

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3770号

土木研究所資料

橋梁基礎に作用した流動力の逆解析

平成12年12月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター振動研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

橋梁基礎に作用した流動力の逆解析

耐震技術研究センター 振動研究室 室 長 田村 敬一
研 究 員 東 拓生*
〃 小林 寛
〃 濱田 禎**

要 旨

平成7年兵庫県南部地震では、地盤の流動化により道路橋の基礎に大きな残留水平変位が生じ、これを契機にして、平成8年に改訂された道路橋示方書では、従来からの液状化に関する規定に加えて、流動化に対する耐震設計法が新たに規定された。

本資料は、流動化に対する耐震設計法のベースとなった流動力の評価方法について取りまとめたものである。流動力の評価に当たっては、地盤の流動化により残留水平変位が生じた阪神高速道路5号湾岸線の4基の橋梁基礎を対象として、杭及び地盤について非線形性を考慮したモデル化を行い、残留水平変位と整合するような荷重条件を逆解析により算定した。その結果、地盤の流動化が橋脚基礎に及ぼす影響は、地表面付近の非液状化層中の構造部材には受働土圧相当の力を、また、その下位の液状化層中の構造部材には全上載圧の30%程度の力を作用させることにより評価できることを明らかにした。

キーワード：流動化、液状化、道路橋、耐震設計、基礎、平成7年兵庫県南部地震

* 現 企画部情報資料課

** 現 道路局企画課道路経済調査室

ま え が き

平成7年兵庫県南部地震では、広範な地域で液状化が発生するとともに、特に、臨海部においては護岸等の水際線構造物の移動に伴い、地盤が水平方向に移動する流動化が発生し、道路橋の基礎に大きな残留水平変位が生じた。我が国では、昭和39年の新潟地震以来液状化に伴う流動化の発生が認識されているが、近年建設された橋梁構造物が流動化により大きな変位を受けたのは、兵庫県南部地震が初めてである。このため、平成8年の道路橋示方書の改訂においては、従来からの液状化に関する規定に加えて、流動化に対する耐震設計法が新たに規定された。

本資料は、地盤の流動化により残留水平変位が生じた橋梁基礎の逆解析から、流動力の評価方法について提案した結果を取りまとめたものである。

平成12年12月

耐震技術研究センター	振動研究室	室長	田村 敬一
	研究員	東 拓生*	
	〃	小林 寛	
	〃	濱田 禎**	

* 現 企画部情報資料課

** 現 道路局企画課道路経済調査室

目 次

まえがき

1. 流動化による道路橋の被災事例	1
2. 流動力の算定方法	3
3. 流動力の算定結果	5
3. 1 解析対象橋脚	5
3. 2 解析モデル	5
3. 3 流動力の算定	5
4. まとめ	16
謝 辞	17
参考文献	18
付属資料	
1. 橋脚一般図	19
2. フーチング底面に作用する鉛直力の算出	25
3. 受働土圧及び全上載圧相当の力の算出	31

1. 流動化による道路橋の被災事例

兵庫県南部地震では、流動化が主原因となり上部構造の落下等の重大な被災につながった橋はなかったが、流動化により損傷が生じた道路橋の事例として、阪神高速道路5号湾岸線の新夙川橋の事例を以下に示す¹⁾。

新夙川橋は西宮浜と南芦屋浜との間の夙川航路を跨ぐ橋として平成5年に竣工した橋長 310mの3径間鋼床版ゲルバー箱桁橋であり、一般図及び地震による被災状況を図-1.1 に示す。南芦屋浜側（西側）のP4橋脚付近上に料金所があるため、幅員は 28mから 69mまで変化している。支点条件は埋立地上の端支点が可動、航路内の中間支点が固定である。

西宮浜にあるP1橋脚は2柱式RCラーメン橋脚、基礎は2脚式オープンケーソン基礎である。南芦屋浜にあるP4橋脚は4柱式鋼製ラーメン橋脚、基礎は場所打ちコンクリート杭基礎である。地盤条件は、地表面から砂礫を主体とした埋立土層、沖積の粘性土と砂質土の互層があり、その下位に洪積砂質土層がある。各基礎は洪積砂質土層を支持層としている。

