cắt ra từ một thanh mới chế tạo và dùng phương pháp ASTM E1356 hoặc ASTM E1640. Lưu ý là nhiệt độ này không phải là nhiệt độ sử dụng cao nhất được phép (cần được tham vấn tại nhà sản xuất).

Trong một vật liệu composit, các sợi do có tính chất chịu nhiệt cao hơn nhựa nên vẫn có thể tiếp tục chịu một phần lực theo phương dọc nhưng tính năng chịu kéo tổng thể của composit thì giảm đi vì sự truyền lực giữa các sợi qua sự dính với nhựa bị suy giảm. Kết quả thí nghiệm cho thấy nhiệt độ 250°C cao hơn nhiều so với T_g sẽ làm giảm cường độ kéo của FRP thủy tinh và FRP cacbon tới trên 20%. Các tính chất khác chịu ảnh hưởng trực tiếp hơn của sự truyền lực cắt qua nhựa, như là cường độ cắt và uốn thì còn giảm nhiều hơn ở nhiệt độ trên T_g . Để thiết kế, một số nhà nghiên cứu đã khuyến nghị rằng vật liệu phải có T_g cao hơn ít nhất là 30°C so với nhiệt độ tối đa có thể gặp.

Đối với bê tông có cốt FRP, tính chất của polyme ở bề mặt thanh là chính yếu để duy trì sự dính giữa FRP và bê tông. Tuy nhiên, tại nhiệt độ gần với T_g , các tính chất cơ học của FRP bị giảm đáng kể và FRP không còn có thể truyền ứng suất từ bê tông đến các sợi. Một nghiên cứu

thực hiện với các thanh có T_g từ 60°C đến 124°C cho thấy cường độ kéo tuột (lực dính) giảm 20% đến 40% khi nhiệt độ là 100°C và giảm 80% đến 90% khi nhiệt độ 200°C. Dầm có cốt FRP được thử nghiệm với nhiệt độ đạt tới 250°C đến 350°C thì cốt chịu kéo bị hỏng. Sự phá hủy kết cấu có thể xảy ra khi bị tuột neo do polyme trở nên mềm và cũng xảy ra khi nhiệt độ vượt quá nhiệt độ ngưỡng của sợi: 880 °C đối với sợi thủy tinh, 180°C đối với sợi aramit và 1600°C đối với sợi cacbon. Đối với sợi cacbon, nhiệt độ cao sẽ làm nhanh tốc độ ôxy hóa khi có ôxy trong không khí. Vì không có một ngưỡng nào có thể coi là nhiệt độ an toàn cho suốt vòng đời, nên khuyến nghị nhiệt độ sử dụng cao nhất khi sợi nằm trong môi trường có không khí là 500°C. Để an toàn, nhiệt độ này nên được coi như là nhiệt độ giới hạn đối với sợi cacbon ngay cả khi chúng được cách ly một phần khỏi ôxy bởi bê tông không nứt và bởi polyme bị đốt hóa than.

Xét về cục bộ, ứng xử như vậy có thể làm tăng bề rộng khe nứt và độ võng. Sự sụp đổ kết cấu có thể xảy ra nếu mọi neo bị mất vì polyme mềm đi hoặc nếu nhiệt độ tăng cao hơn nhiệt độ ngưỡng của bản thân các sợi. Trường hợp như vậy có thể xảy ra ở nhiệt độ gần 980°C đối với sợi thủy tinh và 175°C đối với sợi aramit, trong lúc Sợi cacbon có thể chịu được nhiệt độ vượt quá 1600°C. Có thể dùng ACI 216R (*Chỉ dẫn xác định độ chịu lửa của cấu kiện bê tông*) để ước tính nhiệt độ tại các vị trí khác nhau theo bề cao của một tiết diện bê tông.

4.3.7 Độ lâu bền

Thanh FRP dễ bị thay đổi cường độ và độ cứng trong môi trường trước khi, trong khi và sau khi thi công. Môi trường có thể bao gồm nước, tia cực tím, nhiệt độ cao, dung dịch kiềm hay axit và dung dịch muối. Cường độ và độ cứng có thể tăng, giảm hoặc giữ nguyên tùy theo từng vật liệu riêng biệt và tình trạng bị phơi lộ. Các tính chất chịu kéo và lực dính là các tham số cần quan tâm nhất đối với công trình bê tông dùng cốt FRP

Điều kiện môi trường đáng quan tâm là nước có độ kiềm cao trong lỗ rỗng của bê tông ngoài trời. Đã có những phương pháp dùng nhiệt để thí nghiệm đẩy nhanh sự giảm cường độ của sợi thủy tinh trần, không có ứng suất, nằm trong bê tông và qua đó dự đoán được tính năng dài hạn của vật liệu FRP thủy tinh trong dung dịch kiềm.

Tuy nhiên các phương pháp thí nghiệm đẩy nhanh đối với sợi thủy tinh trần (tại đó chỉ có một phản ứng hóa học làm xuống cấp) không áp dụng được cho composit FRP thủy tinh (tại đó có nhiều phản ứng hóa học và nhiều cơ chế xuống cấp có thể được kích hoạt ngay lập tức hoặc sau đó). Phần lớn dữ liệu được lập bằng thí nghiệm với thanh trần chịu môi trường xâm thực và không có tải trọng. Quan hệ giữa các dữ liệu thanh trần và thanh chôn trong bê tông là phụ thuộc vào các tham biến khác như là mức độ bảo vệ của bê tông đối với cốt.

Trong nội dung này chỉ nêu ra một số kết quả tổng quát chứ không định lượng đối với những vật liệu riêng. Các kết quả thí nghiệm cho các loại vật liệu thanh FRP và điều kiện thử nghiệm được xét trong nội dung này chỉ nên được tham khảo và được sử dụng một cách thận trọng về an toàn;

- Dung dịch nước với độ pH cao từ 11,5 đến 13,0 làm giảm cường độ kéo và độ cứng của thanh FRP thủy tinh. tuy vậy mức độ giảm cho kết quả phân tán vì ngoài độ pH phải kể thêm thành phần hóa học của dung dịch, nhiệt độ và có tải hay không.

Nhiệt độ cao và thời gian dài cũng sẽ làm giảm cường độ kéo và độ cứng của thanh. Phần lớn dữ liệu thí nghiệm được nghiên cứu tại nhiệt độ thấp hoặc ở nhiệt độ cao chỉ kém T_g của nhựa vài độ. Kết quả cho thấy sự giảm cường độ kéo của thanh FRP thủy tinh là trong phạm vi 0% đến 70% giá trị ban đầu. Độ cứng kéo của thanh FRP thủy tinh có ứng suất và không ứng suất

thay đổi trong phạm vi từ 0% đến 75% tùy từng trường hợp. Cường độ kéo và độ cứng của thanh FRP aramit trong dung dịch kiềm nhiệt độ cao, có hay không có ứng suất đã lần lượt giảm giữa 10% đến 50% và 0% đến 20% giá trị ban đầu. Trường hợp thanh FRP cacbon không có ứng suất, cường độ và độ cứng giảm trong phạm vi giữa 0% và 20%.

- Thanh FRP phơi lộ trước tia cực tím và ẩm trước khi đặt trong bê tông có thể ảnh hưởng bất lợi đến cường độ kéo do sự xuống cấp của các thành phần polyme, Khuyến nghị khi đặt cốt FRP vào bê tông, cần có biện pháp bảo vệ không để thanh FRP chịu trực tiếp ánh nắng và ẩm. Kết quả thử nghiệm khi đồng thời chịu tia cực tím và ẩm của các thanh FRP có và không có ứng suất cho thấy cường độ kéo giảm 0% đến 20% giá trị ban đầu đối với thanh FRP thủy tinh, 0% đến 30% đối với thanh FRP aramit và 0% đến 40% đối với thanh FRP cacbon.
- Khi thêm các loại muối khác nhau vào dung dịch ngâm chìm các thanh FRP thấy rằng không làm thay đổi đáng kể cường độ và độ cứng so với các thanh trong dung dịch không có muối.

Độ lâu bền của lực dính giữa FRP và bê tông chịu ảnh hưởng của môi trường ẩm và kiềm trong bê tông. Khả năng dính của cốt FRP là dựa trên sự truyền lực cắt và lực ngang tại mặt phân cách giữa cốt và bê tông, cũng như giữa các sợi riêng rẽ trong thanh FRP. Tóm lại các môi trường làm xuống cấp nhựa polyme hay mặt phân cách sợi/nhựa đường như cũng làm giảm lực dính của thanh FRP và bê tông.

Có nhiều phương pháp thử nghiệm về độ dính của thanh FRP (như là thử kéo tuột, thử kéo, thử phân đầu dầm) nhưng phổ biến nhất là thử nghiệm kéo tuột trực tiếp vì đơn giản và ít tốn kém mặc dù nó không thể hiện đúng trạng thái ứng suất của bê tông trong phần lớn các trường hợp thực tế.

Các mẫu kéo tuột các thanh FRP cacbon và FRP thủy tinh thực hiện trong môi trường tự nhiên, đã không bị giảm đáng kể cường độ dính sau khoảng thời gian 1 đến 2 năm.

Tuy vậy trong các thí nghiệm mẫu kết quả thí nghiệm cho thấy có sự thay đổi cường độ kéo tuột sau thời gian ngắn của thanh FRP thủy tinh bởi một số nguyên nhân sau:

- Vết nứt dọc trong lớp bê tông bảo vệ có thể làm hại nghiêm trọng khả năng dính của thanh FRP và phải có biện pháp đầy đủ để ngăn ngừa sự nứt như vậy. Việc các hóa chất thấm qua bê tông đến thanh FRP là một nhân tố quan trọng làm ảnh hưởng cường độ dính. Các khuyến nghị liên quan đến các tham số dính như là chiều dài neo và chiều dài nối chồng được nêu trong mục 5.5.

Đặc trưng lâu bền của thanh FRP được xác định theo các phương pháp thử nghiệm. Người thiết kế cần luôn luôn tham vấn nhà sản xuất để biết các hệ số về độ lâu bền.

Tiêu chuẩn ACI 440.6-08 có quy định bổ sung về các tính chất bền lâu của các thanh FRP cacbon và thủy tinh như sau:

1. Độ hút ẩm. Phải thử nghiệm độ hút ẩm nhằm mục đích chứng nhận sản phẩm (tức là giá trị danh nghĩa) theo ASTM D570 Mục 7.4 hoặc D5229/D5229M, phương pháp B, dùng nước ở nhiệt độ 122 °F (50 °C) với số lần và số mẫu như đối với thử nghiệm tìm giá trị danh nghĩa của tính cơ lý của sản phẩm (trên ít nhất 25 mẫu gồm 5 nhóm, mỗi nhóm 5 mẫu của các lô sản xuất khác nhau). Kết quả thử nghiệm độ hút ẩm riêng lẻ phải được thông báo và giá trị trung bình của chúng phải nhỏ dưới 1, 0%.

2. Sức chịu môi trường kiềm. Sức chịu môi trường kiềm phải được xác định nhằm mục đích chứng nhận sản phẩm (tức là giá trị danh nghĩa) theo phương pháp do nhà sản xuất đề xuất và

được người mua chấp nhận, với số lần và số mẫu như đối với thử nghiệm tìm giá trị danh nghĩa.

3. Sự thấm thấu theo phương dọc. Sự thấm thấu theo phương dọc phải được xác định nhằm mục đích cam đoan chất lượng với khách mua. Năm đoạn dài 1 inch (2,5 cm) được cắt ra từ thanh FRP để thử nghiệm theo ASTM D5117 với mỗi lô sản phẩm. Không được có hốc rỗng liên tục trong nhựa (hốc rỗng liên tục là hốc rỗng có trong cả 5 mẫu thử, nó có thể xảy ra do co ngót của nhựa khi gia công hoặc do sợi và nhựa không kết chặt với nhau khi chế tạo).

5. Tính toán kết cấu bê tông cốt thanh FRP.

5.1 Nguyên tắc chung

Chỉ dẫn này sử dụng phương pháp thiết kế theo cường độ của cấu kiện bê tông có cốt là thanh FRP để nhất quán với các tài liệu khác của ACI, đặc biệt là các điều khoản của ACI 318-05 “Yêu cầu của Quy phạm Xây dựng đối với kết cấu bê tông và Bình luận”. Các khuyến nghị này dựa trên các nguyên tắc thiết kế theo trạng thái giới hạn tức là một cấu kiện bê tông cốt FRP phải được thiết kế theo độ bền yêu cầu (tức nội lực) rồi được kiểm tra về khả năng chịu mỏi, khả năng chịu phá hủy do từ biến và tiêu chí về sử dụng. Trong nhiều trường hợp, tiêu chí sử dụng hoặc giới hạn chịu đựng mỏi và phá hủy từ biến có thể quyết định việc thiết kế cấu kiện chịu uốn bê tông có cốt FRP (đặc biệt là các thanh FRP aramit và FRP thủy tinh có độ cứng kém).

Các hệ số tải trọng cho trong ACI 318-05 được dùng để xác định cường độ yêu cầu (tức nội lực) của cấu kiện bê tông có cốt FRP.

5.2 Các đặc trưng tính toán của vật liệu

Các tính chất cơ học được cung cấp bởi nhà sản xuất như cường độ kéo được bảo đảm, cần được coi như các tính chất ban đầu chưa xét đến ảnh hưởng của sự phơi lộ dài hạn trong môi trường. Bởi vì sự phơi lộ dài hạn trong các môi trường khác nhau có thể làm giảm cường độ kéo, giảm độ chịu đựng mỏi hoặc phá hủy do từ biến của thanh FRP nên các tính chất cơ học dùng trong các phương trình thiết kế phải được giảm đi tùy theo loại và mức độ phơi lộ.

