

水中部 RC 橋脚の耐震補強工法の開発

清水建設（株） 正会員 前田 敏也
 横浜市 環境保全局 近藤 正佳
 横浜市 港湾局 鈴木東四郎
 清水建設（株） 正会員 今井 克美
 東亜建設工業（株） 正会員 羽瀨 貴士

1. はじめに

1995 年の阪神・淡路大震災以降、道路橋を初めとする橋梁下部工に対する新たな耐震基準が整備されるとともに、旧基準で設計・施工された構造物に対する耐震診断および補強工事が実施されている。橋梁下部工に対する耐震補強工法としては、鉄筋コンクリートや鋼板等の巻立てが多く採用されている。これらの工法を水中部の構造物に対して適用する場合、仮締切を設置して気中と同様の条件で施工を行うのが一般的である。しかし、施工条件の制約により仮締切を設置しない場合には、水中施工において十分な品質が確保できる材料を使用するとともに、段落し部の曲げ補強では既設構造物と補強部材との間の一体性を確保することが重要となる。特に、水中部では既設コンクリートの表面処理後に藻や水中生物がその表面に付着しやすいため、一体性について一層の配慮が必要である。また、鋼板巻立て工法において水中施工に適した充填材が見当たらないのが実状である。

本報告は、横浜市港湾局所管の大黒大橋耐震補強工事において検討・実施した、既設コンクリートとの一体性が図れるジベルプレート埋込工法、ならびに、水中施工に適した水中不分離性充填モルタルについて述べるものである。

2. 工事概要

大黒大橋は昭和 49 年竣工の橋長 736.5 m、最大スパン 165.38 m の二面吊鋼斜張橋である。図-1 に本橋の概要を示す。本橋の橋脚は全部で 9 基あり、水中部の 3 基 (P4~P6) は当時最新技術であったプレキャストコンクリートにより施工されたものである。耐震補強工事は、陸上部の橋脚 3 基 (P7~P9) に対して鉄筋コンクリート巻立て工法を、また、海上部 6 基のうち陸上部に近い 3 基 (P1~P3) に対して水中不分離性コンクリートを併用した鉄筋コンクリート巻立て工法を採用している。一方、海上部のうち航路に近接する中央部の 3 基は、柱の直径が 4.5 m (P4) および 8 m (P5、P6) の大規模な門型ラーメン橋脚であり、鋼板巻

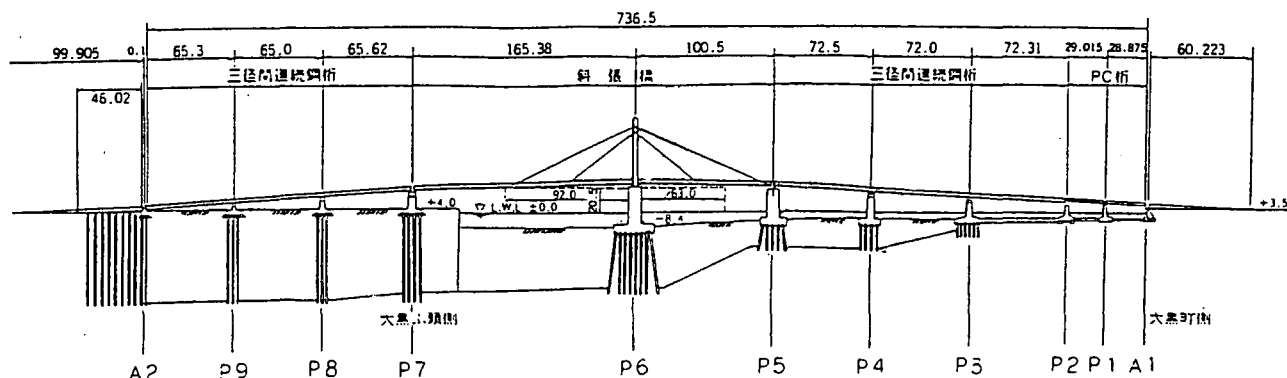


図-1 大黒大橋概要図

キーワード：耐震補強、RC 橋脚、水中施工、ジベルプレート、水中不分離性充填モルタル

連絡先：〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3 TEL.03-5441-0624、FAX.03-5441-0512

立て工法を採用している。このうち、P4 橋脚では無溶接型のかみ合わせ継手[1]を採用し、海上部における施工の効率化を図っている。P5、P6 橋脚では溶接継手を採用している。

