

論文 既存 RC 橋脚の曲げ耐力向上型補強におけるアンカー筋と炭素繊維グリッドとの継手性能について

宮内 克之*1・下枝 博之*2

要旨: 道路橋橋脚の曲げ耐力の向上を目的として、躯体基部塑性域にはアンカー筋を設置し、それに続く躯体部には補強による断面増し厚量をできるだけ小さくするために炭素繊維グリッドを配置して、ポリマーセメントモルタルを乾式で吹き付ける補強方法の開発を行なった。この補強方法における、アンカー筋と炭素繊維グリッドの継手部分を模したはり試験体を用いた載荷試験を行い、アンカー筋と炭素繊維グリッドの継手性能について検討した。その結果、アンカー筋と炭素繊維グリッドとの継手性能は、継手設計断面からのアンカー筋の定着長として鉄筋径の 20 倍程度確保すれば十分であることなどが明らかとなった。

キーワード: 炭素繊維グリッド, 乾式吹付け, 耐震補強, 曲げ補強, 継手

1. はじめに

著者らは、これまでに炭素繊維グリッド（以下、CFG）と耐久性の良いポリマーセメントモルタル（以下、PCM）の乾式吹付け工法を併用した既存 RC 道路橋橋脚の耐震補強方法の開発を行なってきた¹⁾。しかしながら、CFG を用いて曲げ耐力の向上を図る場合には、CFG を直接基礎コンクリート中に定着することが困難なこと、橋脚躯体基部の塑性域に CFG が配置されるなど、問題点が多く存在する。そこで、躯体基部塑性域には曲げ耐力の向上を目的としたアンカー筋を設置し、それに続く躯体部には補強による断面増し厚量をできるだけ小さくするために CFG を配置して、PCM を乾式で吹き付ける補強方法（以下、提案工法：図-1 参照）の開発を行った²⁾。しかし、この提案工法においては、アンカー筋と CFG の継手性能をいかにして確保するかということが極めて重要な事項である。

本論文は、既存 RC 道路橋橋脚を提案工法によって補強する場合を想定し、アンカー筋と CFG の継手部分を模したはり試験体を用いた載荷試験を行い、アンカー筋と CFG の継手性能について論じたものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験計画を表-1 に、鋼材等の力学的特性を表-2 に、はり実験時材齢におけるコンクリートおよび PCM の力学的特性を表-3 に示す。また、試験体の概要および継手部の詳細を図-2 に示す。

実験要因はアンカー筋の径（A シリーズ：D25, B シリーズ：D19）、継手設計断面の位置からのアンカー筋の定着長（以下、定着長、 $10\phi, 20\phi, \phi$ ：アンカー筋の呼び

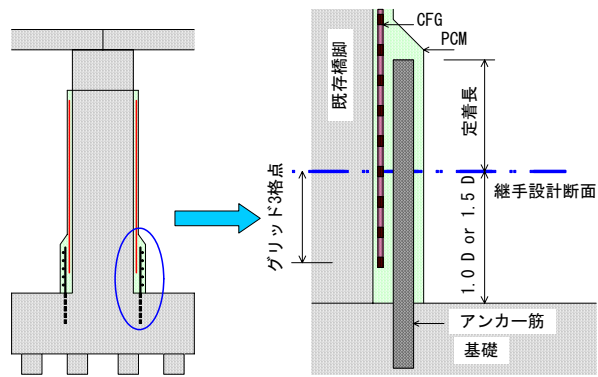


図-1 提案工法における継手部の概要

表-1 実験計画

シリーズ	試験体	アンカー筋	CFG	定着長 (mm)	継手長(mm)	横拘束筋	横拘束筋の体積比 ρ_s
A	D25C16S7	D25	CFG-16 断面積： 100.0 mm ²	10 ϕ	20 ϕ	D10-100 mm	0.0071
	D6-75 mm					0.0042	
	D25C16L7			20 ϕ	30 ϕ	D10-100 mm	0.0071
						D6-75 mm	0.0042
B	D19C13S7	D19	CFG-13 断面積： 65.0 mm ²	10 ϕ	20 ϕ	D10-100 mm	0.0071
	D6-75 mm					0.0042	
	D19C13L7			20 ϕ	30 ϕ	D10-100 mm	0.0071

