## グリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を用いた橋脚補強技術

#### Strengthening Technique of Pier by Use of Carbon Fiber Grid and under Water Curing Type Resin

亀田勇輔\*川瀬義行 根本正幸
 Yusuke KAMEDA Yoshiyuki KAWASE Masayuki NEMOTO
 芦野孝行 三谷和之
 Takayuki ASHINO Kazuyuki MITANI

抄 録

兵庫県南部地震の経験を踏まえ耐震基準が見直されてから, 幹線橋梁橋脚の鉄筋コンクリート巻き立 て工法や炭素繊維シート巻き立て工法などによる橋脚の耐震補強工事が随所で進められ, 気中部の耐震 補強はほぼ完了している。しかし, 水中部(特に大水深部)の耐震補強は既存工法では仮設やコスト面で 課題があり, 未補強の橋脚も多く残っている。このような背景の中でグリッド状炭素繊維と水中硬化形樹 脂を用いた水中施工が可能な橋脚補強技術を開発した。その橋脚補強技術の概要, 補強効果, 施工事例 を紹介し, 今後の展望について述べた。

#### Abstract

From being reviewed quake-resistance standards on the experience of the Hyogoken-Nanbu Earthquake, seismic strengthening work of the pier due to reinforced concrete jacketing method and carbon fiber sheet jacketing method is advanced in everywhere about the land-based pier is almost completed. However, seismic reinforcement of the underwater part (especially deep-water part) there is a problem with the existing method, there are still many piers that are not seismic strengthening works. We have developed a pier reinforcement technique using a carbon fiber grid and underwater curing type resin in this background. In this document, overview of the pier reinforcement technology, verification of reinforcing effect, the introduction of construction cases, we describe future prospects.

#### 1. 緒 言

日本は地震多発国であり,構造物の耐震強度は重要な性能の一つである。兵庫県南部地震(最大震度7,マグニ チュード7.3)では多くの構造物に被害が生じ,特に高速 道路などの道路橋の鉄筋コンクリート(以下,RC)橋脚が 倒壊し,基大な被害が発生した。原因としてはRC橋脚の 軸方向鉄筋本数を減じた部分(以下,段落とし部)に地震 による想定以上の曲げモーメントが生じたためと考えられ る。この震災経験を踏まえて耐震基準が見直されたことか ら,RC橋脚の耐震補強工事が随所で進められてきた。

耐震補強工法としては RC 巻き立て工法や炭素繊維シート巻き立て工法等が広く採用され,気中部の RC 橋脚については殆ど補強工事が終了したと言える。しかし,水中部の RC 橋脚(特に大水深部)では,ドライ環境にすること,及び作業空間を確保するための仮締切工事が必要であり,コスト,工期がかかるという理由から未だに耐震補強工事

が施されていない RC 橋脚が多く残されている。このよう な背景から,仮締切工事が不要な水中部 RC 橋脚の補強を 目的としてグリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を用いた 水中施工が可能な橋脚補強技術を開発した。本報は,上記 橋脚補強技術の概要と補強効果の検証,施工事例を紹介す る。

# グリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を用いた橋脚補強技術の概要

#### 2.1 従来工法の課題

従来の炭素繊維シート巻き立て工法は,水中では,(1) 炭素繊維シートを取扱うのが困難,(2)エポキシ系含浸接 着樹脂が使用できない,といった理由から,RC橋脚の周 囲を仮設鋼矢板等で仮締切しドライ環境にして施工する必 要があった。しかし,仮締切工事を行う上で,(1)大水深 部では工事が大規模になる,(2)工事中は河積阻害率が大 きく,水流阻害が生じる恐れがある,といった課題があった。

<sup>\*</sup> 日鉄住金防蝕(株) エンジニアリング事業部 エンジニアリング第二部 沖縄営業所 沖縄県那覇市泉崎 1-4-16(宮里ビル 202 号室) 〒 900-0021

