

アラミド繊維シートによる曲げ耐力向上方式耐震補強工法の開発と実用化

住友建設（株）技術部	正会員 藤原保久
静岡市役所 建設部 道路建設課	志村高見
住友建設（株）静岡支店	近藤克己
住友建設（株）技術研究所	正会員 小田切隆幸

1. はじめに

既設橋脚の耐震補強では、基礎やアンカー部への負担を小さくするため、基本的に橋全体系のじん性を向上させて粘り強い構造とし、できるだけ曲げ耐力が過度に上がらない工法が採用されている。現在、行われている補強工法は、RC 巻き立て工法、鋼板巻き立て工法等があり、さらに近年、炭素繊維シートや、アラミド繊維シートを用いた耐震補強工法も実用化されている。

しかし、橋脚躯体の耐力が大幅に不足する場合には、じん性向上だけに期待すると地震後に橋脚に大きな残留変位が生じるため、基礎が支持できる範囲内で橋脚躯体の曲げ耐力の向上を図ることが必要となる。橋脚躯体の曲げ耐力を向上させる補強方法については、橋脚躯体を鋼板で巻き立て、その間隙を充填材により密実させるとともに、アンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させる方法が一般的である。

今回、鋼板補強では施工が難しい厳しい施工条件下でも安全、かつ確実な補強が行えるアラミド繊維シート巻き立て工法をじん性補強と同時に曲げ耐力の向上にも適用する工法を開発、実用化した。従来、繊維シートをフーチングに定着するのは困難とされていたが、本工法ではアラミド繊維シートを鋼板と接着し鋼板に取り付けたジベル筋を介しアンカー筋に引張力を伝達し、フーチングに力を伝達する。

本稿では、工法の実用化に際し縮小模型を用いて行った補強効果の確認試験の概要、および静岡市発注の栗原跨線橋の橋梁耐震補強工事での施工概要について報告する。

2. 検証試験

2.1 試験概要

試験供試体は、断面の有効高さを基準にして、一般的な道路橋に対し一定の縮尺率（1/5.6）でモデル化した。柱基部の曲げ耐力に直接影響を及ぼす軸方向鉄筋比は、概ね一致している。また、今回の試験目的が、柱基部の曲げ耐力向上の確認であるため、段落とし部は設けていない。せん断耐力は、補強後試験供試体の曲げ耐力以上に設定した。対象とした実橋脚と試験供試体の諸元の比較を表-1 に示す。

表-1 試験供試体の諸元

	対象実橋脚	試験橋脚	摘要
断面高さ(mm)	2800	500	1/5.6
断面幅(mm)	2800	500	1/5.6
水平力作用位置(mm)	11500	2000	1/5.75
せん断スパン比	4.11	4.00	
主筋の被り(mm)	100	40	
軸方向鉄筋比(%)	1.89	2.03	
帯鉄筋比(%)	0.095	1.689	
軸圧縮応力(N/mm ²)	1.0 (7688kN)	1.0 (245kN)	

表-2 試験水準一覧

	縦方向補強	横方向補強	縦方向シートの定着方法
供試体 NO. 1	無	AT-60 1	---
供試体 NO. 2	AT-60 2	AT-60 1	鋼板との付着

供試体の曲げ補強のアンカー鉄筋は、載荷軸方向のみ行い、載荷側面には配置しない。これは、補強効果の評価を明確にするためである。曲げ補強のアンカー鉄筋量は、載荷面一面当たり D13-5 本とした。

キーワード：アラミド繊維シート、耐震補強、曲げ耐力、変形性能

連絡先：東京都新宿区荒木町 13 番地 4 号 住友建設（株）技術部 藤原保久 TEL03-3225-5134

これは、計算上補強前に対し約 25%の耐力増加である。曲げ補強の縦方向シート量は、補強アンカー鉄筋の降伏強度とシートの設計用引張強度を一致させた。アラミド繊維シートによるじん性補強設計は、『アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案) 平成 10 年 1 月 アラミド補強研究会』に従った。その結果、じん性補強の横方向シートは、AT-60 となる。

試験水準の一覧を表-2 に示す。供試体 NO.1 は、横方向に 60tf/m のシートによるじん性補強のみを行った基準供試体である。供試体 NO.2 は、横方向に 60tf/m、縦方向に 120tf/m のシートによる曲げ補強を行った供試体である。供試体 NO.2 は、柱基部で縦方向シートを鋼板の付着強度で定着し、鋼板に取り付けたスタットジベルを介し、アンカー鉄筋に応力を伝達する。

