

炭素繊維・鋼板複合型のRC橋脚耐震補強工法の設計・施工事例

(株)大林組 二島 建
 阪神高速道路公団 古池 正宏
 阪神高速道路公団 米澤 康夫
 (株)大林組 佐藤 峰生
 (株)大林組 古賀 政二郎
 (株)大林組 越智 聡

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、土木構造物にかつてない甚大な被害を及ぼした。このため、現在、道路橋橋脚の耐震補強工事が各地で行われている。当該Y型独立RC橋脚もその一つであり、工程的に補強を急ぐため、以下の理由により、主に施工性確認を目的とする試験施工として炭素繊維・鋼板複合型の耐震補強工法を用いることとした。

- ①当該Y型独立RC橋脚は、景観に十分配慮した形状となっており、上部工の梁から脚柱にかけてなめらかな曲線となっている。この曲線を損なわずに鋼板により補強するのは困難である。炭素繊維は、軽量・高強度であるため、補強後の断面増加がほとんどなく、橋脚形状を損なうことがない。
- ②炭素繊維による補強については、数多くの実験結果より、せん断および曲げ補強効果が確認されており、補強設計については、実験結果に基づいて、設計指針等が作成され、基本的な設計法が確立されている。
- ③しかし、炭素繊維による大型橋脚基部の靱性補強効果は、その確認試験およびこれに基づく設計法の確立を進めているところであるが、解決すべき問題が多く残されている。

従って、当該Y型独立RC橋脚の耐震補強は、基部を鋼板補強工法、その上部を炭素繊維巻立て工法の複合型とする。

2. 設計

2.1 設計条件

設計は、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様（復旧仕様）」に基づき行った。

表-1に荷重条件および支承条件を、表-2に材料の物性値をそれぞれ示す。

表-1 荷重条件および支承条件

橋脚No.	IP-22	IP-23	IP-24
支承条件	可動	可動	固定
上部構造死荷重反力 R_d (kN)	8050	12010	10560
橋軸方向負担重量(kN)		23690	26060
橋軸直角方向負担重量(kN)	8050	12010	10560

表-2 材料の物性値

材 料	項 目	物性値
コンクリート	設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	27
	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	26.5
	単位重量 γ_c (kN/m ³)	24.5
鉄 筋 (アンカー筋)	種 類	SD345
	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	200
炭素繊維シート	目付け量(g/m ²)	300
	1枚当りの厚さ(mm)	0.16
	ヤング係数 E_{CF} (kN/mm ²)	230
鋼 板	種 類	SS400
	厚 さ(mm)	9.0, 16.0
	ヤング係数 E_s' (kN/mm ²)	200

キーワード：RC橋脚の耐震補強、炭素繊維・鋼板複合型

連絡先 : 住所 東京都文京区本郷2-2-9センチュリータワー

電話 03-5689-9026(FAX 03-5689-9027)

2. 2 設計計算結果

各橋脚の補強量および耐震補強設計結果を表-3に示す。

表-3 各橋脚の補強量および耐震補強設計結果

橋脚No.	I P-22		I P-23		I P-24	
	橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角
炭素繊維シート	鉛直方向	0	5	5	6	7
	水平方向	1	1	3	3	4
アンカー筋	D35@500	D51@500	D51@250	D35@500	D51@250	D35@500
補強鋼板	t9×h3500		t16×h3500		t16×h3500	
補剛形鋼	H-400×400×13×21		H-400×400×13×21		H-400×400×13×21	
降伏水平耐力 P_y (kN)	検討省略	4910	10780	7340	11380	7510
降伏変位 δ_y (cm)	検討省略	11.9	8.1	8.6	8.8	9.2
終局水平耐力 P_u (kN)	検討省略	6180	14700	11740	15600	12580
終局変位 δ_u (cm)	検討省略	147.4	85.0	77.9	95.5	80.4
せん断耐力 P_s (kN)	検討省略	11240	15750	17840	17030	19180
破壊形態	検討省略	$P_u \leq P_s$ 曲げ破壊	$P_u \leq P_s$ 曲げ破壊	$P_u \leq P_s$ 曲げ破壊	$P_u \leq P_s$ 曲げ破壊	$P_u \leq P_s$ 曲げ破壊
保有水平耐力 P_a (kN)	検討省略	5750	13390	10270	14190	10890
等価設計水平震度 k_{he}	検討省略	0.44	0.47	0.51	0.46	0.52
許容塑性率 μ	検討省略	8.59	7.30	6.35	7.61	6.14
$W \cdot k_{he}$ (kN)	検討省略	$5440 \leq P_a$	$13170 \leq P_a$	$8340 \leq P_a$	$14020 \leq P_a$	$7790 \leq P_a$
$0.26 \cdot k_{he} \cdot W$ (kN)	検討省略	$5630 \leq P_a$	$12750 \leq P_a$	$7440 \leq P_a$	$13870 \leq P_a$	$6820 \leq P_a$