#### 2.2 グリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を用いた橋 脚補強技術の特徴

写真1にグリッド状炭素繊維,表1にグリッド状炭素繊 維仕様,表2に水中硬化形樹脂の性状を示す。水中部RC 橋脚における炭素繊維シート巻き立て工法の課題に対し, 炭素繊維シートをグリッド状に加工成形したグリッド状炭 素繊維(以下,CFG)を採用し,RC橋脚への接着は水中 硬化形樹脂をポンプ圧入充填する方法とした。図1に補強 層断面を示す。RC橋脚表面は注入する樹脂との接着性を 確保するため,ケレンや水中ブラストによる下地処理を行 う。合わせて,事前測量の結果に基づき事前に加工製作し



写真1 グリッド状炭素繊維 Carbon fiber grid (CFG)

表1 グリッド状炭素繊維仕様 Specification of carbon fiber grid

Grade		Cross-sectional	Tensile	Degree of	Pitch of bar
		area or bar	strength	elasticity	(mm)×(mm)
		(mm²/bar)	$(N/mm^2)$	(N/mm <sup>2</sup> )	
	CR4	66			100×100
		0.0			50×50
ų	CP 5	12.2			100×100
urbc	CKS	15.2			50×50
h cê	CDC	17.5			100×100
ngt	СКб	17.5	1400	100 000	50×50
gh-stre	CR8	26.4			100×100
					50×50
H	CR10	39.2			100×100
	CR13	65.0			100×100
	CR16	100.0			100×100
	CMR5	13.2			50×50
city	CMR6	17.5		50>	50×50
asti oon	CMR8	26.4	1 200	165.000	50×50
h el carl	CMR10	39.2	1200	165 000	100×100
Hig	CMR13	65.0			100×100
	CMR16	100.0			100×100

表2 水中硬化形樹脂の性状 Property of underwater curing type resin

Item	Property values	Remarks
Adhesion strength	$\geq 2.0  \text{N/mm}^2$	$23^{\circ}C \times 7 \text{ days}$
Compressive strength	55 N/mm <sup>2</sup>	$23^{\circ}C \times 7 \text{ days}$
Bend strength	49 N/mm <sup>2</sup>	$23^{\circ}C \times 7 \text{ days}$
Tensile strength	32 N/mm <sup>2</sup>	$23^{\circ}C \times 7 \text{ days}$
Density	2.05 g/cm <sup>3</sup>	23°C



図1 補強層断面図 Cross-sectional view of reinforcement layer

た CFG,型枠等を対象の RC 橋脚へ設置し,気泡の巻き込み等を考慮し型枠下端側からポンプ圧送にて樹脂を注入充 填する。充填完了後は型枠上端部を水中硬化形エポキシ樹 脂パテにてシーリングして完成である。

グリッド状炭素繊維,水中硬化形樹脂を用いることで, 水中での取扱いが容易になり,従来工法では必要であった 仮締切工事が不要となり,潜水士による潜水作業のみで補 強が可能となった。工事中は簡易な単管足場があれば施工 可能であるため,河積阻害率が抑えられ水流阻害が殆どな い。その他にも RC 巻き立て工法に比べ,完成後の河積阻 害率が小さい,使用材料が軽量で重機を必要としないと いった利点がある。

このように水中部 RC 構造物の補強として優れた特徴を 有している工法であるが,次章でこれまでに曲げ,せん断 等の補強効果について検証を行ってきた試験データを例に 挙げながら本工法の補強効果について述べる。

#### 補強効果の検証

#### 3.1 曲げ補強効果の検証<sup>1)</sup>

#### 3.1.1 試験概要

CFGの接着による構造部材の曲げ補強効果の検証として, CFGを接着補強したコンクリート梁部材の三点曲げ試験を実施した。

#### 3.1.2 三点曲げ試験方法

鉄筋コンクリート梁(2100×200×150mmt, t:厚さ) にサンダーベルトによるケレンを行い,一昼夜海水中に浸 漬した後,図2に示すように CFG を接着し補強層を形成し た。試験水準は CFG:1枚,CFG:2枚の2水準とした。

図3に三点曲げ試験方法を示す。支点間隔を1800mmとし、載荷速度は1kN/minとした。また、初期ひび割れ発生荷重、初期剥離発生荷重、鉄筋降伏荷重、破壊荷重を測定し、同時に荷重に伴う歪みを測定するため、ストレーンゲージを供試体側面に13か所、CFG補強層表面に5か所取り付けた。

