

# 港新橋における道路橋脚下部工の耐震補強対策

近藤賢治<sup>1</sup>・上仲健治<sup>1</sup>・三宅 浩<sup>2</sup>・中條主也<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省 中部地方整備局 名古屋国道工事事務所(〒467-0833 名古屋市瑞穂区鍵田町2-30)

<sup>2</sup> 佐伯建設工業㈱ 名古屋支店(〒460-0002 名古屋市中区丸の内1-17-19)

<sup>3</sup> 正会員 佐伯建設工業㈱ 技術本部(〒101-8632 千代田区東神田1-7-8)

阪神淡路大震災以降、各地で橋脚の耐震補強が実施されているが、補強の範囲が基礎杭までに及んだ例は少ない。港新橋の耐震補強工事では、橋脚躯体に加え鋼管杭基礎においても耐震補強が実施された。また基礎杭は斜杭でなおかつ突出杭であり、道路を供用しながらの施工となった。本工事の設計・施工の概要を紹介すると共に、基礎杭補強の施工上の課題と解決策に関して得られた知見について述べる。

**Key Words** : highway bridge, steel pipe pile, seismic reinforcing

## 1. はじめに

港新橋は、昭和39年8月に供用開始された橋梁であり、国道23号が名古屋市内を流れる堀川を跨ぐ位置に架設されている。橋梁の諸元を表-1に示し、位置図および平・断面図を図-1～3に示す。本橋梁において平成13年度から実施した橋脚の耐震補強工事は、学術経験者を交えた工法検討会により、上部工の老朽化対策が下部工の橋脚の補強、基礎杭の補強へと波及した珍しい事例である。また、阪神・淡路大震災以降、各地で橋脚の耐震補強工事が実施されているが、道路を供用しながら支持杭である鋼管杭を補強した工事事例は少ない。

本稿では、本橋脚の構造的特徴と耐震補強の概要を示すとともに、道路を供用しながら実施した橋梁基礎杭の耐震補強における設計、施工面での検討概要を示す。

表-1 港新橋の諸元

位 置	名古屋市港区
橋 長	251.15m
支 間 割	77m+96m+77m
幅 員	26.2m
上部工形式	3径間連続鋼床版箱桁(2箱桁)
下部工形式	壁式箱形ラーメン橋台(基礎工:鋼管杭) 築島式逆T型ラーメン橋脚(基礎工:鋼管杭)
完成時期	昭和39年8月

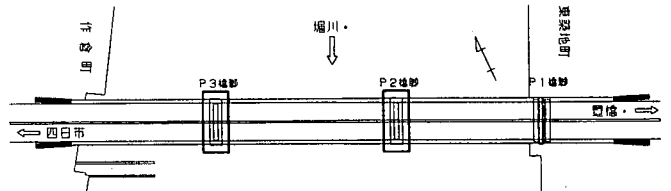


図-2 平面図

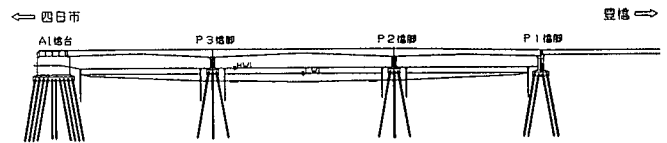


図-3 断面図



図-1 位置図

## 2. 構造的特徴と耐震補強の概要

本橋梁の下部工は橋台1基、橋脚3基で構成されており、耐震補強は陸上部および水上部の橋脚について実施した。この内、水上部の2基の橋脚(P2, P3:同一形状)については鋼管基礎杭までを含めて耐震補強を

表-2 耐震補強概要

部位	補強内容
沓座部	RC 巻き立て拡幅
橋脚部	RC 巻き立て拡幅
	耐震壁新設
フーチング部	—
杭頭部	鋼管巻き立て

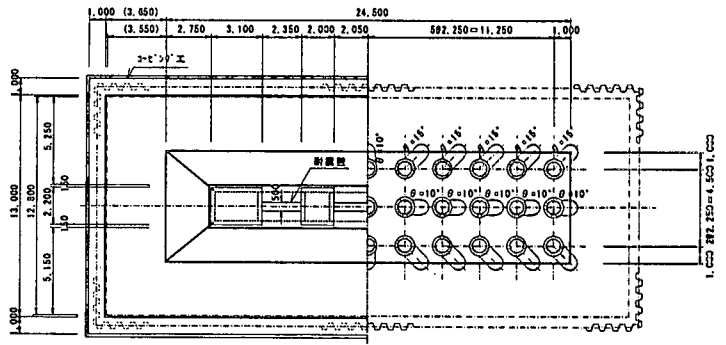


図-4 平面図(杭伏図)

