

首都高速道路1号線羽田ランプ付近の橋脚耐震補強工事

住友建設(株) 東京支店土木部

首都高速道路公団 湾岸線建設局設計課

首都高速道路公団 湾岸海底トンネル工事事務所

住友建設(株) 土木部

住友建設(株) 東京支店土木部

川浦 順一

今井 正智

鈴木 智宏

権藤 健二

和田 修

1. はじめに

本工事は首都高速道路1号線羽田ランプ付近において、橋脚柱の耐震補強を行うものである。補強方法としては、鋼板巻立て工法によるじん性向上補強と、さらにフーチングへのアンカーを併用した曲げ耐力制御式補強を基本とした(図-1、写真-1、2)。

当工区は住宅の密集地にある狭隘な道路に挟まれた高架橋を対象とし、高架下は公園及び駐車場として利用され、作業環境や条件が様々に制約された。大多数の柱は基本とした鋼板巻立て工法で補強したが、一部施工できない柱があり、アラミドシート補強工法、PCケーブルを併用した鋼板巻立て補強工法などの特殊な耐震補強工事を行った。また、中空断面の柱に対しては住友式高流動コンクリートを充填した。

以下に、耐震補強としては特殊な事例と考えられるこの3つのケースについて、その概要を述べる。

《工事概要》

工事名：橋脚耐震性向上工事(W-9) 東京

工事場所：東京都大田区羽田二丁目他

(工事延長 約1.3km)

発注者：首都高速道路公団 湾岸建設局

湾岸海底トンネル工事事務所

施工者：住友・イミック特定建設工事共同企業体

工事内容：橋脚耐震補強工事

R C 門型ラーメン橋脚柱(矩形断面) 118本

T型R C 橋脚単独柱(中空円形断面) 1本

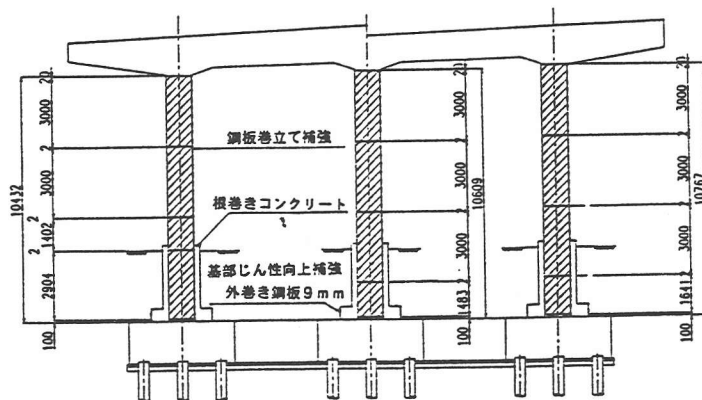


図-1 鋼板巻立て補強図

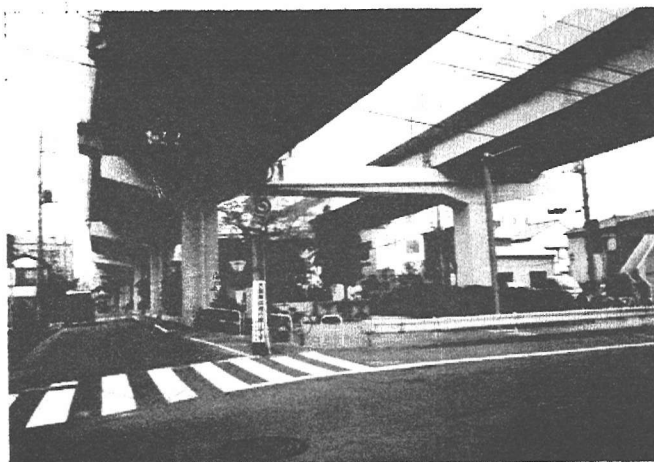


写真-2, 3 工事全景写真(完成後)

キーワード：アラミド繊維シート補強工法、住友式自動昇降足場、PCケーブル補強、住友式高流動コンクリート

連絡先：住友建設(株)東京支店土木部

(〒160 東京都新宿区荒木町14番地 TEL 03-3225-5210 FAX 03-3225-5242)

2. アラミド繊維シート補強工法による補強

一部の区間において障害となる構築物や、道路占用条件から作業帯の確保に制限があり、足場の設置、鋼板吊り込み等の施工が困難な箇所があり、鋼板巻立て工法では対応できない橋脚があった。通常の鋼板巻立て工法では対応が難しい橋脚に確実な耐震補強を行うため、このような条件下でも確実な耐震補強が出来るアラミド繊維シート補強工法を採用した。アラミド繊維シート補強工法を実施した橋脚は4本である。