#### 3.1.3 試験結果

曲げ試験時の変位と荷重の関係を図4に示す。尚,炭素 繊維シート(以下,CFS)の試験結果も同様に併記した。



図2 供試体概要図 Overview figure of test piece







Load-deformation curve

CFG 補強層を形成した場合には、無補強の供試体に比べ、 CFG:1枚では23%の曲げ耐力が向上し、CFG:2枚にお いては曲げ耐力で47%、靭性で45%それぞれ向上するこ とが認められた。更に、CFSとの比較から、CFG:1枚の 炭素繊維量はCFS:1枚の2/3程度であるにも関わらず、 供試体曲げ耐力はCFS:1枚のそれとほぼ同等の値を示し た。また、曲げ補強効果の発現要因を調査するため、供試 体に生じたひび割れ本数(図5)とひび割れ幅(図6)を 測定した。図5より、CFG補強時のひび割れ本数は、無補 強材及びCFS補強時に比べ多いこと、図6より、CFG:1 枚のひび割れ幅はCFS:1枚の2/3程度の炭素繊維量にも 関わらず、無補強材のそれに比して大幅に小さいことから、 ひび割れ間隔の縮小による曲げ応力の分散効果及びひび割



図5 ひび割れ本数 - 荷重 Relation between the number of cracks and load



図6 ひび割れ幅 - 荷重 Relation between the width of the cracks and load

れ抑制効果があることが確認された。

#### 3.2 せん断補強効果の検証<sup>2)</sup>

#### 3.2.1 試験概要

CFGの接着による構造部材のせん断補強効果の検証として,側面,底面に対し CFG 接着による補強を施したコンクリート梁を用いて曲げせん断試験を実施した。

#### 3.2.2 曲げせん断試験方法

供試体としてコンクリート梁(1350×150×200mmt)を 用いた。3.1.2と同様に下地処理, 一昼夜海水に浸漬した後, そのまま水中下で水中硬化形樹脂とCFGを積層した。また, CFGによる補強は側面, 底面, 側面(U字)に施した(図 7)。

#### 3.2.3 試験結果

図8に曲げせん断試験結果を示す。尚, No.5 は参照論 文<sup>2)</sup>の結果に対し追加試験したデータである。No.1 の無 補強体に比べ, No.4 の CR3-50(但し, せん断補強繊維量 1/2) は 53%, No.5 の CR3-50:1 枚で 80% せん断耐力が 向上した。また, No.3 の CFS と比較しても, 同等以上の 補強効果が確認された。



図7 供試体寸法及び補強層寸法 Dimension of test piece and reinforcement layer





#### 3.3 圧縮効果の検証 3)

#### 3.3.1 試験概要

CFGによる圧縮補強効果の検証のため、コンクリート円 柱側面に CFG を接着、補強した供試体を用いて一軸圧縮 試験を実施した。

#### 3.3.2 圧縮試験方法

供試体はコンクリート円柱(150mm径×300mm長)表 面にサンドブラストによるケレンを行い,一昼夜海水に浸 漬後,そのまま水中硬化形樹脂とCFGを積層した(図9)。 同様にCFSにて補強した供試体も作製した(気中製作)。 CFGの繊維補強量は3.1,3.2で述べた通り,CFGの炭素 繊維量がCFSと同等以上であれば,曲げ・せん断補強効 果も同等以上得られることから,CFS周方向目付量50g/m<sup>2</sup> (C0-10)に対し,同程度の57g/m<sup>2</sup>(CR3-60)とし比較を行っ た。また,CFG格子間隔と破壊形態の関係を比較するため,



図9 補強層の構成 Configuration of the reinforcement layer

表3 補強水準 Standards of reinforcement

No.	Specs of reinforcement	Number of layers	Circumferential direction fiber weight (g/m <sup>2</sup> )
1	Unreinforced		—
2	CR3-60	1	57
3	CR3-50	1	68
4	CR3-30	1	114
5	CR3-30	2	228
6	C0-10	1	50

CFG 格子間隔 30 mm, 50 mm, 60 mm を用いた (表3)。載 荷速度は 10 kN/min とし, 試験中は軸方向変位, 軸ひずみ, 周方向ひずみを測定した。