*1 福山大学 工学部 建築・建設学科 教授 博士（工学）（正会員）

*2 (株) クリテック・ジャパン 代表取締役

径) および継手部分の横拘束筋の体積比 (ρ_s : 0.0071, 0.0042) である。

アンカー筋として D25 または D19 を 2 本配置し、アンカー筋に続く CFG には、アンカー筋が負担すべき引張力を、余裕を持って負担できる断面積のものを配置した。CFG には格子間隔が 100 mm のものを使用した。継手設計断面からの CFG の定着長は原則的にグリッド 3 格点³⁾とした。アンカー筋と CFG との継手部の全長は、 20ϕ または 30ϕ とした。継手部におけるアンカー筋と CFG との純間隔は、26~31 mm である。

継手の範囲には、継手性能の確保を目的に、横拘束筋として D10-100 mm 間隔または D6-75 mm 間隔の溶接フープ筋を配置した。また、加力による圧縮側コーナー部での横拘束筋の変形等による拘束効果の低下を抑えるために、横拘束筋は圧縮側コーナー部に配置した L 型钢材に溶接した(写真-1 参照)。道路橋示方書⁴⁾に基づいて算定したこれらの横拘束筋の体積比は、 $\rho_s=0.0071$ (D10-100 mm) および $\rho_s=0.0042$ (D6-75 mm) である。これは、実際の補強においては、D22-100 mm/幅 2m および

表-2 鋼材等の力学的特性

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D25 (SD345)	399	589	200*
D19 (SD345)	384	582	200*
D16 (SD345)	411	578	200*
D10 (SD345)	380	546	200*
D6 (SD295A)	424	628	180
CFG-16	—	1,400**	100**
CFG-13	—	1,400**	100**

* : コンクリート標準示方書による設計用値⁵⁾

** : カタログ値

表-3 コンクリートおよび PCM の力学的特性

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	30.3	2.18	25.5
PCM	79.8	5.98	33.4