また、対象橋脚をできるだけ忠実に縮小した模型供試体によりアラミド繊維シート補強工法の確認試験を行った。

1) アラミド繊維シート補強工法

アラミド繊維シート補強工法は、既設のRC橋脚にアラミド繊維シートを、エポキシ樹脂を含浸させながら貼付け、樹脂の硬化後、アラミド繊維シートとエポキシ樹脂が一体となり耐震性の向上を図るものである。このアラミド繊維シートは、軽量でしなやかな材料であり、貼付け作業は狭いスペースでも揚重機を用いず、安全にしかも短期間に施工することができる。また、高強度・軽量で耐腐食性に優れ、非磁性体・非伝導体であるので施工環境を選ばない特性を有している。補強方法には、部材軸方向に貼付け曲げ補強を行う方法と、部材軸直角方向に貼付け、せん断補強・じん性補強を行う方法とがある。

アラミド繊維シートの種類と特性を表-1に示す。

表-1 アラミド繊維シートの種類と特性

規格	AT-40	AT-60	TS200W
繊維方向	一方向	一方向	二方向
目付 g/m ²	235	350	200
設計厚さ mm	0.169	0.252	0.144
引張強度 kgf/cm ²	24,000	←	←
引張弾性率 kgf/cm ²	0.8×10^6	←	←
破断伸度 %	3.0	←	←
保証耐力 tf/m	40	60	34

2) 耐震補強計画

補強対象となる橋脚は、鋼板厚 $t=9\text{mm}$ によるじん性補強タイプである。完成写真を写真-3に示す。

アラミド繊維シートの設計方法について、必要層数を鋼板厚の引張強度に相当するように決定することとし、一方向繊維(AT-60, 目付 350g/m^2)を使用すると5.3層となった。なお、鋼板 $t=9\text{mm}$ により補強した場合と今回のアラミド繊維シート層数により補強した場合について、他の評価方法により比較を行い、今回のアラミドシートの補強量が鋼板より安全側のものであることを確認している。

本工事では計算上の必要層数に対し、一方向繊維(AT-60, 目付 350g/m^2)を水平方向に5層、二方向繊維(TS200W, 目付 200g/m^2)を鉛直方向に1層貼付けることにした。これは、計算上曲げ耐力補強を行う必要はないものの、鉛直方向にもシートを配置することにより、シート間のずれを防止してシート全体を一体化することを目的としている。アラミド繊維シート貼付け構成図を図-2に示す。

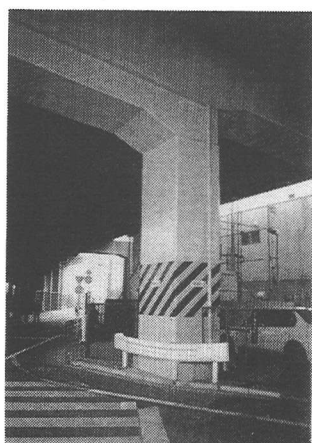


写真-3 アラミドシート補強完成写真

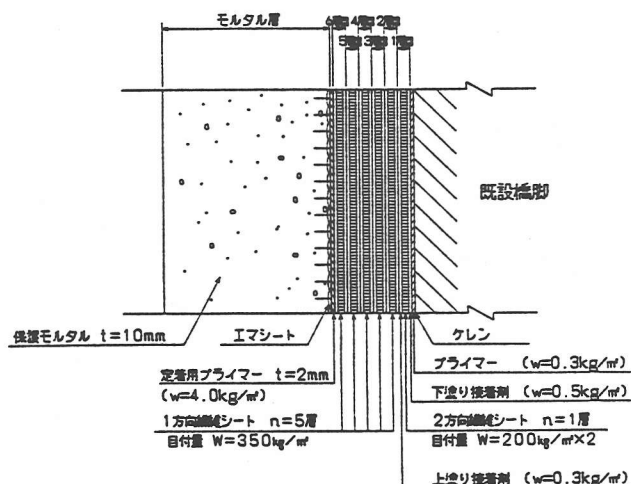


図-2 アラミド繊維シート貼付け構成図

2) 施工

施工フローを図-3に示す。

アラミド繊維シート貼付けにあたり、添加物の移設、ひび割れの調査、グラインダーによる下地処理を実施した。また、アラミド繊維シートの場合、他の繊維シート材料に比べてコンクリート表面の鋭角的な突起、段差の影響による強度低下が生じにくいことが確認されており、隅角部の処理は面取り部の角を落とす程度とした。