埋立地に位置する橋脚付近では、写真-1.1 に示すように、地盤の液状化及び護岸の移動に伴い流動化が発生し、P1及びP4のいずれの橋脚も航路方向に移動した。地震による被災は陸上部にあるこれら2橋脚上に集中していた。2橋脚上の端支点はピボットローラー支承であり、両端支点ともに、写真-1.2 に示すように、上下沓が分離して逸脱した。このため、隣接桁との間に路面の段差が生じ、P1橋脚上では桁間を結合する桁連結装置が破壊した。なお、ゲルバーヒンジ部では、支承は破壊しなかったものの、桁連結装置が変形していた。

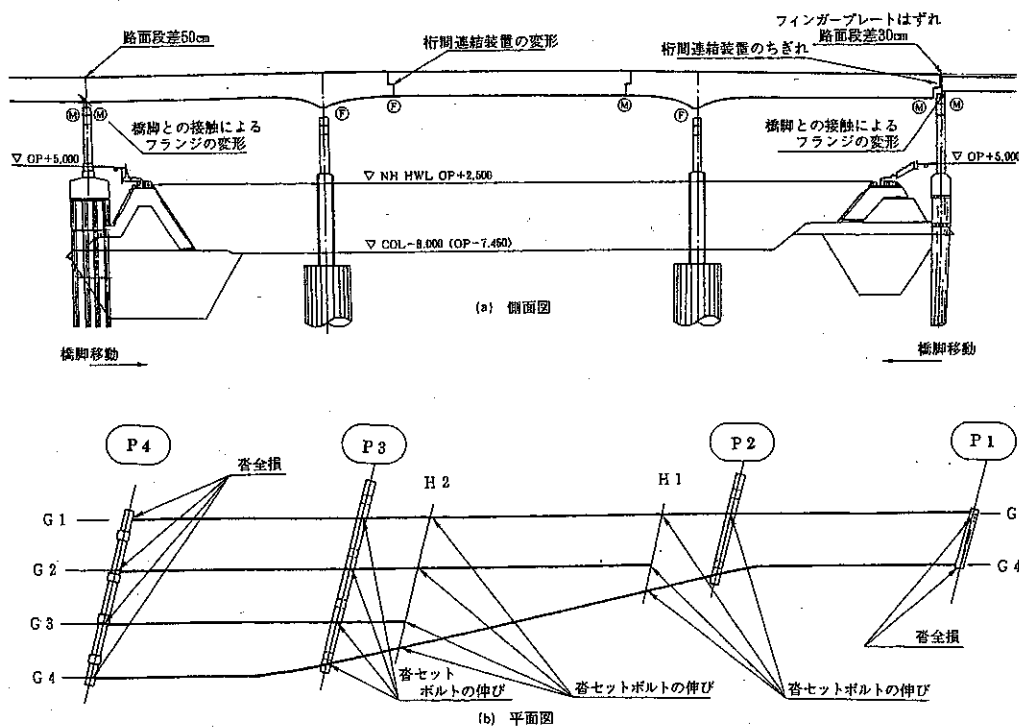


図-1.1 新夙川橋の被災状況 (単位: mm) ¹⁾



写真-1.1 新夙川橋近傍の地盤の変状¹⁾

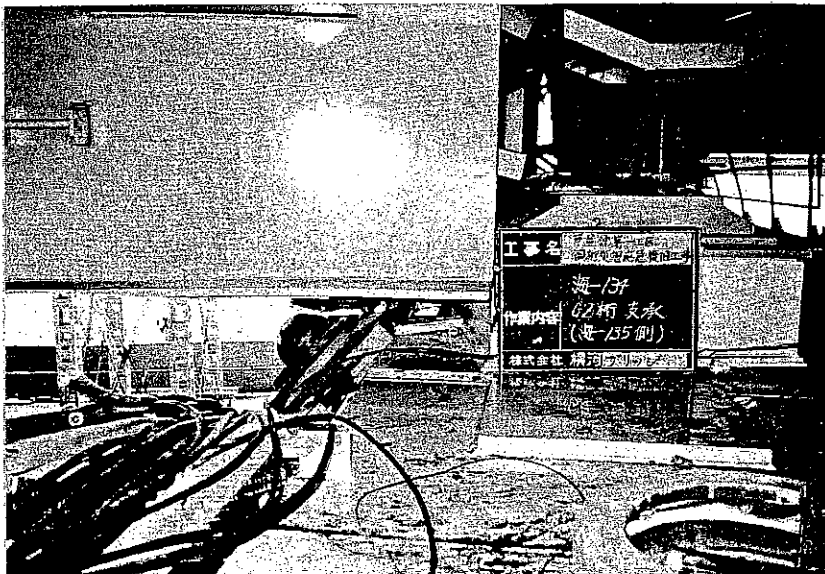


写真-1.2 新夙川橋の支承の損傷¹⁾

2. 流動力の算定方法

流動化が橋梁基礎に及ぼす影響のメカニズムについては研究途上の部分があるが、流動力の評価においては、図-2.1 に示すように、地震時に液状化しなかったと考えられる地表面付近の土層（以下、非液状化層という。）が、その下に位置する液状化したと考えられる土層（以下、液状化層という。）とともに移動し、基礎構造物に力を及ぼしたと仮定した。この場合、非液状化層は構造物の方向に変位して力を及ぼすと考えられるため、受働土圧相当の力が構造物に作用するものと見なした。また、液状化層は流動する際に流体的に構造物に力を作用させるものと考え、土と水を含めた全上載圧のうち、ある割合が構造物に作用するものと見なし、その割合を逆解析により算定した^{2), 3)}。

解析においては、図-2.2 に示すように、基礎を剛体フーチングと地盤に支持された杭にモデル化し、杭及び地盤については非線形性を考慮した。これは、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案）⁴⁾ に示されているモデルと基本的に同一である。なお、地盤のうち流動化が生じた範囲については、地盤の抵抗が期待できないため、非液状化層及び液状化層に対しては地盤ばねを見込まないこととした。フーチング底面に作用する鉛直力としては、フーチング、橋脚等の自重と上部構造の死荷重反力を考慮した。また、流動力の載荷幅は、橋脚及びフーチングについてはそれぞれの幅とし、杭については載荷方向の最外縁に位置する杭間の投影幅とした。

液状化層中の全上載圧のうち、どの割合が荷重として基礎構造物に作用したかは未知であるため、この割合を変化させることにより、荷重-変位曲線を算出し、基礎に生じた残留水平変位を説明することができる割合を算定することとした。

