

—— 新猪名川大橋の下部工設計 ——

大阪第二建設部	設 計 課	吉 川 実
同 部	同 課	大 西 久 巳
計 画 部	特定計画調整室	谷 口 信 彦
大阪第二建設部	設 計 課	西 林 素 彦

要 約

新猪名川大橋は、阪神高速道路大阪池田線（延伸部）に計画されている橋長400mの2径間連続PC斜張橋である。本橋は、(1)中間橋脚において主塔および主桁に作用する荷重の大部分を支持する構造となっている、(2)架橋地点が猪名川の狭隘部に位置し、完成時と施工時における河積阻害率を極力小さくする必要がある、(3)河川内の工事は濁水期施工の制約があり、工程面の配慮が必要である、という条件がある。そこで、河川内に設けられる中間橋脚の基礎形式として、柱列杭式の仮締切工による大口径深礎と地中連続壁基礎が考えられる。これらの基礎形式を比較検討の結果、仮締切工の安全性、マスコンクリートの温度ひびわれの抑制において有利な連続壁基礎を採用することとしたものである。

本稿では、基礎形式の選定の経緯、最近の施工実績においても大型かつ超厚壁となる連続壁基礎の詳細設計の内容を報告する。

まえがき

阪神高速道路大阪池田線（延伸部）に建設が予定されている新猪名川大橋は、一級河川猪名川を24度の斜角で横断する橋長400mの2径間連続PC斜張橋である（位置図を図-1に示す）。本橋はPC斜張橋として我国最大級の規模となり、かつ中間橋脚で主塔および主桁に作用する荷重の大部分を支持する構造となっている。しかし、この橋脚が狭隘部に位置するため、完成時と施工時において河積阻害率を極力小さくすることが要求され、河川管理者の条件に適合する基礎形式の選定が必要となる。さらに、河川内の施工期間は8ヶ月の濁水

期に制限されており、工程面でも十分な配慮が必要となる。これらの制約条件及び経済性から検討した結果、中間橋脚の基礎として地中連続壁基礎（以下「連壁基礎」という）を採用することとした。

そこで本稿は、連壁基礎の選定経緯及び最近の施工実績からしても大型かつ超厚壁となるこの連壁基礎の詳細設計内容について述べる。

1 橋梁の構造および地質概要

この橋梁の基本構造諸元は以下のとおりであり、橋梁一般図を図-2に示す。

- (1) 構造形式：2径間連続PC斜張橋
- (2) 支間長：199.0m + 199.0m (橋長400m)
- (3) 幅員：18.0m (橋梁全幅員20.7m)
- (4) 主桁：4室箱桁断面 (PC構造)
- (5) 主塔：逆Y形 (RC構造)
- (6) 斜材：交差2面吊りマルチファンタイプ
- (7) 橋脚：壁式橋脚 (小判形断面：RC構造)
- (8) 基礎：地中連続壁基礎 (φ20.0m)
- (9) 支持条件
 中間支点：主桁、橋脚および主塔受け梁一体剛結ラーメン形式
 端支点：可動
- (10) 地盤条件：1種地盤 (耐震設計上の地盤種別)

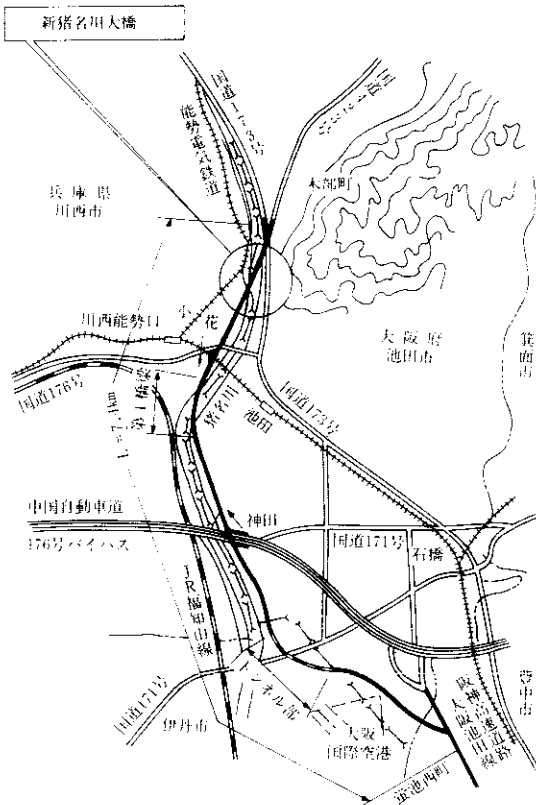


図-1 新猪名川大橋の位置図

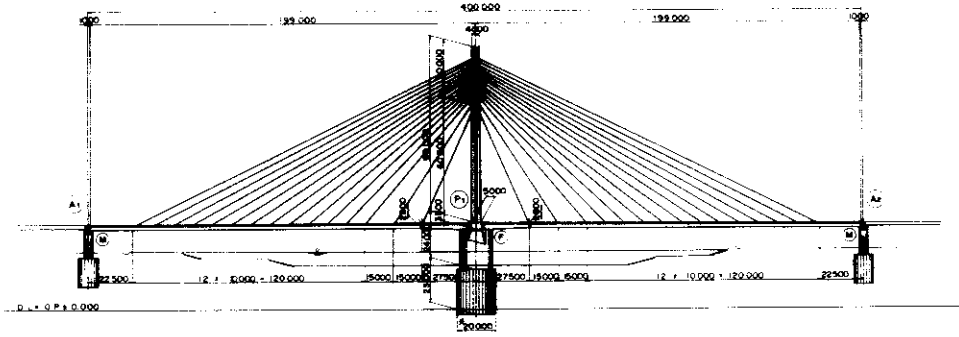
架橋地点の地質はGL-1.0m以深より基盤岩である古生層 (丹波層群) が分布し、主として粘板岩から成っている。しかし、架橋地点の地層は2つの活断層 (南側に第1級の活断層有馬-高槻構造線があり、北から西にかけて五月山断層が走っている) に挟まれたせん裂帯にあるため、GL-8.0m付近まで風化が進んで土砂化している。さらに、GL-25.0mまでは破碎されている。架橋地点における地質柱状図を図-3に示す。