Phương trình từ (5-1) đến (5-3) cho các tính chất chịu kéo sử dụng trong thiết kế. Cường độ chịu kéo tính toán (hay thiết kế) được xác định là:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (5-1)$$

trong đó:

f_{fu} = cường độ kéo tính toán (hay thiết kế) của FRP có xét đến sự suy giảm trong môi trường sử dụng, MPa;

C_E = hệ số giảm do môi trường của cường độ kéo tính toán, cho trong Bảng 5.1 tương ứng với các loại sợi và tình trạng bị phơi lộ khác nhau;

f_{fu}^* = cường độ kéo được bảo đảm của thanh FRP, xác định bằng giá trị trung bình của một bộ các mẫu thử trừ đi ba lần độ lệch chuẩn ($f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$), MPa;

Biến dạng tỷ đối khi phá hủy để thiết kế là

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (5-2)$$

trong đó:

ε_{fu} = biến dạng tỷ đối khi phá hủy để thiết kế của cốt FRP;

ε_{fu}^* = biến dạng tỷ đối khi phá hủy được bảo đảm của thanh FRP, được xác định bằng biến dạng kéo tỷ đối trung bình lúc phá hủy của một bộ các mẫu thử trừ đi ba lần độ lệch chuẩn ($\varepsilon_{fu}^* = \varepsilon_{u, ave} - 3\sigma$).

Môđun đàn hồi thiết kế sẽ lấy bằng giá trị thông báo của nhà sản xuất tức là môđun đàn hồi trung bình (giá trị được bảo đảm) của một bộ các mẫu thử ($E_f = E_{f, ave}$).

Bảng 10 – Hệ số giảm do môi trường cho cường độ kéo tính toán, với các loại sợi và tình trạng bị phơi lộ khác nhau

Tình trạng bị phơi lộ	Loại sợi	Hệ số giảm do môi trường C_E
Bê tông không phơi lộ ra đất và thời tiết	Cacbon	1,0
	Thủy tinh	0,8
	Aramit	0,9
Bê tông bị phơi lộ ra đất và thời tiết	Cacbon	0,9
	Thủy tinh	0,7
	Aramit	0,8

Hệ số giảm do môi trường cho tại Bảng 10 là ước tính thiên về an toàn, tùy thuộc vào độ lâu bền của từng loại sợi, với sự đồng thuận của Ủy ban soạn thảo ACI 440. Ảnh hưởng của nhiệt độ đã được kể đến trong giá trị C_E , tuy nhiên không được dùng trong những môi trường có nhiệt độ sử dụng cao hơn nhiệt độ T_g của nhựa dùng cho chế tạo sợi (Hiện đang có nhiều nghiên cứu tiếp tục về vấn đề này).

5.2.1 Cường độ kéo tại chỗ uốn cong của thanh FRP

Cường độ kéo tại chỗ uốn cong của thanh FRP có thể được xác định bằng công thức

$$f_{fb} = \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) \cdot f_{fu} \leq f_{fu} \quad (5-3)$$

trong đó:

f_{fb} = cường độ kéo tính toán tại chỗ uốn cong của thanh FRP, MPa;

r_b = bán kính uốn, mm;

d_b = đường kính của thanh cốt, mm;

f_{fu} = cường độ kéo tính toán của FRP có xét đến sự giảm trong môi trường sử dụng, MPa.

Phương trình (5-3) được rút từ khuyến nghị thiết kế của Hội Kỹ sư Xây dựng Nhật Bản. Một số nghiên cứu khác về móc của thanh FRP cho thấy lực kéo phát sinh trong phần cong của thanh FRP thủy tinh là chịu ảnh hưởng lớn của tỷ số bán kính cong trên đường kính thanh r_b/d_b , chiều dài phần đuôi và, ở mức thấp hơn, của cường độ bê tông.

Một cách khác để xác định sự suy giảm của cường độ kéo do uốn cong là nhà chế tạo có thể thử nghiệm thanh cong theo phương pháp nêu trong ACI 440.3R.12

5.3. Thiết kế cấu kiện chịu uốn

Thiết kế cấu kiện chịu uốn bằng bê tông có cốt là các thanh FRP cũng tương tự như thiết kế cấu kiện bê tông cốt thép. Các dữ liệu thí nghiệm trên cấu kiện chịu uốn bằng bê tông có cốt là các thanh FRP cho thấy khả năng chịu uốn có thể dựa trên các giả thiết tương tự như đối với cấu kiện bê tông cốt thép. Việc thiết kế cấu kiện chịu uốn bằng bê tông có cốt FRP cần xét đến quan hệ ứng suất – biến dạng đơn trục của vật liệu FRP.

5.3.1 Các vấn đề chung

Các Chỉ dẫn ở nội dung này chỉ xét tiết diện chữ nhật với một lớp cốt thuộc một loại FRP vì việc nghiên cứu thực nghiệm hầu hết làm với loại tiết diện này. Tuy nhiên, các ý tưởng trình bày ở đây cũng có thể áp dụng để phân tích và thiết kế cấu kiện có hình dạng tiết diện khác, và có nhiều loại cốt, nhiều lớp cốt FRP hoặc cả hai trường hợp. Mặc dù lý thuyết về cấu kiện chịu uốn trình bày ở đây cũng áp dụng được cho tiết diện không chữ nhật, sự làm việc của tiết diện không chữ nhật vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu thí nghiệm để khẳng định.

5.3.1.1 Tư duy về thiết kế cấu kiện chịu uốn. Cấu kiện bê tông cốt thép thường được thiết kế có ít cốt thép để cho cốt thép chảy dẻo trước khi bê tông vùng nén bị ép vỡ. Sự chảy dẻo của cốt thép tạo nên độ mềm dẻo và cảnh báo sự phá hủy cấu kiện. Còn cốt FRP ứng xử không dẻo nên cần thiết phải xem xét lại phương pháp nói trên.

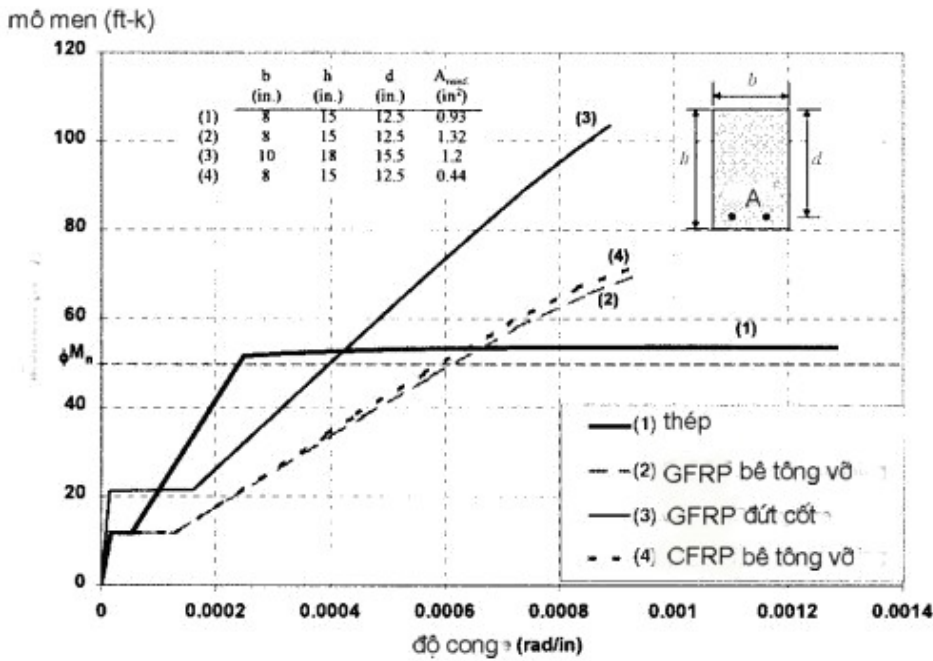
Nếu cốt FRP bị đứt thì sự phá hủy của cấu kiện là đột ngột và nguy hiểm, tuy nhiên cũng có một sự cảnh báo hạn chế về sự phá hủy sắp xảy ra khi có vết nứt quá mức và độ võng lớn do các thanh FRP bị giãn ra nhiều trước khi đứt. Trong mọi trường hợp, cấu kiện sẽ không cho thấy tính dẻo như thường thấy ở dầm bê tông cốt thép đặt ít thép.

Đối với dầm bê tông cốt FRP thì sự phá hủy do bê tông bị ép vỡ có khi lại được mong muốn hơn. Khi bê tông bị ép vỡ, cấu kiện uốn cho thấy một ứng xử dẻo nhất định trước khi phá hủy.

Như vậy, cả hai sự phá hủy (đứt FRP và ép vỡ bê tông) đều chấp nhận được khi thiết kế cấu kiện chịu uốn có cốt FRP, với điều kiện là thỏa mãn các tiêu chí về cường độ và sử dụng. Để bù lại sự thiếu mềm dẻo, cấu kiện cần có sự dự trữ cường độ cao hơn. Do đó, Bản Chỉ dẫn này đề xuất một dự trữ an toàn cao hơn so với khi thiết kế bê tông cốt thép truyền thống.

Dùng bê tông cường độ cao cho phép tận dụng tốt hơn cường độ cao của thanh FRP và có thể làm tăng độ cứng của tiết diện đã nứt nhưng bê tông cường độ cao là giòn hơn bê tông cường độ thường nên có thể làm giảm độ biến dạng tổng thể của cấu kiện uốn.

Hình 2 thể hiện sự so sánh các quan hệ mômen–độ cong của các dầm mà tiết diện được thiết kế với cùng một giá trị cường độ ϕM_n theo nguyên tắc thiết kế theo cường độ cực hạn nêu ở chương này (có kể cả hệ số giảm cường độ được khuyến nghị trong ACI 318-05). Ba trường hợp được trình bày cùng với trường hợp tiết diện có cốt thép:



Hình 2 – Quan hệ lý thuyết mômen – độ cong của các tiết diện bê tông có cốt thép và cốt FRP thủy tinh (GFRP) và FRP cacbon (CFRP)

hai tiết diện có cốt là các thanh FRP thủy tinh và một có cốt là thanh FRP cacbon. Đối với trường hợp dầm có thanh FRP thủy tinh bị đứt, kích thước của bê tông là lớn hơn các dầm khác để chúng cùng đạt một khả năng chịu lực thiết kế.

5.3.1.2 Giả thiết

Việc tính toán cường độ của tiết diện sẽ dựa trên các giả thiết sau:

- Biến dạng tỷ đối của bê tông và của cốt FRP là tỷ lệ với khoảng cách đến trục trung hòa (nghĩa là một tiết diện phẳng trước khi chịu tải thì vẫn là phẳng sau khi chịu tải);
- Biến dạng tỷ đối nén lớn nhất có thể sử dụng được trong bê tông là 0,003;
- Cường độ kéo của bê tông là được bỏ qua;
- Sự làm việc của thanh FRP là đàn hồi tuyến tính cho đến khi phá hủy;

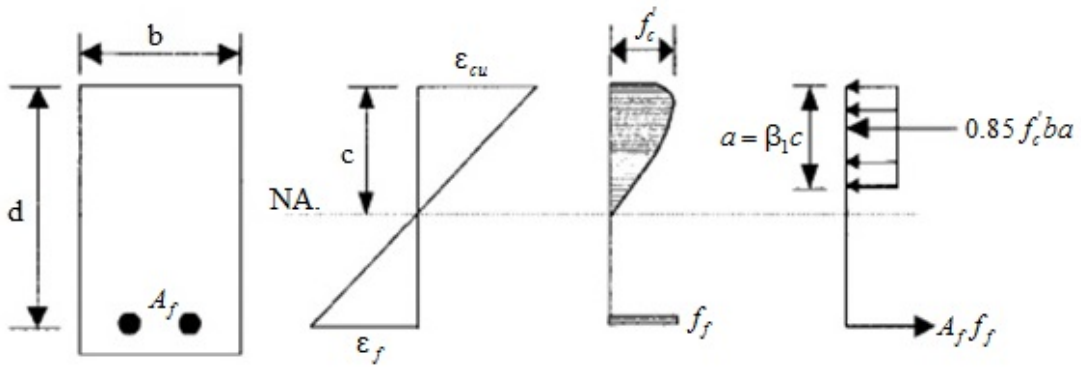
Giữa bê tông và cốt FRP có sự dính kết hoàn toàn.

5.3.2 Cường độ chịu uốn

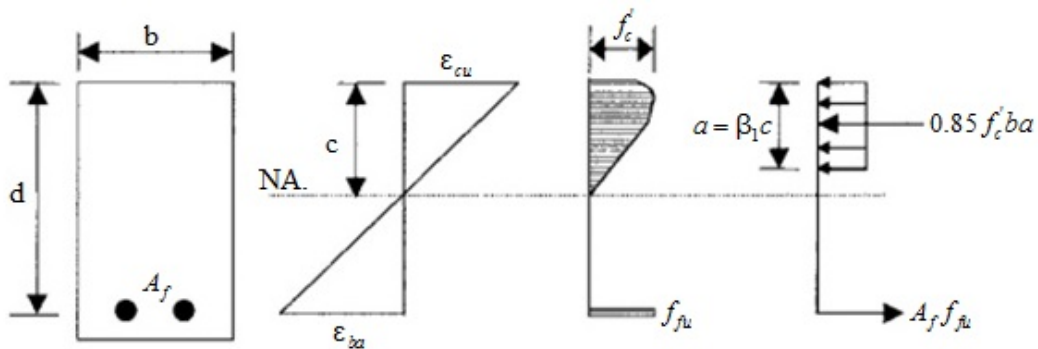
Phương pháp thiết kế theo cường độ, yêu cầu cường độ uốn thiết kế của một tiết diện của cấu kiện phải vượt quá mômen tính toán (tức là mômen đã nhân với hệ số) (phương trình 5-4). Cường độ uốn thiết kế là cường độ uốn danh nghĩa nhân với hệ số giảm cường độ (ϕ , sẽ thảo luận tại mục 5.3.2.3). Mômen tính toán là mômen được tính với tải trọng đã nhân hệ số như quy định trong ACI 318-95 (ví dụ 1, 2D +1, 6L +..)