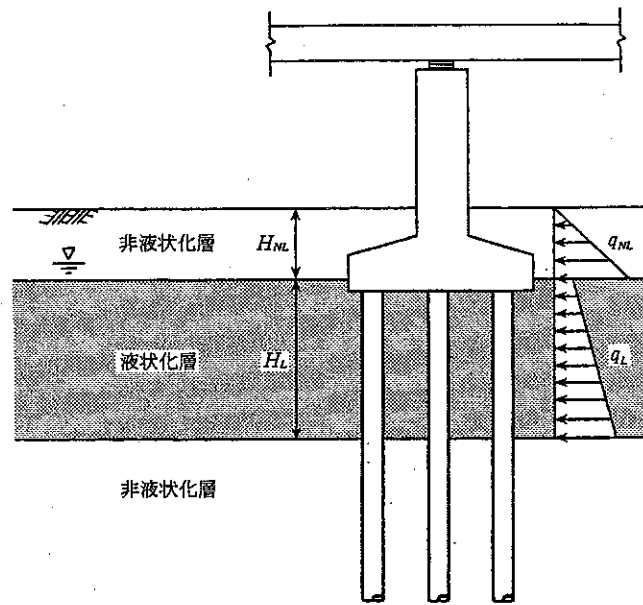


図-2.1 流動力の算定モデル

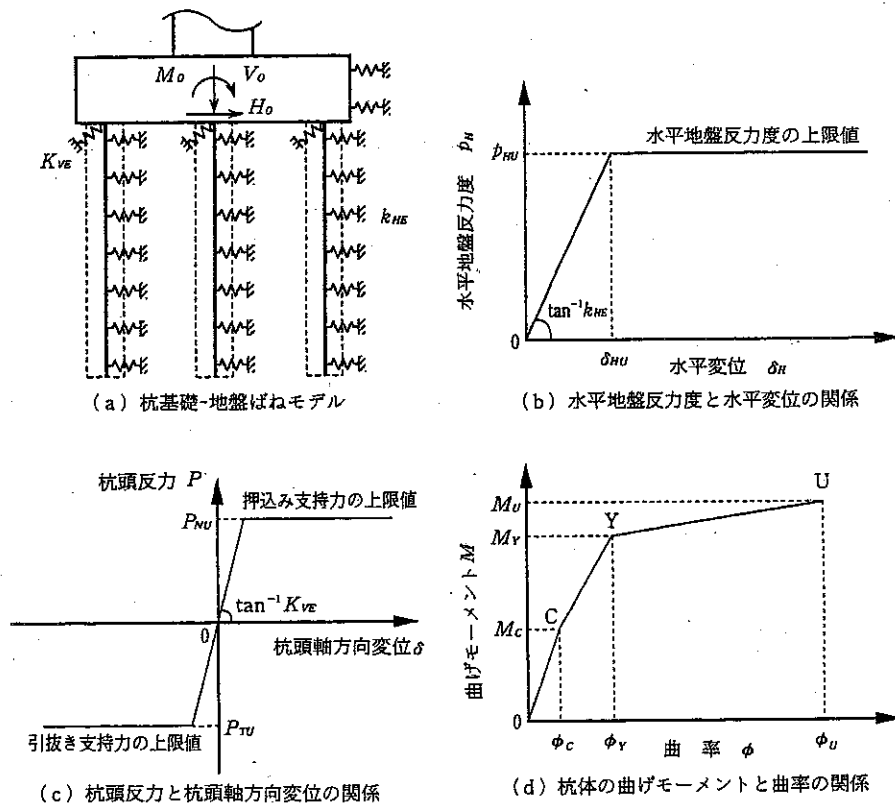


図-2.2 杭基礎の解析モデル

3. 流動力の算定結果

3. 1 解析対象橋脚

逆解析により流動力の算定を行ったのは、流動化により残留水平変位が生じた阪神高速道路5号湾岸線の4基の橋脚である。これらの橋脚の位置を図-3.1に示す。解析対象橋脚は、いずれも、水路直近に位置する杭基礎を有する橋脚である。また、解析対象橋脚の一般図を付属資料1に示す。

A橋脚は4柱式鋼製ラーメン橋脚であり、基礎は直径1.5m、杭長34mの場所打ちコンクリート杭基礎である。橋脚上の支承条件は、水路側及び南芦屋浜側のいずれの桁に対しても可動である。地盤条件は、地表面から砂礫を主体とした埋立土層、沖積の粘性土と砂質土の互層があり、その下位に洪積砂質土層がある。流動化により本橋脚は水路方向に移動したが、残留水平変位の橋軸方向成分は100cmであった。当該地点において液状化判定^{5), 6)}を行った結果によれば、地下水位以深の埋立土層において液状化が発生したものとみなされた。これは、他のB橋脚、C橋脚及びD橋脚についても同様である。

B橋脚は鋼製ラーメン橋脚であり、基礎は直径1.5m、杭長34mの場所打ちコンクリート杭基礎である。橋脚上の支承条件は、南芦屋浜側及び水路側のいずれの桁に対しても可動である。地盤条件は、地表面から埋立土層、沖積粘性土、洪積砂質土層となっている。流動化により橋軸方向に生じた本橋脚の残留水平変位は56cmである。