補強後の橋脚の構造一般図を図-1に示す。

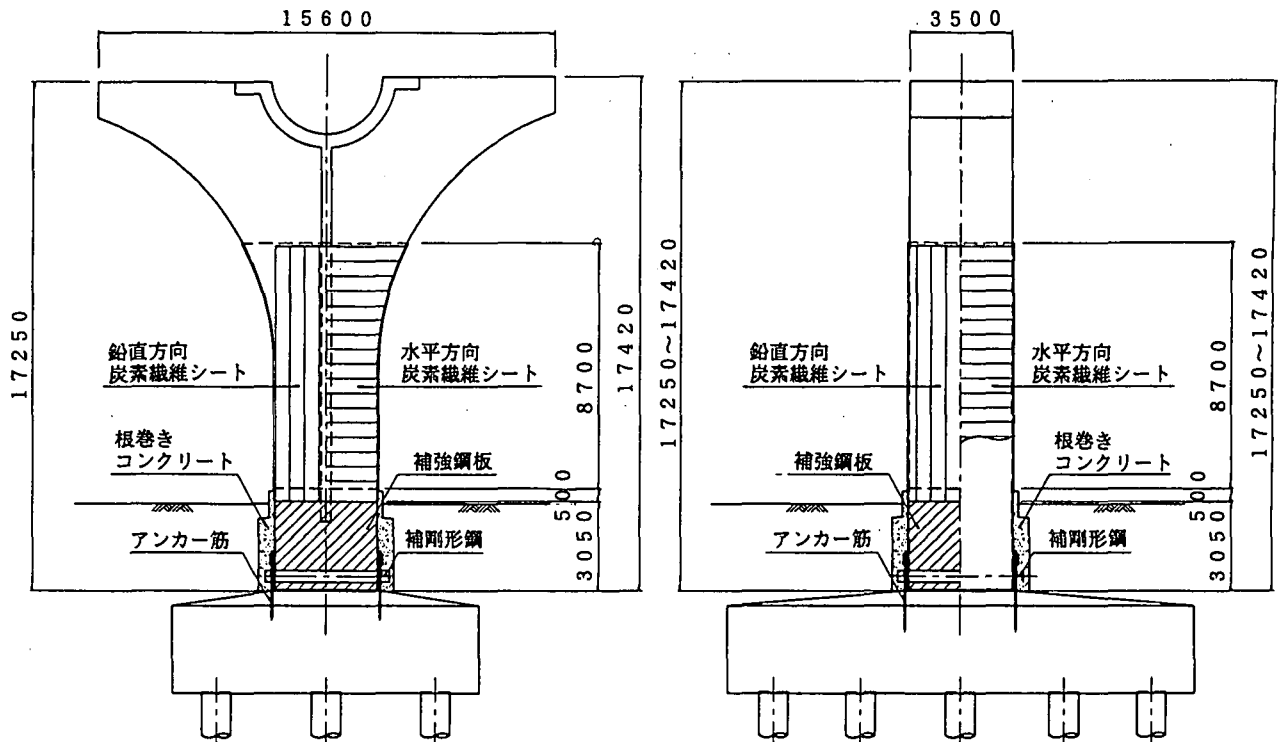


図-1 構造一般図 (補強後)

3. 施工

3.1 工事概要

本工事の概要は、以下の通りである。

工事名称	空港工区床版工事の内 橋脚補強工事
工事内容	橋脚 IP-22、IP-23、IP-24の炭素繊維・鋼板複合型耐震補強工事
施工場所	豊中市蛍池西町 大阪空港駐車場内
発注者	阪神高速道路公団 大阪第二建設部
設計者	阪神高速道路公団 大阪第二建設部 設計課
工事監理	阪神高速道路公団 大阪第二建設部 池田工事事務所
工期	平成7年12月18日～平成8年3月31日