・コンクリート：呼び強度「24」のレディーミクストコンクリート使用

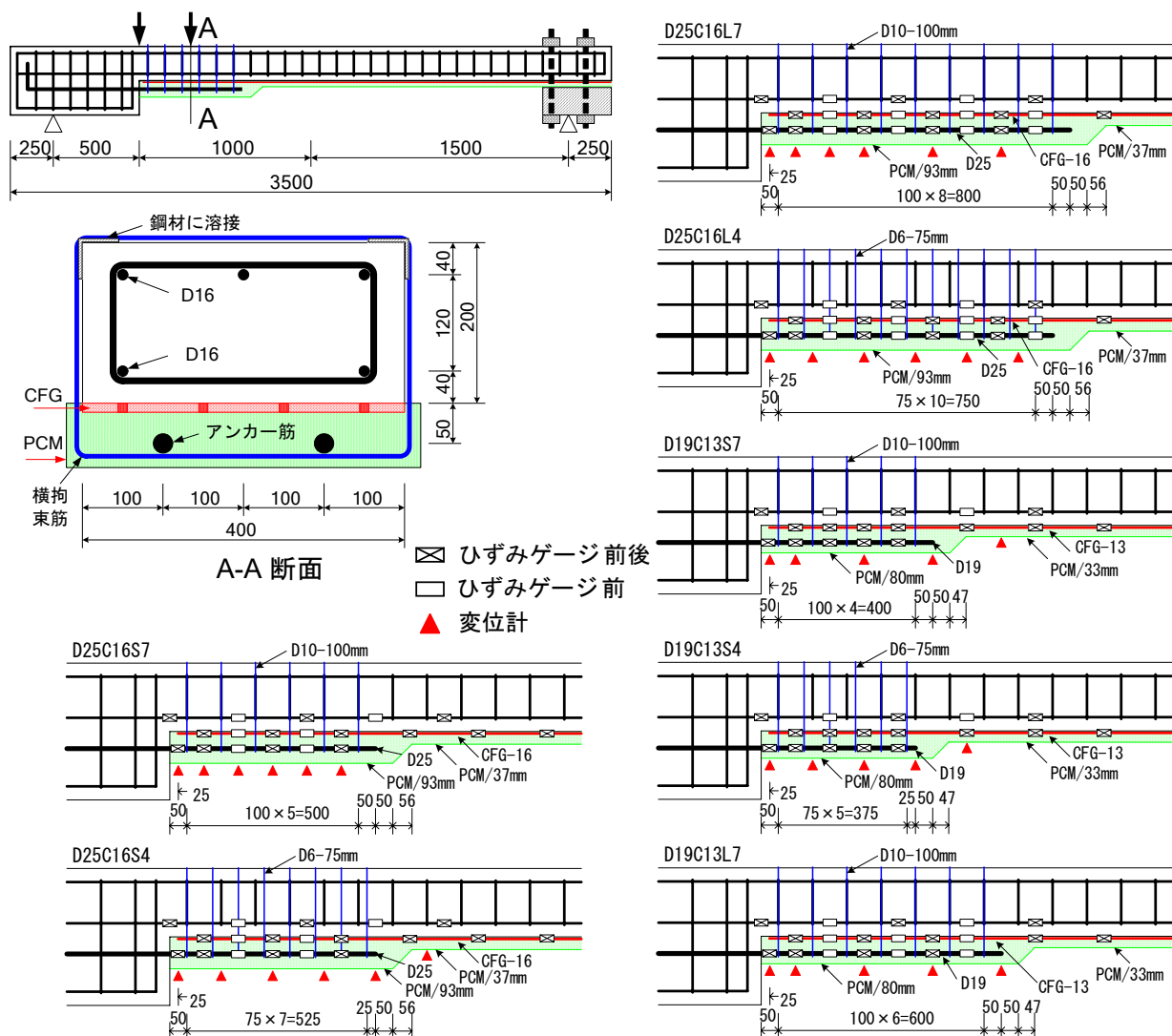


図-2 試験体の概要および継手部の詳細 (単位: mm)

D16-100 mm/幅 2m にほぼ相当する横拘束筋の体積比である。PCM の吹付け厚さは、CFG のみ設置した部分では CFG のかぶり厚 15 mm とした。継手部では、横拘束筋のかぶり厚を 10 mm とした。

2.2 実験方法

実験は単純支持状態における 2 点载荷とした。载荷は単調増加とし、所定の段階においてひび割れ状況等を観察した。アンカー筋、CFG のひずみを電気抵抗線式ひずみゲージにより測定した。また、継手部における平均曲率を算定するために、変位計を用いて所定の位置のたわみ量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

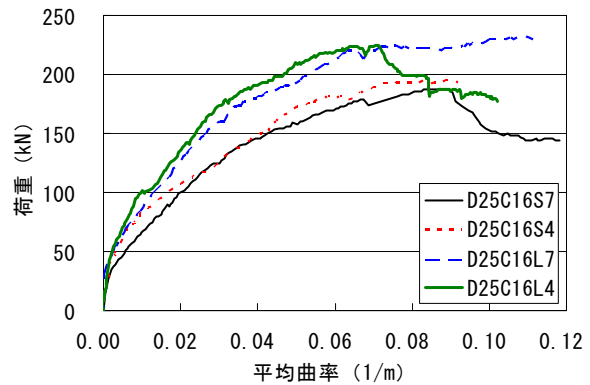
図-3 は、荷重とアンカー筋の先端から 10φ の位置(継手設計位置からのアンカー筋の定着長 10φ に相当する)における平均曲率との関係を示したものである。荷重とアンカー筋の先端から 20φ の位置における平均曲率との関係も、ほとんど同じとなったので、ここでは荷重とアンカー筋の先端から 10φ の位置における平均曲率との関係を示す。