試験供試体の概略寸法、および鉄筋配筋図を図-1 に、曲げ補強を行った供試体の補強仕様を図-2 に、柱基部のシート定着部の詳細を図-3 に、製作状況を写真-1 に示す。

供試体は 2 断配筋とし、主筋に D13 (SD345)、帯鉄筋に D6 (SD345) を使用した。供試体のじん性補強は、柱基部より 1800mm の高さの範囲とした。供試体 NO.1 の補強方法は、全区間において横方向のアラミド繊維シートで行った。供試体 NO.2 は、柱基部より 750mm は RC 巻き立て、750~1800mm は横方向のアラミド繊維シートによる補強を行った。RC 巻き立て部の帯鉄筋量は、シート補強部のシートの設計引張強度と鉄筋の降伏強度を単位長さ当たりで一致させた。また、RC 巻き立て補強部は、アンカー鉄筋の定着長を含む根巻きコンクリートと兼用している。

RC 巻き立て部は、柱基部より 20mm の隙間を設けた。これは、根巻きコンクリートが曲げ耐力に及ぼす影響を無くし、アンカー鉄筋による曲げ補強効果を明確にするためである。

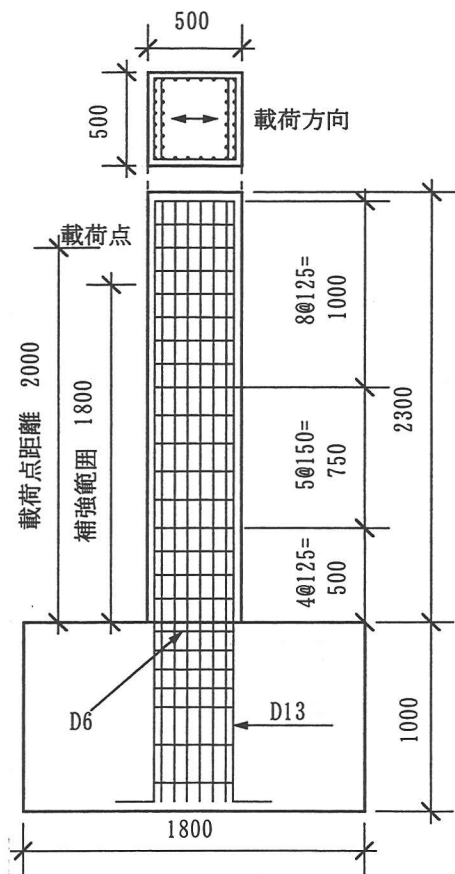


図-1 供試体概略図

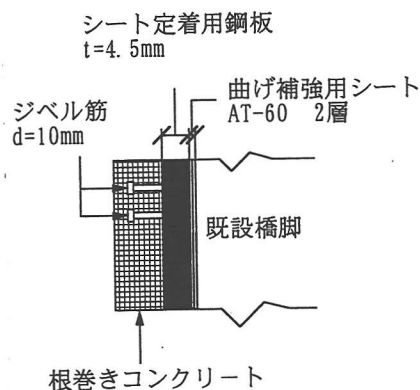


図-3 シート定着部詳細図

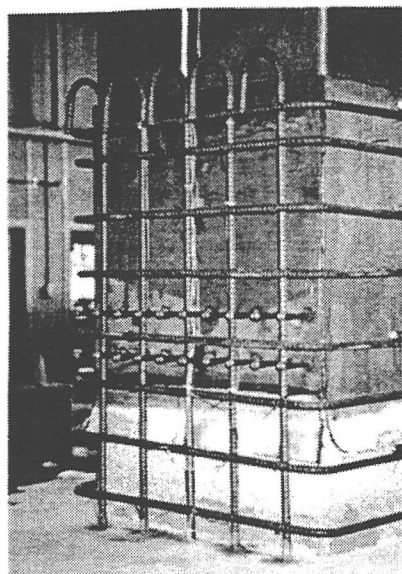


写真-1 製作状況

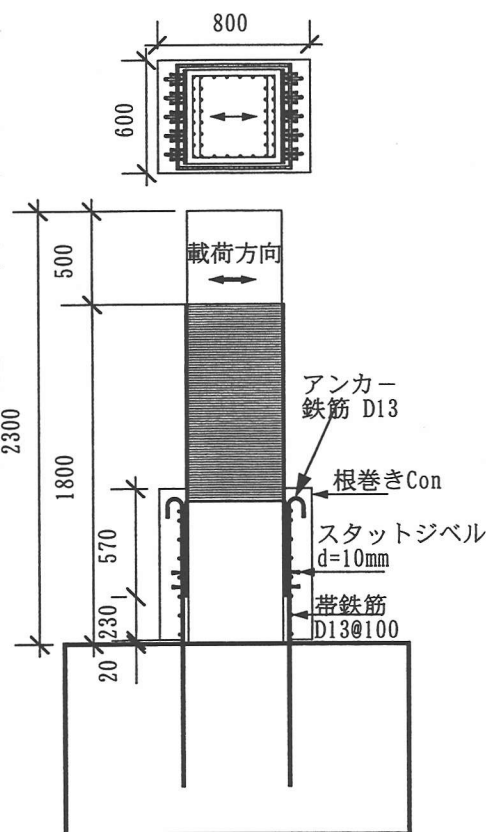


図-2 供試体の補強仕様

曲げ補強用縦方向シートは、柱基部より 250 (0.5d) ~1800mm の範囲とした。縦方向シートの定着部は、『炭素繊維シートによる RC 橋脚補強に関する設計施工要領 (案) : 平成 9 年 5 月 : 阪神高速道路公団』に準拠し、柱基部より 0.5d の位置にした。すなわち、柱基部より 0.5d 区間が曲げ破壊の塑性化領域である。シートの定着方法は、鋼板との付着強度である。定着用鋼板は、厚さ $t=4.5\text{mm}$ とした。

供試体 NO.2 における応力伝達に必要なジベル筋量は、『RC 橋脚の耐震性向上設計要領 (案) : 平成 7 年 11 月 : 首都高速道路公団』に従い、アンカー鉄筋 1 本当たり 4 本 ($d=10\text{mm}$) とした。