主要工事数量を表-4に、施工順序フロー図を図-2に、実施工程を表-5に示す。

3.2 準備工

工事現場内には、管理詰所、作業員詰所および資材倉庫として、ユニットハウス(2.4m×5.4m程度)を3棟設置し、施工管理および品質管理に使用した。

3.3 掘削工・土留工

掘削実施に先立ち、クレーンにより雨水排水用コンクリート会所柵等の周辺施設の一時移設と場内仮置を行った。

掘削工は0.3m³級バックホウにて行い、掘削土は場内に仮置して埋戻しに流用した。

土留工は、図-3に示す通り、φ8,000mmのライナープレートに補強リングを設置した構造とし、掘削の進捗に合わせてライナープレートを建込み、背面の埋戻しを十分に注意して行った。

3.4 足場工

足場工は、図-3に示す通り、足場材料として鋼製建枠を使用した。組立ては、基部鋼板補強部施工用と上部炭素繊維シート補強部施工用とに分割して行った。

また、足場外周は、保温、防風、防湿等、冬期における作業環境確保のため、工所用養生シートにて全周を囲うものとした。

3.5 基部鋼板補強工

(1) 原寸調査工、およびフーチング定着アンカー削孔工

フーチングコンクリート上に地墨を打って既設橋脚の原寸を計測し、補剛形鋼設計計画図に合わせてフーチング定着アンカー位置をマーキングする。最後に、フーチング鉄筋位置の探査結果を踏まえて、鉄筋を切断しない位置に定着アンカー用削孔位置を決定した。鉄筋位置の探査は、非破壊鉄筋探査機を用いたが、鉄筋のかぶり(110～137mm)とピッチ(125mm)の影響により鉄筋位置を明瞭に判別出来ない場合は、ジャックハンマーによる試掘により最終確認を行うこととした。

なお、定着アンカーの中心はフーチング鉄筋の位置を避けることから、脚柱コンクリート面より100mm～200mmの離れが必要となった。

表-4 主要工事数量

工種	規格	単位	IP-22	IP-23	IP-24	合計数量
掘削		m ³	103	106	106	315
埋戻し	流用土	m ³	80	82	83	245
残土処分		m ³	23	25	23	71
補強鋼板	t=9,16	kg	3488	6183	6183	15854
補剛形鋼・鋼板	H-400,t=12~22	kg	4329	4812	4891	14032
基部アンカー	SD345-D51	本	12	22	24	58
	SD345-D35	本	12	14	14	40
炭素繊維シート	下地処理面積	m ²	108	111	121	340
	シート面積	m ²	450	907	1312	2669
根巻コンクリート	σ _{ck} =16N/mm ²	m ³	30	28	24	82
表面仕上げ	耐候性塗装	m ²	114	118	126	358
土留め	ライナープレート t2.7	m ²	75	75	75	225
	平面延長	m	25	25	25	75