水中部の巻立て工法としては、仮締切によって施工範囲をドライアップする方法が考えられるが、本橋の場合、施工場所の水深が満潮時で 10.4 m であること、さらに航路に近く航跡波等の影響が大きいことから仮締切は大規模なものとなる。しかし、大型作業船を使用した橋梁桁下での作業は施工上困難である。このため、本工事では海上において仮締切を行わずに水中施工を行う工法を開発・実用化した。

3. 新技術の開発

(1) ジベルプレート

旧基準で設計された橋脚では、曲げモーメントの分布に応じて主鉄筋量を途中で減少させる、いわゆる段落しを行っている。段落しは耐震上の弱点となる場合が多く、新基準に適合させるためには段落し部に対する曲げ補強が必要となる。段落し部の曲げ補強では既設コンクリートと補強部材との一体性をいかに確保するかが問題となる。気中上部においては、チップング等による表面処理により既設コンクリートと補強部材との付着で一体性が確保できる。しかし、水中部では、気中上部と異なって表面処理が困難であり、処理後のコンクリート表面に水中の藻や水中生物が付着して、コンクリートの打継面での付着が期待できなくなる。そこで、既設コンクリート面に水平方向に連続した溝を切削し、これに鋼製のジベルプレートを水中硬化型エポキシ樹脂を用いて埋込むことにより、既設コンクリートと補強部材との界面に発生するずれを防止し、機械的に一体性を確保する工法を開発した。図-2 にジベルプレートの詳細を示す。通常、機械的に一体性を確保する方法としてジベル筋や結合鉄筋が用いられるが、埋込長が長く、削孔数が多いために水中施工に適用するにはいくつかの改善が必要である。本橋では、橋脚断面が円形であり、補強部がフープテンションとして界面の開きを拘束する効果が現れ、埋込長が短いジベルプレートでも拔出が発生しにくい状況を呈している。しかし、フープテンションとしての拘束効果等の力学的モデルについて十分な知見が得られていないので、ここではジベル筋と同様の設計モデルを採用することとした。すなわち、補強部の主鉄筋が負担すべき設計引張力が既設コンクリートと補強部材との界面に作用するせん断力と考え、ジベルプレートをジベル筋として設計する。図-3 に設計の概念を示す。具体的には、既設部と補強部の界面せん断力を

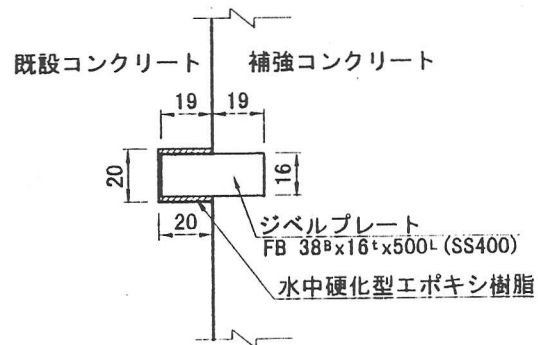


図-2 ジベルプレートの詳細

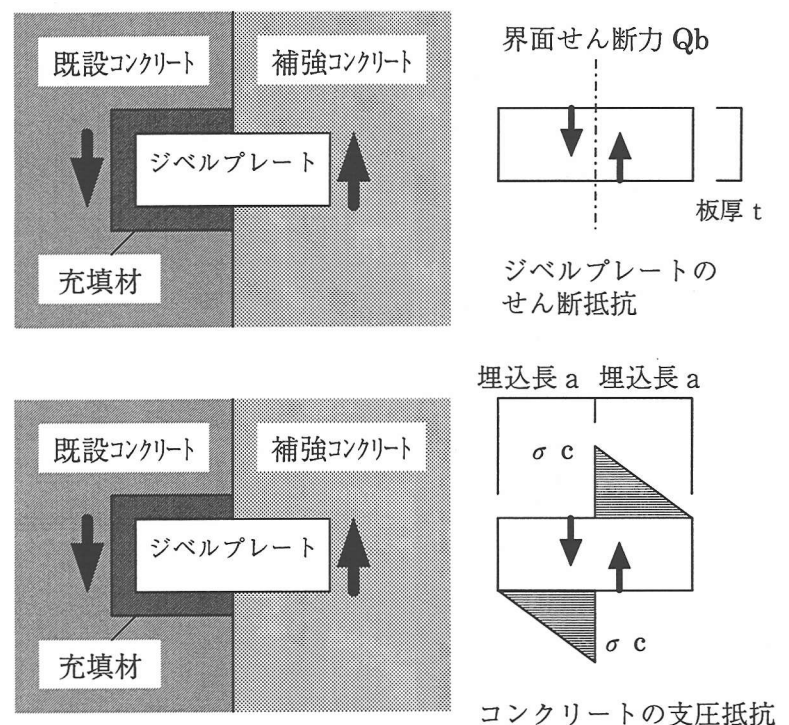


図-3 ジベルプレートの設計概念

式(1)で算出し、ジベルプレートのせん断抵抗を式(2)により、また、ジベルプレートに接するコンクリートの支圧抵抗を式(3)により照査する。ジベルプレートの効果については、実橋脚の縮小モデルを用いた載荷試験を実施して確認しており、詳細については別途報告する予定である。