載荷は、静的に一定軸力下で正負交番繰返し載荷を行った。主筋が、事前に行った材料試験より得られた特性値 (主筋の降伏応力 $\sigma_{sy}=360\text{N/mm}^2$) に対応する歪値に達した時の荷重を初期降伏荷重とした。その時の正負の初期降伏変位の平均値を基準降伏変位とし、その整数倍の変位に対して各 3 回の交番載荷を変位制御で行った。初期降伏荷重を下回った時点を終局と定義した。一定軸圧縮応力は実橋脚と一致させ 1.0N/mm^2 とした。すると供試体への載荷軸力は 245kN になる。

2.2 試験結果

2.2.1 変形性状

各供試体の履歴曲線を図-5~6 に示す。初期降伏荷重 ($1\delta y$) は、躯体主筋が材料試験より得られた歪値 (1935μ) に達した時とした。

供試体 NO.1 の場合、主筋が初期降伏歪に達したのは、載荷荷重= 178kN 、その時の変位量は正負の平均で 10.0mm であった。 $4\delta y$ で横方向シートの剥離が観察され、 $5\delta y$ で最大荷重 219kN に達した。その後、 $6\delta y \sim 8\delta y$ 間において柱基部 1d 区間でシートがはらみだし徐々に載荷荷重が低下し、正側 $8\delta y$ 、負側 $9\delta y$ で主筋が破断し初期降伏荷重を下回った。 $11\delta y$ で初期降伏荷重の 80% を下回ったため試験を終了した。最終変位量は正負の平均で 90.0mm 、靱性率は 9.0 であった。

供試体 NO.2 の場合、まずアンカー鉄筋が載荷荷重= 191kN で降伏歪に達し、躯体主筋が降伏歪に達したのは載荷荷重= 245kN 、その時の変位量は正負の平均で 10.4mm であった。 $2\delta y$ で根巻きコンクリートにひび割れが発生し、 $4\delta y$ で柱基部より 5~10cm の位置の根巻きコンクリートのひび割れの開きが顕著になり、 $5\delta y$ で最大荷重 293kN に達した。その後、 $6\delta y$ で根巻きコンクリートが剥落し、正負側ともに $8\delta y$ でアンカー鉄筋が破断し、供試体 NO.1 の最大荷重程度まで耐荷力が低下した。その後は供試体 NO.1 と同様に、躯体の主筋が破断し徐々に載荷荷重が低下し、 $11\delta y$ で残存耐力が、供試体 NO.1 とほぼ同等になったため試験を終了した。補強後の初期降伏荷重で評価すると、最終変位量は正負の平均で 83.5mm 、靱性率は 8.0 であった。供試体 NO.1 の初期降伏荷重で評価すると、最終変位量は正負の平均で 96.2mm 、靱性率は 9.3 であった。