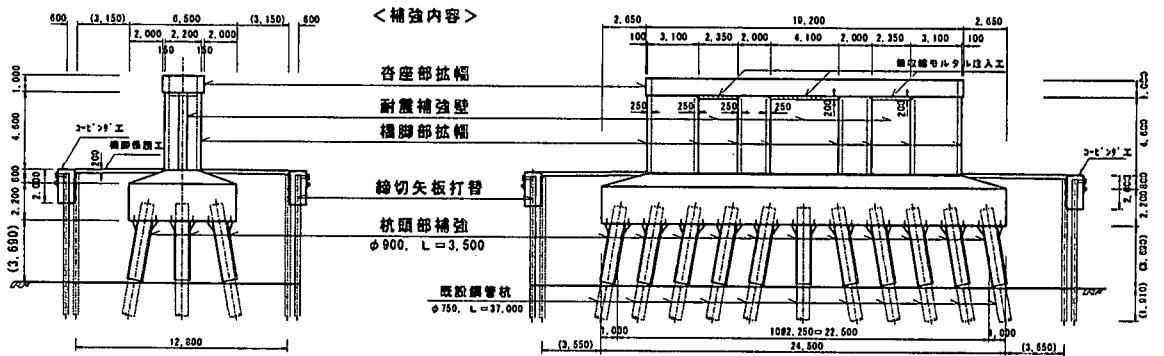


図-5 橋脚縦断面図

図-6 橋脚横断面図

おこなった。これらの橋脚にはいずれも以下に示す2つの構造的特徴がある。第1は、橋脚には33本の鋼管杭が打設されているが、直杭は橋脚中央部の1本のみで、残り32本は中央1列が斜角10°、両端2列が15°の斜杭主体の基礎となっていること。第2に、築島式橋脚のフーチング位置が高いため、基礎杭は河床面より上部について突出杭として設計されていることである。

水上部の橋脚の補強概要を表-2にとりまとめ、平面図(杭伏図)および縦・横断面を図-4~6に示す。図表より、水上部の橋脚ではフーチング以外の全ての部位で補強が行われていることが分かる。また、基礎杭の杭頭部は鋼管による補強を採用している。

### 3. 補強構造の選定検討

#### (1) 補強構造検討の概要

下部工の補強構造検討フローを図-7に示す。検討の流れは、橋脚躯体の検討と基礎杭の検討に大別される。上部工桁の補強による荷重増加と、設計震度が0.20から0.25に上がったことなどにより、橋脚躯体、基礎杭ともに現況の状態を検討し、補強対策を設定して補強後の安全性を照査している。

橋脚躯体は震度法および保有水平耐力法により現況の状態を検討し、補強対策を設定して、再度これらの方法によって補強後の安全性検討を照査している。

基礎杭は震度法と動的解析により現況の状態を検討し、補強構造を設定して、再びこれらにより安全性を照査している。また、保有水平耐力法を補強後の安全性照査のみに用いているのは、現況断面では基礎杭にマルチヒンジが発生する複雑な構造であり、保有水平耐

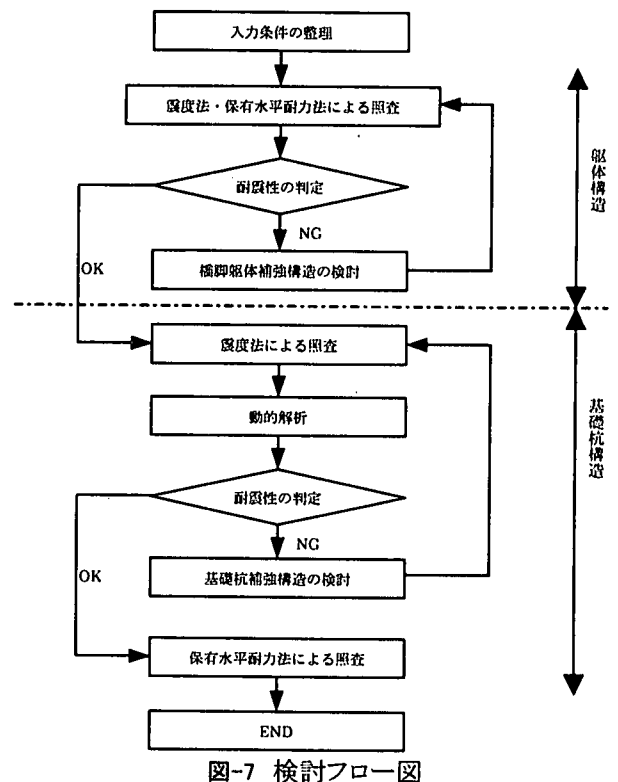


図-7 検討フロー図

力法適応に疑問があるが、補強後の断面ではマルチヒンジが発生しなくなるため、確認の意味で照査したことによる。

(2) 橋脚躯体の補強構造の選定

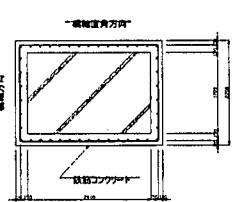
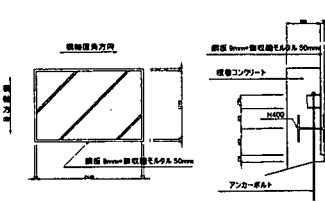
橋脚躯体の補強前後の橋軸直角方向における検討