C橋脚は2層式の鋼製ラーメン橋脚であり、基礎は直径1.5m、杭長41.5mの場所打ちコンクリート杭基礎である。橋脚上の支承条件は、上層は魚崎浜側及び水路側のいずれの桁に対しても可動、下層は魚崎浜側に対しては可動、水路側に対しては固定である。地盤条件は、地表面から埋立土層、沖積の粘性土と砂質土の互層、洪積砂質土層となっている。流動化による本橋脚の橋軸方向の残留水平変位は62cmである。

D橋脚は2層式の鋼製ラーメン橋脚であり、基礎は直径1.5m、杭長39mの場所打ちコンクリート杭基礎である。橋脚上の支承条件は、上層は六甲アイランド島側及び水路側のいずれの桁に対しても可動、下層は水路側の桁に対しては固定、六甲アイランド島側の桁に対しては可動である。地盤条件は、地表面から砂礫～砂質土を主体とした埋立土層及び沖積の粘性土層があり、その下部は洪積の砂質土と粘性土の互層となっている。流動化により橋軸方向に生じた本橋脚の残留水平変位は90cmである。

3. 2 解析モデル

図-3.2に各解析対象橋脚の基礎諸元及び地盤柱状図をもとに設定した解析上の地盤条件を示す。また、表-3.1及び表-3.2に、それぞれ、解析対象橋脚の橋軸方向の残留水平変位及び主要構造寸法並びにフーチング底面における鉛直作用力の集計結果を示す。なお、鉛直作用力の算出方法については付属資料2に示す。