下地処理完了後に、コンクリート面にプライマーを塗布し、プライマーの指触硬化後、エアホールや不陸をパテにて平坦に仕上げた。

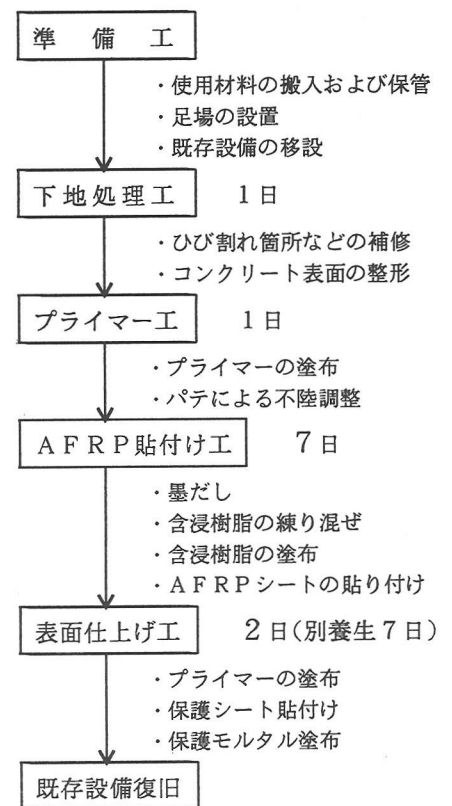
アラミド繊維シートの貼付けは、鉛直方向に二方向繊維を1層、水平方向へは一方向繊維を5層、各層毎に順次エポキシ系含浸樹脂接着材を含浸させながら行った。アラミド繊維シートによる接着剤の含浸性は非常に良く、エアホールの発生や不良箇所などは皆無であった。

当初問題となっていた足場空間の確保については、貼付け作業に要する壁面と足場までの空間が、30cm程度有れば作業が可能であり、道路占用上も問題なく施工できた。貼付け状況を写真-4に示す。

表面仕上げ方法としては、アラミド繊維シートの紫外線劣化防止のための塗装仕上げ、またはいたずら防止、車両衝突対策や火災による耐熱対策として保護モルタル仕上げがある。本工事では、施工場所が高架下であることから後者の理由により、剥離落下防止用のシートを貼付けた上に特殊セメント系のモルタルを塗布する方法を採用した。なお、モルタル塗布後、養生塗布材を塗布し硬化によるひび割れ防止を行った。

橋脚耐震補強工事で作業効率の向上を目指すため、自動昇降装置を装備した作業足場「SBS工法」を試験的に導入した(写真-5)。SBS工法を使用すれば橋脚全周および上下の移動がスピーディに行え、シートの貼付け作業等の作業性を改善し、通常の固定足場に比べ施工効率が大きく向上した。また、道路占用条件は夜間に作業帯を撤去し解放することになっていたが、自動昇降装置の支柱を道路面に配置せず、夜間の道路解放時はステージング部を上昇させることで対処でき、この面からも有効であった。

アラミド繊維シート補強工法はコンクリート、プライマー、含浸樹脂、シートが一体となり耐震機能を発揮するものであり、各材料の特性を理解した上で十分な品質管理を行う必要がある。