結果の一例を表-3に示す。補強前では、外側柱下端部の鉄筋の応力が許容値を超過している。また、橋脚の補強工法の比較検討結果を表-4に示す。RCおよび鋼板による巻立てが考えられたが、梁部補強として脚柱間に設ける補強壁との一体化の確保を考慮して、RC巻立工法を選定した。

表-3 橋脚の応力検討結果一覧表

形状図		P2,P3 橋脚					
		現状照査			補強後(RC巻立)照査		
		橋軸直角方向				橋軸直角方向	
梁部		柱部		柱部			
		端支点①	中間支点②	外柱下端③	内柱下端④	外柱下端③	内柱下端④
常時(死+活)	M (tf/m)	54.18	27.49	-	-	-	-
	N (tf)	-83.80	78.11	-	-	-	-
	S (tf)	22.40	18.11	-	-	-	-
	$\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	26.8<70	0<70	-	-	-	-
	$\sigma_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	509<1800	1274<1800	-	-	-	-
	$\tau$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.4<3.6	1.2<3.6	-	-	-	-
地震時(死+地)	M (tf/m)	62.83	90.39	773.99	222.60	244.81	58.20
	N (tf)	34.52	-8.46	-288.70	-189.01	1181.93	821.65
	S (tf)	17.91	35.99	171.13	76.16	57.86	23.59
	$\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	26.6<105	42.1<105	77.1<105	59.5<105	23.1<105	21.4<105
	$\sigma_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1613<2700	1827<2700	3365>2700	1817<2700	333<2700	224<2700
	$\tau$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.1<3.3	2.3<3.3	4.0<3.3	3.1<3.3	0.9<3.3	0.6<3.3

表-4 脚注の補強工法比較検討表

		RC巻立工法	鋼板巻立工法(無収縮モルタル)
標準断面			
工法概要		<ul style="list-style-type: none"> <li>橋脚柱をRCで巻立てる。</li> <li>主筋は樹脂アンカーでフーチングに固定する。</li> <li>主筋外周にフープ筋を配置する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋脚柱を鋼板で巻立て、既設躯体との間に無収縮モルタルを充填する。</li> </ul>
特徴	長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装などのメンテナンスが不要。</li> <li>耐震壁と柱補強を一体化できる。</li> <li>経済的である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量が軽く、基礎に与える影響が少ない。</li> </ul>
	短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量が増加する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗装などのメンテナンスが必要。</li> <li>耐震壁と柱補強を一体化が困難。</li> </ul>
	施工性	一般的な補強工法であり問題なし	一般的な補強工法であり問題なし

(3) 基礎杭の補強構造の選定

現況の震度法による照査では、斜杭の効果により各杭の応力状態がほぼ等しくなり、全ての照査項目で許容値を満足した。動的解析の検討結果は、タイプⅠ地震波では最大曲げモーメントは弾性範囲に納まり、他の照査項目も許容値を満足した。しかし、タイプⅡ地震波では、耐震安定性は有しているものの、中央部の杭を除く全ての杭頭部が塑性化するとともに、橋脚中央部の3列9本の杭で杭頭部と設計地盤面の2箇所同時に塑性化が起こるマルチヒンジの状態となった。動的解析に用いたモデル図および、タイプⅡ地震波による検討結果を以下の図-8,9に示す。

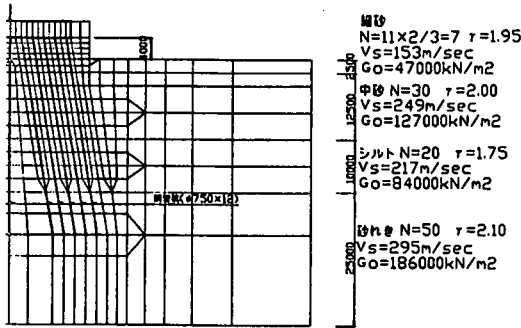


図-8 解析モデル図

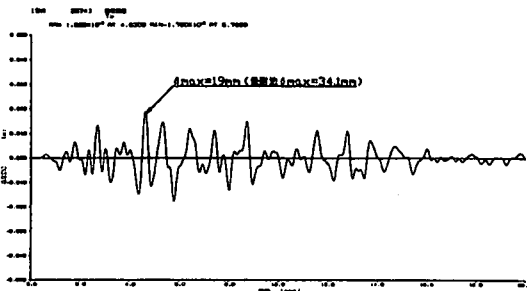


図-9 フーチング底面の水平変位図

検討結果から、現況の基礎杭は一応の耐震安定性を有しているが、以下の点を考慮すると、応力を受けや

すい杭から順次、各個撃破的に塑性化して倒壊に至る可能性があるため、耐震補強を行う必要があると判断した。

- ① 補強壁を設けた橋脚を壁式橋脚とみなして解析検討していること、
- ② 杭によってはマルチヒンジを生じており、基礎杭が構造的に不安定であること、
- ③ 各杭の応力がほぼ等しくなる等強杭であり、マルチヒンジを生じていない杭についても応力的に厳しいこと