#### 3.3.3 試験結果

表4に圧縮試験結果,図10に荷重-変位曲線を示す。 無補強体に比べ,水準2~4では周方向目付量が増加する につれて最大荷重が23~54kN向上し,最大荷重時の周 方向ひずみも荷重に伴い増加した。更にCFG:2枚で補強 した水準5では最大荷重が207kN向上し,最大荷重時変 位が3.8mmとなり,無補強体に比べ変形性能が3.5倍向上 した。CFG格子間隔によって破壊形態は変化しなかった。 また,CFSで補強した水準6は無補強体に比べ最大荷重が 7kN向上した。この結果より,周方向目付量が同等である CFG補強の水準2,3及びCFS補強の水準6は同程度の圧 縮補強効果を発現することが確認された。

#### 3.4 CFG 付着性能の検証<sup>4)</sup>

#### 3.4.1 試験概要

付着性能に対する CFG 補強量の影響を検証するため, 両引きせん断試験を行い,界面剥離破壊エネルギー及び有 効付着長の比較を行った。更に CFG における有効付着長 の簡易算定式を提案し,実験値と比較することで提案式の 有意性を検証した。

#### 3.4.2 両引きせん断試験水準

表5に試験水準及び CFG 構成を示す。補強工事におい

-101 -

No.	Specs of reinforcement	Number of layers	Circumferential direction fiber weight (g/m <sup>2</sup> )	Maximum load (kN)	Displacement at the maximum load (mm)	Circumferential strain at the maximum load $(\mu)$	Final fracture morphology
1	Unreinforced	_		440	1.1	867	Concrete fracture
2	CR3-60	1	57	463	1.7	2679	After CFG fracture, concrete fracture
3	CR3-50	1	68	480	1.7	2714	After CFG fracture, concrete fracture
4	CR3-30	1	114	494	1.7	3 2 9 4	After CFG fracture, concrete fracture
5	CR3-30	2	228	647	3.8	3810	After CFG fracture, concrete fracture
6	C0-10	1	50	447	1.2	1157	After CFG fracture, concrete fracture

表4 圧縮試験結果 Results of compression test

#### 表5 試験水準及び CFG 構成 Results of compression test

Standards	CFG	Configuration of the	Fiber level	Number of row	Fiber level per a row	Sharing width per a row	Converted norminal tickness
		reinforcing fiber	(mm <sup>2</sup> )		$(mm^2)$	(mm)	(mm)
А	CR10-100	$39.2 \mathrm{mm^2 \times 43\% \times 2 row \times 1 layer}$	33.712	2	16.856	100	0.169
В	CR3-50	$4.4 \mathrm{mm^2} \times 43\% \times 3 \mathrm{row} \times 4 \mathrm{layer}$	22.704	3	7.568	50	0.151
С	CR3-30	$4.4 \mathrm{mm^2 \times 43\% \times 2 row \times 2 layer}$	7.568	2	3.784	30	0.126



図 10 荷重 - 変位曲線 Load-deformation curve

て一般的な補強量である水準 A, 少補強量の CFG を重ね 合わせた水準 B, 水準 A, Bに比べ小型の試験体で補強量 は水準 B と同等である水準 C, 以上3水準を設けて補強量 の影響を検証した。

#### 3.4.3 試験結果

表6に両引きせん断試験結果を示す。付着強さの指標として下式より界面剥離破壊エネルギー $G_f$  (N/mm)を算出した。

$G_{f} = P_{max}^{2} / \left(8b^{2} \times E_{frp} \times t_{frp}\right)$	(1)
最大荷重:P <sub>max</sub> (N)	
CFG 格子間隔: b (mm)	
CFG 引張弾性率: E <sub>frp</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
CFG 公称厚さ: $t_{frp}$ (mm)	

#### 表6 両引きせん断試験結果 Results of both pull shearing test

No.	CFG	Sharing width (mm)	P <sub>max</sub> (N)	G <sub>f</sub> (N/mm)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
A-1	CR10-100	100	187980	2.85	2788
A-2			193 150	3.01	2865
A-3			222 810	4.00	3 305
Ave.				3.29	2986
B-1	CR3-50	50	167 770	4.49	3 6 9 5
B-2			171120	4.67	3 768
B-3			161150	4.14	3 5 4 9
Ave.				4.44	3671
C-1	CR3-30	30	56935	3.88	3 761
C-2			53 0 50	3.37	3 504
C-3			54275	3.53	3 585
Ave.				3.59	3617