* 上記日数は、当工事における橋脚1基当たりの標準作業日数である。

図-3 施工フロー

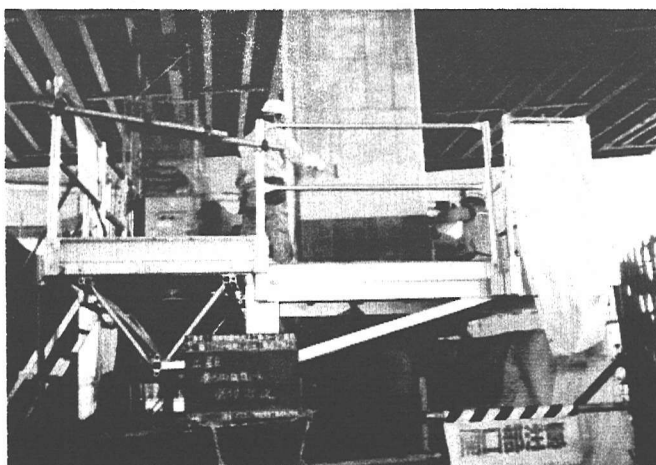


写真-4 施工状況

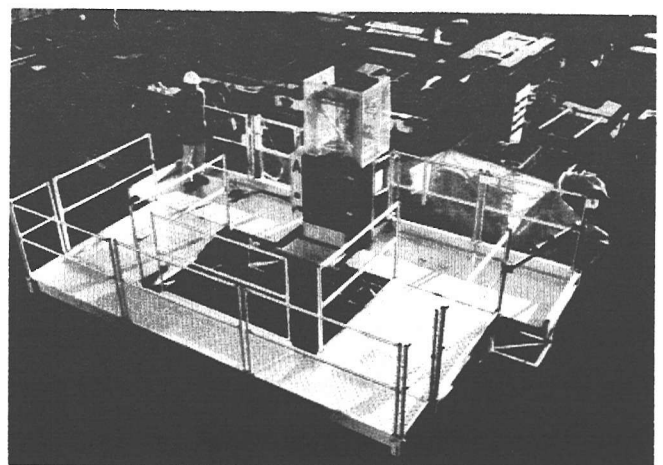


写真-5 自動昇降足場

各使用材料の品質確認だけでなく、現場で供試体を作成しアラミド繊維シートの付着試験、引張試験及び保護モルタルの付着試験などを実施した。

3) 確認実験

本実験は、アラミド繊維シート補強工法の補強効果を確認するために行った。

アラミド繊維シート補強工法を実施した4本のうち、せん断耐力比が最も小さく実験上の優位差を検出しやすい橋脚を実験対象橋脚として選定し、橋脚の諸寸法等をできるだけ等比縮小した模型供試体を作成した。模型供試体の諸元を表-2に示す。ここで、橋脚の断面高さを縮尺率の基準としている。

載荷は、静的に一定軸力下で正負交番載荷を行った。材料試験より得られた特性値から初期降伏荷重を算出し、これに対応する降伏変位を基準降伏変位とし、その正数倍の変位に対して各3回の交番載荷を行う。載荷方法を図-4に示す。

実験の結果として、荷重-変位の履歴曲線、柱基部の状況を図-5、写真-6に示す。供試体は3δyにおいて最大耐力を示し、その後6~7δyにかけて緩やかに耐力が低下し、7~8δyにかけて主鉄筋が破断して急激に耐力が低下したため実験を終了した。柱基部のアラミドシートは3δyごろからはらみだす現象が見られ、最終的に30mm程度はらみだしたが、シートの破断や剥離といった現象は見られず、シートは最後まで健全であった。また、この結果から求められる供試体のじん性率は、計算上求められたじん性率を上回っている。

アラミド繊維シート補強工法の採用により、他の橋脚よりも厳しい施工条件下にもかかわらず、鋼板巻立て補強よりも短時間に効率よく耐震補強が行えたと考えられる。また実験の結果、今回実施したアラミド繊維シート補強工法の補強効果を確認することができた。

表-2 模型供試体諸元

	羽-1942-1 橋脚	供試体	摘要
断面高さ d(mm)	1700	500	s=1/3.4
断面幅 b(mm)	1300	500	s=1/2.6
載荷スパン(mm)	8977	2600	s=1/3.4
主筋の被り(mm)	70	20	s=1/3.4
引張鉄筋	D32	D10	s=1/3.2
側方鉄筋	D29	D10	s=1/2.9
主筋断面積(cm ²)	798.4	88.5	
主筋比(%)	3.6	3.6	
引張鉄筋比(%)	1.0	1.0	
帯鉄筋	φ 13,@250	φ 4,@75	s=1/3.4
軸圧縮応力(kgf/cm ²)	7.7 (170tf)	7.7 (19.3tf)	

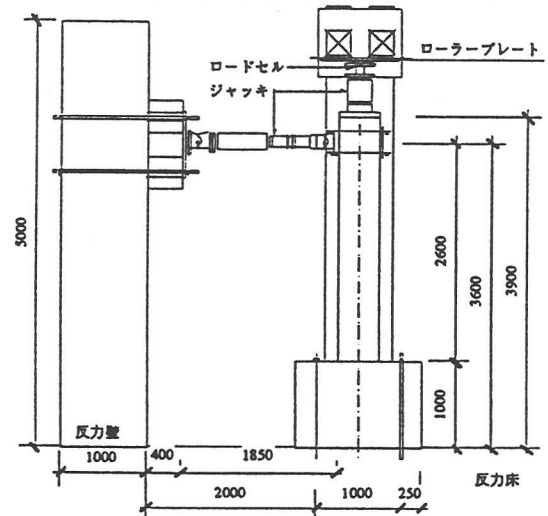


図-4 載荷状況

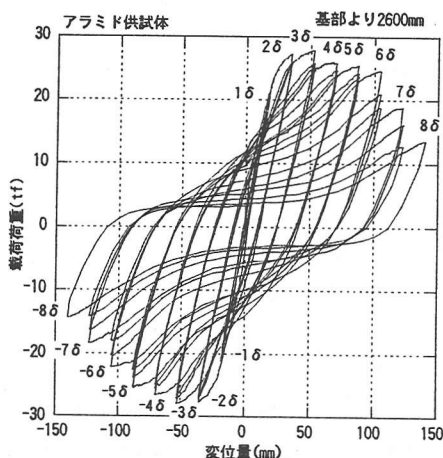


図-5 荷重-変位履歴曲線

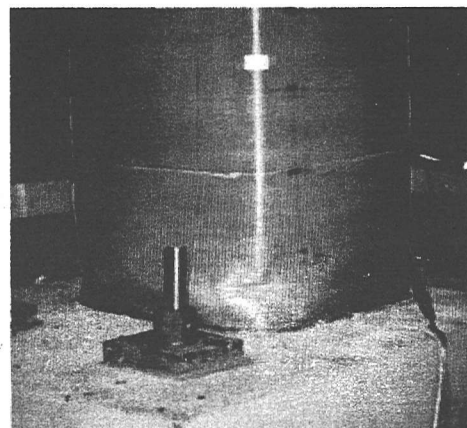


写真-6 供試体基部の状況

3. PCケーブルを併用した鋼板巻立て補強

当工区において羽田ランプが分離し環状八号線と交差している。この区間は2層式の門型ラーメン橋脚となっており、ランプ横梁を挟んだ上段柱、下段柱それぞれに対し耐震補強が必要である(写真-7、8)。