基礎杭の耐震補強案の比較検討例を表-5に示す。これらの補強案を比較した結果、主に確実性と経済性から鋼管による杭頭補強工法を選択した。鋼管により杭頭補強する範囲は、動的解析の結果によれば、杭頭最大曲げモーメント時には、フーチング下面より約3mの位置で曲げモーメントが反転するため、余裕を見て3.5mとした。また、鋼管による杭の補強対象をマルチヒンジが発生した3列だけとするか、全列を対象とするかを検討した結果、以下の観点から全列の杭を補強することとした。

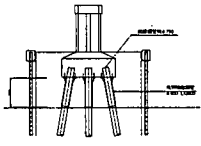
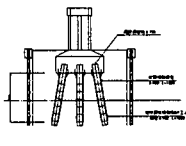
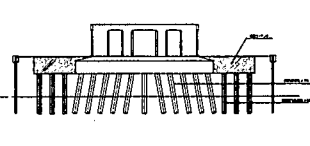
- ① 等強杭であり、マルチヒンジが発生しなかった杭についても耐力余裕があまりない状態であること
- ② 杭基礎の設計上の基本思想から、異種の杭の混在は望ましくないこと
- ③ 3列補強案の耐力は補強後の橋脚の耐力を下回るが、全杭補強案では橋脚の耐力を上回ること

杭頭補強後の動的解析の結果では、全杭の杭頭および地中部には塑性点が発生せず弾性範囲内に納まる結果となった。また、保有水平耐力法による確認の照査結果では、全列の杭頭部で降伏するが、発生するせん断力はせん断耐力以内、杭頭変位およびフーチングの回転角は制限範囲内であり、耐震安定性を有していると判定された。

表-5 動的解析結果(タイプⅡ)

入力波			1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目	7列目	8列目	9列目	10列目	11列目		
基礎の耐力照査	杭頭の最大曲げモーメント		M	tf・m/本	132.7	131.3	129.9	129.3	129.9	127.9	128.9	129.3	129.8	129.9	132.7
	地中部最大曲げモーメント	値	M	tf・m/本	88.4	84.4	82.0	76.2	81.3	90.1	82.7	83.0	84.0	86.1	89.8
		位置	L	m	耐震地盤面上										
	降伏曲げモーメント		My	tf・m/本	132.8(N=0tf), 127.3(N=100tf)										
	判定		-	-	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP	M>MP
	杭頭の鉛直反力		PN	tf/本	425.2	421.8	415.0	418.4	421.8	100.3	421.8	418.4	415.0	421.8	425.2
	押し込み支持力の上限值		PNU	tf/本	554.0										
	判定		-	-	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU	PN≤PNU
			-	-	OK										
			-	-	押し込み支持力の上限值に達しない										
応答塑性率の照査	基礎の応答塑性率		μFR	-	1.72										
	基礎の塑性率の制限値の目安		μFL	-	4.00										
	判定		-	-	μFR ≤ μFL										
	基礎の応答変位		δFR	m	0.185										
	水平変位の制限値の目安		0.75SE	m	0.40										
せん断の照査	判定		-	-	δF0 ≤ δF0a OK										
	杭基礎のせん断力		S	tf	118.0	115.0	113.6	118.0	126.5	129.3	118.7	117.7	118.4	118.7	120.7
	杭基礎のせん断耐力		Ps	tf	314.0										
	判定		-	-	S ≤ Ps OK										

表-6 基礎杭の補強工法比較表

		鋼管による杭頭補強工法	杭頭及び地中部の鋼管補強工法	増杭工法
標断面準				
工法概要		φ900×3500 の鋼管を既設杭に巻立て、無収縮モルタルを注入する。	杭頭にφ900 の鋼管を巻立て、杭の地中部には SSP 工法により同径の鋼管を圧入して無収縮モルタルを注入する	既設杭(斜杭)を避ける位置でφ900 の場所打ち杭(リバース工法)を12本増杭する。
特徴	構造	長所 ・既設杭の状態を確認できる ・杭頭補強が確実である ・杭の防錆効果がある	・既設杭の状態を確認できる ・杭頭補強が確実である ・杭の防錆効果がある	・構造上で信頼性が高まる ・工期が短い
		短所 ・施工中に安全率が低下する ・工期が長い	・SSP 工法での実績がない ・工期が長い	・リバース工法で既設杭周囲の地盤を乱す可能性がある ・既設杭の精度確認が必要
	施工性	・人力作業となる上、部材重量が大きい	・杭の間隔が狭く、機械作業が困難	・一般的な施工であり容易