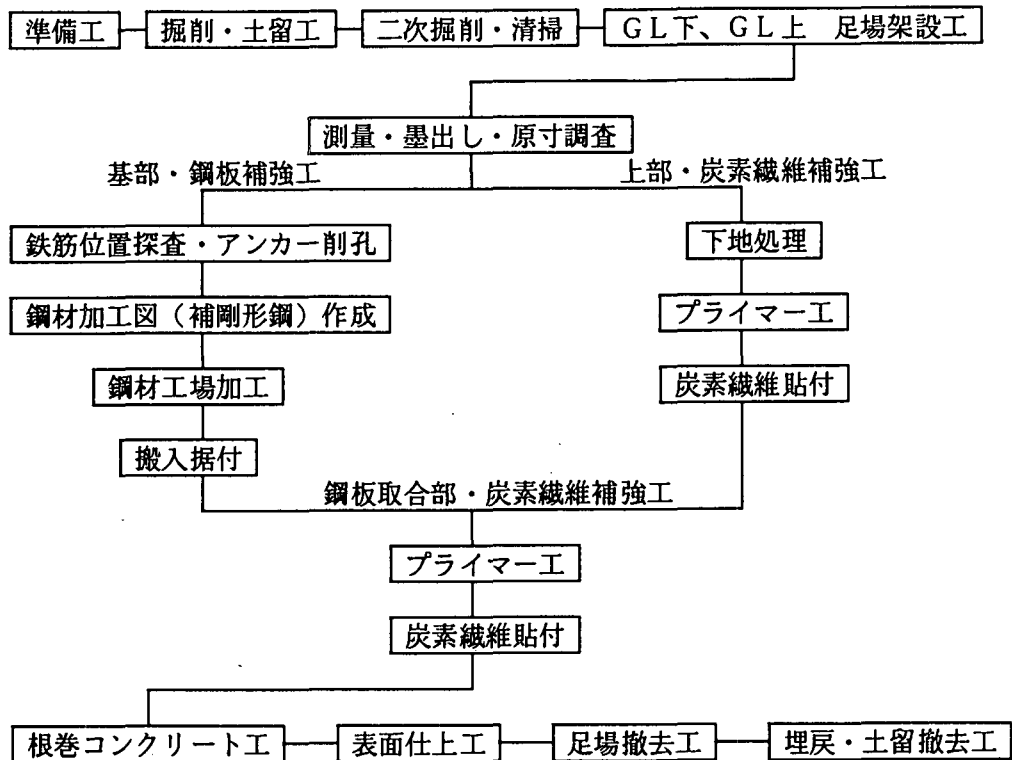


図-2 施工順序フロー図

削孔は、ジャックハンマーにより予備削孔でフーチング主鉄筋に当たらないことを確認した後、所定の位置まで削孔した。

ただし、削孔途中でフーチング鉄筋組立用の架台鋼材等に当たり削孔不能となった場合は、コアボーリングで所定の位置まで削孔した。

アンカーの削孔は、アンカーを樹脂定着構造とすることから25D以上の定着長が必要とされ、フーチング定着アンカーがD51の場合は、φ76×1,300mm、D35の場合は、φ51×900mmとなった。

(2) 鋼材加工据付

設計図通りに工場加工し現場へ搬入した鋼板・補剛形鋼等のコーナーピース部4片は、規定のレベルに設置した仮受台上に仮置して、土留側よりポスト等で押さえ付けながら仮設アンカーを打設して仮留めし、ワイヤーで全体を締め付け後、固定アンカーを打設し、本締めボルトにて締結した。

締め付けワイヤー撤去後に最終原寸取りして工場加工した鋼板・補剛形鋼等の中間ピース部は、現場へ搬入して規定の位置にはめ込み、補剛形鋼のボルト接合を行い、固定アンカーを打設しボルト締結した後、鉛直方向の突き合わせ部溶接を行った。

表-5 工事工程表

項目	年月	平成8年			
		1月	2月	3月	4月
準備工		■			
事前接着試験		■			
掘削・土留工			■		
足場工			■		■
鋼板工			■	■	
炭素繊維シート工			■	■	■
根巻コンクリート工				■	■
埋戻・片付け工					■

溶接部の検査完了後、鋼板端部、固定ボルト上面、仮設アンカー引抜跡、たて樋配管廻り等にシール工を行い、エポキシ樹脂注入を施工し、注入樹脂の硬化を待って注入パイプ・エア抜パイプを切断して表面仕上げを行った。

3. 6 上部炭素繊維シート補強工

(1) 下地処理

炭素繊維シート貼付前に、以下の項目からなる橋脚コンクリートの表面処理を実施した。

①クラック調査

掘削完了後補強範囲全体のクラック調査を行い、調査図を作成したが、補修の必要のないクラック幅であったため、エポキシ樹脂による注入等は行っていない。

②漏水防護処理

施工中の降雨による漏水を防止するため、シート貼付予定範囲上端に水切り用面木を取り付けた。

③たて樋カバープレート処理

橋面雨水排水用たて樋のカバープレート及びその取付ボルト頭部がコンクリート表面より突き出ている部分は、炭素繊維シートが滑らかに貼付出来るようにポリマーモルタルにてすりつけた。