$$Q_b = \sigma_s \cdot A_s / s \quad (1)$$

$$\tau_s = \frac{Q_b}{n \cdot t} \leq \frac{f_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\sigma_c = 2Q_b / a \leq \alpha \cdot f_{ck}' \quad (3)$$

ここに、 Q_b ：既設部と補強部の界面せん断力(N/mm)、 σ_s ：補強部軸方向筋の分担応力度(N/mm²)

A_s ：補強部軸方向筋の断面積(mm²)、 s ：補強部軸方向筋の周方向間隔(mm)

τ_s ：ジベルプレートのせん断応力度(N/mm²)、 n ：ジベルプレートの段数

t ：ジベルプレートの板厚(mm)、 f_{sy} ：ジベルプレートの降伏強度(N/mm²)

a ：ジベルプレートの埋込長(mm)

α ：支圧強度に関する係数（許容応力度設計法の場合 0.5、限界状態設計法の場合 2.0）

f_{ck}' ：コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

(2)水中不分離性充填モルタル

鋼板巻立て工法では、既設橋脚と補強鋼板との間にエポキシ樹脂や無収縮モルタルを充填するのが一般的である。エポキシ樹脂については経済的に高価であることから最近では無収縮モルタルを用いる場合が多い。せん断補強においてはモルタルの収縮が補強効果に与える影響は極めて小さいため、ある程度の収縮を許容したモルタルも使用されている[2]。しかし、いずれのモルタルも水中不分離性は有しておらず、水中施工には適さないものと考えられる。また、本工事では橋脚寸法が大きいこと、充填材に対する要求性能として、流動性が高く経時変化によるコンシステンシーの変化が小さいことが必要であると考えられた。そこで、水中不分離性および無収縮性を有し、かつ、経時変化の小さい充填モルタルの開発を行った。表-1にモルタルの基本配合を示す。ここで、P4橋脚についてはせん断補強であるため、収縮は許容するものとした。また、気中部についても、無収縮性を有し経時変化の小さいモルタルを開発したので表-1に併せて示す。ここで、無収縮性を有するモルタルについては、セメントの自己収縮を低減するために低熱ポルトランドセメントを使用した。表-2および表-3、表-4、図-4にモルタルの要求性能および性能確認試験結果をそれぞれ示す。これらの結果から、開発したモルタルは要求性能を十分満たしており、実用化が可能であると判断された。特に、水中施工において最も重要となる水中不分離性については、水中気中強度比が0.85以上であることから優れた性能を有しているといえる。ただし、無収縮性を期待する場合には、低熱ポルトランドセメントを使用するために初期の強度発現が遅くなる傾向にあるが、長期強度には問題はないと考えられる。

表-1 充填モルタルの基本配合

打設部位	水粉体量比 (%)	単位量 (kg/m ³)							
		水	セメント	膨張材	細骨材	AE減水剤 (C×%)	高性能減水剤 (C×%)	水中不分離性混和剤	増粘剤
P4水中部	38.0	290	703 (普通)	---	1175	0.25	2.05	1.3	---
P6水中部		300	729 (低熱)	60	1131	0.25	2.50	1.3	---
気中部		290	703 (低熱)	60	1183	---	1.00	---	0.35

表-2 充填モルタルの要求性能

項目	規格値	備考
コンシステンシー	300±30mm	JIS R 5201 規定のフローコーン使用
ブリーディング	1.0%以下	JSCE-F542-1994 (JSCE-F532-1994)
膨張収縮率	材齢 7日 で収縮無し	CRD C 589 改良式 (JSCE-F533-1994 に相当)
圧縮強度	材齢 3日 : 24.5N/mm ² 以上 材齢 28日 : 44.1N/mm ² 以上	作製方法 : JSCE-F506-1995 (供試体寸法 : φ5×10cm) 試験方法 : JSCE-G541-1994