4. 施工上の課題と対応

(1) 施工手順

杭頭補強の詳細フローを含めた耐震補強工事全体の施工フローを図-10に示す。全体的には仮設工を施工した後、橋脚の補強を下側から順次施工し、最後に足場となる築島部を施工する流れとなっている。また、杭頭補強工の施工は、各施工ブロックごとにフーチング下面から1.5mまで床掘した後、補強鋼管取付け用のアンカーボルトを設置し、補強する深さまで更に掘削して、杭1本ごとに工場で加工・製作された補強管ピースを既設杭に固定して溶接により一体化し、無収縮モルタルを充填する流れをくり返している。

(2) 試掘調査の結果

杭頭補強においては、橋梁を供用した状態で既設フーチングの下を掘削することになる。このため、施工中の安全性を確認するため、本施工に先立ち試掘調査を実施した。試掘位置および調査結果を下の図表にまとめる。調査は杭の健全性の確認を主目的として行われたが、電気防食によるエレクトロコーティングと思われる現象によって、健全であることが確認された。

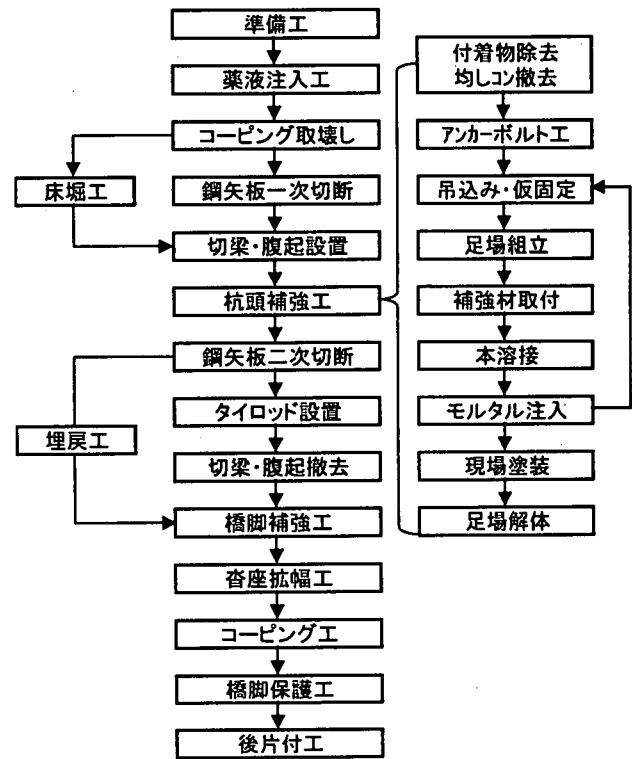
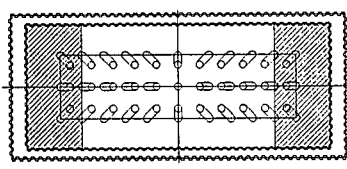


図-10 耐震補強工事の施工フロー図

表-7 試掘調査結果

試掘調査位置図	調査項目	調査方法	調査結果
 網掛け部分試掘調査位置 (P2,3 共通)	外観調査	目視	黒色固化物が付着
	杭付着固化物	成分調査	主成分はCaCO <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub>
	杭の打設位置ずれ	杭頭部平面位置を測量	最大ずれ幅84cm
	杭の板厚	超音波肉厚測定	ほぼ公称厚t=12mm
	杭の変形	水系を張り離隔長さ測定	最大1.0mm、平均0.57mm
	杭内のコンクリート充填状態	たたき点検	斜杭上面側に一部浮きあり
	フーチングのコンクリート強度	シュミットハンマー試験	270~320kgf/cm <sup>2</sup> ≧ σ ca(240)
	掘削中の杭の応力	ひずみゲージ連続計測	掘削作業との関連認められず

基礎杭のエレクトロコーティング現象の状況を写真-1に示す。心配された杭の腐食が無いことから、基礎杭の杭頭補強のための掘削は十分可能であると判断された。

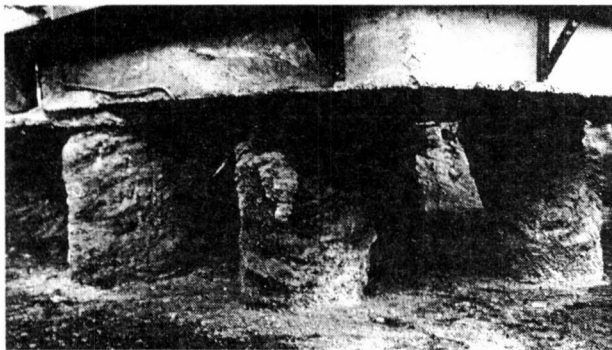


写真-1 基礎杭のエレクトロコーティングの状況

### (3) 施工上の課題

試掘調査などによって、事前に把握された施工上の課題とその対策の概要を表-8に示す。施工上の課題は、主に基礎杭の補強に関する施工事例が無いこと、および既設杭の打設精度の不良に起因して発生している。