④隅角部面取り

橋脚の隅角部は、面長45mmに面取りがしてあるが、隅角部の影響による炭素繊維シートの引張耐力の低下を防止する目的で、R=50mm以上の面取りを行った。

⑤全面グラインダー掛

コンクリート表面の劣化部除去と不陸整正のため全面グラインダー掛を実施した。

(2) プライマー塗布・炭素繊維シート貼付

下地処理後のコンクリート面にプライマーを塗布し、プライマーが指触乾燥した後、コンクリートの不陸とエアホールをパテによって修復した。炭素繊維シート貼付は、エポキシ系含浸接着樹脂塗布と炭素繊維シート貼付を計画枚数回繰り返すことにより行う。当現場においては、鉛直方向炭素繊維シート5～7層貼付を先行し、貼付完了後、水平方向炭素繊維シート1～4層貼付を施工した。

炭素繊維シート貼付の具体的要領は次の通りである。

まず、炭素繊維シート割付図にしたがってコンクリート表面に墨出を行う。炭素繊維シート割付図を図-4に、貼付順序図を図-5に示す。

プライマー面が濡れていないことを確認した後、プライマー上面にエポキシ樹脂を上から下にむかって均一に塗布し、塗布直後に炭素繊維シートを上から下に向けて貼り、押さえ付け、空気を追い出すようにしごいていく。炭素繊維シートに樹脂が充分含浸したことを視察確認の後、あまり時間を置かず炭素繊維シートの上面にシートの繊維方向に沿って再び樹脂を塗布することにより1層貼付が完了する。