表-3 フレッシュ性状の試験結果

打設部位	モルタル フロー (mm)	温度 (℃)	ブリーディング (%)
P4 水中部	285×280	22.5	0.0
P6 水中部	310×300	18.5	0.0
気中部	290×285	23.0	0.0

表-4 圧縮強度の試験結果

打設部位		圧縮強度 (N/mm ²)		
		材齢 3日	材齢 28日	材齢 56日
P4 水中部		28.4	59.0	-----
P6 水中部	気中採取	20.1	45.1	55.7
	水中採取*1	-----	43.7 (0.97)	54.7 (0.98)
	水中採取*2	-----	38.4 (0.85)	49.4 (0.89)
気中部		21.3	62.9	-----

備考) *1 : トレミー方式で採取、*2 : 水中落下方式で採取
() : 水中気中強度比

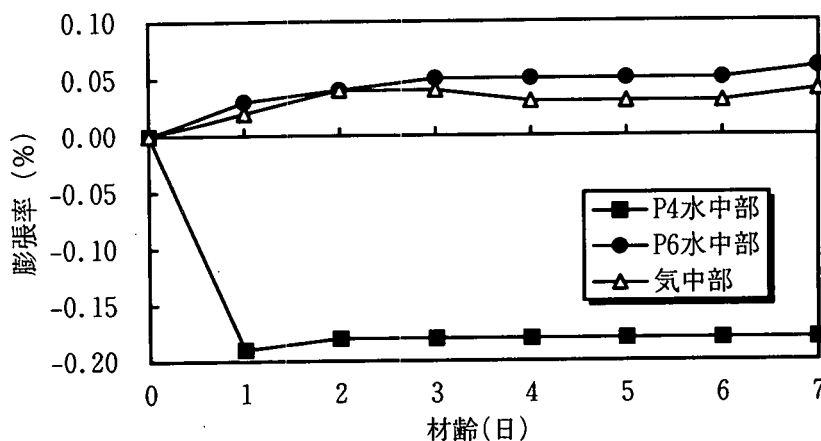


図-4 膨張収縮試験結果

4. 実施工

前述の新工法を用いて実橋脚の補強を行った。ここでは、水中不分離性コンクリートによる鉄筋コンクリート巻立てを行ったP3橋脚および鋼板巻立てを行ったP4、P6橋脚について施工状況を述べる。

(1) P3橋脚

P3橋脚に対する補強概要を図-5に示す。橋脚は幅20.0m、高さ13.4mのラーメン橋脚であり、柱部は直径4.5m、高さ10.4mの円柱である。コンクリートの巻立て厚は700mmである。

施工は、まず、橋脚基部の周囲を浚渫して足場台船を設置した後、既設橋脚の表面処理を行った。表面処理は、気中部に対してはウォータージェット、水中部に対してはサンドブラストを行った。P3橋脚はせん断補強と段落し部の曲げ補強であり、曲げ補強部にジベルプレートを図-6のように配置した。ジベルプレートの施工は、水中部の既設コンクリートに対して幅20mm、深さ20mmの溝を700mm間隔で橋脚の全周にわたって専用のカッターにより切削した後、水中硬化型のエポキシ樹脂を充填し、幅38mm、厚さ16mmの鋼板(SS400)を設置した。ジベルプレート設置後、鉄筋、型枠を組み立て、コンクリートを打設した。コンクリートは、橋脚基部からM.W.L.までを水中不分離性コンクリート、気中に露出する頻度の高いM.W.L.~H.W.L.の範囲を通常の水中共用コンクリート、H.W.L.より上部を気中コンクリートとした。