このうち上段柱は首都高ランプと側道に挟まれたスペースでの施工となり、また作業によっては夜間ランプの交通を規制する必要がある。また、当工区の高架橋はもともと水路上に建設されたものであり、旧護岸がそのまま残されていた。このため、下段柱はランプ桁下の作業であるとともに、旧水路内での作業となる。

この様な状況の上段柱、下段柱それぞれに対し、次のような耐震補強を実施した。

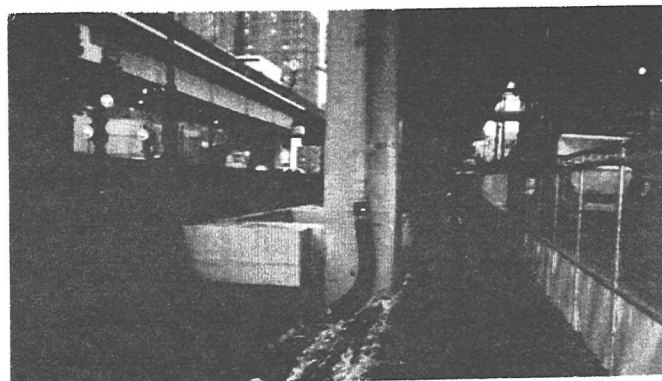


写真-7、8 ランプ部橋脚

1) 上段柱の耐震補強

上段柱については、鋼板巻立てによりじん性を向上させ、さらに多量のアンカーを用いた曲げ耐力制御式補強が必要となった。しかし、アンカーの配置位置が中間横梁上面となり、また横梁には多量の鉄筋が配置されていたことから、現実に必要量のアンカーを打設することが不可能な構造であった。上段柱には上部工荷重が偏載して作用し、柱基部には常にアンバランスモーメントが作用している状態であったことから、柱側面にPC鋼材を配置してモーメントを打ち消すことにより、曲げ耐力を確保する補強方法を考えた。柱の引張側側面にはクラックの発生も見られたため、引張応力を打ち消すプレストレスの導入は耐震性を向上するだけでなく、耐久性や耐荷性の向上も期待できる。

PC鋼材の配置について、これまで橋脚補強に外ケーブルを用いた事例もあるが、今回は同時に鋼板巻立て工法によってじん性を向上させる必要もある。よって完成後の景観にも配慮し、柱側面において鋼板と柱面に400mmのすき間を設け、この中にPC鋼材を配置し、コンクリートで充填することとした。

PC鋼材の緊張は柱上端側にて行うこととしたが、この場合PC鋼材の定着スペースが柱幅により限定され、また上部には沓座拡幅のためのブラケットが取り付けられていたため、緊張ジャッキスペースが制約される。このため、PC鋼材及び定着工法には、比較的コンパクトな定着具と緊張ジャッキにより、大きなプレストレスを導入できるφ28.6mmシングルストランドケーブルを選定した(図-6)。

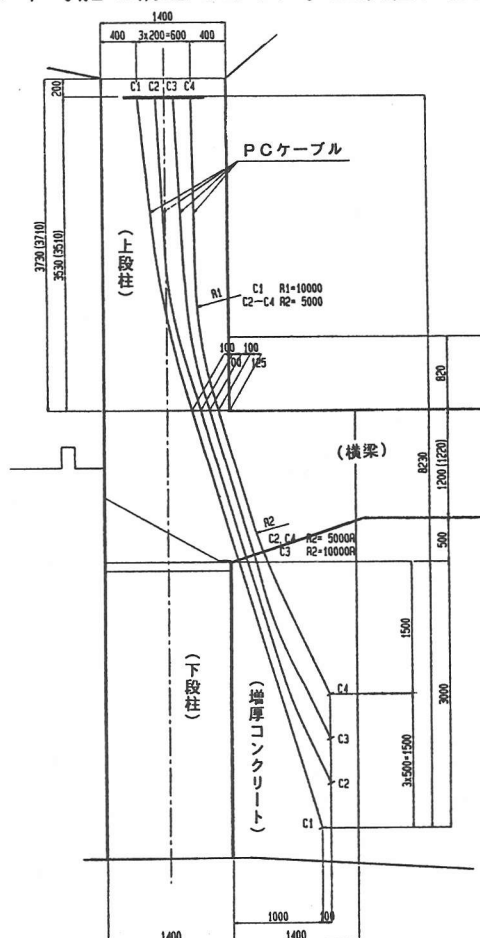


図-6 PCケーブル配置図

また、上段柱の施工はランプの片側車線を夜間規制して行うものであるが、規制可能な期間が短く2週間程度しかなく、少しでも規制を必要とする作業を減らす必要があった。そこで、シングルストランドケーブルをアフターボンドケーブルとして、車線規制が必要とされていたグラウト作業を不要とした。また、グラウト作業を無くすことにより経済性も向上する。