平均曲率は以下のようにして求めた。すなわち、継手部に設置した複数の変位計によるたわみ量に、最小二乗法を適用して求めたたわみの近似曲線(二次放物線)に式(1)で表される曲率の定義式を適用し、アンカー筋の先端から所定の位置における平均曲率を算定した。以下の平均曲率についても同様の手法により算定した。

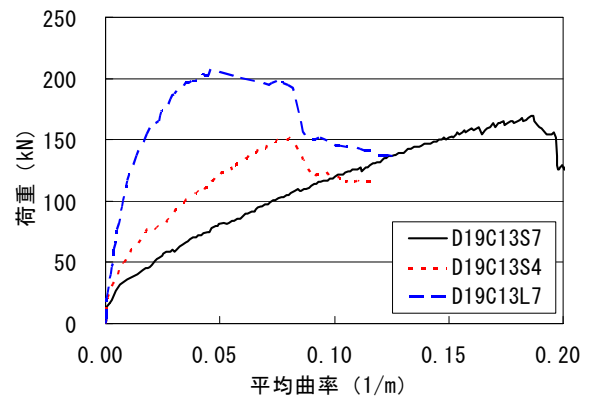
$$\phi = \frac{d^2y}{dx^2} / \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

本研究で使用している試験体は、スパン途中で断面形状が変化している。すなわち、曲げに対する剛性が変化しており、2 点の载荷点において荷重の偏心が想定され、試験体の変形が大きくなればなるほど、その偏心の度合いは大きくなるものと思われる。しかも剛性の変化点が試験体によって異なっている。したがって、断定的なことは言えないが、図-3 から以下のことが推察される。

A シリーズ(アンカー筋 D25, CFG-16)に関してみると、アンカー筋の定着長を 10φ とした試験体 D25C16S7, D25C16S4 に比較して、アンカー筋の定着長を 20φ とした試験体 D25C16L7, D25C16L4 のほうが、同一荷重に対する平均曲率が小さいことがわかる。また、最終的な負担荷重も定着長を 20φ とした試験体 D25C16L7, D25C16L4 のほうが大きくなった。これは、アンカー筋の定着長が長くなることによって、アンカー筋と CFG との継手が十分に機能していることを窺わせる。



(a) A シリーズ : アンカー筋 D25, CFG-16



(b) B シリーズ : アンカー筋 D19, CFG-13

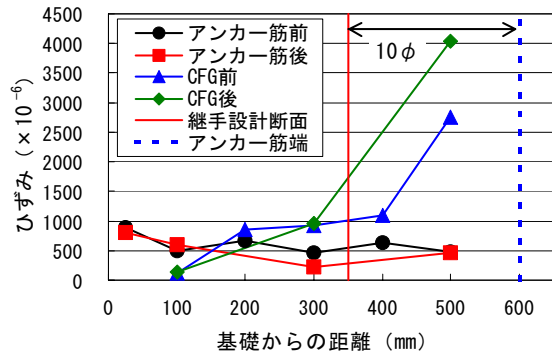
図-3 荷重～平均曲率関係

B シリーズ(アンカー筋 D19, CFG-13)に関して、アンカー筋の定着長を 10φ とした試験体 D19C13S7, D19C13S4 を比較すると、横拘束筋の体積比が大きい試験体 D19C13S7 のほうが、同一荷重に対する平均曲率が大きくなった。また、定着長を 20φ とした試験体 D19C13L7 のほうが定着長を 10φ とした試験体 D19C13S7, D19C13S4 よりも最終的な負担荷重が大きくなった。これは、A シリーズの場合と同様、アンカー筋の定着長が長くなることによって、アンカー筋と CFG との継手が十分に機能していることを表しているものと考えられる。