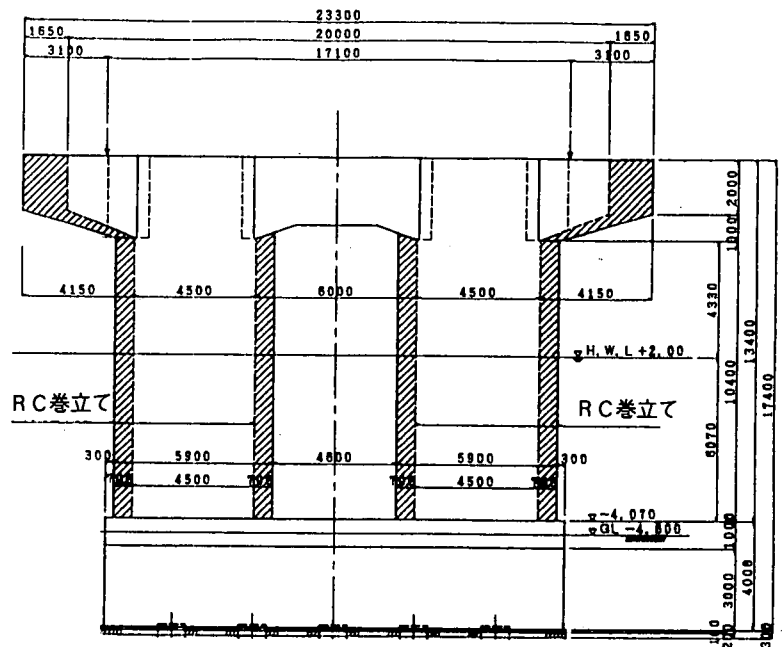


図-5 P3橋脚補強概要

(2) P4橋脚

P4橋脚に対する補強概要を図-7に示す。橋脚は幅20.0m、高さ19.3mのラーメン橋脚であり、柱部は直径4.5m、高さ16.3mの円柱である。柱部の補強は厚さ6mmの鋼板巻立て、梁部は厚さ700mmのコンクリートの巻立てである。

施工は、P3橋脚同様、浚渫により足場台船を設置した後、ウォータージェットおよびサンドブラストにより既設橋脚の表面処理を行った。P4橋脚はせん断補強であり、既設コンクリートと補強部材とを一体化させる必要が無いため、ジベルプレートは設置しなかった。補強鋼板は運搬時の重量や大きさ等の制約から鉛直方向に2分割、周方向に4分割とし、鉛直継手に無溶接型のかみ合わせ継手を採用することにより海上における施工の効