2 中間橋脚基礎形式の選定

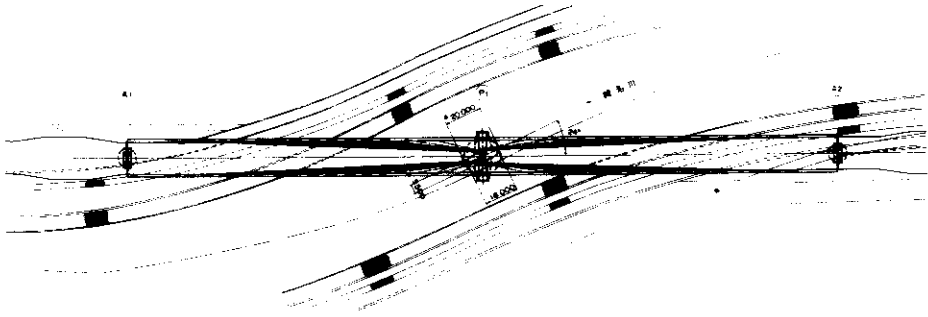
中間橋脚基礎形式選定にあたっての条件をまとめると次のようになる。

- (1) 完成時および施工時の河積阻害率を極力小さくする。ただし、耐震検討の結果、完成時における橋脚は地震時の耐荷性能を確保できる最小寸法として、5.5m (河川横断方向) × 18.0m (流心方向) の小判形断面をとることになり、これを支える形式が要求される。²⁾ また、施工時において基礎は外径20m、深さ20m程度の大規模な河川内工事となる。このため、河道確保のため重構造の仮締切工法の採用が強いられるので、仮設時における安全性を十分に検討する必要がある。
- (2) 出水期には河川内工事が不可能なため、河川占有期間をできるだけ短縮する。すなわち、限られた日数 (8ヶ月の濁水期) で、かつ短期間 (2~3年) で下部工事を完了する必要性から、その施工法と工程について入念に検討する必要がある。
- (3) 架橋地点の地盤は、N値、弾性波速度の結果からすると、計画河床面 (GL-3.1m付近) から支持地盤とみなすことができる。しかしながら、GL-25.0mまでは土砂化および破碎が生じているので、上部よりも硬質なそれ以深の軟岩に近い層に根入れすることが必要である。

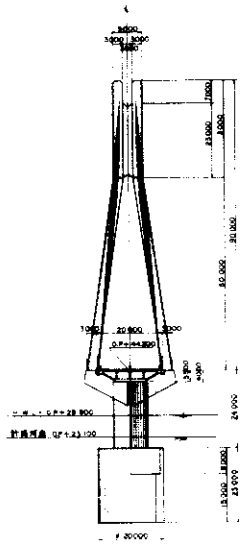
側面圖



平面圖



主塔橫斷圖



主桁斷面圖

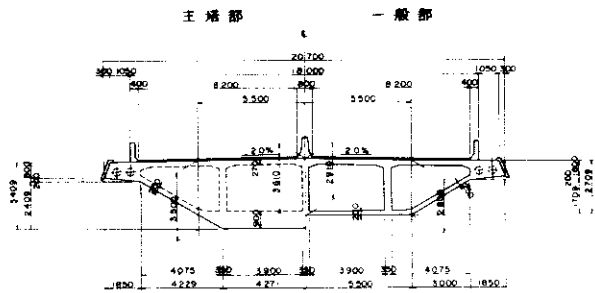


圖-2 新猪名川大橋橋梁一般圖 (單位: mm)

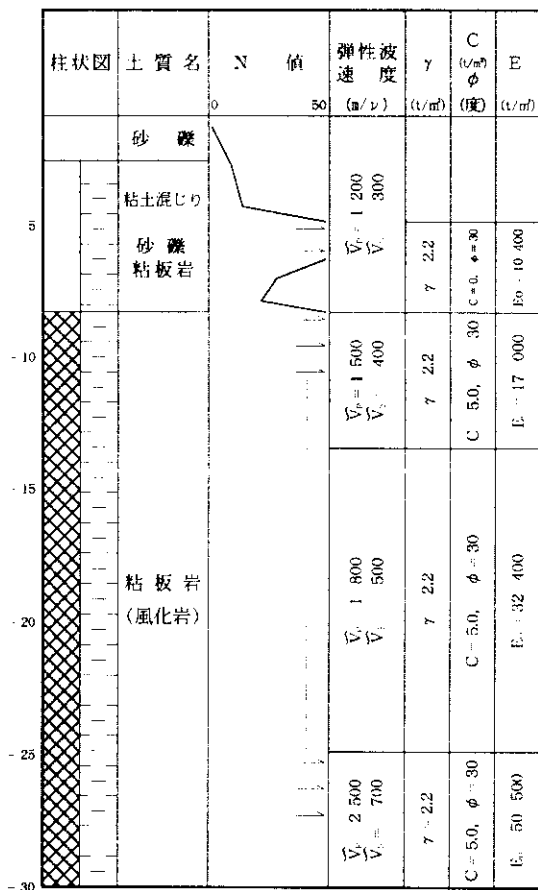


図-3 架橋地点の地質柱状図

検討項目の中で仮締切工法のタイプに着目すると、次に示す工法が考えられる。なお、斜橋脚の特性から橋脚・橋軸直角方向に連成した立体的挙動が顕著に現れることから、方向性に依存しない円形断面の採用を前提としている。³⁾