2.2.2 縦方向アラミド繊維シートの歪性状

曲げ補強を行った供試体の縦方向シートの歪性状を図-7 に示す。引張力作用時において、引張歪が変位量の増加に

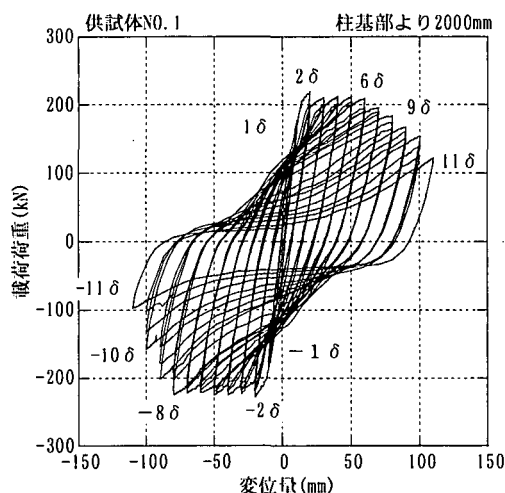


図-5 履歴曲線 (供試体 NO.1)

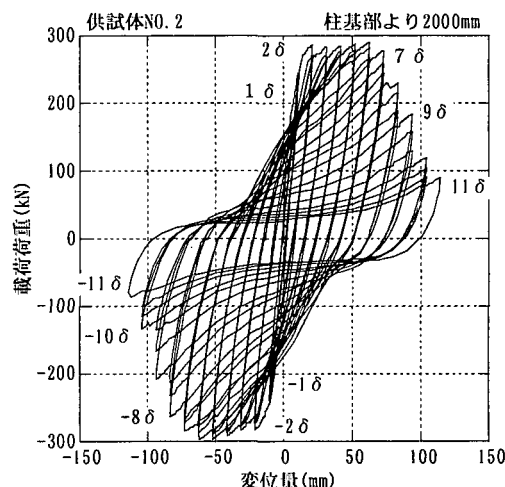


図-6 履歴曲線 (供試体 NO.2)

に伴い増加しており、シートが引張材として有効に機能していると考えられる。すなわち、アンカー鉄筋とシート間の応力伝達が円滑に行われていることを表している。また、圧縮力作用時において、圧縮歪が試験終了まで一定の値を示している。これは、橋脚躯体と縦方向シートの付着が良好であり、一体性が確保されていることを表していると思われる。

2.2.3 エネルギー吸収能の比較

変位レベルでの累積吸収エネルギーの比較を図-8 に示す。縦軸は載荷荷重、および変位置で除し無次元化している。初期降伏荷重を下回る以前においては（変位置=100mm 以下）、同レベルでエネルギー吸収能力を評価することが可能であり、安定した履歴性状であると思われる。すなわち、曲げ耐力が増加しても履歴曲線が乱れていないことを表している。

2.2.4 包絡線の比較

各供試体の初期載荷における包絡線の試験値と実験値の比較を図-9 に示す。計算値は事前に行った材料試験の結果を使用し、平成 8 年 12 月の道路橋示方書に準拠して求めている。試験供試体は耐力、変形量ともに、道路橋示方書に対して安全側にある。また、補強効果は、試験値の初期降伏荷重がやや高めであるが、供試体の破壊耐力である最大耐力で評価すると、ほぼ計算と同じ補強効率であった。供試体の破壊状況を写真-2 に示す。

2.3 まとめ

本試験の範囲内において、以下のことが検証された。

1. 今回用いた構造形式で、縦方向アラミド繊維シートとアンカー鉄筋の応力伝達が円滑に行われている。
2. 今回用いた補強方法によりエネルギー吸収性能が向上し、その増加量は補強方法の相違に関わらず、ほぼ同レベルで評価可能である。
3. 今回用いた補強方法により所定の曲げ耐力が増加し、道路橋示方書で示す耐力、及び変形性能を有する。