$$\phi M_n \geq M_u \tag{5-4}$$

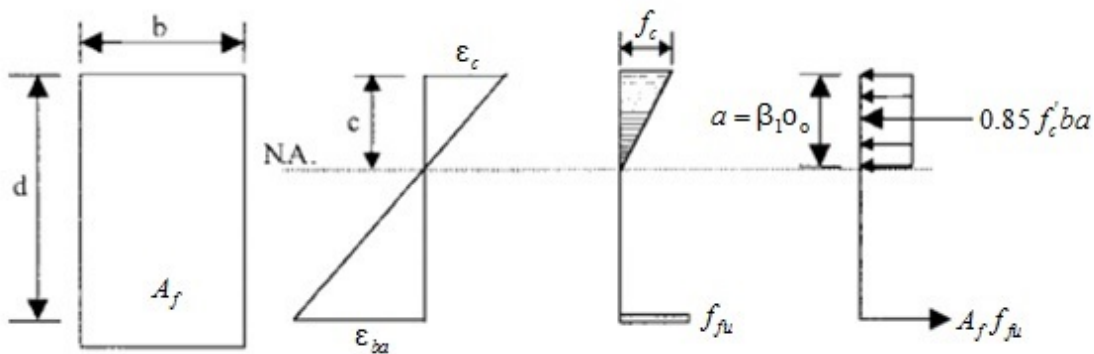
Cường độ uốn danh nghĩa của cấu kiện bê tông cốt FRP có thể được xác định dựa trên sự tương thích biến dạng, sự cân bằng nội lực và trạng thái phá hủy. Hình 3 thể hiện ứng suất, biến dạng tỷ đối và nội lực của ba trường hợp phá hủy khả dĩ của tiết diện chữ nhật có cốt FRP.



a) Phá hủy do bê tông bị ép vỡ



b) Điều kiện phá hủy cân bằng



c) Phá hủy do FRP bị đứt (ứng suất trong bê tông có thể không tuyến tính)

Hình 3 – Trạng thái ứng suất và biến dạng tại các trạng thái phá hủy

5.3.2.1 Cách thức phá hủy. Khả năng chịu uốn của cầu kiện có cốt FRP phụ thuộc vào cách thức phá hủy là do bê tông bị ép vỡ hay do FRP đứt. Cách phá hủy có thể được xác định bằng cách so sánh hàm lượng cốt FRP với hàm lượng cốt cân bằng (tức là hàm lượng khi mà bê tông vỡ và FRP đứt xảy ra đồng thời). Bởi vì FRP không chảy dẻo, hàm lượng cân bằng của cốt FRP được tính toán theo cường độ kéo thiết kế của cốt FRP. Hàm lượng cốt FRP có thể tính từ phương trình (5-5) và hàm lượng cốt FRP cân bằng có thể tính từ phương trình (5-6).

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (5-5)$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (5-6)$$

Nếu hàm lượng cốt nhỏ hơn hàm lượng cốt cân bằng ($\rho_f < \rho_{fb}$), cấu kiện sẽ phá hủy do đứt FRP. Ngược lại thì phá hủy do bê tông vỡ.

Bảng 11 ghi một số giá trị điển hình của hàm lượng cốt cân bằng, cho thấy hàm lượng cân bằng đối với cốt FRP ρ_{fb} thấp hơn nhiều so với hàm lượng cân bằng của cốt thép ρ_b . Thực vậy, hàm lượng cân bằng đối với cốt FRP thậm chí còn nhỏ hơn hàm lượng cốt tối thiểu của cốt thép ($\rho_{min} = 0,0035$ đối với thép cấp 60 và bê tông có $f_c' = 5\text{ksi}(34,5\text{MPa})$).

Bảng 11– Giá trị điển hình của hàm lượng cốt cân bằng đối với tiết diện chữ nhật có $f_c' = 5\text{ksi}(34,5\text{MPa})$

Loại thanh	Cường độ chảy f_y hoặc cường độ kéo f_{fu} , ksi(MPa)	Môđun đàn hồi, ksi(GPa)	ρ_b hay ρ_{fb}
Thép	60 (414)	29 000 (200)	0,0335
FRP thủy tinh	80 (552)	6 000 (41,4)	0,0078
FRP aramit	170 (1172)	12 000 (82,7)	0,0035
FRP cacbon	300 (2070)	22 000 (152)	0,0020

5.3.2.2 Cường độ uốn danh nghĩa. Khi $\rho_f > \rho_{fb}$, sự phá hủy của cấu kiện bắt đầu bằng sự vỡ của bê tông, và sự phân bố ứng suất trong bê tông có thể gần đúng là biểu đồ ứng suất chữ nhật theo ACI. Dựa trên sự cân bằng lực và tương thích biến dạng (xem Hình 3) có thể suy ra các phương trình sau:

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5-7a)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0,85 \cdot f_c' b} \quad (5-7b)$$

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad (5-7c)$$

Thay a từ (5-4b) vào (5-4c) và giải ra f_f

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (5-7d)$$

Cường độ uốn danh nghĩa có thể được xác định từ các phương trình (5-7a), (5-7b) và (5-7d). Cốt FRP là đàn hồi tuyến tính với trong trường hợp bê tông vùng nén bị ép vỡ, nên ứng suất trong FRP có thể tìm từ (5-7c) vì nó nhỏ hơn f_{fu} .

Theo cách khác, cường độ uốn danh nghĩa tại một tiết diện có thể biểu thị theo hàm lượng cốt FRP như phương trình (5-8) thay cho (5-7a):

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c} \right) b d^2 \quad (5-8)$$

Khi $\rho_f < \rho_{fb}$, sự phá hủy cấu kiện bắt đầu bằng sự đứt thanh FRP nên biểu đồ ứng suất theo ACI không áp dụng được vì có thể không đạt tới được biến dạng tỷ đối cực đại của bê tông. Trong trường hợp này, một biểu đồ ứng suất tương đương sẽ cần dùng để xấp xỉ với sự phân bố ứng suất trong bê tông tại mức ứng suất đã đạt tới.

Bài toán có hai ẩn số: biến dạng tỷ đối nén của bê tông tại lúc phá hủy ϵ_c và bề cao tính đến trục trung hòa c . Ngoài ra cũng chưa biết các hệ số của biểu đồ chữ nhật α_1 và β_1 . Hệ số α_1 là tỷ số của ứng suất trung bình của bê tông so với cường độ bê tông. Hệ số β_1 là tỷ số giữa bề cao của biểu đồ ứng suất chữ nhật tương đương so với bề cao tính đến trục trung hòa. Phân tích với mọi ẩn số này trở nên phức tạp. Cường độ uốn danh nghĩa tại một tiết diện có thể tính theo phương trình (5-9a):

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (5-9a)$$

Với một tiết diện đã cho, tích số $\beta_1 c$ trong (5-9a) biến đổi tùy theo tính chất vật liệu và hàm lượng đặt cốt FRP. Giá trị lớn nhất của tích số này là bằng $\beta_1 c_b$ và có được khi đạt tới biến dạng tỷ đối cực đại của bê tông (0,003). Một cách tính đơn giản hóa và thiên an toàn cho cường độ uốn danh nghĩa của cấu kiện có thể làm theo (5-9b) và (5-9c) như sau:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (5-9b)$$

$$C_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d \quad (5-9c)$$

5.3.2.3 Hệ số giảm cường độ khi uốn. Vì cấu kiện bê tông cốt FRP không thể hiện ứng xử dẻo nên cần có một hệ số giảm cường độ thiên về an toàn để tạo một dự trữ cường độ cao hơn cho cấu kiện. Các khuyến nghị của Nhật về thiết kế cấu kiện uốn đề xuất một hệ số giảm cường độ bằng 0,77. Một số nghiên cứu khác dựa trên quan điểm xác suất đề nghị con số 0,75.

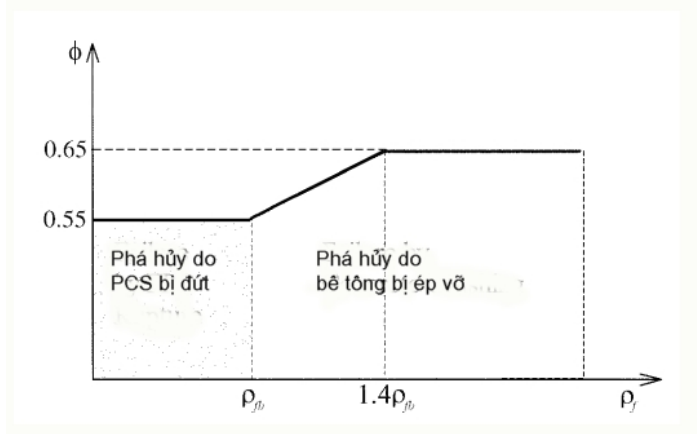
Theo ACI 318-05, hệ số ϕ cho phá hủy về nén là 0,65 với chỉ số độ tin cậy mục tiêu là từ 3,5 đến 4,0. Phân tích độ tin cậy cho dầm có cốt FRP chịu uốn, khi sử dụng tổ hợp tải trọng thứ 2 của ACI 318-05 với tỷ số hoạt tải trên tĩnh tải là giữa 1 và 3 cho thấy chỉ số độ tin cậy là giữa 3,5 đến 4,0 khi hệ số ϕ lấy bằng 0,65 cho phá hủy về ép vỡ bê tông và 0,55 khi phá hủy vì đứt cốt FRP theo phương trình (5-9b). Phân tích phi tuyến độ cong lúc phá hủy cho thấy độ cong lúc phá hủy của những dầm có cốt FRP biến đổi trong khoảng $0,0138/d$ đến $0,0176/d$ cho các trường hợp phá hủy do kéo và $0,0089/d$ đến $0,012/d$ cho các trường hợp phá hủy do nén.

ACI 318-05 cho là phá hủy do kéo mỗi khi độ cong lớn hơn $0,008/d$ (tương ứng với biến dạng tỷ đối trong thép là 0,005). Điều này chứng tỏ rằng dầm có cốt FRP sẽ có độ võng lớn ở trạng thái cực hạn vì môđun đàn hồi của cốt FRP thấp, và dầm cốt FRP bị phá hủy vì đứt cốt sẽ

có độ võng ở trạng thái cực hạn lớn hơn độ võng khi phá hủy do bê tông vỡ. Và mặc dù độ cong của dầm cốt FRP lớn hơn độ cong của dầm cốt thép tương đương, Ủy ban nghiên cứu của ACI vẫn khuyến nghị hệ số ϕ là 0,55 cho trường hợp phá hủy do kéo để duy trì chỉ số độ tin cậy tối thiểu là 3,5.

Mặc dù có thể dùng tính toán để tiên đoán sự phá hủy do bê tông vỡ, nhưng cấu kiện chế tạo ra có thể không bị hỏng như vậy. Ví dụ nếu cường độ bê tông cao hơn cường độ đặc trưng, cấu kiện có thể bị hỏng do cốt FRP đứt. Vì lý do đó và để thiết lập một sự chuyển tiếp giữa hai giá trị ϕ , một tiết diện không chế bởi bê tông vỡ được xác định là tiết diện trong đó $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$ và một tiết diện không chế bởi cốt FRP đứt được xác định là tiết diện trong đó $\rho_f < \rho_{fb}$.

Hệ số giảm cường độ uốn có thể tính bằng phương trình (5-10). Phương trình này được biểu diễn bằng đồ thị ở H.4, và cho hai hệ số 0,65 cho tiết diện do bê tông vỡ không chế và 0,55 cho tiết diện không chế bởi cốt FRP đứt. Giữa hai giá trị này là sự chuyển tiếp tuyến tính:



.Hình 5.3 Hệ số giảm cường độ là hàm của hàm lượng cốt

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{khi } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{khi } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{khi } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad (5-10)$$

5.3.2.4 Lượng đặt cốt FRP tối thiểu. Nếu một cấu kiện được thiết kế để phá hủy vì cốt FRP đứt $\rho_f < \rho_{fb}$, cần phải có một lượng cốt tối thiểu để khỏi bị phá hủy khi bê tông nứt (nghĩa là $\phi M_n \leq M_{cr}$ trong đó M_{cr} là mômen gây nứt). Các điều khoản của ACI 318-05 về lượng đặt cốt tối thiểu là dựa trên quan điểm này và có điều chỉnh để áp dụng cho cấu kiện cốt FRP. Sự điều chỉnh này là do hệ số giảm cường độ có khác (tức là 0,55 cho tiết diện không chế bởi kéo chứ không phải là 0,9). Diện tích cốt tối thiểu đối với cấu kiện đặt cốt FRP được tính bằng cách lấy phương trình đã có trong ACI 318-05 đối với cốt thép nhân với 1,64 ($1,64 = 0,90/0,55$). Được phương trình (5-11):

$$A_{f, \min} = \frac{4,9\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{330}{f_{fu}} b_w d \quad (5-11)$$

Nếu sự phá hủy của cấu kiện không khống chế bởi FRP đứt $\rho_f > \rho_{fb}$, lượng cốt tối thiểu để ngăn ngừa phá hủy khi nứt là được tự động thực hiện. Như vậy chỉ cần kiểm tra phương trình (5-11) nếu $\rho_f < \rho_{fb}$.

5.3.2.5 Các vấn đề đặc biệt

5.3.2.5.1 Đặt nhiều lớp cốt và kết hợp nhiều loại FRP khác nhau. Trong tiết diện mà phá hủy kéo là khống chế, mọi cốt thép dẻo được giả thiết là chảy tại cực hạn khi sử dụng phương pháp thiết kế theo cường độ để tính toán cường độ uốn danh nghĩa của cấu kiện có cốt thép đặt nhiều lớp. Như vậy, lực kéo được giả thiết đặt tại trọng tâm của các cốt thép và độ lớn bằng diện tích của cốt thép kéo nhân với cường độ chảy của thép. Nhưng vì vật liệu FRP không có vùng dẻo, ứng suất trong mỗi lớp cốt sẽ biến đổi tùy theo khoảng cách từ lớp đến trục trung hòa. Tương tự như vậy, nếu có nhiều loại thanh FRP được dùng để làm cốt cho cùng một cấu kiện, khi tính khả năng chịu uốn, sẽ cần phải xét sự biến đổi của mức ứng suất trong mỗi loại thanh. Trong trường hợp này, sự phá hủy của lớp cốt ngoài cùng sẽ quyết định sự phá hủy toàn thể các cốt, và việc phân tích khả năng chịu uốn cần dựa trên phương pháp tương thích biến dạng tỷ đối.