- ① 柱列杭工法
- ② 柱列杭+ロックアンカー工法
- ③ 鋼管矢板工法
- ④ 連壁基礎工法
- ⑤ 圧入ケーソン工法

これらの各工法について、施工の確実性、工期、経済性等の諸条件を比較検討をしたところ、最も現実的な工法と考えられたのは、①柱列杭工法と④連壁基礎工法である。両工法について、表-1に

示すような主として仮締切工に関する検討項目の比較および表-2に示す各濁水期における本体利用を含めた施工上の検討項目の比較を行っている。

表-1 仮締切工に着目した比較

		連壁基礎工法	柱列杭工法	備考
構造上	遮水性	◎	○	施工時の鉛直精度
	壁体としての信頼性	◎	○	構造物相互の継手および鉛直性
	基礎形状選定の自由度	◎	◎	円形から河川占用幅を考慮した小判形等
	本体内としての利用度	◎	○	基礎としての本体利用
	掘削深度等による難易度	◎	○	本体利用をからめて、内部掘削深度の問題
その他	施工期間	○	◎	投入機械台数も含めた仮締切工の施工期間
	仮締切工の工事費	○	◎	ただし、連壁壁は本体利用が可能

この結果、次に示す連壁基礎工法の優位性があげられる。

- (1) 一重締切工法という点で施工中の安全性に優れ、かつ高品質の基礎構造物の構築が可能である。
- (2) 下部工全体の工程からすると、工期的に柱列杭工法と変わらない。
- (3) 外形寸法は、ほぼ柱列杭工法の場合と同じ規模であるが、連壁基礎工法の場合には本体構造物として利用が可能なることから工費面での差はない。
- (4) 柱列杭工法による大口径深礎案では、マスコンクリートの温度ひびわれに問題があるが、連壁基礎工法ではこれが相当改善できる。
- (5) 近年、硬質地盤を高能率で掘削できる連壁掘削機の開発が進み、各種施工実験を通じて実用可能な状況にある。

このような優位点を配慮し、中間橋脚の基礎形式として連壁基礎を採用することとしたものである。

表 - 2 施工に着目した比較

	柱 列 杭 工 法	連 壁 基 礎 工 法
第 1 濁水期	<ul style="list-style-type: none"> 第1濁水期は、柱列杭施工後内部掘削の途中で終ることになるので、出水期の河川安全対策上掘削部を砂で埋め戻す必要がある。 ⇒工期、工費に与える影響が大きく、次年度濁水期には、砂の除去後本掘削にかかる必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 第1濁水期で連壁まで構築するので、柱列杭工法のように砂での埋め戻しの必要がない。
第 2 濁水期	<ul style="list-style-type: none"> 基礎構造上、現河床面より約25mの掘削が必要である。 掘削時の支保工として、リングビームが必要である。 計画高水位まで橋脚の構築を終了する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎構造上頂版厚さ8mとなるので、現河床面から15mまでの掘削でよい。 岩掘削が少なく済み、工期上および安全上で有利となる。 濁水期の終わりには、柱列杭工法と同じ高さまでの橋脚の施工を完了できる。
第 3 濁水期	<ul style="list-style-type: none"> 計画高水位より上の部分の橋脚の構築を行う。 柱列杭の施工は、連壁基礎工法の場合より早い、下部工全体の工期は変わらない。 	<ul style="list-style-type: none"> 第3濁水期には柱列杭工法と全く同じ工程になる。 ⇒ 各濁水期毎の工程区分がうまくいく。 掘削およびコンクリート打設による工程が短くなる。
その他	<ul style="list-style-type: none"> 施工ヤードは比較的狭くてよい。 締切工としてリングビームが必要であり、基礎外周鉄筋の組立に時間がかかる。 	<ul style="list-style-type: none"> 施工ヤードが広くなる。 (泥水処理プラント、鉄筋加工場等の設置) 締切工としてリングビームを要しないので、配筋が比較的容易である。

3 連壁基礎の設計

3-1 設計の基本方針

この基礎は、PC斜張橋の上部工荷重が頂版を通じて連壁に伝達される構造である。この基礎の形状寸法を図-4に示す。また、主要な使用材料を表-3に、基礎天端における上部工反力を表-4にそ

表 - 3 使用材料

	壁 体	頂 版
コンクリート	$\sigma_c = 300 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c = 240 \text{ kg/cm}^2$
鉄 筋	SD35	SD35

れぞれ示す。上部工反力における地震の影響は、鋭角橋脚を考慮して、橋軸・橋軸直角方向のほか橋脚長軸・短軸方向の入力を基準としている。そして、地震時断面力は以上の4ケースの地震入力による断面力を比較して、そのうちの最大値を設計断面力とする。

連壁部は、頂部は頂版で拘束されており、その根入れ深さ15mは直径20mに比べて小さいので、縦(鉛直)方向応力が支配的と考えられる。このため、連壁の各エレメント間は横(円周)方向に鉄筋を継がず、それぞれを杭部材とみなして部材応力度を検討している。そのかわりに、連壁エレメント間の連結に継手筋を用いている。この継手

表 - 4 上部工反力 (基礎天端)