表-8 施工上の課題と対策

状況および施工内容	施工上の課題・問題点	実施した対応策
供用中にフーチング下部を掘削する	施工時の安全確保策が必要	・杭応力度および橋脚傾斜量の連続計測 ・目標管理値と対応マニュアルの作成
既設杭の打設位置の精度が不良	締切タイロッド取付けが困難 補強管が一部フーチングからはみ出す	タイロッド位置の変更、斜め設置 不足部分のフーチングコンクリートの打ち増し
既設杭の打設角度の精度不良	補強管が取付け不可能	アンカーホルトに余裕穴を設ける 補強管を傾斜して取り付ける
狭隘箇所での補強管取付け	施工事例が無く、補強管の取付け方法が確立していない	・補強管のリップを鉛直方向に取付け搬入 ・取付け方法を模型で検討し、フーチング下面に設けた吊り金具で補強管をサポート

表-9 分割数の比較検討表

	2分割施工案		4分割施工案	
	内容	評価	内容	評価
施工性	・台船上からの吊り降ろし作業の際、クレーンの旋回半径が制限されるため、台船の移動回数が増える。 ・設計上の杭間が狭く(1.5m)、杭の打設位置の精度が不良な為、引込みが出来ない可能性がある。 ・吊込み回数が少ない。	×	・台船上からの吊り降ろし作業の際、台船の移動が最小限ですむ。 ・設計上の杭間が狭く(1.5m)、杭の打設位置の精度が不良な場合においても、引込みが可能である。 ・吊込み回数が多い。	○
品質	・運搬・吊込時に歪む可能性が高い。 ・吊込時に補強杭・既杭に傷が付く可能性が高い。	△	・運搬・吊込時に歪む可能性が低い。 ・吊込時に補強杭・既杭に傷が付く可能性が低い。	○
経済性	・経済的である	○	・比較的経済的である	△
総合評価	経済的であり、吊込み回数が少ないメリットはあるが、施工が出来ない可能性があり、品質上も懸念がある	×	比較的経済的であり、施工性に優れ、品質上も問題がない。	○

主要な課題は、基礎杭の杭頭補強に対して、補強管の取付け施工方法の確立、および掘削時の安全確保であった。

### (4) 杭頭補強の施工方法

杭頭補強に用いる補強鋼管はφ900×9×3500であり、付属するプレートおよびリップを加えた重量は約1.2tとなる。また、斜杭間の間隔は補強前でも1.5mしかないため、補強鋼管の搬入、取付けにはクレーンなどの機械の使用が不可能である。更に、人力で施工する際、フーチング下部の掘削深さ(取付け高さ)は約3.7mあるため、補強鋼管のアンカー取付けなどには足場が必要となる。このため、狭隘な施工条件での補強鋼管取付け方法を、模型を作成するなどして事前に検討した。

その結果、フーチング下-1.5mまで掘削した後、土足場で均しコンクリート・付着物撤去及びアンカー取付けを行い、その後-4.0mまで掘削する二段階掘削を採用した。また、補強鋼管の取付け方法を検討するに当たり、分割数について比較検討を行った。検討した結果を表-9に示す。

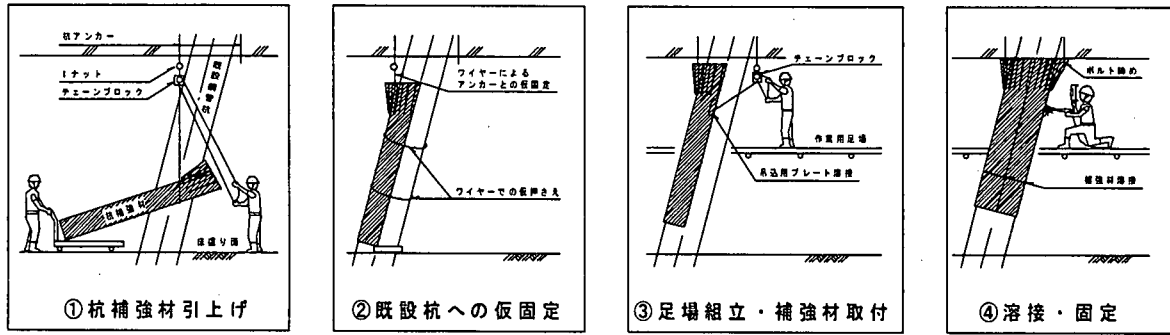


図-12 杭頭補強鋼管取付方法

比較検討の結果、補強鋼管を4分割して設置位置に仮止めし、現場溶接で一体化し、補強鋼管と既設杭の空隙に無収縮モルタルを注入する工法を採用した。取付け作業の流れを図-12に示し、4分割した補強鋼管の構造図(斜杭15°)を図-13に示す。