5.3.2.5.2 Phân phối lại mômen. Cơ chế phá hủy của cấu kiện uốn có đặt cốt FRP sẽ không dựa trên sự hình thành khớp dẻo vì vật liệu FRP thể hiện ứng xử đàn hồi tuyến tính đến tận lúc phá hủy. Sự phân phối lại mômen trong dầm liên tục hay trong các kết cấu siêu tĩnh khác sẽ không được xét với bê tông đặt cốt FRP.

5.3.2.5.3 Cốt chịu nén. Thanh FRP có cường độ chịu nén thấp hơn nhiều so với cường độ kéo và cũng khá biến động. Vì vậy, cường độ chịu nén của mọi thanh FRP cần được bỏ qua khi tính toán thiết kế.

Bản Chỉ dẫn này không khuyến nghị sử dụng thanh FRP làm cốt dọc chịu nén cho cột hoặc làm cốt chịu nén trong cấu kiện uốn. Tuy nhiên trong một vài trường hợp, không tránh được việc đặt các thanh FRP trong vùng nén của cấu kiện uốn. Ví dụ tại các gối tựa của dầm liên tục hoặc tại những chỗ cần thanh dọc để cố định các đai. Trong các trường hợp này, cần có cách kiểm chế thanh FRP trong vùng nén để nó khỏi mất ổn định và để giảm thiểu ảnh hưởng của sự giãn nở phương ngang tương đối cao của vài loại thanh FRP. Cốt FRP ngang (đai) dưới dạng thanh nổi cần có khoảng cách nhỏ hơn bề rộng cấu kiện hoặc 16 lần đường kính thanh dọc hoặc 48 lần đường kính thanh nổi (đai).

5.3.3 Khả năng sử dụng.

Cấu kiện bê tông cốt FRP có độ cứng tương đối nhỏ sau khi nứt. Do đó, độ võng cho phép khi chịu tải trọng sử dụng có thể quyết định thiết kế. Nói chung, thiết kế tiết diện đặt cốt FRP theo điều kiện phá hủy do bê tông vỡ sẽ thỏa mãn tiêu chí về khả năng sử dụng tức là độ võng và bề rộng khe nứt.

Khả năng sử dụng có thể được định nghĩa như là tính năng làm việc thỏa đáng dưới tải trọng sử dụng. Điều này có thể được mô tả theo hai tham số:

- Khe nứt – Không nên có bề rộng nứt quá lớn vì lý do thẩm mỹ và nhiều lý do khác (ví dụ để ngăn nước rò rỉ) có thể làm tổn hại hoặc làm hỏng bê tông kết cấu;

- Vòng – Độ võng phải ở trong các giới hạn chấp nhận được bởi sự sử dụng kết cấu. Ví dụ để đỡ các bộ phận phi kết cấu khỏi bị hư hại.

Các điều khoản về khả năng sử dụng cho trong ACI 318-05 sẽ cần thiết phải điều chỉnh đối với cấu kiện đặt cốt FRP vì tính chất của thép và FRP khác nhau như độ cứng kém hơn, cường độ bám dính và độ chịu ăn mòn. Ví dụ lấy thanh FRP thay cho thép cùng một diện tích thì hiển nhiên làm võng nhiều hơn và nứt rộng hơn.

5.3.3.1 Khe nứt. Thanh FRP có khả năng chống ăn mòn tốt nên bề rộng nứt lớn nhất có thể không bị hạn chế nhiều như đối với trường hợp phải hạn chế nứt vì cốt bị ăn mòn. Các lý do khác phải hạn chế nứt là vì thẩm mỹ và tác động của lực cắt.

Hội Kỹ sư Xây dựng Nhật chỉ xét yêu cầu thẩm mỹ khi định bề rộng nứt lớn nhất cho phép là 0,5 mm. Theo Tiêu chuẩn Canada khi dùng cốt FRP thì cho phép bề rộng nứt 0,5 mm khi cấu kiện phơi lộ bên ngoài và 0,7 mm đối với cấu kiện bên trong nhà. ACI 318-05 không nói về cốt FRP. Tuy nhiên có thể nêu ra để so sánh, điều khoản khống chế nứt đối với cốt thép là tương ứng với bề rộng nứt lớn nhất là **0,4 mm**. Ủy ban ACI soạn thảo Tài liệu này khuyến nghị dùng giới hạn của Tiêu chuẩn Canada cho phần lớn trường hợp. Các giới hạn này cũng có thể không đủ đối với kết cấu phơi lộ trong môi trường xâm thực hoặc có yêu cầu kín nước. Trong các trường hợp này cần cẩn thận hơn. Trái lại kết cấu có vòng đời ngắn hoặc kết cấu mà không cần quan tâm vấn đề thẩm mỹ thì có thể bỏ qua yêu cầu bề rộng nứt, trừ phi có mặt cả cốt thép.

Các điều khoản của ACI 318-05 về khoảng cách tối đa của cốt thép khi khống chế nứt là dựa trên mô hình vật lý chứ không phải suy từ kinh nghiệm. Công thức này không phụ thuộc vào loại cốt (thép hay FRP), trừ việc phải điều chỉnh bằng hệ số chất lượng dính kết. Do đó, bề rộng nứt lớn nhất có thể có của cấu kiện đặt cốt FRP được tính từ phương trình (5-12):

$$W = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (5-12)$$

trong đó w = bề rộng khe nứt lớn nhất, mm; f_f = ứng suất trong cốt, MPa; E_f = môđun đàn hồi của cốt, MPa; β = tỷ số giữa khoảng cách từ trục trung hòa đến mặt kéo so với khoảng cách từ trục trung hòa đến trọng tâm của cốt; d_c = bề dày lớp bảo vệ từ mặt kéo đến tâm của thanh gần nhất, mm; s = khoảng cách thanh, mm.

Hệ số k_b là một hệ số xét đến mức độ dính giữa thanh FRP và bê tông. Đối với thanh FRP mà có ứng xử bám dính tương tự như thanh thép không sơn thì hệ số k_b giả thiết bằng 1. Đối với thanh FRP mà có ứng xử bám dính thấp hơn thép thì k_b lớn hơn 1,0 còn với thanh FRP mà có ứng xử bám dính cao hơn thép thì k_b nhỏ hơn 1,0. Đặc trưng dính của thanh FRP thủy tinh GFPR có thể so sánh ngang với thép. Các nghiên cứu chỉ ra rằng bề rộng khe nứt của dầm bê tông cốt GFRP dưới tải trọng dài hạn sẽ tăng lên so với ban đầu chừng 40% tại môi trường bên trong nhà và tăng 60% tại môi trường bên ngoài, sau một giai đoạn 3 năm. Theo phân tích của các thành viên Ủy ban ACI về bề rộng nứt trên nhiều loại tiết diện bê tông và nhiều thanh FRP của các nhà sản xuất, loại sợi, công thức nhựa và cách xử lý bề mặt thì giá trị trung bình của k_b thay đổi trong phạm vi từ 0,60 đến 1,72, trung bình là 1,10. Thanh FRP bề mặt nhám phủ cát thì thiên về giá trị thấp. Ủy ban đồng thuận là trong trường hợp hệ số k_b không có dữ liệu thí nghiệm thì có thể giả thiết một giá trị an toàn là 1,4. Thanh nhẵn và lưới không được theo khuyến nghị này.

5.3.3.2 Độ võng. Nói chung, các điều khoản của ACI 318-05 về không chế độ võng là liên quan đến các độ võng sinh ra ở mức độ sử dụng, chịu tải trọng tĩnh dài hạn và tức thời chứ không áp dụng cho các tải trọng động lực như động đất, gió giật hay dao động máy móc. Hai phương pháp được cho trong ACI 318-05 để không chế độ võng của cầu kiện uốn một phương:

- Phương pháp gián tiếp để quy định bề dày tối thiểu của cầu kiện (bảng 9.5(a) trong ACI 318-05);

- Phương pháp trực tiếp hạn chế biến dạng tính được (bảng 9.5(b) trong ACI 318-05).

Do độ cứng biến đổi, bản chất đàn hồi giòn và tính chất dính riêng biệt của cốt FRP, độ võng của cầu kiện bê tông cốt FRP là nhạy cảm hơn trước các sự biến động ảnh hưởng đến võng so với cầu kiện bê tông cốt thép có cùng kích thước và cùng cách bố trí cốt. Độ võng của cầu kiện có cốt FRP cũng thường lớn hơn vì độ cứng nhỏ hơn của các thanh FRP có trên thị trường. Do đó, Bản Chỉ dẫn này yêu cầu dùng phương pháp trực tiếp để không chế võng như nêu ở các mục 5.3.3.2b và 5.3.3.2c. Bề dày tối thiểu của cầu kiện có cốt FRP được khuyến nghị trong mục 5.3.3.2a chỉ để thuận tiện thiết kế khi thiết lập tỷ lệ kích thước cầu kiện.

5.3.3.2a Khuyến nghị bề dày tối thiểu để thiết kế. Bề dày tối thiểu được khuyến nghị để thiết kế bản một phương và dầm được cho trong Bảng 12. Bảng này chỉ để hướng dẫn cho thiết kế sơ bộ, chứ dùng bề dày tối thiểu này không đảm bảo là các yêu cầu về võng sẽ được thỏa mãn cho một thiết kế cụ thể.

Các giá trị của Bảng 12 là dựa trên giới hạn của tỷ lệ tối đa nhịp trên bề cao thông dụng, tương ứng với độ cong giới hạn kết hợp với tỷ lệ nhịp trên độ võng muốn có (phương trình 5-13). Phương pháp này áp dụng được cho mọi loại cốt.

$$\frac{l}{h} = \frac{48\eta}{5K_1} \left(\frac{1-k}{\varepsilon_f} \right) \left(\frac{\Delta}{l} \right)_{\max} \quad (5-13)$$

Bảng 12 – Bề dày tối thiểu được khuyến nghị để thiết kế dầm hoặc bản một phương

	Bề dày tối thiểu h			
	Tựa đơn giản	Một đầu liên tục	Hai đầu liên tục	Công xôn
Bản đặc 1 phương	$l/13$	$l/17$	$l/22$	$l/5, 5$
Dầm	$l/10$	$l/12$	$l/16$	$l/4$

Trong (5-13), $\eta = d/h$; k xác định theo (5-15) và $(\Delta/l)_{\max}$ là tỷ lệ giới hạn của độ võng do tải trọng sử dụng so với nhịp; K_1 là tham số xét các điều kiện biên. Với tải trọng phân bố đều, nó có thể được lấy bằng 1,0; 0,8; 0,6 và 2,4 lần lượt cho các nhịp tựa đơn giản, một đầu liên tục, hai đầu liên tục, và công xôn. Số hạng ε_f là biến dạng tỷ đối trong cốt FRP dưới tải trọng sử dụng, tính tại giữa nhịp, trừ trường hợp nhịp công xôn thì tính tại gối tựa.

Phương trình (5-13) giả thiết không có sự tham gia chịu kéo của bê tông giữa các khe nứt, cũng được gọi sự tăng cứng do kéo (tức là sự tăng độ cứng do bê tông chịu kéo). Để xét tác động của sự tăng cứng do kéo này, khi lập Bảng 12, các giá trị tính từ (11-13) đã được điều chỉnh bởi tỷ số mômen quán tính hữu hiệu và mômen quán tính khi nứt hoàn toàn, được lần lượt tính theo các công thức (5-16a) và (5-14). Các giá trị ở bảng được dựa trên giả thiết giới

hạn độ võng sử dụng là $l/240$ dưới tải trọng sử dụng và với giả thiết hàm lượng đặt cốt là $2,0\rho_{fb}$ cho bản và $3,0\rho_{fb}$ cho dầm.

5.3.3.2b Mômen quán tính hữu hiệu. Khi tiết diện không nứt, mômen quán tính bằng mômen quán tính nguyên I_g . Khi mômen tác dụng M_a vượt quá mômen gây nứt M_{cr} , nứt xuất hiện và làm giảm độ cứng; mômen quán tính được tính theo tiết diện nứt I_{cr} . Với tiết diện chữ nhật, mômen quán tính nguyên tính bằng $I_g = bh^3/12$, còn I_{cr} thì tính bằng phân tích đàn hồi. Việc phân tích đàn hồi bê tông cốt FRP là tương tự như phân tích dầm cho bê tông cốt thép (tức là bỏ qua bê tông chịu kéo) và được tính bằng (5-14) và (5-15), với n_f là tỷ số môđun giữa FRP và bê tông:

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (5-14)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (5-15)$$

Độ cứng uốn tổng thể $E_c I$ của cầu kiện uốn đã có nứt khi sử dụng là biến đổi giữa $E_c I_g$ và $E_c I_{cr}$. ACI 318-05 dùng phương trình sau (của Branson) cho mômen quán tính hữu hiệu:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g$$

Phương trình Branson phản ánh hai hiện tượng: sự biến đổi của độ cứng EI dọc theo cầu kiện và tác động của sự tăng cứng do kéo của bê tông.

Phương trình này dựa trên ứng xử của dầm bê tông cốt thép tại mức tải trọng sử dụng. Các nghiên cứu về độ võng của dầm cốt FRP chỉ ra rằng trên một đồ thị tải trọng – độ võng của dầm tựa đơn giản, các đường cong thực nghiệm gần như song song với các đường cong vẽ theo phương trình Branson. Tuy nhiên phương trình Branson đã tính toán quá lớn mômen quán tính hữu hiệu của dầm cốt FRP, đặc biệt khi dầm đặt ít cốt, dẫn đến mức độ tăng cứng do kéo thấp hơn so với dầm cốt thép tương ứng. Việc giảm của sự tăng cứng do kéo có thể là do môđun đàn hồi thấp hơn và mức ứng suất dính khác nhau của cốt FRP so với cốt thép.