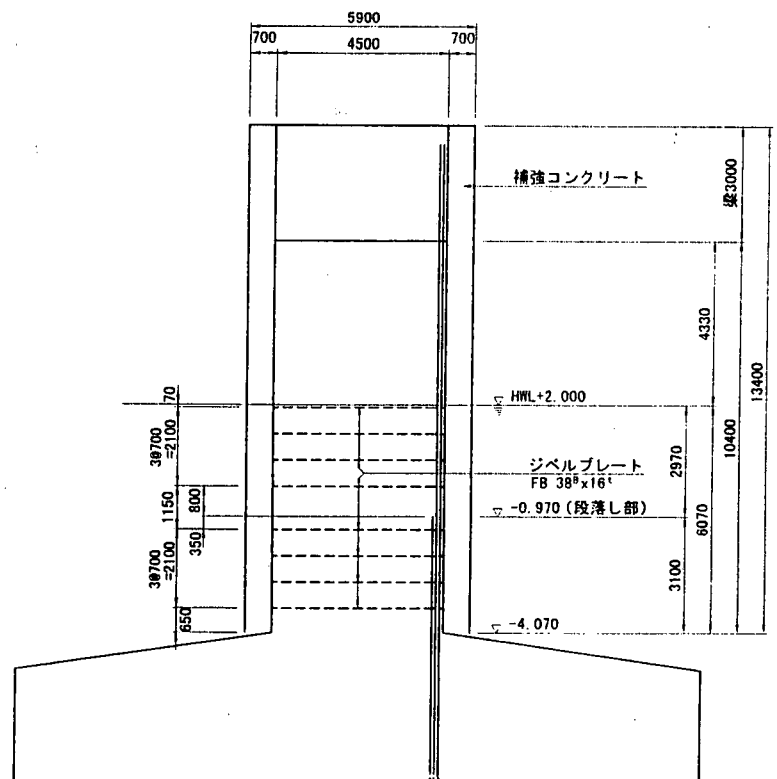


図-6 ジベルプレートの配置

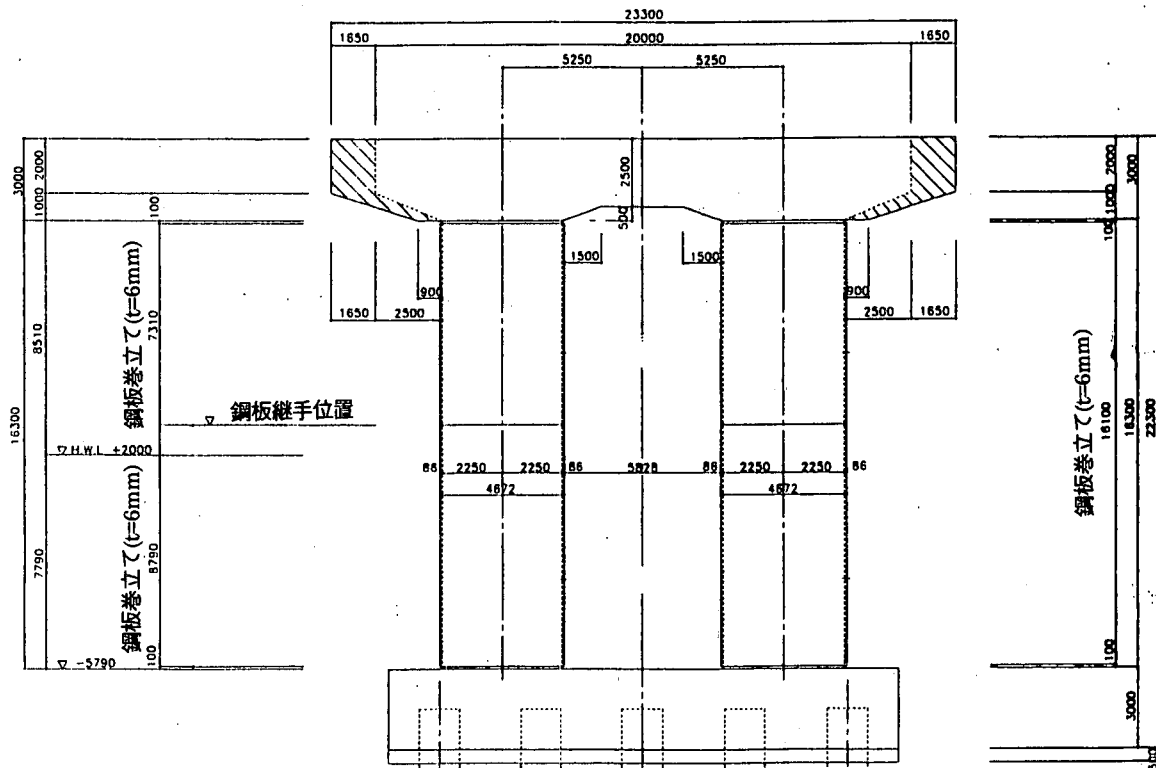


図-7 P4 橋脚補強概要

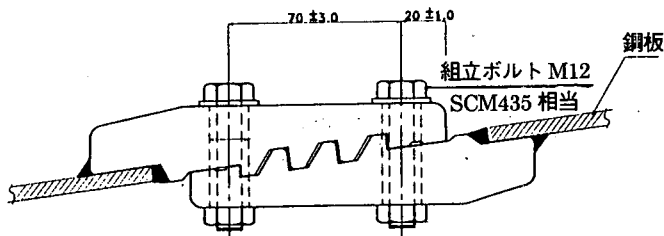


図-8 かみ合わせ継手

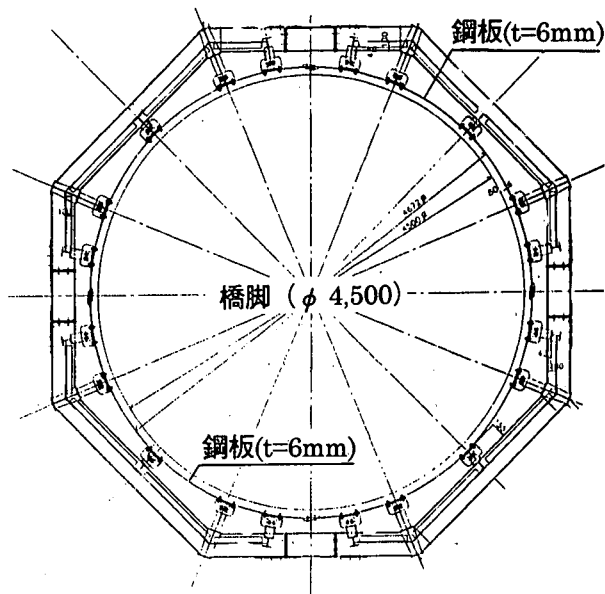


図-9 補剛材の概要

率化を図った。かみ合わせ継手の概要を図-8に示す。かみ合わせ継手は無溶接型であるため、鋼板の分割寸法が制約を受けない場合には水中での勘合も可能であるが、今回は運搬時の重量、大きさ等の制約から気中にて勘合後、水中に落とし込んだ。一方、水平継手は、補強目的がせん断補強であることから全強を必要としないため、ボルトによる接合を行った。鋼板の設置は、まず、鉛直方向に2分割した下部の鋼板を気中にて勘合して水中に落とし込んでモルタルを注入した後、上部の鋼板の勘合、モルタル注入を行った。また、鋼板厚が6 mmと薄いため、運搬時や施工時の変形を小さくするために図-9に示す補剛材を鋼板に設置して施工を行った。モルタル注入は、モルタルの流動距離を考慮して注入バルブ(φ 38 mm)を橋脚の周方向に4箇所、高さ方向に3 m間隔で設置した。注入は橋面に設置した2台のポンプによりモルタルを圧送し、2系統の注入ホースをモルタルの打上がり状況に応じて逐次盛替えて行った。注入に先立ち、フーチングと鋼板との隙間からのモルタルの漏洩防止として、水中不分離性モルタルを全周に打設した。