水準 B において,水準 A と同等の G<sub>f</sub>が得られていることから,小補強量の CFG を重ねて接着しても付着強さには影響しないことがわかった。

次に有効付着長を下式によって算出した。

τ

$$\sum_{y} = \Delta \varepsilon_F \times E_{frp} \times AF/S_g/b$$

$$\sum_{g} = P_{max} / (2 \times \tau_y \times b)$$
(2)

有効付着長: $L_e$  (mm)

- 102 -

表7に有効付着長計算結果を示す。各水準で195~ 221mmでありほぼ同程度の値であることがわかった。この 実験値と比較するために提案した簡易算定式(式(4))を 用いて有効付着長を算出した。

$$L_{e}' \geq \frac{1.479 \sqrt{E_{frp} t_{frp}}}{f_{c}^{'0.095}}$$
(4)  
CFG 定着長: $L_{e}'$  (mm)  
CFG 引張弾性率: $E_{frp}$  (N/mm<sup>2</sup>)  
CFG 公称厚さ: $t_{frp}$  (mm)  
コンクリートの圧縮強度: $f_{c}'$  (N/mm<sup>2</sup>)

図 11 に有効付着長の実験値と計算値の比較を示す。計 算値は実験値と比較して同程度であり,簡易算定式は有意 性があることがわかった。次に CFS の定着長計算式として よく用いられる式(5)を用いてある補強量の CFS 定着長を 計算すると以下のように算出される。

$$h = \frac{\sigma_{CF} \times t_{CF}}{\tau_{CF}} = 862 \,\text{mm}$$
(5)  
CFS 定着長:h (mm)  
設計用引張強度: $\sigma_{CF} = 2\,300 \,(\text{N/mm}^2)$   
シート厚さ: $t_{CF} = 0.169 \,(\text{mm})$ 

設計用付着強度: $\tau_{CF} = 0.45$  (N/mm)

一方 CFS と同じ補強量とした場合において、CFG と水

表7 有効付着長計算結果 Results of calculation enable attachment length

No.	CFG	P <sub>max</sub>	$\tau_y$	L <sub>e</sub>
		(11)	(18/11111)	(11111)
A-1	CR10-100	187980	2.29	220
A-2		193 150	2.09	221
A-3		222 810	2.37	217
Max				221
B-1	CR3-50	167770	2.14	190
B-2		171120	1.96	182
B-3		161 150	1.61	208
Max				208
C-1	CR3-30	56935	3.45	165
C-2		53 050	3.19	166
C-3		54275	2.79	195
Max				195





中硬化形樹脂を用いた補強技術の定着長を簡易算定式(4) を用いて計算すると、以下のように算出される。

$$L_{e}' \ge \frac{1.479 \sqrt{E_{frp} t_{frp}}}{f_{c}'^{0.095}} = 209 \,\mathrm{mm}$$

CFG 定着長: $L_{e'}$ (mm) 設計用引張強度: $E_{frp} = 230\,000$  (N/mm<sup>2</sup>) 換算公称厚さ: $t_{frp} = 0.169$  (mm)

コンクリート圧縮強度:f<sub>c</sub>'=33.3 (N/mm<sup>2</sup>)

このように CFG の定着長は CFS と比較して約 1/4 に短 縮することが可能となった。

以上より, CFG と水中硬化形樹脂を用いた補強工法は既 存工法である CFS を用いた補強工法と同等以上の曲げ, せ ん断, 圧縮補強効果が得られることが確認された。また, CFG の定着長は CFS に比べ約 1/4 に短縮できることが付 着性能の検証からわかった。

#### 4. 施工事例紹介

### 4.1 広畑製鉄所 夢前川管路橋橋脚補修工事

#### 4.1.1 工事概要

新日鐵住金(株)広畑製鉄所にある夢前川管路橋 RC 橋脚 (写真2) はコンクリートの剥落や鉄筋露出,鉄筋の腐食劣 化が著しく進行していた(写真3)。コンクリートコア抜き 試験より,鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透していること, 当該管路橋が夢前川河口から上流へ約1km 程度とほぼ海 洋環境にあることから,劣化原因は塩害による腐食劣化で あると推定した。気中 - 水中を跨る範囲に劣化が生じてお