Để kể đến việc giảm của sự tăng cứng do kéo trong cầu kiện đặt cốt FRP, cần thiết dùng một biểu thức điều chỉnh của mômen quán tính hữu hiệu, được cho trong (5-16a):

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (5-16a)$$

Hệ số β_d là hệ số giảm do việc giảm của sự tăng cứng do kéo xuất hiện trong cầu kiện đặt cốt FRP. Mức độ của sự tăng cứng do kéo bị ảnh hưởng bởi số lượng và độ cứng của cốt chịu uốn và bởi hàm lượng đặt cốt tương đối (tỷ số của ρ_f so với ρ_{fb}). Ủy ban ACI đề nghị biểu thức đơn giản sau để tính β_d :

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1.0 \quad (5-16b)$$

Phương trình (5-16a) chỉ đúng khi mômen cực đại chưa nhân hệ số trong cầu kiện là bằng hoặc lớn hơn mômen nứt ($M_a \geq M_{cr}$). Bề dày tối thiểu khuyến nghị ở Bảng 11 là giả định điều kiện này. Nếu trong quá trình thiết kế, người thiết kế thấy mômen cực đại chưa nhân hệ số trong cầu kiện là nhỏ hơn khá nhiều so với mômen nứt thì độ võng tính theo mục 5.3.3.2b và 5.3.3.2c phải sử dụng I_g . Trường hợp mômen cực đại chưa nhân hệ số chỉ nhỏ hơn mômen nứt đôi chút thì người thiết kế vẫn nên giả định một tiết diện nứt vì các yếu tố như là co ngót và nhiệt độ có thể gây nứt tiết diện ngay cả khi $M_a < M_{cr}$. Làm điều này bằng cách áp dụng (5-16a) với $M_a = M_{cr}$.

5.3.3.2c Tính độ võng (phương pháp trực tiếp). Khi độ võng được tính toán theo các điều khoản của mục này, người thiết kế cần so sánh độ võng tính được với giới hạn chấp nhận được, giới hạn này coi như một phần của tiêu chí thiết kế. Trong nhiều trường hợp, tiêu chí độ võng được quy phạm địa phương định ra.

Độ võng ngắn hạn (độ võng tức thời dưới tải trọng sử dụng) của cầu kiện uốn một phương đặt cốt FRP có thể được tính toán bằng cách phân tích kết cấu và dùng mômen quán tính hữu hiệu của dầm FRP.

Độ võng dài hạn có thể lớn hơn nhiều lần độ võng ngắn hạn, và trong thiết kế cần xét cả hai độ võng ngắn hạn và dài hạn dưới tải trọng sử dụng. Sự tăng của độ võng dài hạn là hàm của nhiều yếu tố: hình học của cầu kiện (diện tích cốt và kích thước cầu kiện), đặc trưng của tải trọng (tuổi của bê tông lúc đặt tải, độ lớn và thời gian của tải dài hạn) và đặc trưng của vật liệu (môđun đàn hồi của bê tông và của cốt FRP, từ biến và co ngót của bê tông, hình thành các khe nứt mới và mở rộng các khe nứt đã có).

Các dữ liệu về độ võng theo thời gian của cầu kiện có cốt FRP do từ biến và co ngót chỉ ra rằng các đường cong độ võng theo thời gian của cầu kiện có cốt FRP và cầu kiện có cốt thép là có cùng hình dạng, điều này chứng tỏ có thể dùng cùng một phương pháp cơ bản để tính độ võng dài hạn.

Theo ACI 318-05, độ võng dài hạn do từ biến và co ngót $\Delta_{(cp+sh)}$ có thể tính theo các phương trình sau:

$$\Delta_{(cp+sh)} = \lambda (\Delta_i)_{sus} \quad (5-17a)$$

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (5-17b)$$

Tham số λ trong (5-17b) được giảm đến ξ vì không xét cốt chịu nén trong cầu kiện cốt FRP ($\rho_f' = 0$). Các giá trị ξ của được cho trong ACI 318-05.

Các phương trình này có thể được dùng cho cốt FRP với các điều chỉnh để xét sự khác nhau về độ cứng dọc trục giữa cầu kiện bê tông cốt FRP so với cầu kiện bê tông cốt thép. Dù với cốt FRP hay cốt thép, từ biến của bê tông đều làm giảm đáng kể độ cứng uốn $E_c I$. Để đơn giản, sự giảm này có thể coi như là sự cộng hai tác động trái ngược. Tác động thứ nhất là sự giảm môđun đàn hồi hữu hiệu, như là hệ quả trực tiếp của từ biến bê tông. Tác động thứ hai là sự

tăng bề cao của vùng nén; điều này có thể gần đúng tính bằng phân tích đàn hồi tiết diện bê tông với môđun đàn hồi giảm. Sự tăng bề cao của vùng nén là theo tỷ lệ rõ rệt đối với cấu kiện cốt FRP hơn là cấu kiện cốt thép vì độ cứng của cốt FRP là khá nhỏ trong những cấu kiện bê tông cốt FRP điển hình. Kết quả là sự tăng độ võng theo thời gian đối với bê tông cốt FRP sẽ có thể là theo tỷ lệ kém hơn so với bê tông cốt thép.

Một nghiên cứu cho thấy độ võng theo thời gian của dầm cốt FRP không có cốt nén, sau thời gian 6 tháng chịu tải dài hạn thì bằng 60% đến 90% độ võng ban đầu. Độ võng theo thời gian bổ sung đo được chỉ bằng 50% đến 75% độ võng theo các phương trình (5-17a) và (5-17b).

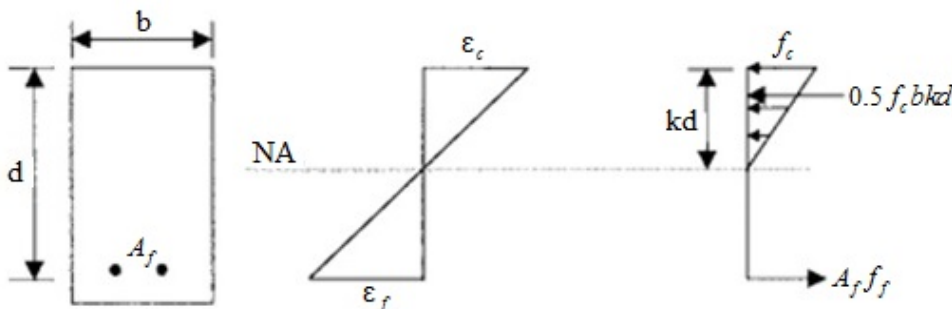
Căn cứ các kết quả nêu trên, khuyến nghị áp dụng hệ số 0,6 vào phương trình (5-17a). Do đó, với các trường hợp áp dụng tiêu biểu, độ võng dài hạn của cấu kiện có cốt FRP có thể xác định theo (5-18):

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6\xi(\Delta_i)_{sus} \quad (5-18)$$

Đối với dầm không nứt trước khi đặt tải trọng dài hạn, phương trình (5-18) có thể đã tính thiếu đáng kể hệ số nhân vào độ võng theo thời gian. Tình hình này thấy ở các dầm mà phần lớn hoặc tất cả tải trọng sử dụng là tải trọng dài hạn. Sự tính thiếu này được cho là do có những khe nứt uốn hình thành thêm trong dầm sau thời gian chịu tải trọng dài hạn.

5.3.4 Phá hủy do từ biến và mỏi

Để tránh đứt do từ biến của cốt FRP dưới ứng suất dài hạn hoặc sự phá hủy do ứng suất có chu kỳ và sự mỏi của cốt FRP, cần phải hạn chế mức ứng suất trong cốt FRP dưới các điều kiện làm việc như vậy. Vì rằng mức ứng suất này sẽ ở trong phạm vi đàn hồi của cấu kiện, có thể tính ứng suất này qua phân tích đàn hồi như mô tả ở hình 5:



Hình 5 – Sự phân bố ứng suất và biến dạng tỷ đối đàn hồi

5.3.4.1 Giới hạn của ứng suất phá hủy từ biến – Để tránh phá hủy cấu kiện có cốt FRP do sự đứt vì từ biến của FRP, cần định ra giới hạn ứng suất trong cốt FRP. Ứng suất trong cốt FRP có thể tính theo (5-19), với M_s là mômen chưa nhân hệ số do tải trọng dài hạn (tải tĩnh và phần dài hạn của hoạt tải):

$$f_{f,s} = M_s \frac{n_f d (1-k)}{I_{cr}} \quad (5-19)$$

Mômen quán tính nứt I_{cr} và tỷ số k của bề cao hữu hiệu so với bề cao vùng nén tính theo đàn hồi được tính theo (5-14) và (5-15).

Các giá trị của mức ứng suất dài hạn an toàn được cho trong Bảng 13. Các giá trị này được căn cứ trên các giới hạn ứng suất phá hủy từ biến đã nói ở mục 2.3.1, với một hệ số an toàn được áp đặt là 1/0, 60.

Bảng 13 – Giới hạn ứng suất đứt vì từ biến trong cốt FRP

Loại sợi	GFRP	AFRP	CFRP
Giới hạn ứng suất phá hủy từ biến $f_{f,s}$	0,20 f_{fu}	0,30 f_{fu}	0,55 f_{fu}

5.3.4.1 Giới hạn của ứng suất mỗi. Nếu kết cấu chịu chế độ mỗi, cần giới hạn ứng suất FRP theo các giá trị ghi ở Bảng 13. Ứng suất FRP có thể tính bằng (5-19), với M_s là mômen do mọi tải trọng dài hạn cộng các mômen cực đại gây ra trong một chu kỳ gia tải mỗi.

5.4 Thiết kế cấu kiện chịu cắt

Thiết kế cấu kiện chịu cắt bằng bê tông có cốt là các thanh FRP cũng tương tự như thiết kế cấu kiện bê tông cốt thép. Tuy nhiên các tính chất cơ học của thanh FRP là khác thép nên chúng ảnh hưởng đến cường độ chịu cắt và yếu tố này cần phải được xét đến. Chương này đề cập tới sức kháng cắt của dầm bê tông và của bản một phương đặt cốt FRP, sử dụng đai FRP, và khả năng chịu xuyên thủng của bản hai phương có cốt FRP.

5.4.1 Các vấn đề chung

Khi thiết kế cấu kiện bê tông cốt FRP chịu cắt, cần xét đến các vấn đề chung như sau:

- FRP có môđun đàn hồi tương đối thấp;
- FRP có sức kháng cắt theo phương ngang là thấp;
- FRP có cường độ kéo cao và không có điểm chảy;
- Cường độ kéo ở chỗ uốn của thanh FRP là thấp hơn nhiều so với đoạn thẳng.

Thiết kế cốt FRP chịu cắt được dựa trên phương pháp thiết kế theo cường độ. Hệ số giảm cường độ 0,75 của ACI 318-05 đối với khả năng chịu cắt danh nghĩa ϕV_n của cấu kiện bê tông cốt thép cũng sẽ được dùng cho cốt FRP. Cường độ chịu cắt đã nhân hệ số ϕV_n phải lớn hơn lực cắt V_u tại tiết diện xét. Tính lực cắt lớn nhất V_u tại các gối tựa dầm có thể làm theo các điều khoản của ACI 318-05.

5.4.2 Cường độ chịu cắt của cấu kiện đặt cốt FRP

Theo ACI 318-05, cường độ chịu cắt danh nghĩa của tiết diện bê tông cốt thép V_n là tổng của khả năng chịu cắt do bê tông V_c và khả năng chịu cắt của cốt thép V_s .

So sánh với một tiết diện bê tông có cốt thép dọc cùng diện tích, một cấu kiện uốn có cốt FRP sau khi nứt sẽ có bề cao tính đến trục trung hoà nhỏ hơn bởi vì độ cứng dọc trục thấp hơn (độ cứng dọc trục là tích số diện tích cốt với môđun đàn hồi). Vùng nén của tiết diện giảm đi còn vết nứt thì rộng hơn. Kết quả là sức kháng cắt do cả hai yếu tố chèn cốt liệu và bê tông vùng nén là nhỏ hơn. Nghiên cứu khả năng chịu cắt của cấu kiện uốn mà không có cốt chống cắt cho thấy cường độ chịu cắt của bê tông chịu ảnh hưởng bởi độ cứng của cốt dọc (chịu uốn).

Khả năng chịu cắt của bê tông V_c của cầu kiện uốn dẹt cốt chủ là FRP có thể tính theo phương trình (5-20):

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (5-20)$$

trong đó b_w = bề rộng của bụng dầm, mm và c = bề cao đến trục trung hoà của tiết diện đã biến đổi vì nứt, mm.

Với tiết diện chữ nhật đặt cốt đơn, bề cao đến trục trung hoà c có thể tính bằng:

$$c = kd$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$$

trong đó ρ_f = hàm lượng cốt FRP = $A_f/b_w d$

Phương trình (5-20) có xét đến độ cứng dọc trục của cốt FRP thông qua bề cao đến trục trung hoà c , là một hàm số của hàm lượng cốt ρ_f và tỷ số môđun n_f

Phương trình (5-20) có thể viết lại thành dạng (5-20a). Dạng này cho thấy phương trình (6-1) chỉ là phương trình tính khả năng chịu cắt của cốt thép cho bởi ACI 318-05, được điều chỉnh bằng hệ số $[(5/2)k]$, để xét đến độ cứng dọc của cốt FRP :

$$V_c = \left(\frac{5}{2}k\right) \cdot 2 \cdot \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5-20a)$$

Phương pháp ACI 318-05 dùng để tính toán phần tham gia chịu cắt của cốt đai cũng áp dụng được cho cốt FRP chịu cắt. Khả năng chịu cắt của cốt đai FRP vuông góc với trục cầu kiện có thể viết là:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (5-21)$$

Mức ứng suất trong cốt FRP cần được hạn chế để không chế bề rộng khe nứt do cắt và tránh phá huỷ tại chỗ uốn của đai FRP (phương trình 5-3). Phương trình (5-22) cho mức ứng suất cực hạn trong cốt FRP chịu cắt dẹt trong thiết kế:

$$f_{fv} = 0,004E_f \leq f_{fb} \quad (5-22)$$

Khi dẹt cốt chịu cắt đặt vuông góc với trục cầu kiện, khoảng cách và diện tích cần thiết của cốt chịu cắt có thể tính theo (5-23):

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} \quad (5-23)$$

Khi sử dụng đai FRP đặt nghiêng để chịu cắt, dùng (5-24) để tính sự tham gia của đai FRP :

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (5-24)$$

Nếu dùng cốt FRP xoắn ốc chữ nhật liên tục để chịu cắt (trong trường hợp này, c là bước và α là góc nghiêng của đường xoắn ốc), phương trình (5-25) cho biết sự tham gia của cốt xoắn :

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} (\sin \alpha) \quad (5-25)$$

Cách thức phá huỷ của cấu kiện có cốt FRP chịu cắt có thể xếp thành hai loại: cách phá huỷ kéo do cắt (khống chế bởi sự đứt của cốt FRP chịu cắt) và cách phá huỷ nén do cắt (khống chế bởi bụng bê tông bị vỡ). Cách thứ nhất thì giòn hơn, cách thứ hai thì vồng nhiều hơn. Kết quả thực nghiệm cho thấy cách phá huỷ phụ thuộc vào chỉ số cốt chịu cắt $\rho_{fv} E_f$, trong đó ρ_{fv} là hàm lượng cốt FRP chịu cắt. Khi giá trị $\rho_{fv} E_f$ tăng lên, khả năng chịu cắt trong sự làm việc kéo do cắt tăng lên và cách phá huỷ thay đổi từ kéo do cắt sang nén do cắt.