2) 下段柱の耐震補強

下段柱については、基本としている鋼板巻立て工法によるじん性補強が必要となった。しかし、旧水路内の護岸が存在し、しかも側道と旧水路内の地盤高さに3.0m程度の段差があり、通常のライナープレートを用いた土留め工では掘削できなかった。このため、側道とランプの大幅な交通規制を伴う山留め工が必要となるが、このような道路占用、規制は現実に許されない。

そこで、水路内を掘削することは比較的容易であることから、図のように柱内側に増厚コンクリートを打設し、下段柱の曲げ耐力及びじん性を確保することとした。またこの増厚コンクリートはまた上段柱の補強のために配置するPCケーブルの定着ブロックとしても利用できる(写真-9)。

以上の補強により、ランプ部の2層式のラーメン橋脚の耐震補強を実現することができた(図-7)。

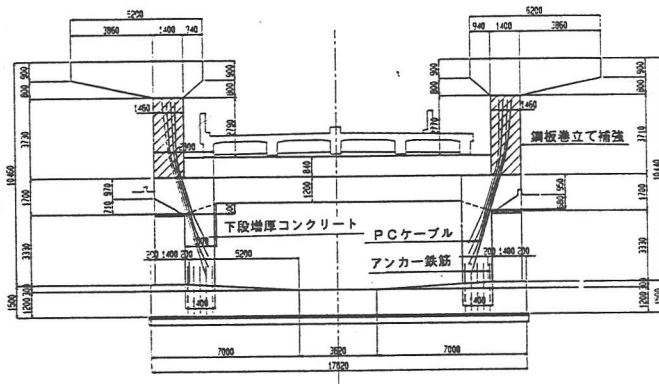


図-7 ランプ部橋脚補強図

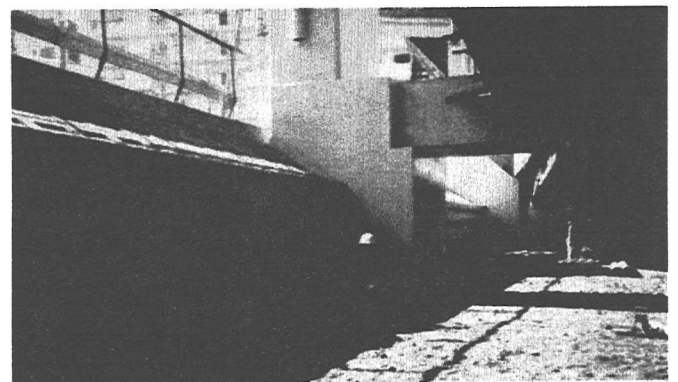


写真-9 下段柱(完成後)

4. 中空断面への高流動コンクリート充填による補強

本工事のうち、最も多摩川側に位置する橋脚は円形断面中空RC橋脚である。鋼板巻立て工法によるじん性向上補強を行ったが、補強効果を確実なものにするため、中空部にコンクリートを充填する必要があった。

1) 住友式高流動コンクリート

従来、コンクリート施工では、複雑な構造物や締固めが容易でない構造物では、スランプの大きなコンクリートが望まれ、高性能AE減水剤や流動化剤が使用されている。この様な中で、「高性能AE減水剤を用いたコンクリートの施工指針(案)」(土木学会)では、スランプが大きいコンクリートは材料分離を起こしやすいため、スランプ18cmまでのコンクリートが規定されていた。

これに対して、材料分離抵抗性を確保しつつ高い流動性を付与したコンクリートを高流動コンクリートと呼んでいる。一般に、流動性は高性能AE減水剤を使用して付与し、材料分離抵抗性は分離低減剤の使用や粉体(セメントや混和材)量を調整しセメントペーストに粘りを与え骨材の分離を抑制している。

住友式高流動コンクリートは、粉体量を調整することで材料分離抵抗性を確保したものであり、次のような特徴をもっている。

- ①生コンプラントが所有するセメントや骨材を使用し、高性能AE減水剤以外の特別な材料は不要である。
- ②水セメント比を低く抑え粘りを付与するため高強度が得られる。
- ③高強度設計のため普通ポルトランドセメントを使用しても初期に所要強度が得られる。
- ④緻密なコンクリートであり、締固め不良などによる欠陥部が少なくなり耐久性に優れる。