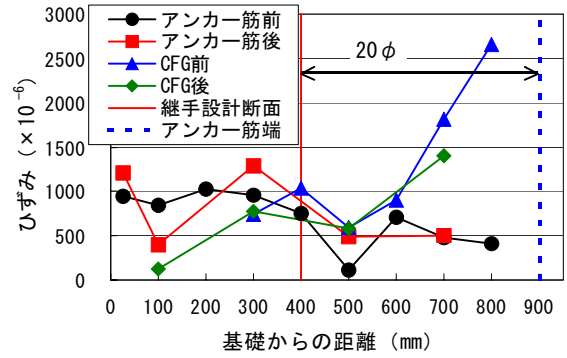
3.2 継手部におけるひずみの分布

図-4, 5 は、継手部におけるアンカー筋と CFG のひずみ分布の様子を継手部における平均曲率が 0.02(1/m)および最大荷重時に関して示したものである。一例として、継手長が短く横拘束筋の体積比が少ない D25C16S4, および継手長が長く横拘束筋の体積比が多い D25C16L7 を採り上げた。

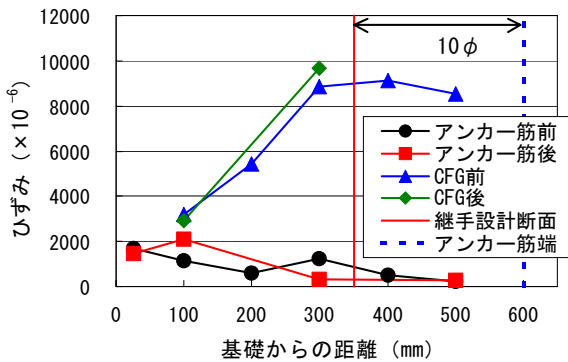
アンカー筋が D25 で定着長 10φ を想定した $\rho_s=0.042$ の試験体 D25C16S4 の場合(図-4), 平均曲率 0.02(1/m)においては継手部においてアンカー筋から CFG に力がスムーズに伝わっている様子を見て取ることができる。



(a) 平均曲率 : 0.02 (1/m)

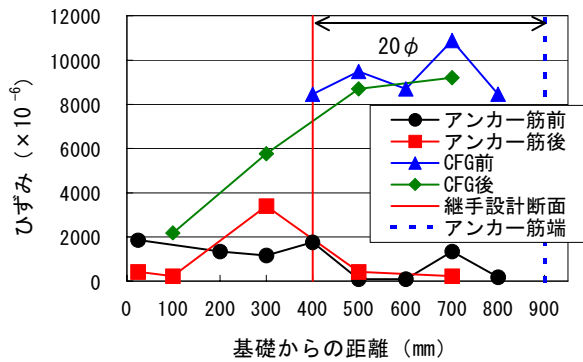


(a) 平均曲率 : 0.02 (1/m)



(b) 最大荷重時 : 平均曲率 ; 0.074 (1/m)

図-4 継手部のひずみ分布 : D25C16S4



(b) 最大荷重時 : 平均曲率 ; 0.104 (1/m)

図-5 継手部のひずみ分布 : D25C16L7

しかし、最大荷重時（平均曲率 0.074(1/m)）になると、継手設計断面において、アンカー筋のひずみが十分に発現していない。すなわち、継手が必ずしも十分に機能していないことを窺わせる。

一方、アンカー筋が D25 で定着長 20ϕ を想定した $\rho_s = 0.071$ の試験体 D25C16L7 の場合（図-5）、最大荷重時（平均曲率 0.104(1/m)）においても、継手設計断面において、アンカー筋のひずみが十分に発現しており、継手が十分に機能していることがわかる。

なお、同一断面においてアンカー筋のひずみに比べて CFG のひずみが特に大きくなっているのは、例えば曲げひび割れが発生した際、CFG の場合、はり軸方向に対して直交方向の CFG 横筋によって CFG 縦筋の伸びが拘束され、ひずみが局所化するためである。

また、曲げひび割れの発生および進展に伴う CFG のひずみが十分に増大していることより、CFG の定着長としてグリッド 3 格点で十分と考えられる。

3.3 継手性能の評価

各試験体の継手設計断面に近いひずみゲージ貼付位置における継手性能の評価結果の一覧を表-4 に示す。

アンカー筋が負担する引張力 T_a は、2 本のアンカー筋に貼り付けられたひずみゲージの値の平均値に弾性係数と断面積を掛けて算定した。同様に、CFG が負担する引