		N (t)	S _x (t)	S _y (t)	M _x (tm)	M _y (tm)
死 荷 重 (D)		32,590	-	-	-	-
活 荷 重 (L)		1,269	-	-	17,905	7,973
地震時活荷重 (L _{EQ})		625	-	-	-	-
地震の影響 (EQ)	0°	-	3,960	1,490	97,600	21,000
	24°	-	3,860	1,727	95,300	25,700
	90°	-	1,390	2,580	37,800	64,900
	114°	-	1,640	2,430	42,300	63,200

注) (i)、常時 = D + L、地震時 = D + L_{EQ} + EQを意味する。また、地震時において2方向同時入力を考慮する場合は、地震時断面力を1割増することとする。

注) (ii)

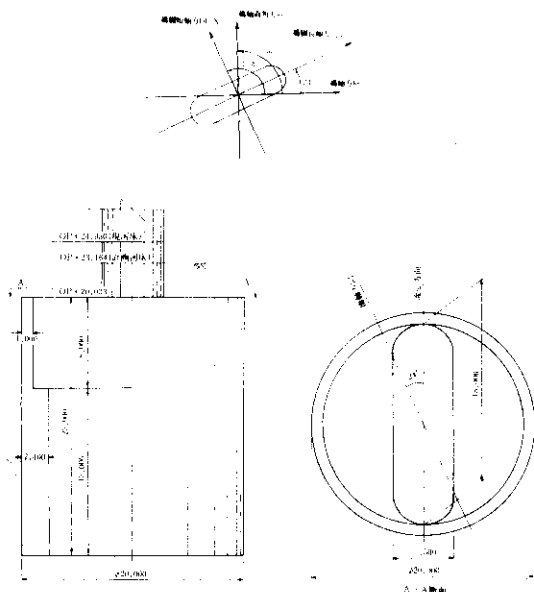


図 - 4 基礎構造図 (単位 : mm)

筋は、エレメント間相互のずれ止めを目的として設計されている。しかし、連壁継手部の効率が基礎の安定に与える影響を検討した結果、継手効率が変位、断面力に与える影響は小さいと判断されたため、安定計算では継手部を剛結として全断面有効として解析している。設計手順を図-5に示す。

3-2 安定計算

基礎全体の安定計算については、公団の「地中連続壁基礎の設計指針(案)」に示されている規定により、弾塑性安定計算法を円形断面に拡張して適用している⁹⁾。ここで考慮される地盤反力としては、基礎が周辺地盤を乱すことなく構築され、地盤との密着性が十分に期待できるものとして、連壁基礎底面の鉛直地盤反力、前面の水平地盤反力、底面および周面のせん断抵抗力で支持されるものとしている。頂版下面の鉛直地盤反力は、頂版下面での粘板岩の支持力の分担が全体に比べて微小であるため、計算ではこれを無視している。

安定計算モデルを図-6に示す。このモデルでは4種類の地盤バネを考慮し、弾塑性地盤として地盤反力度の各抵抗条件に対応する極限抵抗値を設定している。

基礎天端に作用させる荷重は、方向性のない円形基礎であることから、水平および直交の2方向のベクトルの和として評価し、特に地震時断面力については、2方向同時入力を考慮して10%増としている⁹⁾。なお、基礎底面の許容鉛直支持力は、ケーソン底面地盤の許容鉛直支持力度(道示IV編)の考え方に準じて算出し、常時200tf/m²、地震時300tf/m²を設定している⁹⁾。