写真2 夢前橋管路橋 Yumesakibashi Conduit Bridge



写真3 劣化状況 Situation of deterioration

Preparation	
(installation equipment)	
Marking coverage of repair	<in factory=""></in>
Preparation surface (sandblast-cleaning)	Manufacture CFG
Install CFG	Manufacture SUS form
Install SUS form and falsework	·
Grouting epoxy resin	
Remove falsework	
Resealing edge by epoxy patty	
Remove scaffold	
Completion inspection	



り,気中部に関しては断面修復及び脱落防止,表面保護目 的で炭素繊維シート巻き立て工法とし,水中部に関しては グリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を用いた補強工法と した。この水中部の補修工事に着目し施工事例として紹介 する。

#### 4.1.2 施工状況

図 12 に施工フローを示す。コンクリート剥落,鉄筋が 露出している箇所は鉄筋の防錆処理をした後,断面修復を 行い,CFGと既存コンクリートとの接着性を確保するため, サンドブラストによる下地処理を行った。グリッド状炭素 繊維の仕様は腐食劣化による鉄筋の損失分を補填するた め,CR5-50P(筋断面積:13.2mm<sup>2</sup>,筋ピッチ:50mm,P はピッチ数を表す)とした。補修範囲下端にCFG及び SUS 型枠を受ける金物を設置し,CFG は事前に SUS 型枠 内面に設置することで一体化,CFG 及び SUS 型枠設置工 程の短縮を図った(写真4)。

CFG, SUS 型枠一体品及び支保工を設置した後,水中硬 化形樹脂をポンプ圧送によって充填した。水中硬化形樹脂 を充填する際は,樹脂の流動性を確保するため昇温設備に よる樹脂昇温及び樹脂温度管理を行った。また,樹脂充填 時の空気の巻き込み防止と確実な充填を目的として,SUS 型枠下側から圧送を行った。充填完了後,SUS 型枠上端部 を水中硬化形エポキシ樹脂パテにてシーリングをし,完成 とした(写真5)。

本工事によって(1) CFG + SUS 型枠一体化による工程 短縮効果の有用性,(2) 実河川環境における施工条件につ いて知見を得ることができた。本対象の RC 橋脚形状は直 線形状であったため, CFG 及び SUS 型枠の製作,取り付 けは比較的容易であった。CFS の場合,シート状であるた め補強対象部材の形状に作用されにくいが,CFG は補強対 象部材の形状に合わせて事前の加工が必要となる。



写真4 CFG-SUS 型枠一体 CFG-SUS form



写真5 施工完了 Completion of construction



写真6 河川 RC 橋脚 RC pier in the rivers

#### 4.2 曲線部を有する河川 RC 橋脚補強例 4.2.1 概要

曲線部を有する河川 RC 橋脚に対し本工法を適用した事 例を写真6に示す。当該橋脚は段落とし部を有する構造で あり,現在の耐震設計では耐力不足範囲が生じており,段 落とし部に対して耐震補強が必要であった。この段落とし 部の耐力不足範囲が水中域にあること,施工中及び完成後 の河積阻害率に制限があったことから,CFG 及び水中硬化 形樹脂による補強工法を提案し採用された。また,当該 RC 橋脚の水平断面形状は楕円形状(小判型)で曲線部が あり,CFG 標準品(平板,2m×3m)をそのままでは適用 できないため,曲線部 CFG 形状についても検討を行った。

#### 4.2.2 段落とし部耐力不足範囲の補強設計

段落とし部に対する CFG 補強設計の概要について述べ

る。図13に RC 橋脚のモーメント曲線概要図を示す。設 計方法は CFS の補強設計と同様に段落とし部不足モーメ ント Δ*M* を求め,不足モーメントを補うように CFG 断面積 を求める。以下,橋軸方向に対する補強設計を例に挙げて 説明する。

$$M_{yt} = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot M_y B \tag{6}$$