3. 3 流動力の算定

流動力の算定においては、まず、図-3.3に示すように、地表面付近の非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧及びその下位の液状化層中の構造部材に作用する全上載圧に相当する力を算出した。ここでは、A橋脚の場合を例として示すが、付属資料3に全算出結果を示す。

(1) 単位長さ当たりの受働土圧

$$p = K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

K_p : 受働土圧係数 (=4.14)

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$p_1 = 4.14 \times 1.7 \times 1.85 \times 12.0 = 156.2 [\text{tf/m}]$$

$$p_2 = 4.14 \times 1.7 \times 1.85 \times 53.0 = 690.1 [\text{tf/m}]$$

$$p_3 = 4.14 \times 1.7 \times 3.7 \times 53.0 = 1,380.2 [\text{tf/m}]$$

(2) 非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧相当の力

$$P_{NL} = 1/2 \times 156.2 \times 1.85 + 1/2 \times (690.1 + 1,380.2) \times 1.85 = 2,060 [\text{tf}]$$

(3) 単位長さ当たりの全上載圧

$$q = \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$q_1 = 1.7 \times 3.70 \times 53.0 = 333.4 [\text{tf/m}]$$

$$q_2 = 333.4 + 1.8 \times 1.15 \times 53.0 = 443.1 [\text{tf/m}]$$

$$q_3 = 323.9 + 1.8 \times 1.15 \times 51.5 = 430.5 [\text{tf/m}]$$

$$q_4 = 323.9 + 1.8 \times 15.3 \times 51.5 = 1,742.2 [\text{tf/m}]$$

(4) 液状化層中の構造部材に作用する全上載圧相当の力

$$P_L = 1/2 \times (333.4 + 443.1) \times 1.15 + 1/2 \times (430.5 + 1,742.2) \times 14.15 = 15,818 [\text{tf}]$$

次に、非液状化層中の構造部材には受働土圧相当の力を、また、液状化層中の構造部材には全上載圧に相当する力の $c_L=0, 10, 20, 30, 40\%$ を作用させた場合の流動力と杭頭における水平変位との関係（荷重—変位曲線）を算出した。図-3.4 及び表-3.3 は、それぞれ、A橋脚に対する荷重—変位曲線及び作用力の算出結果である。A橋脚の場合、非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧相当の力 P_{NL} 及び液状化層中の構造部材に作用する全上載圧相当の力 P_L は、それぞれ、次のように算出される。

$$P_{NL} = 2,060 [\text{tf}]$$

$$P_L=15,818[\text{tf}]$$

ここで、例えば、液状化層中の構造部材には全上載圧に相当する力の 25% が作用したものと仮定すれば、残留水平変位 100cm に対応する全作用力 P は、 $c_L=20\%$ と $c_L=30\%$ の場合の比例配分により、次式で求められる。

$$P=5,314+(5,724-5,314) \times (1/2)=5,519[\text{tf}]$$

この場合、液状化層中の構造部材に作用した力の全上載圧に対する割合は、

$$c_L=(5,519-2,060)/15,818=0.22$$

となり、 $c_L=25\%$ とは整合しない。

そこで、さらに、液状化層中の構造部材には全上載圧に相当する力の 21% が作用したものと仮定すれば、全作用力 P は次のように求められる。

$$P=5,314+(5,724-5,314) \times (1/10)=5,355[\text{tf}]$$

したがって、液状化層中の構造部材に作用した力の全上載圧に対する割合は、

$$c_L=(5,355-2,060)/15,818=0.21$$

となり、 $c_L=21\%$ と調和する。すなわち、A 橋脚の場合は、非液状化層中の構造部材には受働土圧相当の力を、また、液状化層中の構造部材には全上載圧の 21% 相当の力を作用させることにより、流動化で生じた残留水平変位を説明できる。

図-3.5~3.7 及び表-3.4~3.6 には、それぞれ、B 橋脚、C 橋脚及び D 橋脚に対する荷重-変位曲線及び作用力の算出結果を示す。A 橋脚の場合と同様に、液状化層中の構造部材に作用する力の全上載圧に対する割合を算定すると、それぞれ、31%、28% 及び 24% と求められる。表-3.7 は、流動力の算定結果をまとめたものであり、この表によれば、流動化により液状化層中の構造部材に作用する力は、全上載圧の 30% 程度とみなせることがわかる。