取付け作業は全て人力作業となるが、補強鋼管を4分割しても1ピースの重量は約300kgとなるため、フーチング底面に取付けたアンカーボルトに吊り金具を取付けチェーンブロックによって移動、引き上げ作業を行っている。補強鋼管を1ピース毎、順番に既設杭に沿わせて引き上げ、下部を敷板にのせ上部をワイヤーでアンカーボルトに固定する。この作業を4ピース繰り返した後、ワイヤーで4ピースまとめて既設杭に仮固定する。施工ブロックすべての補強鋼管を既設杭に仮固定した後、足場組立を行う。4ピースを順次チェーンブロック及び油圧ジャッキにより、既設杭に沿わせてアンカーボルトの高さまで引き上げ、ナットで仮締めし、補強鋼管と既設杭の空隙及び溶接寸法の確保を行い、各ピースを溶接して一体化している。

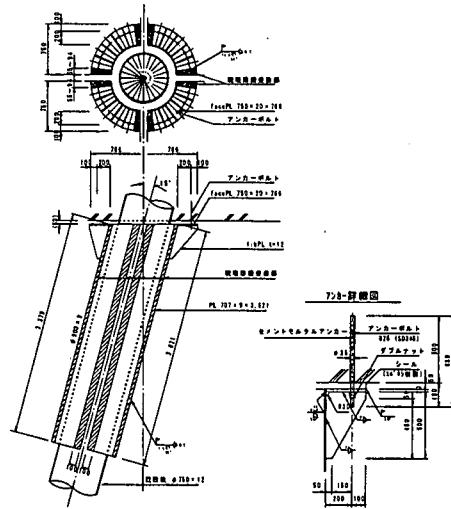


図-13 杭頭補強構造図(斜杭15°)

(5) 掘削時の安全確保

フーチング下面掘削時の安全確保のため、1橋脚を4ブロックに分割して、2橋脚を対角状に端部から順次施工することとし。端部の既設杭および補強鋼管にひずみゲージを取付け、応力をリアルタイムで計測し、常に管理基準と比較しながら施工を実施した。掘削の順序および計測管理の概要を図-14、15に示す。なお、安全管理計測は、鋼管杭および桁の温度、橋脚の傾斜および沈下量についても行っている。

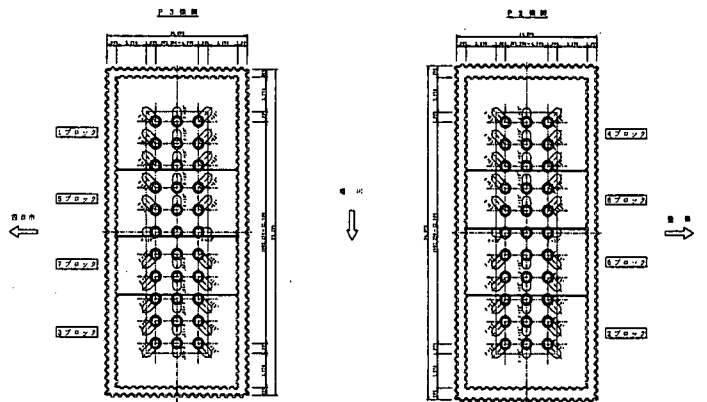


図-14 杭頭補強・掘削順序図

杭応力の管理基準値の設定方法を以下に示す。具体的な目標管理基準は92N/mm<sup>2</sup>となっている。

- ①目標管理値： $\sigma_1 = (1.25 \cdot \sigma_a - \sigma_d) \times 0.7$   
 $\sigma_a$ ：鋼管杭の許容応力度
- ②予備管理値： $\sigma_2 = (1.25 \cdot \sigma_a - \sigma_d) \times 0.5$   
 $\sigma_d$ ：理論上の死荷重応力度