 $\Delta M = 1.2 M_{yr} - M_{y}$  (7) 照査段落とし位置作用モーメント: $M_{yr}$  (kNm) 段落とし部不足モーメント: $\Delta M$  (kNm) 慣性力作用位置: $h_1 = 8.170$  m 照査段落とし位置: $h_2 = 2.625$  m 基部降伏モーメント: $M_y B = 6658.9$  kNm 段落とし部降伏モーメント: $M_y = 4247.7$  kNm

上記数値を代入すると,  $M_{y_{I}}$ ,  $\Delta M$ が次のように求められる。

$$M_{yt} = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot M_y B = 4519.4 \,\mathrm{kNm}$$

$$\Delta M = 1.2 M_{vt} - M_v = 1175.6 \,\mathrm{kNm}$$

算出された段落とし部不足モーメント ΔM より, CFG の 必要断面積を求める。

$$A_{cf} = \frac{\Delta M}{\sigma_{f} \times \sqrt[7]{8} \times d}$$
(8)  
≈ 800 mm<sup>2</sup>  
必要 CFG 断面積 :  $A_{cf}$  (mm<sup>2</sup>)  
CFG 設計引張強度 :  $\sigma_{f} = 933$  N/mm<sup>2</sup>  
(≈ 1400 × 2/3)

橋軸方向有効高さ:d=1800mm

必要 CFG 断面積より, CFG の仕様を決定する。前提条 件として, 橋脚直線部幅: *b*=1700mm, 筋ピッチ: *a*= 50mm として, 単位 CFG 断面積: *A<sub>g</sub>*を求めると以下のよ うになる。

 $A_g = A_{cf} / (b/a) = 23.5 \,\mathrm{mm}^2$ 

表1より, A<sub>g</sub>を満足する CFG 仕様は CR8-50P (筋断面積: 26.4 mm<sup>2</sup> > 23.5 mm<sup>2</sup>) となる。補強範囲は照査段落とし部



図 13 モーメント曲線概要図 Overview figure of moment curve

抵抗モーメントと作用モーメントの交点: $L_a$ =1.202mであるため、橋脚基部を原点とすると+2.625m~+3.827mとなる。更に、補強範囲の上端下端それぞれから定着長: $L_{cf}$ =0.510m<sup>5)</sup>を伸ばした範囲の+2.115m~+4.337mが実際のCFG設置範囲となる。このように炭素繊維シート巻き立て工法と同様の検討方法で設計が可能である。

#### 4.2.3 橋脚形状への対応

当該 RC 橋脚の水平断面形状は直線部と曲線部からなる 楕円形状をしていた。曲線部に関しては CFG 標準品を使 用できないことから,曲線 CFG を特注製作するため,事前 に潜水士による既設橋脚の測量を実施した。事前測量によ る橋脚の幅,直角度などのデータと前項で計算した CFG の設置範囲を基に曲線 CFG を工場製作した。写真7に曲 線 CFG 及び SUS 型枠設置状況を示す。直線 CFG と曲線 CFG の継手部が必要となることから,CFG と SUS 型枠の 一体化は行わず,CFG を設置後に SUS 型枠を設置した。 後工程は 4.1 の工事と同様に支保工を設置し,ポンプ圧送 による水中硬化形樹脂の充填,端部パテシーリングを行い 完成となる (写真8)。

このように、既設橋脚の事前測量を実施した上で CFG



写真7 曲線 CFG 及び SUS 型枠設置状況 State of installation curved CFG and SUS form



写真8 施工完了 Completion of construction

Timing of implementation	Place	Facility name	Area of CFG
2000.9	Iwate	Pier pile	6.0 m <sup>2</sup>
2006.5	Hyougo	Water tank	3.0 m <sup>2</sup>
2009.3	Hyougo	Pier	32.0 m <sup>2</sup>
2013.1	Aichi	Bank protection	25.0 m <sup>2</sup>
2014.1	Tottori	Beams of pier	187.0 m <sup>2</sup>
2014.11	Toyama	Pier	30.0 m <sup>2</sup>
2014.11	Toyama	Pier	25.0 m <sup>2</sup>
2015.1	Tottori	Beams of pier	75.0 m <sup>2</sup>
2015.2	Miyagi	Pier	50.0 m <sup>2</sup>
2016.3	Tokyo	Pier	63.0 m <sup>2</sup>
2016.4	Aichi	Bank protection	4390.0 m <sup>2</sup>
	4886.0 m <sup>2</sup>		