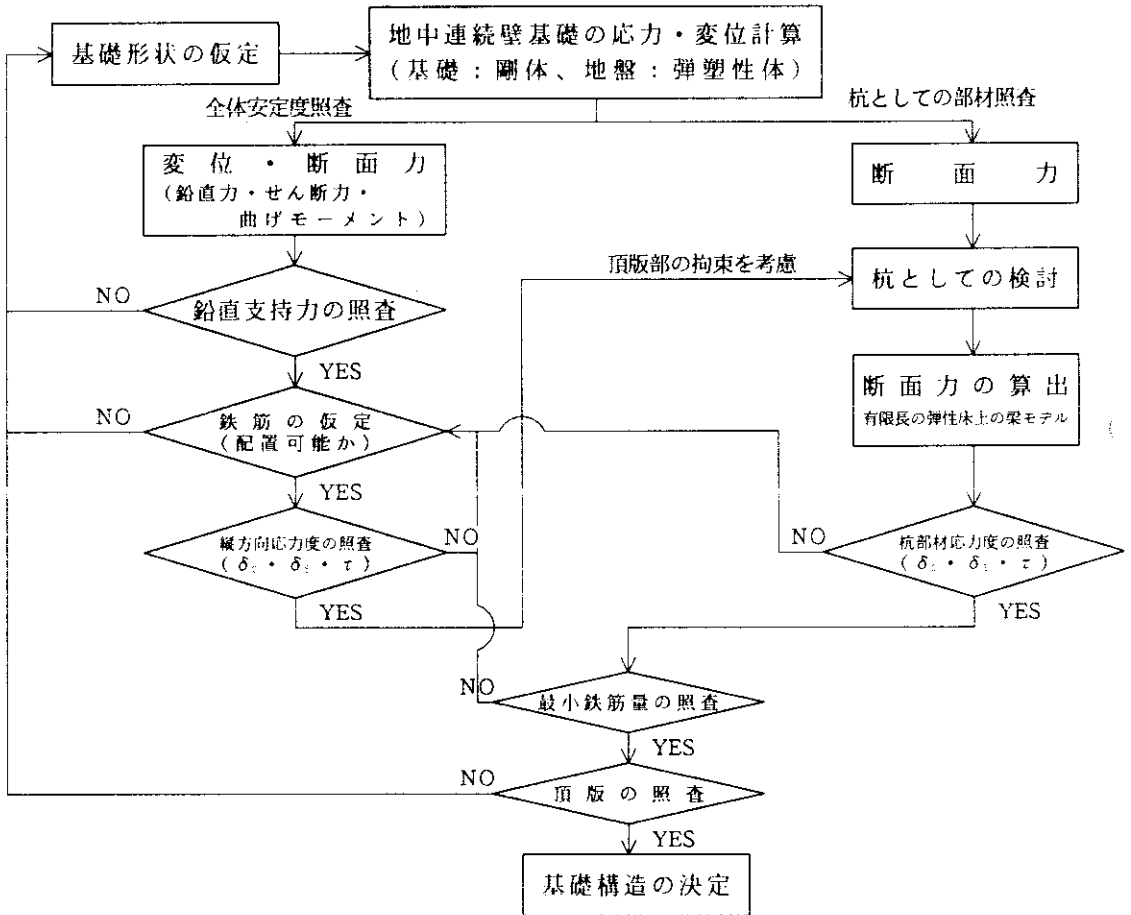


図-5 連壁基礎設計フロー

表-5 安定計算結果

		常時	地震時
変位(基礎天端)	鉛直 (cm)	0.12	0.36
	水平 (cm)	0.88	0.61
	回転角度 (rad)	0.00007	0.00030
前面反力	最大 (tf/m ²)	3.32	37.09
底面反力	最大 (tf/m ²)	218.62	286.53
	最小 (tf/m ²)	195.01	70.96
最大断面力	軸力 (t)	34.660	34.020
	せん断力 (t)	617	4661
	曲げモーメント (tm)	19.509	120.737

安定計算の結果を表-5に示す。また、一例として地震時における水平地盤反力度分布および断面力分布を図-7に示す。

3-3 壁体の設計

3-3-1 設計方法

この基礎の壁体は、通常の連壁と異なり、形状が円筒形で上端が剛な頂版によって拘束されている。このため、壁体上部での応力状態は、一辺固定の2方向版に近い挙動を示し、鉛直方向応力が支配的な構造になるものと考えられる。そこで、水平方向の設計にあたり、通常のリング・モデルに

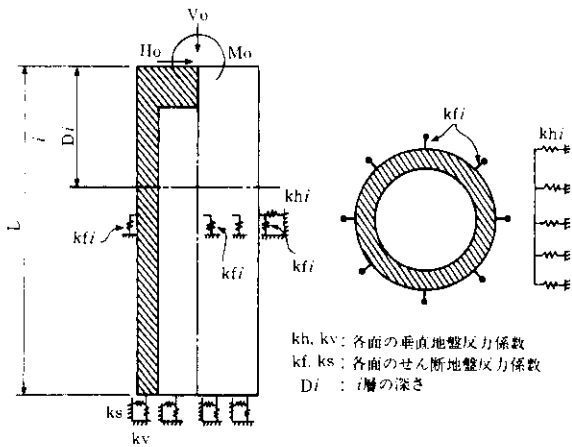


図-6 安定計算モデル

よる平面フレーム解析を適用するのは問題があると予想される。したがって、ここでは、壁体部の応力性状を把握することを目的として、FEMによる円筒シェル解析を行っている。その解析モデルを図-8に示す。連壁と頂版とは、連壁の縦方向鉄筋を頂版内に延長することにより結合される。しかし、頂版による連壁頂部の拘束が完全な剛結構造とならないことも考えられるため、上端の境界条件として完全固定とピン固定の2ケースを考慮することとしている。また、荷重は安定計算によって得られた地震時水平地盤反力度を載荷するものとしている。

3-3-2 解析結果

解析結果の一例として、鉛直方向および円周方向曲げモーメント分布を図-9に示す。これによると、連壁上部では鉛直方向曲げモーメントが支配的である。また、円周方向曲げモーメントは、連壁頭部で零であり、下方向に向かって増加しているが、その値も10t・m程度と小さい。このことから、連壁を杭としてその部材応力を検討することは妥当なものと考えられる。

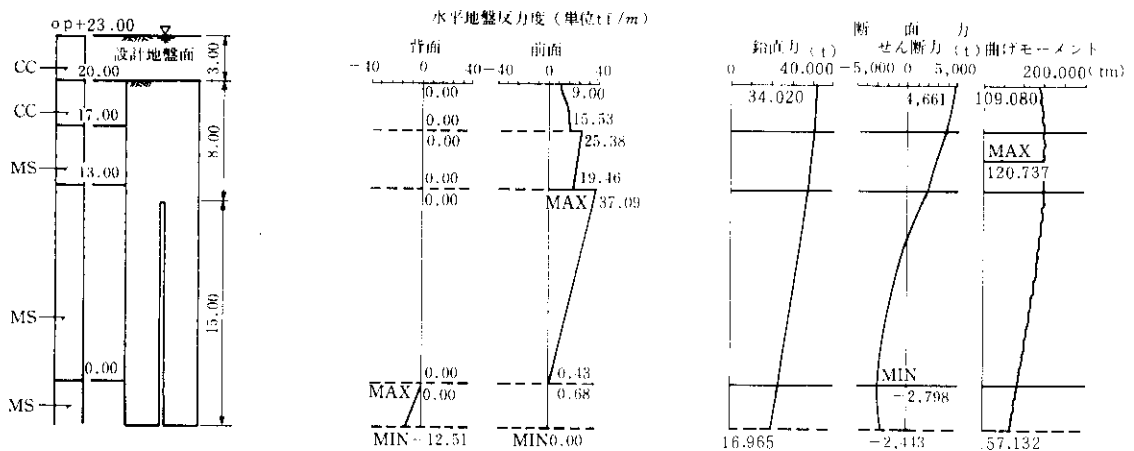


図-7 水平地盤反力度分布および断面力分布 (地震時)