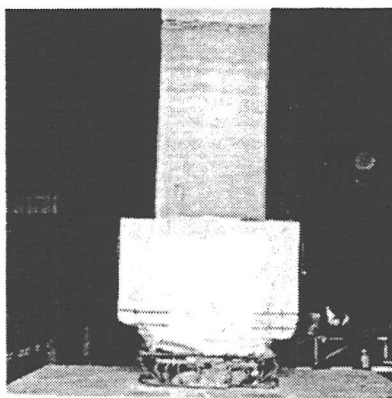


写真-2 破壊状況（供試体 NO. 2）

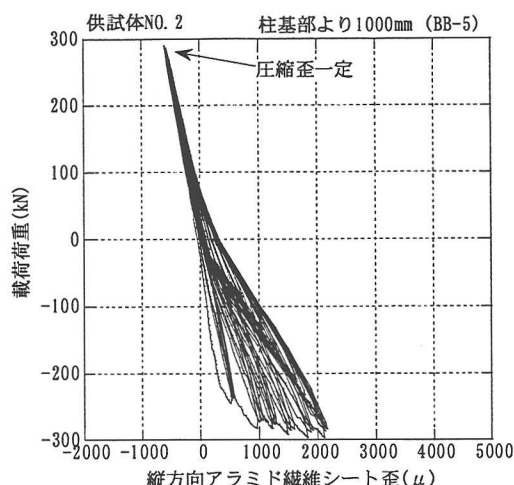


図-7 縦方向繊維シートの歪性状

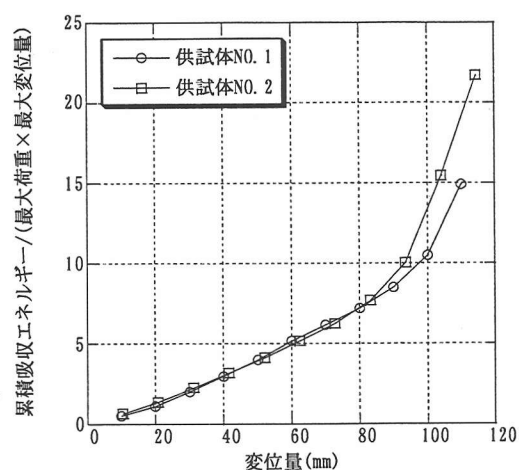


図-8 累積吸収エネルギーの比較

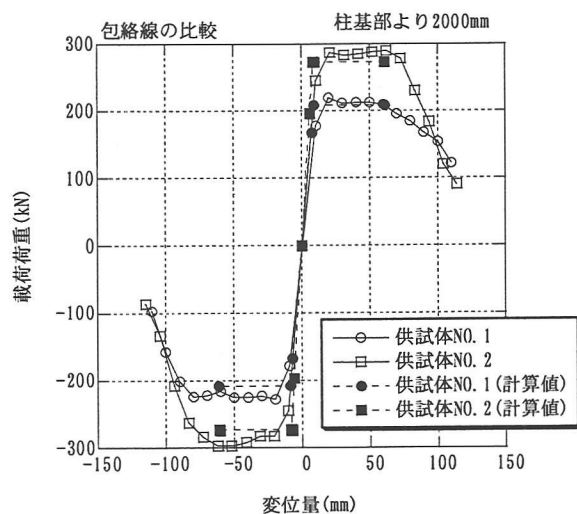


図-9 包絡線の比較

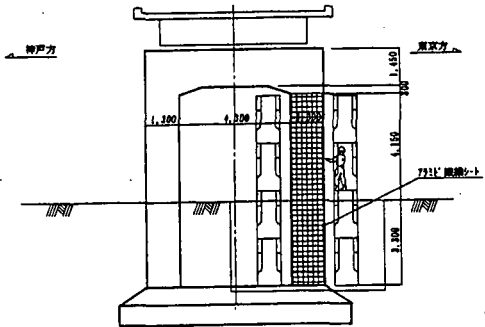
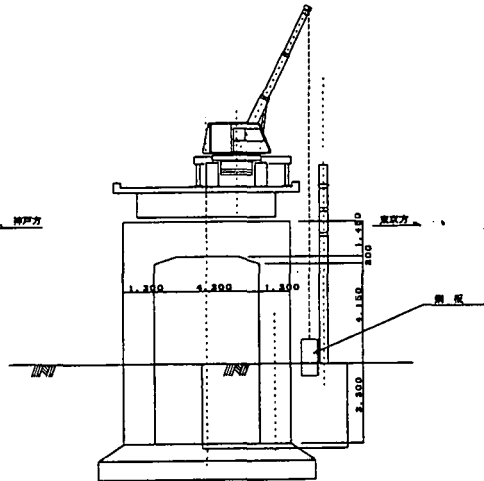
3. 栗原跨線橋橋梁耐震補強工事への適用