表8 施工実績一覧 Construction results list

製作を行えば,角柱,楕円形状,楕円形状かつテーパー形状(台形楕円錐型)など,様々な形状に対応が可能である。 但し,補強範囲に極端な突起物やコンクリート欠損などに よる段差がある場合は,CFGの適用は困難である。その場 合は突起物の撤去,整正,断面修復などの事前補修が発生 することがある。

#### 5. 今後の展望

表8に施工実績一覧を示す。本工法は新日鐵住金のRC 基礎補修補強から始まり,現在は河川RC橋脚を中心とし た官公庁案件に適用され始めている。それに伴い補強対象 の水平断面が楕円形状であるものやテーパーがあるものな ど,多様な形状へのCFG適用実績を積み重ねている。また, 市街地にある小河川の橋脚では,仕上がり厚が20~30mm 程度で施工中,施工後とも河積阻害率が小さく,使用材料 が軽量で重機を必要としない本工法は特に適している。以 上より,緒言でも述べた通り,今後もグリッド状炭素繊維 と水中硬化形樹脂を用いた橋脚補強工法の需要拡大を目指 す所存である。

#### 6. 結 言

本報ではグリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を用いた 橋脚補強技術において,補強技術の概要,補強効果の検証, 施工事例の紹介,今後の展望について述べた。要点をまと めて以下に示す。

- (1)本補強工法はグリッド状炭素繊維と水中硬化形樹脂を 用いることから、仮締切工事、排水作業を要さず、潜 水士による水中作業が可能であるため、仮締切が困難 な大水深部や河積阻害が問題となる場所で有利な補強 技術である。
- (2)過去の試験データより本補強工法が炭素繊維シート巻き立て工法と同等以上の曲げ、せん断、圧縮補強効果があり、付着性能検証から定着長を短縮できることが確認された。

- (3) 施工事例を挙げながら、本補強工法が炭素繊維巻き立 て工法と同様の設計方法で検討可能であることを示し た。
- (4) 新日鐵住金の RC 基礎補修補強を始めとして, 昨今は 官公庁案件も増加している。今後も CFG と水中硬化形 樹脂を用いた橋脚補強工法の需要拡大を目指す。

#### 参照文献

- 1) 芦野孝行 ほか:水中適用型 CFRP グリッド接着補強工法の 補強効果に関する研究.コンクリート工学年次論文報告集.

   23 (1), 1123-1128 (2001)
- 2) 芦野孝行 ほか:水中適用型 FRP グリッド接着補強工法のせん断補強効果に関する研究. コンクリート工学年次論文報告集. 24 (2), 1555-1560 (2002)
- 3) 芦野孝行 ほか:水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の圧 縮補強効果に関する研究.コンクリート工学年次論文報告集. 25 (2), 1879-1884 (2003)
- 4) 根本正幸 ほか:水中適用型高流動エポキシ樹脂により接着 した CFRP グリッドの付着性能. コンクリート工学年次論文 報告集. 30 (3), 1633-1638 (2008)
- 5) FRP グリッド工法研究会:「水中グリッド工法」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). 第 3版. 2015, p.24



# 亀田勇輔 Yusuke KAMEDA 日鉄住金防蝕(株) エンジニアリング事業部 エンジニアリング第二部 沖縄営業所 沖縄県那覇市泉崎1-4-16 (宮里ビル202号室) 〒900-0021



川瀬義行 Yoshiyuki KAWASE 日鉄住金防蝕(株) エンジニアリング事業部 技術部長



根本正幸 Masayuki NEMOTO 日鉄住金防蝕(株) エンジニアリング事業部 エンジニアリング第二部 西日本営業所 所長



芦野孝行 Takayuki ASHINO 日鉄住金防蝕(株) エンジニアリング事業部 エンジニアリング第二部 東日本営業所 マネージャー



三谷和之 Kazuyuki MITANI 広畑製鉄所 設備部 機械・土建技術室 主幹