3. 7 鋼板取合部炭素繊維補強工

施工の迅速な進捗を図るため、橋脚上部の炭素繊維シート貼付工と、橋脚基部の鋼板補強部の施工を併行して進めたこ

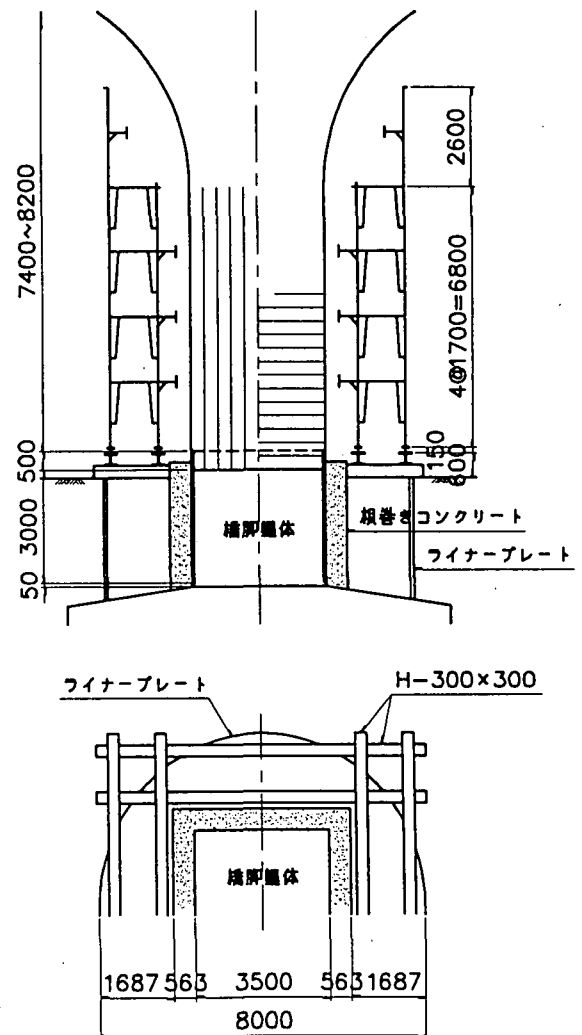


図-3 土留・足場組立図

とから、鋼板取り合い部約2m間の炭素繊維シート貼付は、基部鋼板補強工完了後に実施した。取合部詳細図を図-6に示す。

3. 8 根巻コンクリート工

橋脚基部の鋼板補強部については、鋼板および補剛形鋼の防錆を目的として、根巻コンクリートを打設した。

鋼板取合部の炭素繊維シート貼付完了後、エポキシ樹脂注入に先行して鋼板および補剛形鋼に溶接しておいたセパ取付用ナットを利用して型枠を組立てた後、打設を行う。

3. 9 表面仕上工

表面仕上げ工として、周辺との色調調和および炭素繊維シートの防護・耐久性向上等を目的として、全橋脚とも耐候性塗料（中塗り60 μ 、上塗り30 μ ）を塗布した。

3. 10 埋戻、土留撤去、後片付工

橋脚補強作業終了後、仮置掘削土砂を使用して橋脚廻りの埋戻しを行い、埋戻しと併行して土留ライナープレート及び補強リングの撤去を実施した。

4. 施工性調査および品質管理

4. 1 施工性調査結果

本工事において実施した施工性調査項目のうち、炭素繊維シート貼付工に関する主要調査項目は、①作業必要空間、②下地処理時発生騒音、③炭素繊維シート寸法、④各種養生方法、などである。

作業必要空間は、橋脚壁面と足場内側との間に25～30cm程の空間があれば十分であった。

下地処理時の隅角部処理およびグラインダーがけによる発生騒音は、処理壁面付近で約75 d B、30m離れた位置で周辺暗騒音と同じ65 d Bであったことから、一般には問題となる騒音ではないと考えられる。

炭素繊維シート寸法は、貼付作業性に大きな影響を与えることから、実施工に当たって十分な検討を要求されたが、本工事では、貼付施工面積が広く縦貼り層数が多いこと等の理由から、幅50cm×長さ4m程度の場合に良い施工性が得られた。

炭素繊維シート貼付工の主要材料である炭素繊維シートは軽量で風による飛散を受け易く、エポキシ樹脂の品質と施工性は温度・湿度・水分に大きく左右される。従って、本工事では、風雨対策として、施工場所全体を覆う養生シートの設置および水切り措置を行い、更に、施工が低温時期となったので、温度5 $^{\circ}$ C以上