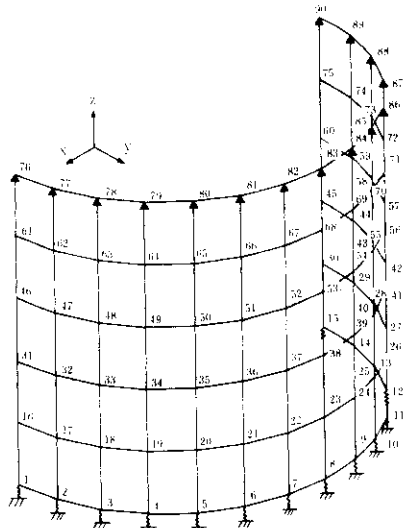


図 - 8 解析モデル

3-3-3 配筋

配筋は、安定計算で得られた断面力に加え、上記円筒シェル解析による完全固定・ピン固定の2ケースのうちの厳しい方の断面力に対して行うこととしている。

この結果、鉛直方向に対しては、主鉄筋としての最小鉄筋量の鉄筋を配置すれば耐力上十分であ

ることが判明したので、D35を200mmピッチに配置している。また、水平方向については断面力が非常に小さいので、鉛直方向の鉄筋量の1/4程度の鉄筋(D22etc200)を配置している。なお、鉛直方向曲げモーメントは、杭と同様な性状を示すことから杭部材としての照査も行い、上記の鉄筋量で安全性を確保できることを確認している。

エレメント間の継手構造は、円周方向に曲げ応力を伝達できる剛結継手と、エレメント相互間のずれ止めとして機能する簡易継手が考えられた。しかし、基礎本体は円形断面のアーチ作用により円周方向曲げ応力が卓越しないこと、また前者の継手を用いると、円形断面を構成する先行・後行エレメントの寸法が著しくアンバランスになり、施工性や設備の面で不利となることから、簡易継手を採用することとしている。簡易継手の構造を図-10に示す。なお、継手部の鉄筋は、コンクリートのせん断耐力に見合うせん断力まで伝達し得る鉄筋量をせん断摩擦理論により算定して配置することとしている。

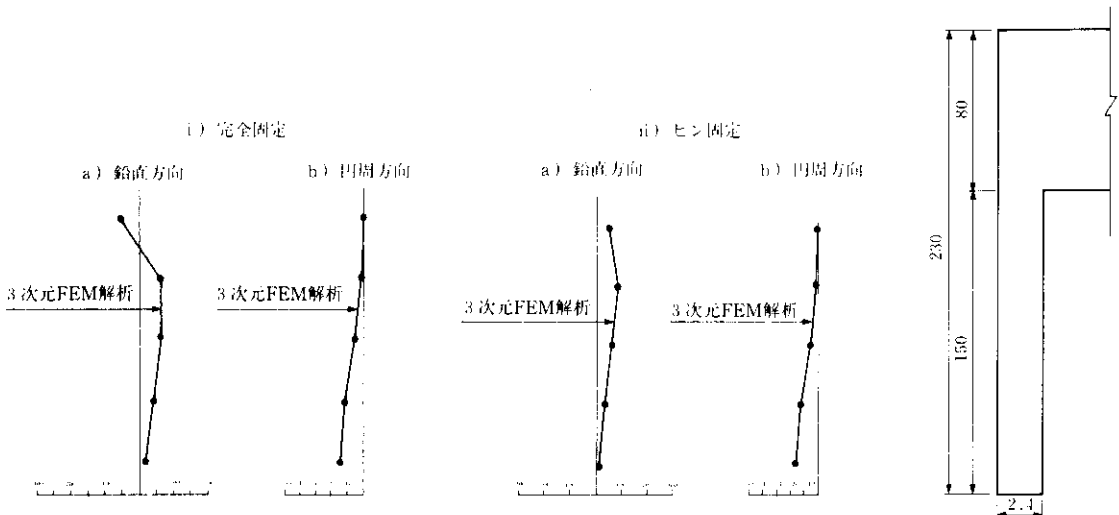


図 - 9 曲げモーメント分布図 (水平方向) (単位 : t・m)

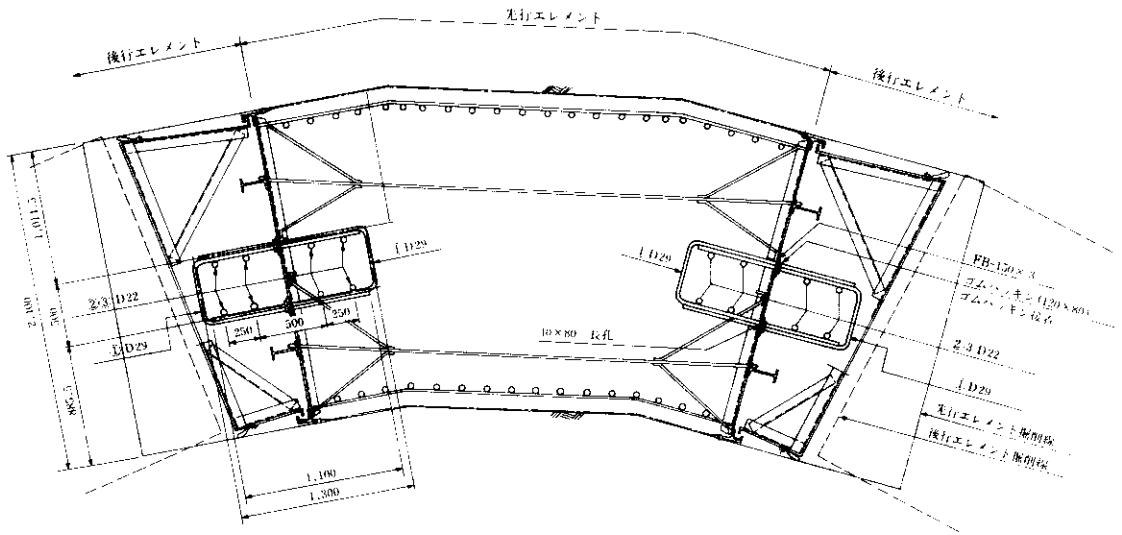


図-10 簡易継手構造 (単位: mm)