3.1 施工概要

栗原跨線橋橋梁耐震補強工事は東海道新幹線および東海道本線を跨ぐ橋梁の橋台、橋脚の耐震補強および落橋防止装置の設置を行う工事である。

橋脚の耐震補強工法としては、曲げ制御式鋼板巻立て工法で計画されていた。ところがその中の1橋脚（P5橋脚）については、東海道線貨物線に囲まれた狭隘な空間での作業となり、鋼板吊込み等の作業条件が厳しいと考えられた。そこで、このような施工条件下でも安全かつ確実に耐震補強を行うための工法について検討し、アラミド繊維シートを用いた曲げ耐力向上方式耐震補強工法を採用した。曲げ制御式鋼板巻立て工法との比較を表-3に示す。表よりわかるように本工法の方が鋼板巻立て工法に比べて、施工性がかなり改善されるとともに、工期、経済性の面でも優れている。

表-3 アラミド繊維巻立て工法と鋼板巻立て工法の比較

	アラミド繊維シート工法	鋼板巻立て工法
施工概要図		
補強概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設橋脚の表面にアラミド繊維シートをエポキシ系樹脂を用いて巻立て補強する。 ・ 橋脚のじん性、せん断補強としては、帯筋方向に巻立て、曲げ補強としては、主筋方向に巻立てる。 ・ 基部にアンカー筋D29を設置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設橋脚を鋼板により巻立て、隙間に充填剤を注入し、一体化させ補強する。 ・ 鋼板巻立てにより、せん断耐力、じん性の向上および曲げ補強が同時に行える。 ・ 基部にアンカー筋D25を設置する。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 使用材料は人力で運搬可能であり、狭いスペースでも施工できる。 ・ 施工期間が短い。 ・ 補強後の断面増加はほとんどない。 ・ 接着樹脂の紫外線劣化を防止するため、最低限度の保護層の施工が必要。 ・ 円形ライナープレート（φ2700）で施工可能。 ・ 掘削量：15m³ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 材料搬入に揚重機が必要で、そのための作業スペースを要する。 ・ 現場溶接が必要。 ・ 鋼板の原寸加工に手間がかかる。 ・ 工場加工の製品を用いるので材料の信頼性は高い。 ・ 塗装の塗り替えが必要。 ・ 小判型ライナープレート（φ2700×6000）が必要。 ・ 掘削量：46m³
工期	46日	69日
工費	1,00	1.35
備考	◎	○

3.2 P5橋脚の補強設計

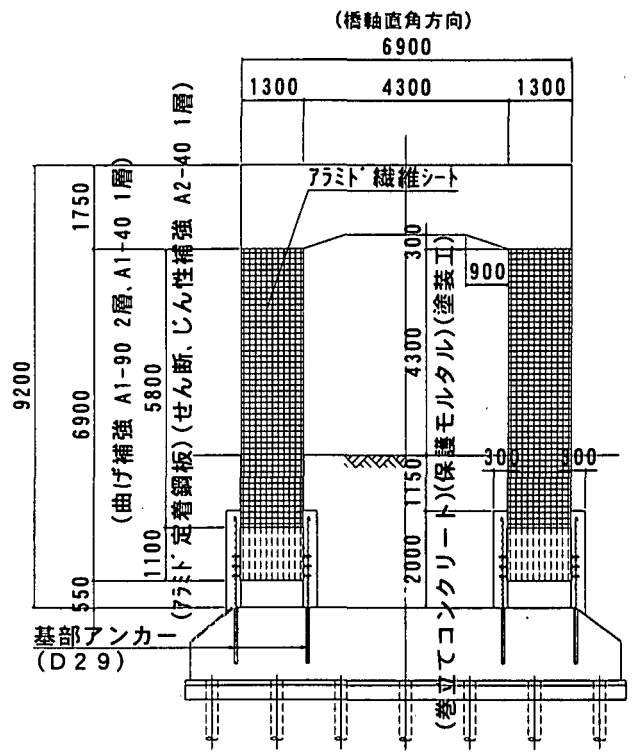
P5橋脚は図-10に示すように鉄筋コンクリート製の門型柱である。

平成7年6月の「復旧仕様」に従って、既設橋脚の耐震性を照査した結果、曲げ耐力が不足しており、耐震性がないと判断された。耐震補強工法としては、前述の比較よりアラミド繊維シートを用いた工法を採用し、補強設計は「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法、設計・施工要領(案)平成10年1月 アラミド補強研究会」に従って行った。その結果、曲げ補強用縦方向シートは90tfシート2層、40tfシート1層、横方向シートは40tfシート1層となった。また、曲げ耐力を向上させるための基部アンカー筋はD29-16本となった。