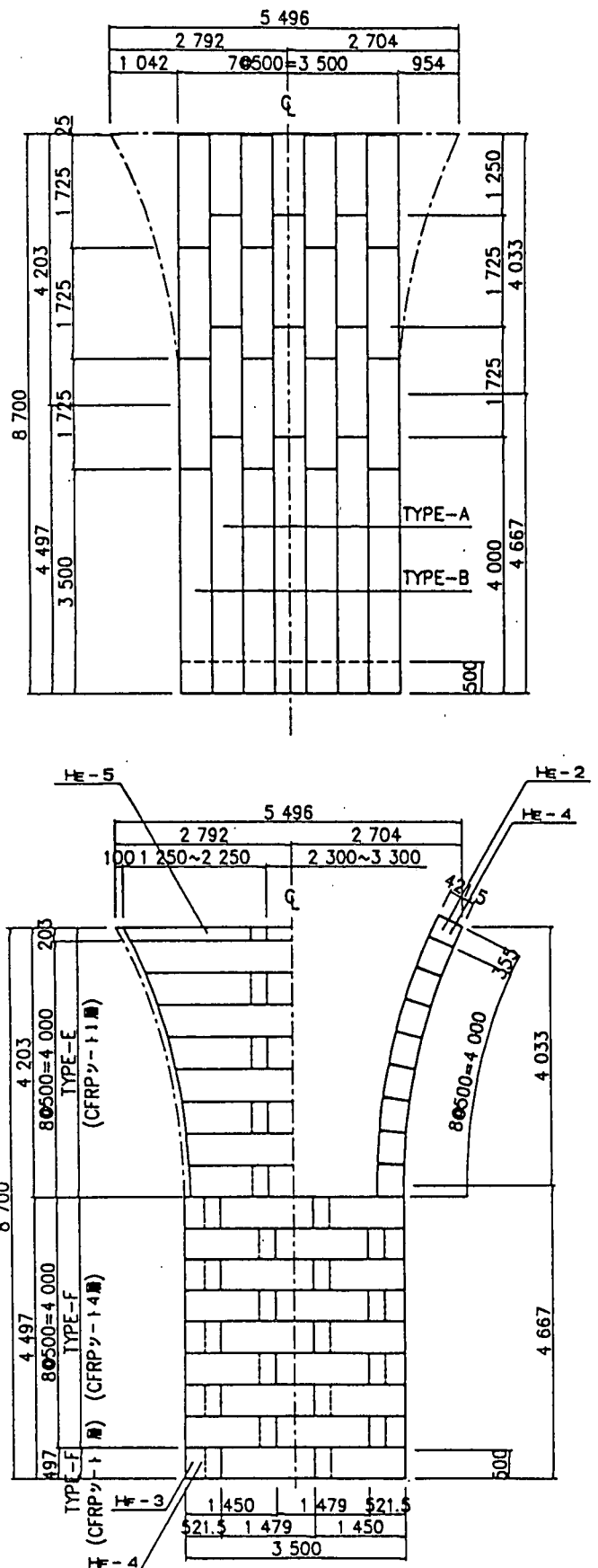


図-4 炭素繊維シート割付図

を確保するため温風機などによる保温対策を行った。

4. 2 施工前品質管理

炭素繊維シート貼付による補強工は、十分に処理されたコンクリート表面に、プライマーおよび含浸接着樹脂および炭素繊維シートが完全に1体となるように施工されなければ、その機能を十分に発揮することができない。

従って、本工事施工に先立ち、実橋脚コンクリート面を使用して、炭素繊維シート補強工使用材料および施工法の予備確認検査として、現場接着試験を実施した。

接着試験は、実施計画通りの材料と施工法により貼付した炭素繊維シートを、養生期間経過後、建研式接着力試験器（JIS A6909）を使用して、40mm×40mmの剥離試験を実施した。判定は、炭素繊維シートとコンクリートの接着面での剥離や炭素繊維シート内部での剥離等が生じた場合は施工不良、炭素繊維シートとともにコンクリートを引き剥がした場合は施工に問題なしとした。

本工事では、I P-22橋脚コンクリート面に200mm×500mmの炭素繊維シート3種類を一層貼付し、5°C以上、48時間の保温養生を経て、材令24日時点で5回の現場接着試験を実施した。

試験体作成は平成8年1月26日、接着試験は平成8年2月20日で、試験結果は表-6の通りであり、いずれもコンクリート表層面での剥離であった。

4. 3 施工中の品質管理

本工事施工中に実施した品質管理の要点は、次の通りである。

(1) 使用材料の受入検査と保管および使用量検査

主要使用材料は、各製品に添付された試験成績表により所定品質規格に適合することを確認して受入れ検印を行い、各材料が品質変化を起こさない環境条件下で保管すると共に、出庫時使用先・在庫記録により、使用量管理を実施した。

(2) 下地処理工・面取り工

橋脚コンクリート表面のレイトンス、風化層、汚れ等のプライマー接着を阻害するもの、および、炭素繊維の引張強度発揮に悪影響を及ぼす鋭角的な凹凸はディスクサンダーで研磨除去した。また、隅角部は、炭素繊維引張耐力の低下を防止する目的で、標準ゲージを作成して処理半径50mmを確保した。

(3) プライマー塗布工・および不陸整正工

プライマー塗布工は、材料の使用前外観検査後、樹脂の主材と硬化材の使用割合を確認して混合攪拌し、コンクリート表面の乾燥度に注意しながら、可使時間管理を十分に行って実施した。