5.4.2.1 Giới hạn của biến dạng tỷ đối khi kéo của cốt chịu cắt. Giả thiết khi thiết kế là các khả năng chịu cắt của bê tông và của cốt được cộng với nhau chỉ đúng khi khe nứt do cắt được khống chế thích hợp. Vì vậy, biến dạng tỷ đối khi kéo của cốt FRP chịu cắt phải được hạn chế để có thể áp dụng được phương pháp thiết kế của ACI 318-05.

Tiêu chuẩn Canada hạn chế biến dạng tỷ đối kéo của cốt FRP chịu cắt là 0,002 mm/mm. Giá trị biến dạng tỷ đối này (tương ứng với biến dạng tỷ đối chảy của thép cấp 60) đã được chứng tỏ là rất an toàn: một số nghiên cứu thực nghiệm cho thấy có thể đạt giá trị cao hơn. Dự thảo của Tiêu chuẩn bê tông châu Âu giới hạn giá trị biến dạng tỷ đối do cắt trong cốt FRP là 0,0025 mm/mm. Xét biến dạng lúc phá huỷ của FRP là cao, người kỹ sư có thể dùng giá trị 0,00275 như đã hoàn toàn cho phép trong các ấn bản ACI 318-05 trước đây. Trong mọi trường hợp, biến dạng tỷ đối hữu hiệu của cốt FRP chịu cắt không được vượt quá 0,004, và cường độ tính toán không được vượt quá cường độ của phần uốn cong của đai f_{fb} . Giá trị 0,004 được coi là biến dạng tỷ đối ngăn ngừa sự suy giảm của hiệu ứng chèn cốt liệu và của khả năng chịu cắt tương ứng của bê tông.

5.4.2.2 Lượng cốt chịu cắt tối thiểu. ACI 318-05 yêu cầu một lượng cốt chịu cắt tối thiểu khi V_u vượt quá $\phi V_c / 2$. Yêu cầu này nhằm ngăn ngừa hoặc kiểm chế sự phá huỷ vì cắt trong các cấu kiện khi mà sự hình thành vết nứt đột ngột có thể dẫn đến nguy hiểm quá mức. Để ngăn ngừa phá huỷ giòn do cắt, cần có dự trữ cường độ thích hợp để đảm bảo một hệ số an toàn tương tự như các điều khoản của ACI 318-05 đối với cốt thép:

$$A_{fv, \min} = 0,35 \frac{b_w S}{f_{fv}} \quad (5-26)$$

với b_w và s bằng mm, f_{fv} bằng MPa.

Lượng cốt tối thiểu tính theo (5-26) không phụ thuộc cường độ bê tông. Nếu dùng đai thép, lượng cốt tối thiểu sẽ làm cho cường độ cắt biến đổi từ $1,50V_c$ khi f_c' là 17MPa đến $1,25V_c$ khi f_c' là 69MPa. Phương trình (5-26) suy từ cấu kiện bê tông cốt thép sẽ là an toàn hơn khi dùng với cấu kiện có cốt FRP. Chẳng hạn khi áp dụng vào cấu kiện uốn có cốt dọc chủ là FRP thủy tinh, cường độ cắt tính theo (5-26) có thể vượt quá $3V_c$. Tỷ số cường độ cắt tính theo (5-26) so với V_c sẽ giảm khi độ cứng của cốt dọc tăng hoặc cường độ bê tông tăng.

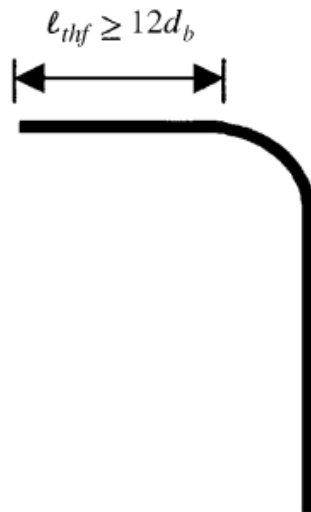
5.4.2.3 Phá huỷ vì cắt do bụng dầm bị ép võ. Nhiều nghiên cứu chứng tỏ rằng đối với cấu kiện có cốt FRP, sự chuyển tiếp từ cách phá huỷ do đứt cốt FRP sang phá huỷ vì ép võ bê tông xảy ra với giá trị trung bình của V_c là $0,3f_c' b_w d$, nhưng cũng có khi giảm thấp tới $0,18f_c' b_w d$. Khi V_c nhỏ hơn $0,18f_c' b_w d$, có thể sẽ là phá huỷ bởi kéo do cắt, trong khi nếu vượt quá $0,3f_c' b_w d$ thì sẽ có thể phá huỷ ép võ bê tông. Mối tương quan giữa phá huỷ đứt và phá huỷ ép võ chưa thật rõ ràng nên khuyến nghị dùng giới hạn của ACI 318-05 là $0,18\sqrt{f_c'} b_w d$ là an toàn hơn $0,3f_c' b_w d$.

5.4.3 Cấu tạo chi tiết của đai chịu cắt

Khoảng cách tối đa của đai thép đặt đứng theo ACI 318-05 là giá trị nhỏ hơn giữa $d/2$ hay 600 mm; khoảng cách này cũng áp dụng được cho cốt FRP đặt thẳng đứng. Giới hạn này đảm bảo mỗi vết nứt đều giao với ít nhất một đai.

Các thử nghiệm chỉ ra rằng với mẫu có r_b/d_b bằng không, các thanh sẽ phá huỷ do cắt tại chỗ uốn cong ở mức tải trọng rất thấp. Do đó, mặc dù có thể chế tạo được cốt FRP với góc uốn nhọn, nhưng cần tránh làm như vậy. Nên dùng tỷ số r_b/d_b tối thiểu là 3. Ngoài ra, đai FRP phải khép kín với móc có uốn góc 90 độ.

Các điều khoản của ACI 318-05 về lực dính của thanh thép có móc không thể áp dụng trực tiếp cho các thanh cốt FRP vì cơ tính của chúng khác nhau. Lực kéo trong nhánh của đai đặt thẳng đứng được truyền đến bê tông thông qua phần đuôi ở sau móc như H.6. Khi chiều dài đuôi l_{thf} lớn hơn $12d_b$, thì không có sự trượt đáng kể và không ảnh hưởng đến cường độ kéo của nhánh đai. Do đó, khuyến nghị dùng chiều dài đuôi tối thiểu là $12d_b$.



Hình 6– Chiều dài đuôi yêu cầu của đai FRP

5.4.4 Cường độ chịu cắt của bản bê tông cốt FRP làm việc hai phương

Nhiều thí nghiệm chứng tỏ rằng độ cứng dọc trục của cốt FRP cũng như cường độ bê tông f_c' là có ảnh hưởng đáng kể đến sự làm việc chịu cắt theo phương ngang của liên kết giữa cột trong và bản bê tông cốt FRP làm việc hai phương.

Thử nghiệm bản bê tông riêng rẽ có cốt FRP làm việc hai phương chịu tải trọng trọng lực phân bố đều cho thấy là việc tăng độ cứng của tấm thảm FRP đặt bên trên sẽ làm tăng khả năng chịu cắt xuyên thủng và làm giảm độ võng cực hạn của bản. Sự phá hủy về cắt xuyên thủng của bản có cốt thanh FRP là đột ngột và giòn. Ngược lại, kết quả các thử nghiệm xuyên thủng cho thấy bản hai phương có cốt là lưới FRP chứ không phải là thanh FRP sẽ không đột ngột sụt giảm tải trọng khi phá hủy xuyên thủng. Ngược lại, chúng tiếp tục hấp thụ năng lượng một cách ổn định sau khi đã phá hủy ban đầu.

Tính toán thống kê các kết quả thử nghiệm phát hiện rằng mô hình thiết kế chịu cắt của bản một phương có xét độ cứng của cốt có thể được điều chỉnh để xét đến sự truyền lực cắt trong bản hai phương. Việc điều chỉnh dẫn đến phương trình (5-27) có thể dùng để tính khả năng chịu cắt xuyên thủng đồng tâm của bản bê tông cốt FRP hai phương; bản tựa lên các cột trong hoặc chịu tải trọng tập trung có hình dạng vuông hay tròn:

$$V_c = \frac{4}{5} \sqrt{f'_c} \cdot b_0 c \quad (5-27)$$

trong đó b_0 = chu vi của tiết diện nguy hiểm của bản và đế móng, bằng mm; c = bề cao trục trung hòa của tiết diện đã biến đổi vì nứt, bằng mm.

Bề cao đến trục trung hòa của bản tính như sau:

$$c = kd$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$$

ρ_f = hàm lượng cốt FRP

Khi tính theo (5-27), b_0 ở sẽ tính tại khoảng $d/2$ từ mặt cột. Ngoài ra, hình dạng của mặt nguy hiểm của bản phải lấy giống như hình dạng của cột.

Phương trình (5-27) có thể viết lại thành (5-27a). Phương trình này chỉ là phương trình cơ bản của ACI 318-05 về cắt xuyên thủng đồng tâm của bản bê tông cốt thép, được điều chỉnh bằng hệ số $(5/2)k$ để xét độ cứng dọc trục của cốt FRP.

$$V_c = \left(\frac{5}{2} k \right) \cdot 4 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 c \quad (5-27a)$$

Phương trình (5-27) tạo một hệ số an toàn hợp lý cho bản đặt cốt FRP làm việc hai phương trong phạm vi các hàm lượng đặt cốt và các cường độ bê tông đã được thử nghiệm cho đến nay.

5.5. Các tính toán thiết kế kết cấu khác

5.5.1 Cốt chịu tác dụng của co ngót và biến thiên nhiệt độ

Cốt chịu tác dụng của co ngót và biến thiên nhiệt độ (sau đây gọi tắt là cốt chịu co ngót và cốt nhiệt độ) dùng để hạn chế bề rộng khe nứt. Độ cứng và cường độ của thanh cốt sẽ ảnh hưởng lớn đến chức năng này. Vết nứt do co ngót có phương vuông góc với nhịp cấu kiện được

không chế bởi cốt chịu uốn, như vậy cốt chịu co ngót và cốt nhiệt độ chỉ cần đặt theo phương vuông góc với nhịp. ACI 318-05 yêu cầu một hàm lượng cốt thép tối thiểu là 0,0020 khi dùng thép có gân cấp 40 hay 50 và 0,0018 khi dùng thép có gân cấp 60 hoặc cốt thép hàn (có gân hoặc trơn). ACI 318-05 cũng yêu cầu khoảng cách của các cốt chịu co ngót và cốt nhiệt độ không được quá 5 lần bề dày cấu kiện hoặc 500 mm.

Hiện nay chưa có các dữ liệu thực nghiệm đủ tin cậy cho hàm lượng tối thiểu cốt FRP chịu co ngót và nhiệt độ. ACI 318-05 mục 7.12.2 đã quy định đối với bản sử dụng cốt thép có giới hạn chảy vượt quá 414MPa tại biến dạng tỷ đối khi chảy 0,0035 thì tỷ số cốt thép trên diện tích nguyên của bê tông phải ít nhất là $0,0018 \times 60/f_y$, (f_y bằng ksi, hoặc $414/f_y$, f_y tính bằngMPa) nhưng không ít hơn 0,0014. Công thức này cũng có thể dùng lại với độ cứng và cường độ của cốt FRP chịu co ngót và cốt nhiệt độ. Do đó, khi dùng thanh gân FRP làm cốt chịu co ngót và cốt nhiệt độ, lượng cốt FRP có thể xác định theo phương trình (5-28):

$$\rho_{f,ts} = 0,0018 \cdot \frac{414 \cdot E_s}{f_{fu} \cdot E_f} \quad (5-28)$$

Do kinh nghiệm sử dụng còn hạn chế, nên hàm lượng cốt FRP chịu co ngót và nhiệt độ tính theo (5-28) không nên lấy nhỏ hơn 0,0014, tức là giá trị nhỏ nhất mà ACI 318-05 quy định cho cốt thép chịu co ngót và nhiệt độ. Người kỹ sư cũng có thể chọn giới hạn cao hơn, tới 0,0036, cho hàm lượng cốt FRP chịu co ngót và nhiệt độ hoặc tính toán hàm lượng dựa trên các mức biến dạng tương ứng với khả năng chịu uốn danh nghĩa mà không dùng các giá trị biến dạng tính theo (5-28). Khoảng cách của các cốt FRP chịu co ngót và nhiệt độ không được quá 3 lần bề dày bản hoặc 300 mm, lấy số nhỏ hơn.