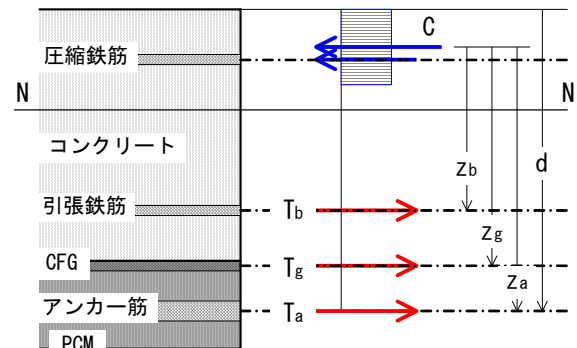


図-6 モーメントの算定図

張力 T_g は、CFG の 2 本の軸方向筋に貼り付けられたひずみゲージの値の平均値に弾性係数と断面積を掛けて算定した。

$$\begin{aligned} T_a &= A_a \cdot E_a \cdot (\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a2}) / 2 \\ T_g &= A_g \cdot E_g \cdot (\varepsilon_{g1} + \varepsilon_{g2}) / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 A_a, A_g : アンカー筋および CFG の断面積、 E_a, E_g : アンカー筋および CFG の弾性係数、 $\varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}$: アンカー筋のひずみ、 $\varepsilon_{g1}, \varepsilon_{g2}$: CFG のひずみである。

アンカー筋および CFG が負担する曲げ耐力 M_a, M_g は、式(3)を用いて算定した（図-6 参照）。

最大荷重時には既存断面の軸方向引張鉄筋は既に降伏

しているものと考え、既存断面の軸方向引張鉄筋 D16 が負担する曲げ耐力 M_b は式(3)により算定した。

$$\begin{aligned} M_a &= T_a \cdot z_a \\ M_g &= T_g \cdot z_g \\ M_b &= f_{sy} \cdot A_s \cdot z_b \\ M_{total} &= M_a + M_g + M_b \end{aligned} \quad (3)$$

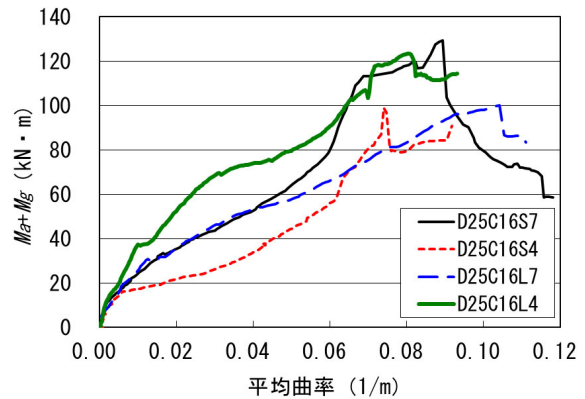
ここに、 z_a : 圧縮合力の位置からアンカー筋までの距離、 z_g : 圧縮合力の位置から CFG までの距離、 z_b : 圧縮合力の位置から既存軸方向引張鉄筋までの距離、 f_{sy} : 既存軸方向引張鉄筋の降伏強度、 A_s : 既存軸方向引張鉄筋の断面積である。また、終局時における d/z_a の計算値が 1.10 ~ 1.13 程度であること、およびアンカー筋が負担するモーメントが支配的であることから、圧縮上縁からアンカー筋までの距離 d を 1.15 で除した値を便宜上圧縮合力の位置として z_a, z_g, z_b を算定した。

終局曲げ耐力の計算値 M_u は、既存断面の軸方向引張鉄筋とアンカー筋を有する断面に関して、標準示方書⁵⁾に基づいて算定した。その際、材料強度には実強度を用い、材料係数は全て 1.0 を採用した。