表-4に設計結果を、図-10に補強図を示す。

表-4 P5橋脚の補強設計結果

		単位	既 設	補強後
柱形状	柱高	m	9.200	9.200
	部材幅	m	1.300	1.300
	部材高	m	1.100	1.100
主鉄筋 (基部)	径・間隔		橋軸D16c1c300	橋軸D16c1c300
	鉄筋量	cm ²	31.776	31.776
横方向	径・間隔		D16c1c250	D16c1c250
地震時保有水平耐力照査結果				
水平耐力	ひびわれ	tf	9.21	9.21
	降伏	tf	8.69	12.38
	終局	tf	10.78	32.34
水平変位	ひびわれ	m	0.0068	0.0068
	降伏	m	0.0065	0.023
	終局	m	0.3118	0.3831
段落とし部終局水平耐力		tf	—	36.69
柱基部終局水平耐力		tf	10.78	32.34
判定Pu/Pbu			—	1.135
損傷位置			基部	基部
せん断耐力		tf	88.25	114.074
破壊形態			曲げ破壊	曲げ破壊
保有水平耐力		tf	9.00	25.688
許容塑性率			8.00	8.00
設計水平震度			1.67	1.67
等価水平震度			0.43	0.43
等価重量		tf	54.74	54.5
水平力=khc×w		tf	23.54	23.44
			khc×w>Pa	khc×w<Pa
			OUT	OK



基部詳細図

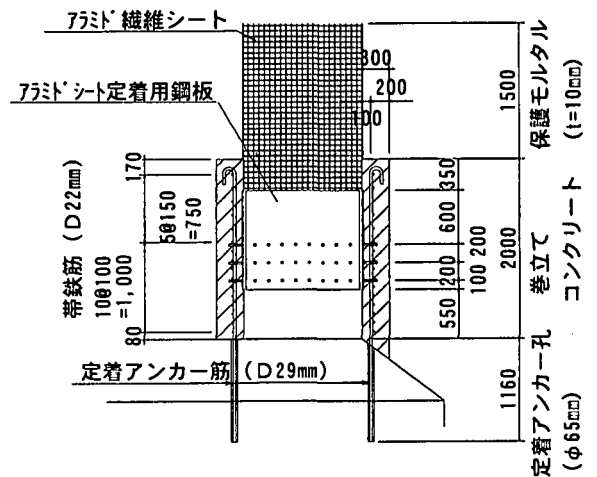


図-10 補強図

3.3 施工

3.3.1 施工順序

P5橋脚の施工順序を図-11に示す。

3.3.2 仮設工

P5橋脚は東海道貨物線の線路間に位置し、作業ヤード幅としては2.78mしか確保できず、非常に狭隘な空間での作業を余儀なくされた。また、当初計画では作業員の出入りはJR線の線路横断する必要があり、資機材の搬入は全て橋上からのクレーン作業にて行う方法であった。しかし、耐震補強工法をアラミド繊維シート工法に変更したため、重量物の搬入が不要となり、実施工では橋脚横に昇降足場兼資機材投入ガイドを設置して、作業員の出入り、資機材の搬入を全て橋上から行った。これによって作業の安全性及び効率がかなり向上した。写真-3に足場組立状況を示す。