また、不陸整正工はコンクリート表面の粗密の程度に応じて炭素繊維シートの接着性確保のために、エポキシ樹脂系パテによる部分パテ処理、または全面パテ処理を行った。

しかし、次工程で見る炭素繊維シート貼付工で両者の特段の差は見られていない。

(4) 含浸樹脂塗布工・炭素繊維シート貼付工

含浸樹脂塗布工は、材料の使用前外観検査後、樹脂の混合割合を確認して攪拌し、プライマー表面の乾燥度と粉塵除去に注意しながら、可使時間管理を十分行って実施した。

炭素繊維シート貼付工は、炭素繊維シートを上から下へ向かって貼り、ローラー等で良く押さえて空気の除去を十分に行い、プライマー表面との密着性と樹脂の含浸を確保した。

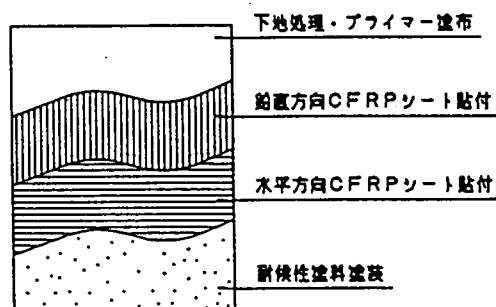


図-5 貼付順序図

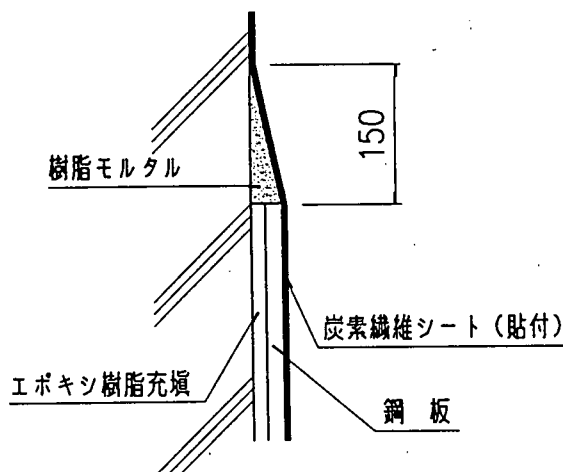


図-6 取合部詳細図

炭素繊維シート貼付作業直後、かつ、含浸接着樹脂の指触硬化前の時点で、貼付状況外観検査により貼付寸法・貼付精度・浮き・たるみ・しわ等不良箇所の有無を調査し、不良箇所は速やかに改善措置を行った。

なお、炭素繊維シートによる補強工完成品の品質確認を目的として、各橋脚において現場作成試験体による、引張試験および接着試験を実施した。試験結果は、表-7の通りであり、所定品質の確保を確認することができた。

(5) 鋼板と炭素繊維シートの接続工

基部補強鋼板と上部補強炭素繊維シートとの取り合い部は、以下の処理を行い、その後、通常の炭素繊維シート貼付工を実施し、軸方向曲げ引張力の伝達を確実にすることとした。

①コンクリート表面と鋼板表面との段差は、樹脂モルタルにより勾配1/10以上で摺り付け、炭素繊維シートを滑らかに貼り付けることとした。

②炭素繊維シートを接着する鋼板表面は、ディスクサンダーにより、エッチングプライマーおよび黒皮除去と金属面目荒し後、アセトンによる脱脂を行い、プライマーの接着性を確保した。

表-6 施工前品質試験結果

No.	試験体		引張具合		接着強度 (N/mm ²)
	No.	荷重(N)	寸法(mm)	面積(mm ²)	
1	1	7000	40.5×39.5	1580	4.43
	2	8600	40.5×40.5	1640	5.24
	3	6300	39.5×39.8	1570	4.01
	4	6300	40.0×39.8	1590	3.96
	5	6500	40.8×40.3	1640	3.96
	平均				4.32
2	1	5200	39.8×39.5	1570	3.31
	2	5700	39.8×40.0	1590	3.58
	3	6000	39.8×39.0	1530	3.92
	4	5300	38.5×39.0	1500	3.53
	5	3900	39.0×39.3	1530	2.55
	平均				3.38
3	1	5100	40.0×40.0	1600	3.19
	2	3300	39.0×38.8	1510	2.19
	3	4100	39.5×39.5	1560	2.63
	4	4400	39.3×39.3	1540	2.86
	5	6700	40.0×39.5	1570	4.27
	平均				3.03

表-7 施工中品質試験結果

橋脚 No.	番号	引張強度 (N/mm ²)	接着強度 (N/mm ²)
IP-22	1	3739	2.94
	2	3513	3.25
	3	2714	3.06
	4	3524	3.00
	5	3760	3.00
	平均	3450	3.05
IP-23	1	3326	3.06
	2	3247	3.06
	3	3576	2.45
	4	3433	3.37
	5	3390	3.68
	平均	3394	3.12
IP-24	1	3400	3.25
	2	3841	2.76
	3	3460	3.37
	4	3325	2.76
	平均	3530	3.04

5. おわりに

Y型独立RC橋脚の耐震補強工法として採用した炭素繊維・鋼板複合型の補強工法は、それぞれの工法の持つ長所を有効に組み合わせることにより、大規模独立橋脚の耐震補強に要求される基部の靱性能向上と曲げ補強を可能にした。また、曲線部を有する段落し部など中間部の曲げ補強とせん断補強を可能にすることを、実際の設計・施工により確認することができた。

本工法は、今後ますます厳しさを加える橋脚の耐震補強設計施工環境条件に適応することができる工法であるといえる。