5.5.2 Neo cốt FRP

Trong một cấu kiện chịu uốn bằng bê tông cốt thép hoặc cốt FRP, lực kéo trong cốt cân bằng với lực nén trong bê tông. Lực kéo được truyền cho cốt qua lực dính giữa cốt và bê tông bao quanh. Ứng suất dính tồn tại bất cứ khi nào lực kéo trong cốt thay đổi. Lực dính giữa cốt FRP và bê tông phát triển theo một cơ chế giống như đối với cốt thép và phụ thuộc vào loại FRP, mô đun đàn hồi, dạng gân bề mặt và hình dạng của thanh FRP.

5.5.2.1 Sự phát triển ứng suất trong thanh thẳng. Hình 7 thể hiện điều kiện cân bằng của một thanh FRP dài l_e chôn trong bê tông. Lực trong thanh được chống lại bởi ứng suất dính trung bình u tác dụng trên bề mặt thanh. Sự cân bằng lực có thể viết như sau:

$$l_e \pi d_b u = A_{f,bar} f_f \quad (5-29)$$

trong đó $A_{f,bar}$ là diện tích một thanh, d_b là đường kính thanh, và f_f là ứng suất triển khai trong thanh ở đầu cuối của chiều dài chôn. Khác với cốt thép, cường độ của thanh FRP không được tận dụng hết toàn bộ, đặc biệt là khi khả năng uốn bị khống chế bởi sự ép vỡ bê tông và ứng suất yêu cầu trong thanh tại lúc phá hủy nhỏ hơn nhiều so với cường độ cực hạn được bảo đảm của cốt. Ngoài ra, việc thay đổi từ cách thức phá hủy do thanh đứt hay bê tông vỡ sang cách thức phá hủy do lực dính không làm thay đổi đáng kể độ dẻo của kết cấu tại lúc phá hủy.



Hình 7 – Truyền lực qua sự dính

Phương trình tính chiều dài neo đối với cốt thép trong ACI 318-05 được dựa trên nhiều thí nghiệm các mối nối thép chôn trong bê tông, có và không có hạn chế nở ngang. Dùng phép hồi quy tuyến tính, đã nhận được một phương trình biểu diễn quan hệ giữa ứng suất dính trung bình được chuẩn hóa theo căn bậc hai của cường độ bê tông nén với lớp bảo vệ được chuẩn hóa tính đến tâm của thanh C/d_b và chiều dài nối chuẩn hóa d_b/l_e . Phương trình này được dùng làm cơ sở của phương trình tính chiều dài neo đối với cốt thép trong ACI 318-05.

Phương pháp nghiên cứu tương tự cũng được làm với nhiều mẫu thử dầm, thử mối nối với cốt FRP, đa số là cốt GFRP, gồm cả hai loại thanh xoắn ốc và thanh cốt gai, có hoặc không có cốt đai chống nở ngang. Dùng phép hồi quy tuyến tính, nhận được quan hệ dưới đây giữa ứng suất dính trung bình chuẩn hóa với lớp bảo vệ và chiều dài chôn chuẩn hóa, sau khi đã làm tròn các hệ số:

$$\frac{u}{0,083\sqrt{f'_c}} = 4,0 + 0,3\frac{C}{d_b} + 100\frac{d_b}{l_e} \quad (5-30)$$

trong đó C là số nhỏ hơn trong hai giá trị: bề dày lớp bảo vệ tính đến tâm thanh và một nửa khoảng cách (tâm đến tâm) giữa các thanh được neo. Bề mặt của thanh (thanh cuốn xoắn ốc hoặc thanh có gờ) cũng như việc có hay không có cốt chống nở ngang gần như không ảnh hưởng đến kết quả. Thí nghiệm đã cho thấy trong dầm bê tông cốt thép, khi cốt dọc là các thanh thép gân có diện tích gờ tương đối lớn thì các cốt chống nở ngang có tác dụng làm tăng lực dính nhiều hơn so với thanh thép cùng cỡ nhưng có diện tích gờ nhỏ hơn. Vì lý do đó, với thanh GFRP có diện tích gờ rất nhỏ nên cốt chống nở ngang có thể không làm tăng ứng suất dính trung bình. Tuy nhiên, ảnh hưởng của cốt chống nở ngang đối với lực dính của thanh GFRP vẫn cần được nghiên cứu thêm.

Dùng phương trình (5-29) và (5-30) có thể tính được ứng suất đạt được trong thanh khi đã cho chiều dài chôn và lớp bảo vệ. Nhiều dữ liệu thí nghiệm đã được sử dụng nhằm định ra một hệ số an toàn cho việc sử dụng các phương trình này với xác suất của tỷ số giá trị thí nghiệm trên giá trị dự tính nhỏ hơn 1,0 là 22%. Các dữ liệu đó bao gồm cả hai trường hợp phá hủy do tách vỡ bê tông và kéo tuột cốt, với chiều dài chôn tối thiểu là $19d_b$. Ngoài ra, một giá trị giới hạn là 3,5 được gán cho số hạng C/d_b để có thể dùng được phương trình trên để dự tính ứng suất phát triển trong thanh với cả hai cách phá hủy dính (tách vỡ bê tông hoặc tuột cốt). Khi lớp bảo vệ chuẩn hóa có giá trị trên 3,5 và chiều dài chôn lớn hơn $19d_b$ thì dạng phá hủy luôn luôn là tuột cốt. Khi đó biểu thức của ứng suất phát triển trong thanh là:

$$f_{fe} = \frac{0,083\sqrt{f'_c}}{\alpha} \left(13,6\frac{l_e}{d_b} + \frac{C.l_e}{d_b.d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (5-31)$$

trong đó số hạng C/d_b không được lấy lớn hơn 3,5 và α là hệ số xét đến vị trí của thanh (sẽ thảo luận ở mục 5.5.2.3). Trị trung bình của tỷ số ứng suất thanh thí nghiệm/ dự tính khi dùng phương trình này là 1,14 với hệ số biến động là 15,8%. Với chiều dài chôn lớn hơn

$100d_b$, phương trình này không thích hợp nữa vì dữ liệu thí nghiệm không thấy sự phá hủy về dính khi chiều dài chôn lớn hơn $100d_b$. Không nên dùng chiều dài chôn nhỏ hơn $20d_b$.

Khi áp dụng phương trình (5-31) vào thiết kế, cần giả thiết rằng ứng suất lớn nhất đạt được trong thanh biến đổi tuyến tính từ 0 đến giá trị tính theo (5-30) dọc theo $20d_b$ đầu tiên của chiều dài chôn. Sau điểm này, có thể dùng (5-31) để xác định ứng suất đạt được trong thanh dọc chiều dài chôn. Cần kiểm tra xác định xem khả năng chịu mô men tại điểm cuối của chiều dài chôn có được đảm bảo hay không. Nếu không đạt thì phải tăng chiều dài chôn, tăng số lượng thanh sao cho ứng suất trong mỗi thanh ở trạng thái cực hạn phải giảm xuống, hoặc tính lại khả năng chịu mô men danh nghĩa có xét đến khả năng phá hủy do dính như mô tả ở mục 5.5.2.4. Cần lưu ý rằng việc tăng số thanh có thể làm giảm ứng suất trong các thanh, vì số hạng C/d_b giảm khi khoảng cách thanh giảm.

5.5.2.2 Hệ số điều chỉnh do vị trí thanh. Hệ số điều chỉnh do vị trí thanh mặc định là 1, 0.

Khi đổ bê tông, không khí, nước và các hạt nhỏ di chuyển lên phía trên ngang qua bê tông. Điều này có thể làm giảm đáng kể cường độ dính bên dưới cốt nằm ngang. Thuật ngữ “cốt trên đỉnh” thường để chỉ thanh cốt nằm ngang có lớp bê tông bên dưới dày hơn 305mm (12inch) tại lúc chôn vào bê tông. Các thí nghiệm với cốt trên đỉnh có chiều dài chôn lớn hơn $16d_b$ cho kết quả là phá hủy do dính. Căn cứ vào các dữ liệu này, đối với thanh có hơn 300 mm bê tông bên dưới, α trong phương trình (5.31) nên lấy là 1,5.

5.5.2.3 Hệ số điều chỉnh vật liệu. Số liệu thí nghiệm (tuy còn hạn chế) cho thấy chiều dài neo của các thanh AFRP cũng gần tương tự như của các thanh GFRP. Do đó, các phương trình về chiều dài neo cũng dùng được với thanh AFRP mà không cần thêm hệ số điều chỉnh vật liệu. Còn đối với các thanh CFRP, do có độ cứng lớn hơn nhiều nên chiều dài neo cần thiết cũng như hệ số điều chỉnh vật liệu có thể lấy giảm xuống. Hiện tại, do chưa đủ số liệu thí nghiệm đối với thanh CFRP, nên khuyến nghị vẫn dùng hệ số vật liệu là 1,0.

5.5.2.4 Khả năng chịu mômen danh nghĩa trên tiết diện nguy hiểm về lực dính. Tiết diện được coi là nguy hiểm về lực dính là tiết diện mà tại đó ứng suất lớn nhất đạt được trong thanh FRP bị giới hạn bởi phương trình (5-31). Trong trường hợp này, khả năng chịu mômen danh nghĩa cần được tính toán lại theo điều chỉnh của phương pháp đã mô tả ở Mục 5.3.2. Khi trị số ứng suất có thể phát triển trong thanh bị hạn chế bởi lực dính, hai cách thức phá hủy có thể xảy ra là vỡ bê tông và hỏng do bám dính. Khả năng chịu mômen đối với trường hợp phá hủy vỡ bê tông có thể tính toán theo phương trình (5-8). Phương trình này được áp dụng nếu ứng suất có thể xuất hiện trong thanh (f_{fe} xác định từ (5-31)) lớn hơn hay bằng ứng suất trong thanh được xác định theo (5-7d). Khi $\rho < \rho_{fb}$ hoặc $\rho > \rho_{fb}$ và ứng suất yêu cầu trong thanh theo phương trình (5-7d) không thể đạt được thì khả năng chịu mômen đối với trường hợp phá hủy do bám dính có thể được xác định bằng phương trình (5-9b), trong đó f_{fe} từ phương trình (5-31) sẽ thay thế cho f_{fu} và f_{fe}/E thay thế cho ϵ_{fu} trong (5-9c). Một hệ số giảm cường độ uốn bằng 0,55 được khuyến nghị áp dụng đối với trường hợp phá hủy do bám dính.

5.5.3 Chiều dài neo của thanh uốn

Các điều khoản của ACI 318-05 về chiều dài neo của thanh thép có móc không áp dụng được cho thanh FRP vì các đặc trưng vật liệu khác nhau.

Dựa trên kết quả thí nghiệm với các thanh FRP có móc, một biểu thức cho chiều dài neo l_{bhf} của thanh uốn móc 90° được đề xuất như sau:

$$l_{bhf} = K_4 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} \quad (5-32)$$

Hệ số K_4 để tính chiều dài neo trong phương trình này lấy bằng 150 đối với thanh có f_{fu} nhỏ hơn 517MPa. Hệ số này cần phải nhân với $f_{fu}/517$ đối với các thanh có cường độ kéo ở giữa 517MPa và 1034MPa.

Khi lớp bảo vệ phía hai bên (vuông góc với mặt phẳng của móc) lớn hơn 64 mm và lớp bảo vệ phía đầu móc không nhỏ hơn 50 mm thì có thể nhân thêm với hệ số 0, 7. Các hệ số điều chỉnh này cũng tương tự như các hệ số trong ACI 318-05, mục 12.5.3 cho các thanh thép có móc. Các phương trình (5-33) dưới đây đã được đề xuất để tính chiều dài neo của các thanh có móc:

$$l_{bhf} = \begin{cases} 165 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{khi } f_{fu} \leq 520\text{MPa} \\ 3,1 \frac{f_{fu}}{\sqrt{f'_c}} \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{khi } 520 < f_{fu} < 1040\text{MPa} \\ 330 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{khi } f_{fu} \geq 1040\text{MPa} \end{cases} \quad (5-33)$$

trong đó l_{bhf} tính bằng mm, f_{fu} và f'_c bằng MPa và d_b bằng mm.

Giá trị tính được theo (5-33) không được nhỏ hơn $12d_b$ hay 230 mm. Các trị số này là dựa trên những kết quả thí nghiệm cho thấy lực kéo và sự chống trượt của thanh có móc là có trị số ổn định xung quanh giá trị $12d_b$. Chiều dài của đuôi móc, l_{thf} (hình 6), không được nhỏ hơn $12d_b$. Chiều dài lớn hơn của đuôi móc có ảnh hưởng không đáng kể đến lực kéo cực hạn và sự chống trượt của móc. Để tránh sự phá hủy do cắt tại chỗ uốn, bán kính uốn không nên lấy nhỏ hơn $3d_b$.

5.5.4 Chiều dài neo của cốt chịu mômen dương

Nói chung, các yêu cầu của Mục 12.10 và 12.11 của ACI 318-05 phải được tuân theo đối với cốt FRP với những thay đổi như sau: đối với thanh thẳng, ứng suất đạt được trong thanh f_{fr} sẽ là trị số nhỏ nhất giữa f_{fu} , ứng suất cho bởi phương trình (5-4d), và ứng suất cho bởi phương trình (5-31). Chiều dài neo đối với thanh thẳng được xác định như là chiều dài bám dính cần thiết để đạt được trị số ứng suất f_{fr} và cho bởi:

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0,083 \cdot \sqrt{f_c}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (5-34)$$

Do có hệ số giảm cường độ so với thép, nên quy định cho chiều dài neo của cốt chịu mômen dương tại các điểm uốn và gối tựa đơn giản cho trong ACI 318-05 (Mục 12.11.3) phải được đổi thành:

$$l_d \leq \frac{\phi M_n}{V_u} + l_a \quad (5-35)$$

trong đó M_n là khả năng chịu mômen danh nghĩa với giả thiết là mọi thanh cốt tại tiết diện đều đạt ứng suất bằng ứng suất yêu cầu của thanh f_{fr} ; V_u là lực cắt tính toán tại tiết diện; và l_a là đoạn chôn kéo qua tâm gối tựa, nếu xét tại gối tựa hoặc l_a lấy bằng trị số lớn hơn giữa hai trị số: bề cao hữu hiệu của cầu kiện và $12d_b$, nếu xét tại điểm uốn. Giá trị $\phi M_n/V_u$ có thể tăng lên 30% khi các điểm cuối của thanh cốt chịu ảnh hưởng của phản lực nén. Yêu cầu về chiều dài neo nói trên có thể không cần phải tuân thủ nếu như các tính toán chi tiết chứng tỏ rằng khả năng chịu mô men của tiết diện lớn hơn các trị số mô men tính toán trên suốt chiều dài neo.