3-4 頂版部の設計

3-4-1 設計方法

この基礎の頂版は、部材厚が8.0mと厚いうえに、その直径に相当する寸法の橋脚が結合した構造となっているため、スラブあるいはディープビームとして単純にモデル化するには疑問がある。このため、頂版の応力度の算定は立体FEM解析にて行い、橋脚部を一体とした図-11に示す解析モデルを用いて、全体的な応力の流れを正確に把握することとしている。ここで、頂版は、下面の壁体の結合部分である1.4m幅の全周において、一様な鉛直バネおよびせん断バネで支持されるものとして、境界条件を設定している。また、荷重は、上部工反力と等価な断面力(地震時断面力は2方向同時入力を考慮)を橋脚上端に作用させている。

3-4-2 解析結果

解析結果の一例として、常時における主応力図を図-12に示す。これによると、頂版と橋脚の結合部および頂版周面の連壁本体との結合部におい

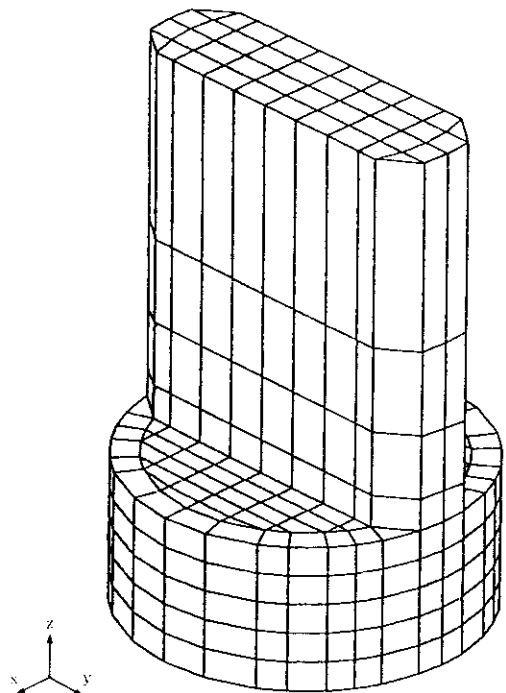


図-11 解析モデル

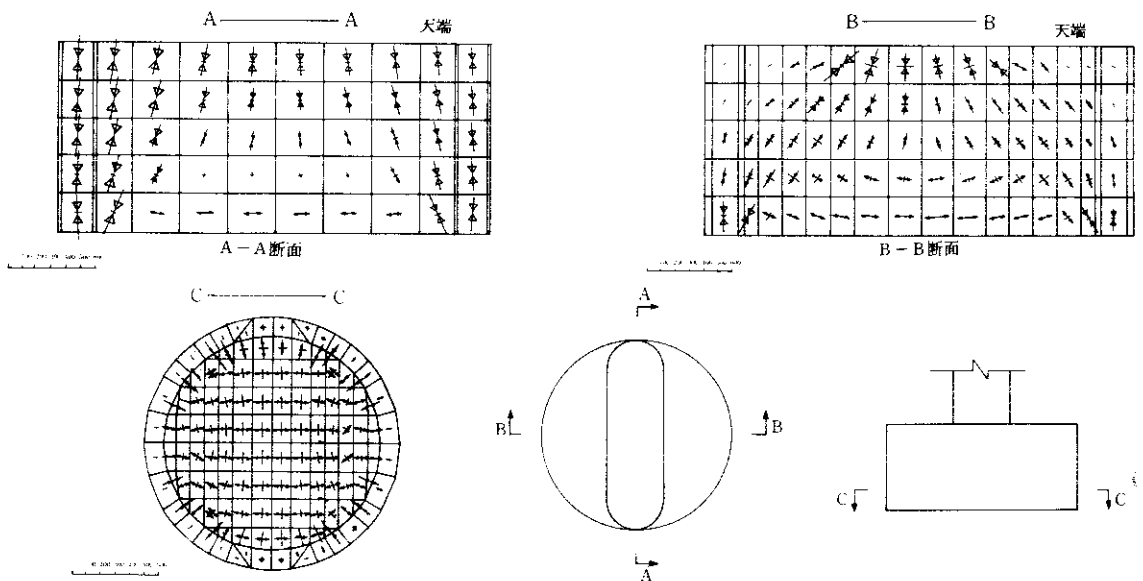


図-12 主応力図

表-6 配筋ブロックと検討断面 (単位: mm)