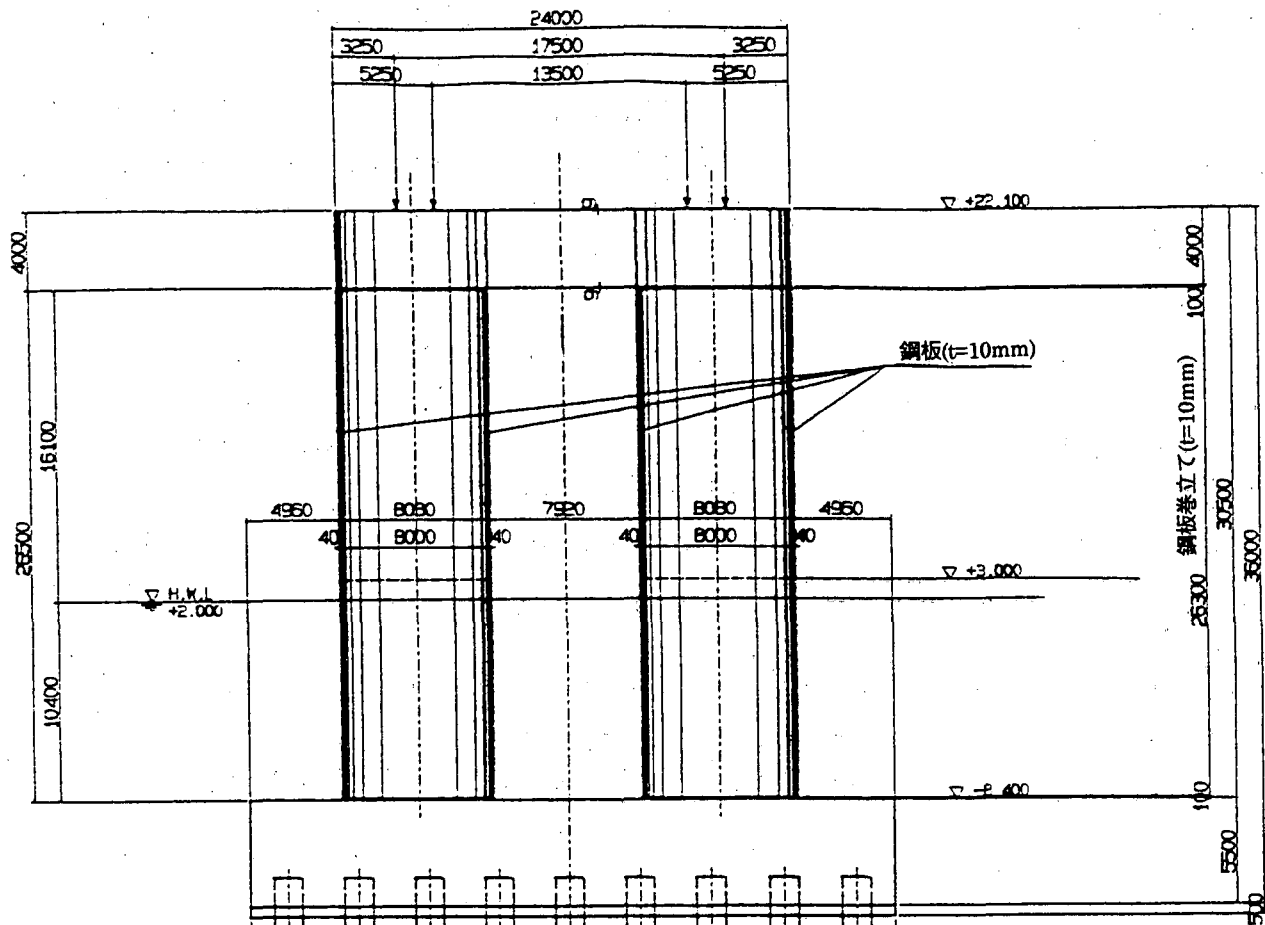


図-10 P6 橋脚補強概要

(3) P6 橋脚

P6 橋脚に対する補強概要を図-10に示す。P6 橋脚は主塔部に当たる、本橋で最大規模の幅 24.0 m、高さ 30.5 m のラーメン橋脚であり、柱部は直径 8.0 m、高さ 26.3 m の円柱である。柱部の補強は厚さ 10mm の鋼板巻立て、梁部は厚さ 9 mm の鋼板巻立てである。