5.5.5 Mỗi nối chồng chịu kéo

ACI 318-05 Mục 12.15 phân biệt hai loại mỗi nối chồng chịu kéo tùy thuộc vào số lượng các thanh được nối trên một đoạn dài định sẵn và vào ứng suất trong các thanh trong phạm vi mỗi nối. Đối với cốt thép, chiều dài mỗi nối chồng loại A là $1,0l_d$ và loại B là $1,3l_d$. Sự phân loại này áp dụng không hợp cho FRP vì không bao giờ sử dụng hết toàn bộ cường độ chịu kéo của thanh. Tuy nhiên để tăng mức độ an toàn nên các mỗi nối đều lấy theo loại B. Chiều dài neo tối thiểu này cũng đã được kiểm chứng qua thí nghiệm nối chồng đối với cốt FRP chịu kéo. Vì vậy trị số $1,3l_d$ có thể dùng được cho tất cả các mỗi nối chồng.

5.5.6 Bản đặt trên đất

5.5.6.1 Bản bê tông không đặt cốt. Bản bê tông không cốt đặt trên đất truyền trực tiếp tải trọng xuống đất nền, nên gần như không chịu lực, chỉ cần được thiết kế để không bị nứt dưới tải trọng sử dụng. Để làm giảm nứt do co ngót, phải hạn chế khoảng cách giữa các khe co ngót và khe thi công (mạch ngừng). Chi tiết thiết kế bản bê tông không cốt có thể tham khảo ACI 360R (Thiết kế bản đặt trên đất).

5.5.6.2 Bản bê tông có cốt chịu co ngót và cốt nhiệt độ. Khi thiết kế một bản bê tông có cốt chịu co ngót và cốt nhiệt độ, cần coi nó như bản bê tông không có cốt để xác định bề dày. Bản được giả thiết là không nứt khi có tải trọng sử dụng đặt lên trên mặt. Bề rộng và khoảng cách các vết nứt co ngót được hạn chế bởi một lượng danh nghĩa cốt FRP phân bố đặt tại nửa trên của bản. Mục đích chủ yếu của cốt chịu co ngót là khống chế bề rộng của mọi vết nứt hình thành giữa các khe. Cốt chịu co ngót không ngăn được nứt, cũng không làm tăng đáng kể khả năng chịu uốn của bản. Tăng bề dày bản có thể tăng được khả năng chịu uốn.

Mặc dù bản được thiết kế để không nứt khi chịu tải trọng sử dụng, các thanh cốt vẫn được dùng để hạn chế khoảng cách và bề rộng vết nứt, cho phép tăng khoảng cách giữa các khe (co ngót và thi công), tăng khả năng truyền tải tại các khe và tạo thêm mức độ an toàn sau khi xảy ra nứt do co ngót và nhiệt độ.

Phương pháp biến dạng nền thường được dùng để xác định lượng cốt chịu co ngót và nhiệt độ không căng trước, nhưng không áp dụng được khi các sợi được căng trước hoặc sợi bố trí không có quy luật. Khi dùng cốt thép, phương trình theo phương pháp nói trên là:

$$A_s = \frac{\mu LW}{2 \cdot f_s} \quad (5-36)$$

trong đó:

A_s = diện tích tiết diện thép trên mét dài, mm²/m;

f_s = ứng suất cho phép của cốt thép, MPa, thường lấy bằng 2/3 đến 3/4 của f_y ;

μ = hệ số ma sát nền (1, 5 đối với bản sàn trên đất);

L = khoảng cách giữa các khe, m;

w = trọng lượng bản thân của bản, N/m² (thường giả thiết bằng 24 N/m² cho một mm bề dày bản).

Vì mô đun đàn hồi của cốt FRP thấp hơn cốt thép, nên khi thiết kế cốt FRP chịu co ngót và nhiệt độ, phương trình chủ đạo nên dựa vào biến dạng chứ không dựa vào mức ứng suất. Tại ứng suất cho phép, biến dạng trong cốt thép là xấp xỉ 0,0012; sử dụng giá trị biến dạng này vào cốt FRP sẽ có ứng suất là $0,0012E_f$ và phương trình (5-36) được viết thành.

$$A_{f,sh} = \frac{\mu LW}{2(0,0012 \cdot E_f)} \quad (5-37)$$

trong đó $A_{f,sh}$ là diện tích tiết diện của cốt FRP, mm² trên mét dài.

Phương trình (5-37) cũng có thể dùng để tính khoảng cách L giữa các khe ứng với một lượng cốt FRP đã định trước. Hiện nay chưa có các dữ liệu thí nghiệm công bố về bản bê tông đặt trên đất sử dụng cốt FRP, nên phương pháp tính này cần được nghiên cứu, kiểm chứng thêm.

6. Tóm tắt quy trình tính toán cốt FRP

6.1 Dữ liệu đầu bài ban đầu:

- + Kích thước tiết diện cấu kiện : $b \times h$
- + Thông số về bê tông : cường độ chịu nén f'_c ; biến dạng cực hạn ϵ_{cu} ; mô đun đàn hồi E_c
- + Thông số về cốt FRP : cường độ chịu kéo f_{fu}^* ; biến dạng cực hạn ϵ_{cu}^* ; mô đun đàn hồi E_f
- + Điều kiện tiếp xúc với môi trường của cốt FRP (điều kiện phơi lộ)
- + Sơ đồ kết cấu và các giá trị tĩnh tải, hoạt tải (ngắn hạn và dài hạn)

6.2 Các bước tính toán

6.2.1 Kiểm tra khả năng chịu mô men uốn:

+ Tính ứng suất thiết kế f_{fu} và biến dạng ϵ_{fu} của thanh FRP :

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* ; \quad \epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

Tình trạng bị phơi lộ	Loại sợi	Hệ số giảm do môi trường C_E
Bê tông không phơi lộ ra đất và thời tiết	Cacbon	1,0
	Thủy tinh	0,8
	Aramit	0,9
Bê tông bị phơi lộ ra đất và thời tiết	Cacbon	0,9
	Thủy tinh	0,7
	Aramit	0,8

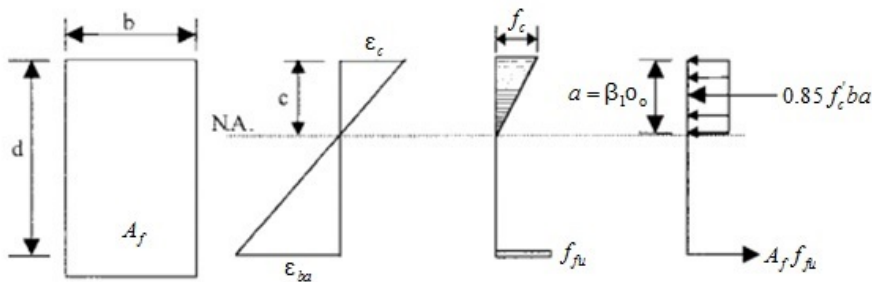
+ Xác định hàm lượng cốt FRP cân bằng : $\rho_{fb} = 0.85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$

+ Lựa chọn đường kính cốt dọc, cốt đai, số lượng thanh cốt FRP cần bố trí cho cầu kiện

+ Xác định hàm lượng cốt dọc FRP đã bố trí : $\rho_f = \frac{A_f}{bd}$

+ Xác định khả năng chịu mô men uốn giới hạn :

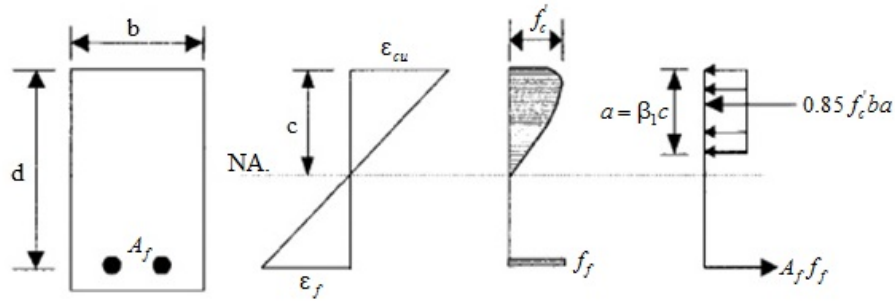
~Nếu $\rho_f < \rho_{fb}$, cơ chế phá hoại do đứt thanh FRP trước khi bê tông bị nén vỡ (underreinforced).



- Giá trị $c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d \rightarrow a = \beta_1 c_b$

- Khả năng chịu mô men uốn giới hạn $M_n : M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{a}{2} \right)$

~ Nếu $\rho_{fb} > \rho_f$, cơ chế phá hoại do sự nén vỡ bê tông trước khi đứt thanh FRP (overreinforced)



- Giá trị ứng suất của thanh FRP:

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right]$$

- Giá trị $a = \frac{A_f f_f}{0,85 f_c' b}$

- Khả năng chịu mô men uốn giới hạn M_n : $M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$

+ Hệ số giảm khả năng chịu lực :

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{khi } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{khi } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 & \text{khi } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases}$$

+ Kiểm tra khả năng chịu mô men uốn : $\phi M_n \geq M_u$

6.2.2 Kiểm tra điều kiện hạn chế về vết nứt :

+ Xác định mô men tiêu chuẩn: M_{DL+LL}

+ Xác định: $n_f = \frac{E_f}{E_c}$

+ Giá trị : $k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$

+ Ứng suất của cốt FRP : $f_f = \frac{M_{DL+LL}}{A_f d (1 - k/3)}$

+ Giá trị gradien biến dạng tỷ đối : $\beta = \frac{h - kd}{d(1 - k)}$

+ Tính khoảng cách từ thớ biên chịu kéo của bê tông đến trọng tâm của cốt chịu uốn :

$$d_c = h - d$$

+ Khoảng cách giữa các thanh cốt dọc : s

+ Giá trị bề rộng khe nứt : $w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2} \right)^2}$

+ So sánh bề rộng khe nứt w với bề rộng khe nứt giới hạn

6.2.3 Kiểm tra điều kiện hạn chế về độ võng :

+ Tính mômen quán tính nguyên của tiết diện : $I_g = \frac{bh^3}{12}$

+ Giá trị ứng suất nứt : $f_r = 0,62\sqrt{f'_c}$

+ Mô men nứt : $M_{cr} = \frac{2f_r I_g}{h}$

+ Mô men quán tính nứt : $I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2$

+ Hệ số điều chỉnh β_d : $\beta_d = \frac{1}{5} \frac{\rho_f}{\rho_{fb}}$

+ Mô men quán tính hữu hiệu : $(I_e)_{DL+LL} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr}$

+ Độ võng do tổng tải trọng tĩnh tải và hoạt tải: $(\Delta_i)_{DL+LL} = \alpha \frac{M_{DL+LL} l^2}{E_c (I_e)_{DL+LL}}$

với α là hệ số tính toán độ võng phụ thuộc vào dạng sơ đồ kết cấu

+ Độ võng do riêng tĩnh tải : $(\Delta_i)_{DL} = \frac{W_{DL}}{W_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL}$

+ Độ võng do riêng hoạt tải : $(\Delta_i)_{LL} = \frac{W_{LL}}{W_{DL+LL}} (\Delta_i)_{DL+LL}$

+ Hệ số ảnh hưởng của thời gian : $\lambda = 0,60.\xi$

+ Độ võng dài hạn $\Delta_{LT} = (\Delta_i)_{LL} + \lambda[(\Delta_i)_{DL} + \varphi_{LT}(\Delta_i)_{LL}]$

với φ_{LT} là tỷ lệ phần trăm (%) của hoạt tải dài hạn

+ So sánh độ võng với độ võng giới hạn

6.2.4 Kiểm tra ứng suất giới hạn do tác dụng của tải biến :

+ Tính mô men do tải trọng dài hạn : $M_s = \frac{W_{DL} + \varphi_{LT} \cdot W_{LL}}{W_{DL+LL}} M_{DL+LL}$

+ Ứng suất dài hạn trong thanh FRP : $f_{f,s} = \frac{M_s}{A_f d (1-k/3)}$

+ So sánh nếu $f_{f,s} < 0,2f_{fu} \rightarrow$ thỏa mãn.

6.2.5 Tính toán cốt FRP chịu cắt :

+ Xác định lực cắt đã tính toán tại khoảng cách “d” tính từ gối tựa V_u

+ Khả năng chịu cắt của bê tông : $V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w k d$

+ Ứng suất cho phép trong đai tại chỗ uốn cong : $f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{fu}$

+ Ứng suất thiết kế của đai : $f_{fv} = \min(0,004E_f; f_{fb})$

+ Diện tích của 1 lớp cốt đai A_{fv}

+ Khoảng cách yêu cầu của cốt đai FRP : $s_u = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{(V_u - \phi V_c)}$

với ϕ là hệ số giảm khả năng chịu lực khi tính cốt đai

+ Khoảng cách cốt đai cấu tạo : $s_{ct} = \min(d/2 ; 600mm)$

+ Khoảng cách cốt đai lớn nhất: $s_{max} = \frac{A_{fv} f_{fv}}{0,35b_w}$

+ Khoảng cách cốt đai cần thiết : $s = \min(s_{tb}; s_{ct}; s_{max})$

6.2.6 Kiểm tra về điều kiện neo cốt FRP:

+ Chọn chiều dài neo l_e dự kiến cho thanh FRP

+ Xác định ứng suất thanh có thể triển khai với chiều dài neo l_e đã bố trí :

$$f_{fe} = \frac{0,083\sqrt{f_c'}}{\alpha} \left(13,6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{c}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 340 \right)$$

+ Nếu $f_{fe} > f_f$ (ứng suất f_f khi tính toán khả năng chịu mô men uốn) → thỏa mãn yêu cầu về neo cốt thép !