延長コードの配線及び固定方法

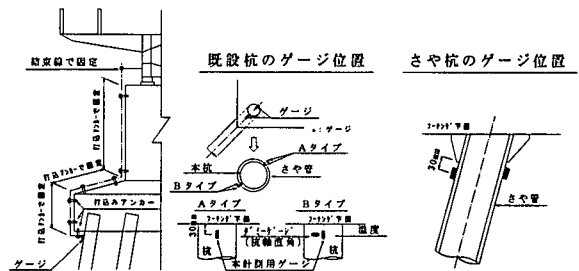


図-15 計測管理概要図

P3橋脚上流東京側既杭・さや管

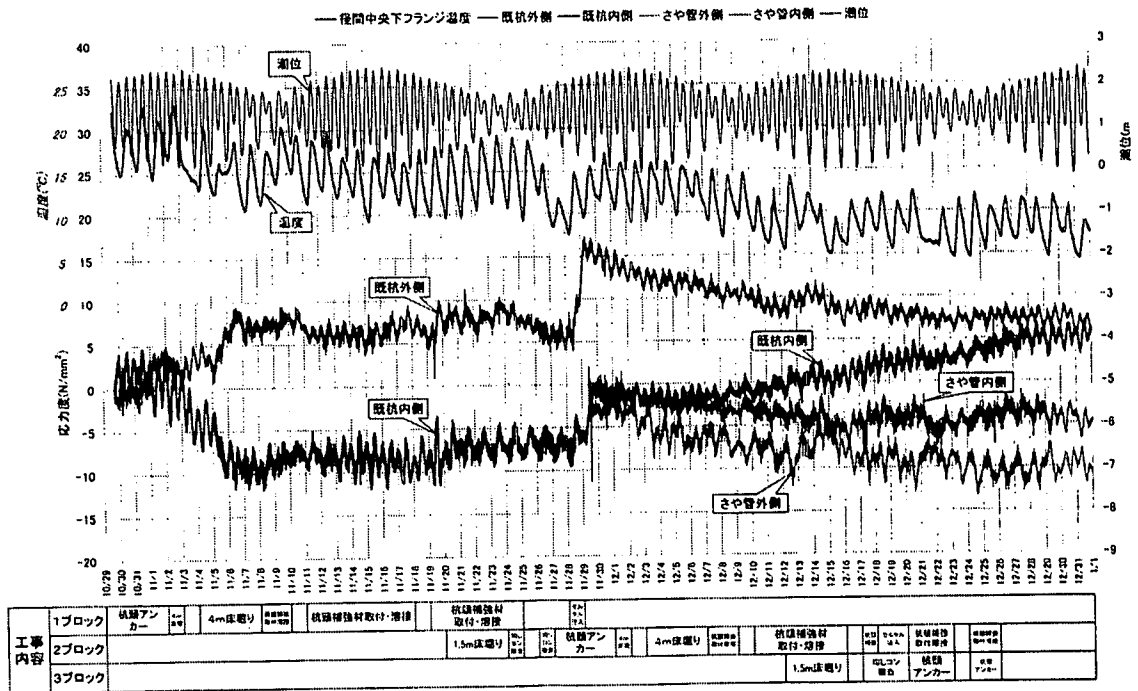


図-16 安全管理計測結果(P3-上流側, 長期間)

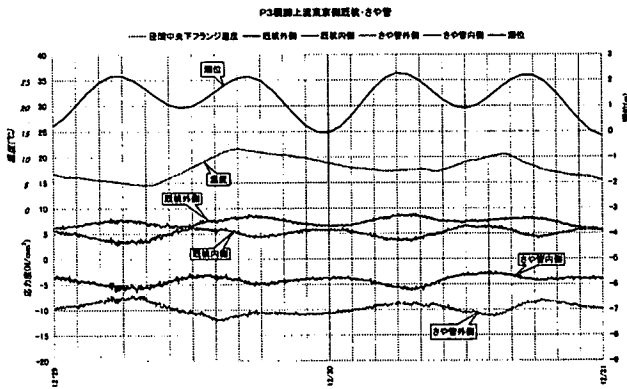


図-17 安全管理計測結果(P3-上流側, 短期間)

最も早く掘削が開始されたP3橋脚東京側の、長期間および短期間の作業工程と杭応力の計測データの関連を図-16, 17に示す。

計測結果から、掘削を実施しても既設杭の応力は目標基準値を大きく下回っており、施工中の問題は発生しなかった。長期間のデータを見ると、既設杭の応力は掘削によって内外の応力度が正負に離れて行き、補強管のモルタル注入後、引張側に収束している。逆に補強管の応力は圧縮側に収束しており、既設杭が負担していた荷重が補強管に配分されていることが分かる。また、短期間のデータを見ると、応力の変動は温度変化よりも潮位変動によって生じており、既設杭および補強管の内外の応力が同様の動きをしていることから、既設杭と補強管が一体化していることが分かる。

5. おわりに

本橋脚の基礎杭は、斜材でなかつ突出構造であることが構造的特徴であり、効率の良い等強杭ではあるがマルチヒンジを発生する可能性が高かったため、全体系の安全性を考慮して全杭頭部を補強した。橋梁を供用しながら杭頭補強した事例はほとんど無かったが、今回の事例によって一応の施工方法および安全管理手法を提示できたものとする。

今回の事例では、もともと突出杭として設計され、既設杭の腐食がほとんど無かったが、今後の課題として、一般的な橋脚基礎杭を補強する場合、および鋼管杭が腐食している場合への適応が挙げられる。また、施工面の課題として、フーチング下面の掘削を開始してから、計66本の既設杭を補強するのに約6ヶ月を要しており、施工ブロックの分割方法を含め、迅速な補強管取付けの方法への改良が挙げられる。

謝辞:本橋梁の補強工法の検討においては、山田健太郎座長をはじめとする工法検討会のメンバーの方々にも多大の支援を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省中部地方整備局名古屋国道工事事務所:一般国道23号港新橋耐震補強工法検討会資料