	水 平 方 向	鉛 直 方 向																									
検 討 断 面																											
配 筋 ブ ロ ッ ク	<table border="1" style="display: inline-table; margin-left: 20px;"> <tr><td>1</td><td>775</td></tr> <tr><td>2</td><td>1,225</td></tr> <tr><td>3</td><td>1,300</td></tr> <tr><td>4</td><td>1,250</td></tr> <tr><td>5</td><td>1,150</td></tr> <tr><td>6</td><td>850</td></tr> <tr><td>7</td><td>850</td></tr> <tr><td>8</td><td>850</td></tr> <tr><td colspan="2" style="border-top: 1px solid black;">850,000</td></tr> </table>	1	775	2	1,225	3	1,300	4	1,250	5	1,150	6	850	7	850	8	850	850,000		<table border="1" style="display: inline-table; margin-left: 20px;"> <tr><td>1,350</td><td>5,500</td><td>1,350</td></tr> <tr><td>1,400</td><td>1,500</td><td>1,500</td><td>1,400</td></tr> </table>	1,350	5,500	1,350	1,400	1,500	1,500	1,400
1	775																										
2	1,225																										
3	1,300																										
4	1,250																										
5	1,150																										
6	850																										
7	850																										
8	850																										
850,000																											
1,350	5,500	1,350																									
1,400	1,500	1,500	1,400																								

表-7 配筋結果

i) 水平方向

ブロック No		最大引張力 (t/m)			配筋量
		Case 1	Case 2	Case 3	
1	x	6.19	17.62	54.05	D22 ctc 200
	y	11.39	35.30	36.54	D19 ctc 200
2	x	10.89	14.89	22.72	D22 ctc 400
	y	13.54	24.24	24.09	D22 ctc 400
3	x	37.29	45.16	59.11	D35 ctc 400
	y	10.89	13.56	14.85	D19 ctc 400
4	x	56.87	70.76	86.82	D32 ctc 200
	y	143.22	23.99	16.13	D22 ctc 400
5	x	65.43	84.55	92.46	D35 ctc 200
	y	27.76	36.21	25.43	D35 ctc 400
6	x	87.75	96.71	94.18	D38 ctc 200
	y	50.27	49.81	49.36	D29 ctc 200
7	x	90.67	103.38	100.35	D38 ctc 200
	y	56.39	58.66	58.34	D32 ctc 200
8	x	178.33	214.24	202.21	D38 ctc 200 (2段)
	y	118.22	131.94	130.93	D32 ctc 200 (2段)

ii) 鉛直方向

ブロック No		最大引張応力度 (kg/cm ²)			配筋量
		Case 1	Case 2	Case 3	
1		1.87	2.30	1.57	D22×2 ctc 600×800
2		1.80	1.93	1.43	
3		1.93	1.57	2.44	
4		2.00	1.94	2.55	
5		1.70	1.54	4.94	D22×2 ctc 400×800
6		1.63	1.08	7.98	
7		1.44	1.74	0.98	
8		1.52	2.05	1.15	

注) Case 1:常時、Case 2:地震時(0°)、Case 3:地震時(90°)

て大きな圧縮応力が発生し、頂版下面に大きな引張応力が見られる。

3-4-3 配筋

配筋は上記解析結果により行うこととし、引張応力に対しては、コンクリートの引張強度を考慮せずに全て鉄筋で対処することとしている。また、引張主応力の方向は各点で任意の方向を向いているため、主応力を水平2方向分力と鉛直方向分力に分けて配筋している。

ここでは、表-6に示すような配筋ブロックおよび検討断面を設定している。各検討断面に対して各配筋ブロックごとに単位奥行あたりの引張力（水平方向）あるいは平均引張応力度（鉛直方向）を算定し、荷重ケースによる許容応力度の割増を考慮した最大引張力に対して配筋を行っている。各ブロックに対する配筋結果を表-7に示す。

3-4-4 頂版部の温度応力解析

頂版はマスコンクリートとなるため、水和熱に起因する温度ひびわれ発生の可能性について解析により確認している。解析は、セメントの種類、配合を変化させた数種類のケースを考え、それぞれのケースについて一次元FEMモデルによる非定常熱伝導解析プログラムを用いて、部材温度履歴を計算している。

次に、この結果にコンペンセーション・ライン法を適用して部材の温度応力、温度ひびわれ指数を計算し、ひびわれの発生について照査している。

これによると、低発熱型のセメントを用い単位セメント量を抑制すれば、ひびわれ発生確率をかなり抑えられることが明らかになった。

あとがき

本稿は、長大PC斜張橋の荷重の大部分を支える中間橋脚の連壁基礎について、設計を中心にその計画の概要を述べたものである。

従来の連壁基礎には、このような大規模なものは少なく、しかも近接施工を想定した矩形のものが主であった。⁶⁾円断面でしかも超厚壁を有するこ

の基礎は、設計にあたって力学的挙動に不明確な所が多々あり、その解決法の提案が待たれる。ここでは、杭の設計手法の応用、簡易継手の採用等により、合理的でかつ確実な設計が行えたものと考えられる。

この報告が、今後の大規模連壁基礎の適用にあたっての一助となれば幸いである。

また、施工については現地着工する時点で報告する予定であるが、概要は第20回技術研究発表会『論文集』を参考にされたい⁷⁾。

最後に、基礎形式の選定段階で熱心に御検討いただいた技術審議会基礎構造分科会（主査柴田徹京大教授）の委員の方々、そして実際の検討の裏を賜った、(株)建設技術研究所の岡田、友永両氏に厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：新猪名川（PC斜張橋）基礎工の設計・施工法に関する資料、技術審議会・基礎構造分科会資料、昭和62年8月
- 2) 高橋、松倉、杉山、谷口：新猪名川大橋の耐震設計、技報第6号、昭和62年3月
- 3) 橋本、谷口、松倉、杉山：新猪名川大橋上部工の設計、技報第7号、昭和63年3月
- 4) 阪神高速道路公団：地中連続壁基礎の設計指針（案）、昭和62年3月
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、昭和55年5月
- 6) 地中連続壁基礎協会：地中連続壁基礎工法技術資料集、昭和62年1月
- 7) 前原、鈴木、西林：新猪名川大橋の施工概要、阪神高速道路公団、第20回技術発表会論文集、昭和63年2月