2) . 施工方法の検討

対象とする橋脚は、直径φ3.0m、高さ12.5mのT型単柱RC橋脚である。中空部は直径φ1.8m、高さ7.3mあり、内部の障害物などを確認することはできない。

コンクリート充填は、既設橋脚の主筋を極力切断しないことが望ましいが、柱基部の最外部にはD35鉄筋126mm間隔（純間隔91mm）で配置されている。このため、注入孔のコアボーリング径を80mmとする必要がある。橋脚の形状、補強概要を写真-10および図-8に示す。

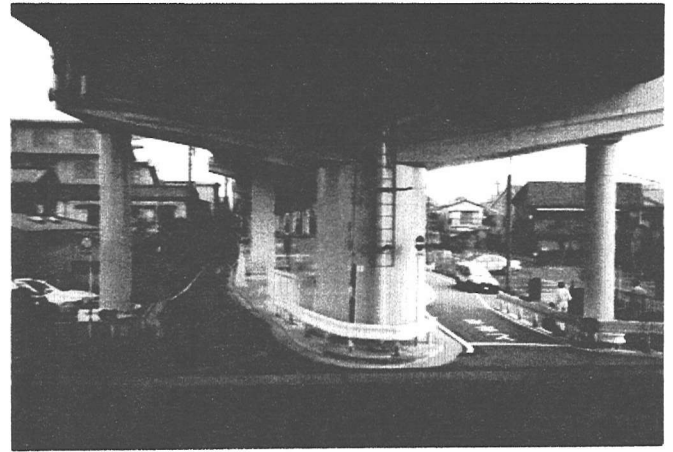


写真-10 中空橋脚

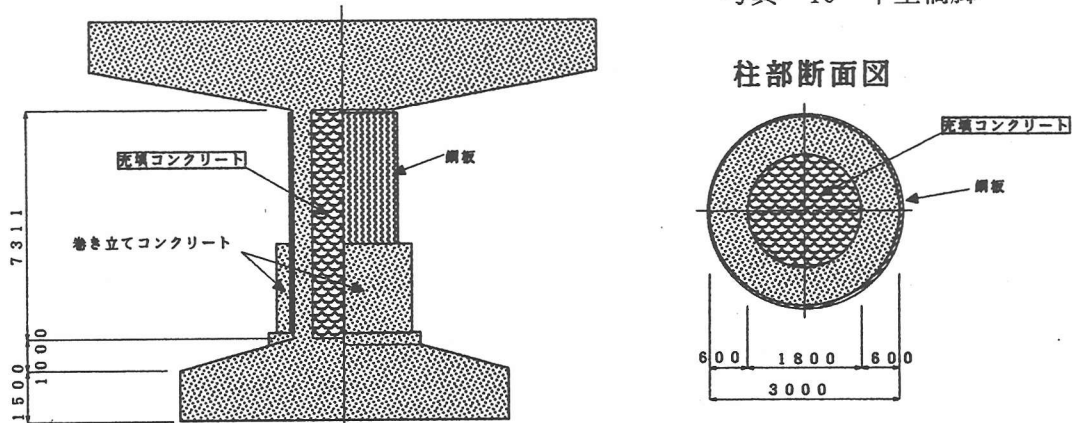


図-8 耐震補強図

橋脚中空部のコンクリート充填方法として、スランプ18cmのJISコンクリートを使用する方法と、高流動コンクリートを使用する方法が考えられた。コンクリートの選定比較表を表-3に、また今回用いたコンクリートの配合表を表-4に示す。

本工事の目的は、既設橋脚を鋼板巻立ておよび中空部へのコンクリート充填により補強し、じん性を向上させるものである。JISコンクリートを使用した場合、主筋を切断することが避けられず、橋脚の重要な部分に弱点を残す恐れがあると考えられ、本来の目的に反するものである。これに対し、高流動コンクリートを用いた圧入工法は、主筋を切断することなく施工可能であり、本工事の主旨に添った工法であると考えられた。さらに、より確実な充填性があることから、施工性や品質面でも優れていると判断し使用した。

表-3 コンクリート選定比較表

	JISコンクリート	住友式高流動コンクリート
スランプ	18cm	スランプフロー55~65cm
使用材料	生コンプラント所有材料	生コンプラント所有材料
混和剤	流動化剤あるいは高性能AE減水剤	高性能AE減水剤
配合	製造者側ですでに配合設計されており、時間がかからない。強度データも豊富にある。	試験練りを行い配合設計を行う必要がある。JISコンクリートに比べ低水セメント比となるため強度的な問題はない。
注入口の確保	橋脚の主筋を切断する必要がある	主筋を切断する必要はない
締固め	必要	不要
注入方法	コンクリートの落下高さを考慮し注入口を2~3箇所設け、筒先を移動させながら注入する。	注入口と排気口を設け、筒先を移動させることなくコンクリートを押し上げる。