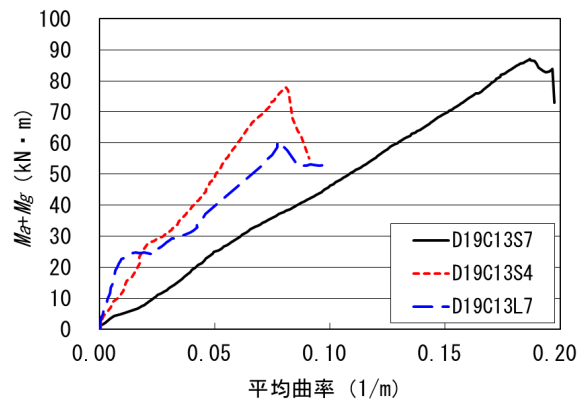
図-7 は、継手設計断面においてアンカー筋と CFG が負担する曲げ耐力の計算値 (M_a+M_g) と平均曲率との関係を示したものである。既存断面の軸方向鉄筋の降伏時における平均曲率は概ね 0.02~0.03(1/m)程度以下であること、およびアンカー筋に比べてその断面積が小さいことにより、平均曲率が小さい範囲を含めて図-6 を仮定しても、アンカー筋と CFG が負担する曲げ耐力に与える影響は、そう大きくないものと考えられる。

A シリーズの場合、アンカー筋の定着長が 20ϕ の試験体 D25C16L7, D25C16L4 においては、変形に伴って負担耐力も増大しており、継手が有効に機能していることがわかる。一方、アンカー筋の定着長が 10ϕ の試験体、特に D25C16S4 においては、平均曲率 0.01(1/m)手前から変形に伴う耐力の増加割合が減少し、平均曲率が 0.06(1/m)

を過ぎた辺りから再び耐力の増加が観察される。これは、平均曲率 0.01(1/m)辺りでアンカー筋先端の断面変化部から CFG に沿って基礎方向に向かって進展したひび割れ(写真-1)によって、特に継手の先端部において CFG とアンカー筋が力学的に一体性を失うことによって継手機能が失われ、耐力の増加割合が減少したものが、さらに変形が大きくなると CFG によって耐力のほとんどが負担されているものと推察される。このことは、図-8



(a) A シリーズ (アンカー筋 : D25)



(b) B シリーズ (アンカー筋 : D19)

図-7 曲げ耐力~平均曲率関係

表-4 継手性能の評価結果

試験体	D25C16S7	D25C16S4	D25C16L7	D25C16L4	D19C13S7	D19C13S4	D19C13L7
評価断面の基礎からの距離 (mm)	300	300	400	300	300	300	300
T_a (kN)	277.9	159.6	318.2	287.4	133.7	108.9	113.1
T_g (kN)	397.9	370.6	327.2	351.9	337.2	315.0	208.6
M_a (kN·m)	60.4	34.7	69.2	62.5	29.1	23.7	24.6
M_g (kN·m)	68.8	64.1	56.6	60.8	58.0	54.1	35.9
M_a+M_g (kN·m)	129.2	98.8	100.1	123.3	87.0	77.8	60.4
M_b (kN·m)	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
M_{total} (kN·m)	150.0	119.6	120.9	144.1	107.8	98.6	81.2
M_u (kN·m)	112.0	112.0	112.0	112.0	72.5	72.5	72.5
M_{total}/M_u	1.34	1.07	1.08	1.29	1.49	1.36	1.12

の曲げ耐力の負担割合を見てもわかる。試験体 D25C16S7 においても同様の傾向が窺われる。

B シリーズの場合、アンカー筋の定着長が 10ϕ で $\rho_s = 0.071$ の試験体 D19C13S7 は、他の試験体と比べて変形に伴う耐力の増加割合が小さい。これは、継手部および断面変化部に発生した曲げひび割れの幅が初期の段階から大きくなり、結果的に平均曲率が增大したためと考えられる。一方、アンカー筋の定着長が 20ϕ の試験体 D19C13L7 では、変形に伴って十分に耐力が増大しており、継手機能が健全であることが推察される。したがって、アンカー筋の定着長としては 10ϕ では不十分であり、 20ϕ 程度確保すれば十分であるものと考えられる。