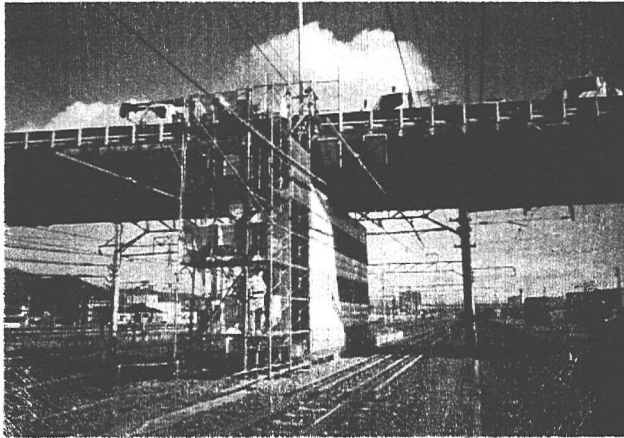


写真-3 足場組立状況

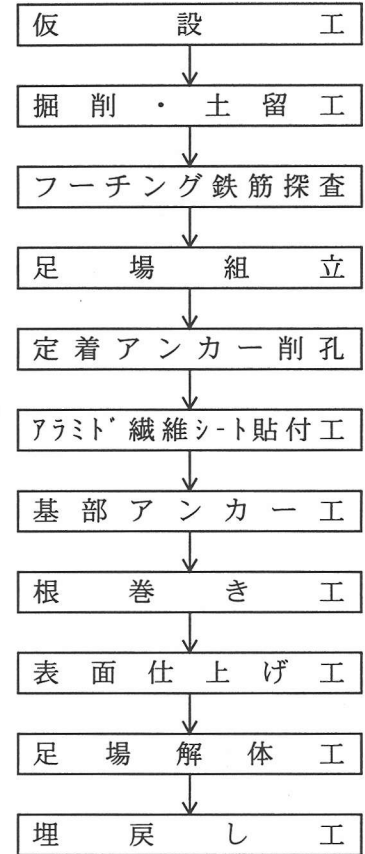


図-11 施工順序

3.3.3 掘削・土留工

P5橋脚では、フーチング上に3.5mの土被りがあるため、φ2700mmの円形ライナープレートで土留めを行い人力掘削を行った。掘削残土は簡易の残土搬出装置により立坑内から地上に引き上げ、ワイヤーモッコに集積し、橋上のクレーンにてダンプに積み込み搬出した。

3.3.4 アラミド繊維シート貼付工

アラミドシートを貼付ける下地処理として、橋脚全面をディスクサンダーを使いコンクリート表面の汚れ、風化部分を削り取った。その後、高圧ジェット水により水洗いし、粉塵等が残らないようにした。コンクリート表面の乾燥後、ローラ刷毛を用いてプライマーを均一に塗布した。さらにコンクリート表面を平坦にするためエポキシ系パラを用いて表面の段差、まめ板等処理した。

アラミドシートは幅50cm、長さ50mのものを工場より搬入して、現場にて所定の寸法に切断した。アラミドシートの接着は含浸樹脂材により行い、アラミドシート1層に対して下塗りと上塗りの2回に分けて、ローラ刷毛にて塗布した。アラミドシート1層の貼付けが完了したのち、同様の作業をくり返し必要層数を貼り付けた。

3.3.5 基部アンカー工

アラミドシート貼付け完了後、スタットジベルを溶接した定着用鋼板を取り付けた。鋼板の取付は、四隅をホールインアンカーにて仮止めし、周囲の隙間をシール後、エポキシ樹脂を注入し接着させた。写真-4に鋼板の取付状況を示す。

その後、あらかじめ削孔しておいた箇所アンカー筋を挿入・定着し、根巻き部の鉄筋を組立て、コンクリートを打設した。

最後に、表面仕上げをして、地中部分はモルタル、地表部は塗装を施した。完成状況を写真-5に示す。

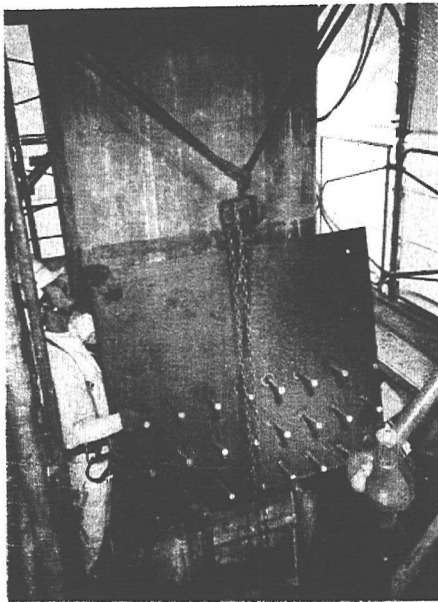


写真-4 鋼板取付状況



写真-5 完成状況

4. おわりに

近年、繊維シートを用いた耐震補強工法が実用化されているが、フーチングにアンカーして、基部の曲げ耐力を向上させる方法は困難とされていた。ここでは、アラミド繊維シートを鋼板と接着し、鋼板に取り付けたジベル筋を介してアンカー筋に引張力を伝達する工法を開発、実用化した。本工法の採用によって、従来の鋼板巻立て工法等では施工が難しい場合でも安全かつ確実に耐震補強工事が実施できることが実証された。本稿が同様の耐震補強工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領。1998.1
- 2) 阪神高速道路公団：炭素繊維シートによるRC橋脚補強に関する設計施工要領。1997.5
- 3) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料。1995.6