表-4 住友式高流動コンクリート配合表

Gmax (mm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水 セメント比 (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	55	4.5	32.7	162	495	839	837

3) コンクリート注入作業

現場は大型車進入禁止の区域であり、小型アジテータ車によって運搬した。運搬時間は片道20分程度である。1車当たりの積載量は 2m^3 として1バッチ（ミキサ能力 6m^3 に対し 2m^3 練り混ぜ）で練り上げ積み込んだ。ポンプ車も最大吐出量 $60\text{m}^3/\text{hr}$ の小型車を使用した。

既設橋脚には最下部に水抜き孔（ $\phi 20\text{mm}$ ）を2箇所、下より2.0m位置に注入口1（ $\phi 80\text{mm}$ ）、上より1.5m位置に注入口2（ $\phi 80\text{mm}$ ）の計2箇所、最上部に空気孔（ $\phi 40\text{mm}$ ）を2箇所設けた。ポンプ車の圧送管は $\phi 125\text{mm}$ である。壁表面にはポンプ車からの圧送管を取り付ける治具を設け、圧送後には治具で注入口を閉鎖する。注入口1からコンクリートを押し上げ充填する計画とし、注入口2はコンクリートの注入高さの確認と圧送能力に限界が生じたときのために準備した。注入孔の配置と状況を、図-9、写真-11に示す。

コンクリートの注入速度はポンプ圧を観察しながら行った。コンクリートが注入口1に達しないうちは、注入管が閉塞するような状態が見られたが、注入高さが注入口1に達すると比較的スムーズな注入が行えた。この結果、コンクリートの打ち上がり高さが注入口1に達するまでの注入速度は $2\text{m}^3/\text{hr}$ 、注入口1に達してからの注入速度は $4\text{m}^3/\text{hr}$ 程度であった。吐出圧力は最大でも約 $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度であり、最終的に注入口2に筒先を移動することなく中空部を打ち上げることができた。

以上のように住友式高流動コンクリートの採用により、既設断面を痛めないように設けた $\phi 80\text{mm}$ という非常に小さな注入孔から、コンクリートを圧入することが可能となった。

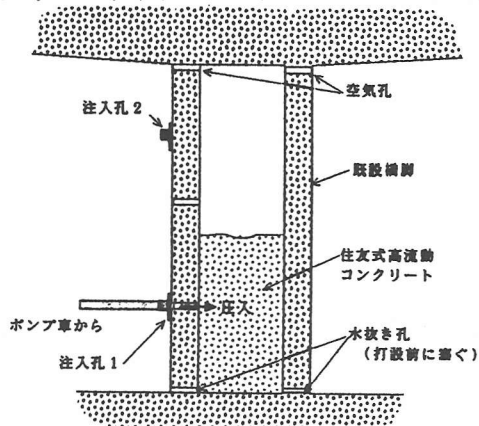


図-9 注入孔配置

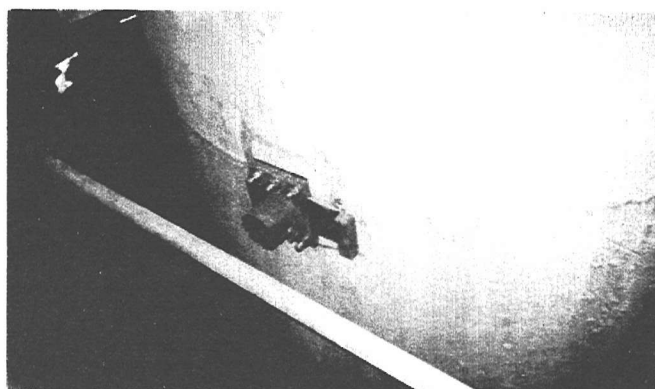


写真-11 注入孔

5. あとがき

本工事は多くの制約条件下で特殊な耐震補強工事を行ったので、この事例について報告した。このうち、アラミド繊維補強工法による耐震補強は一般的な工法として、簡便な設備で短期間に確実な補強を実施できることが確認できた。

現在、各地で鋼板巻立て工法を標準工法とした耐震補強工事が実施されている。このうち都市部に建設されている比較的古い高架橋の耐震補強工事は、近接家屋や高架下の道路、鉄道などにより非常に多くの制約を受ける場合が見られる。また一方で、阪神大震災に経験したように、都市部の高架橋が震災を受けた時の社会的な影響は非常に大きく、多くの制約を受けたとしても確実で可能な耐震補強工法を選択し、これを実施しなければならない。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) (財) 鉄道総合技術研究所：

アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針、平成8年11月

2) 梅津健司ほか：アラミドシートにより補強したRCはりのせん断性状、

JCI北海道支部、新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム、平成8年11月