図-8 は、継手設計断面におけるアンカー筋と CFG の曲げ耐力の負担割合を示したものである。

アンカー筋の定着長が 10ϕ の試験体 (**S*) においては、定着長が 20ϕ の試験体 (**L*) と比較して CFG の負担する曲げ耐力の割合が大きくなった。これは、アンカー筋の定着長が 10ϕ の試験体においては、断面変化部を中心に発生した曲げひび割れにより、CFG のひずみが増大した結果、CFG の負担する耐力の計算値が増大したためと考えられる。また、最大荷重時に試験体 D25C16S4 ではアンカー筋の負担する曲げ耐力が、他の A シリーズの試験体と比較して小さくなった。これは試験体 D25C16S4 がアンカー筋の定着長が 10ϕ と短いのに横拘束筋の体積比も小さいために、最大荷重時にはアンカー筋先端部において顕著なひび割れが発生しており、もはやアンカー筋が引張力を十分に負担できない状態になっていたためと考えられる。

表-4 に、最大荷重時に関して各試験体の継手性能の評価断面における曲げ耐力 M_{total} と、補強断面が負担すべき終局曲げ耐力 M_u との比 M_{total}/M_u を示す。全ての試験体において、補強断面の継手設計断面における曲げ耐力 M_{total} が、補強断面が負担すべき終局曲げ耐力 M_u を上回っていることが確認できる。

4. まとめ

曲げ耐力の向上を目的としてアンカー筋と CFG を配置し、ポリマーセメントモルタルを乾式で吹き付ける方法により曲げ耐力向上型の補強を行なう場合の、アンカー筋と CFG との継手性能に関して検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) アンカー筋と炭素繊維グリッドとの継手性能は、継手設計断面からのアンカー筋の定着長として鉄筋径の 20 倍程度確保すれば十分である。
- (2) 炭素繊維グリッドの定着長は、グリッド 3 格点で十分と考えられる。

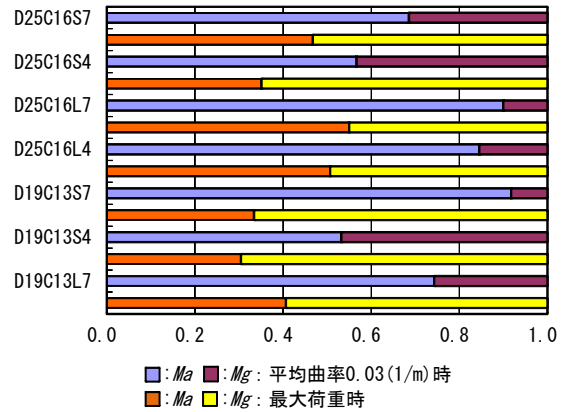
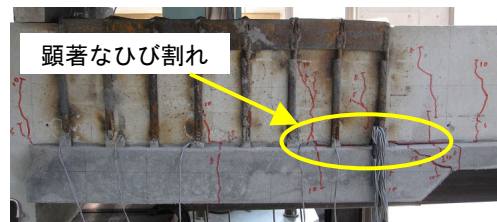


図-8 曲げ耐力の負担割合



(a) D25C16S4: 平均曲率: 0.028 (1/m)



(b) D25C16L7: 平均曲率: 0.030 (1/m)

写真-1 継手部ひび割れの様子

謝辞 本研究で使用した炭素繊維グリッドは新日鉄マテリアルズ(株)日鉄コンポジット社 小林 朗 氏よりご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮内克之, 清水健蔵: 乾式吹付けと炭素繊維グリッドを併用した補強方法の耐震補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1597-1602, 2007.7
- 2) 宮内克之, 秋田政人, 下枝博之: 炭素繊維グリッドと乾式吹付け工法を用いた既存 RC 橋脚の曲げ耐力向上型補強, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1369-1374, 2010.7
- 3) FRP グリッド工法研究会: FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強 設計・施工マニュアル (案), 2001.4
- 4) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3
- 5) (社) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2007