施工は、P4 橋脚同様、浚渫により昇降足場を設置した後、ウォータージェットおよびサンドブラストにより既設橋脚の表面処理を行った。P6 橋脚はせん断補強と段落し部の曲げ補強であり、既設コンクリートと補強部材とを一体化させるためにジベルプレートを 1 m 間隔で設置した。補強鋼板は鉛直方向に 9 分割、周方向に 4 分割とし、鉛直、水平継手は現場溶接とした。

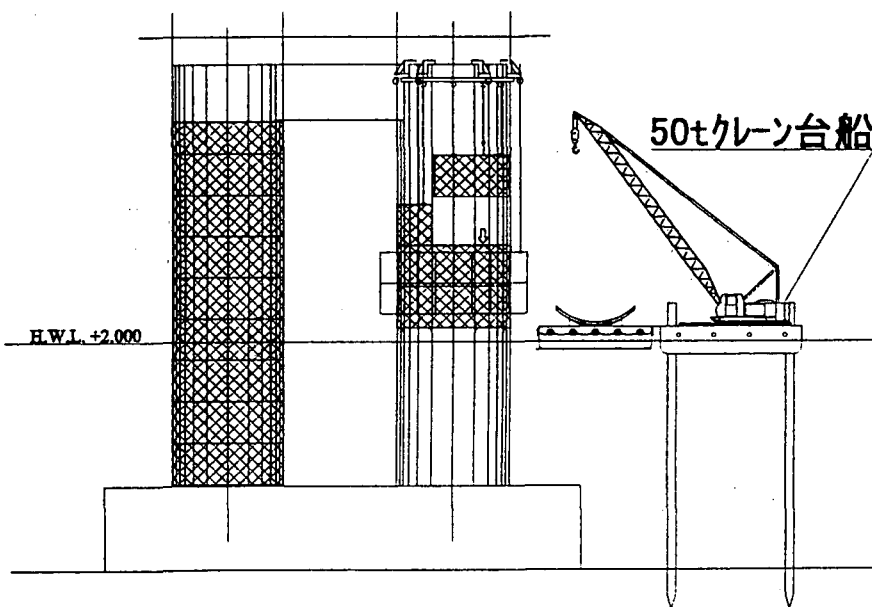


図-11 鋼板の建込み

鋼板の設置は、まず、鉛直方向に9分割した下部4分割分の鋼板を気中にて勘合し、水中に落とし込んでモルタルを注入した後、上部の鋼板の勘合、モルタル注入を行った(図-11 参照)。また、鋼板厚は10mmであるが、溶接時の施工性を考慮して補剛材を鋼板に設置して施工を行った。モルタル注入は、モルタルの流動距離を考慮して注入バルブ(φ38mm)を橋脚の周方向に8箇所、高さ方向に3m間隔で設置した。注入はP4橋脚と同様に行った。ただし、P6橋脚は段落し部の曲げ補強を兼ねているため、充填モルタルは無収縮性を有するタイプとした。

5. おわりに

既設橋脚に対する耐震補強は、地上部については近接構造物等の影響を受ける狭隘部等を除き、多くの箇所で実施されている。しかし、水中部については、水深、船舶の航行、桁下空間の制限、等の理由から仮締切の設置が困難な場合が多い。今回開発したジベルプレートおよび水中不分離性充填モルタルの採用により、港湾や河川等の水中部のRC橋脚に対する耐震補強工事が、仮締切を設置すること無く短期間、低コストさらに周辺環境への影響が少なく施工できることが立証され、今後、同様な条件下にある構造物に対して非常に有用であると考えられる。

【参考文献】

- [1]野口、青井、斎藤：かみ合わせ継手を用いた鋼板巻立てによる耐震補強方法、「耐震補強・補修技術、耐震診断に関するシンポジウム」講演論文集、pp.87-93、平成9年7月
- [2]佐藤、安原、渡辺：RC柱の鋼板巻きによる耐震補強効果、橋梁と基礎 Vol.30 No.8、pp.96-99、1996.8