表-3.1 解析対象橋脚の橋軸方向の残留水平変位及び主要構造寸法

			A橋脚	B橋脚	C橋脚	D橋脚
橋軸方向の残留水平変位 [cm]			100	56	62	90
鉛直方向部材 寸法 [m]	非液化化層	橋脚 h_a	1.85	1.40	1.50	1.90
		フーチング h_b	1.85	2.20	1.35	1.40
	液化化層	フーチング h_c	1.15	0.80	2.15	1.60
		杭 h_d	14.15	8.90	14.00	14.30
橋軸直角方向の部材幅 [m]		橋脚 B_C	3.0×4 =12.0	3.0×2 =6.0	2.5×2 =5.0	2.5×2 =5.0
		フーチング B_F	53.0	22.0	22.5	18.0
杭の最外縁幅 B_P [m]			51.5	20.5	21.0	16.5

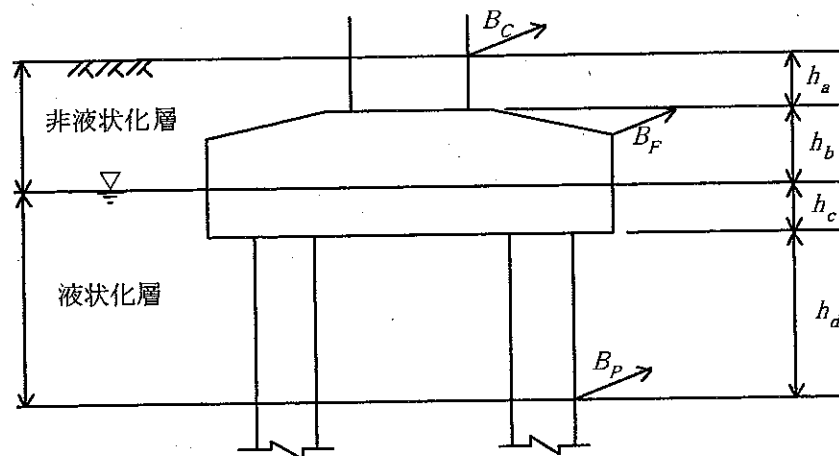


表-3.2 フーチング底面における鉛直作用力 (単位: tf)

	A橋脚	B橋脚	C橋脚	D橋脚
上部構造死荷重反力	5,327	1,869	3,160	1,500
橋脚重量	302	245	300	280
フーチング重量	5,465	1,663	2,720	1,225
上載土砂重量	2,620	597	923	592
浮力	-884	-164	-701	-274
フーチング底面作用力	12,830	4,210	6,402	3,323

注) 1 [tf]=9.8[kN]

表-3.3 作用力の算出結果 (A橋脚)

非液化化層中の作用力 P_{NL} [tf]	c_L [%]	液化化層中の作用力 $P_L \times c_L$ [tf]	全作用力 [tf]	残留水平変位に対する 荷重 [tf]
2,060	0	0	2,060	3,616 ($\delta_R=100\text{cm}$)
2,060	10	1,582	3,642	4,683 ($\delta_R=100\text{cm}$)
2,060	20	3,164	5,224	5,314 ($\delta_R=90\text{cm}$)
2,060	30	4,745	6,805	5,724 ($\delta_R=100\text{cm}$)
2,060	40	6,327	8,387	6,008 ($\delta_R=100\text{cm}$)

表-3.4 作用力の算出結果 (B橋脚)

非液化化層中の作用力 P_{NL} [tf]	c_L [%]	液化化層中の作用力 $P_L \times c_L$ [tf]	全作用力 [tf]	残留水平変位に対する 荷重 [tf]
893	0	0	893	1,548 ($\delta_R=56\text{cm}$)
893	10	296	1,189	1,673 ($\delta_R=56\text{cm}$)
893	20	592	1,485	1,749 ($\delta_R=56\text{cm}$)
893	30	888	1,781	1,801 ($\delta_R=56\text{cm}$)
893	40	1,185	2,078	1,841 ($\delta_R=56\text{cm}$)

表-3.5 作用力の算出結果 (C橋脚)

非液化化層中の作用力 P_{NL} [tf]	c_L [%]	液化化層中の作用力 $P_L \times c_L$ [tf]	全作用力 [tf]	残留水平変位に対する 荷重 [tf]
505	0	0	505	1,663 ($\delta_R=62\text{cm}$)
505	10	659	1,164	2,101 ($\delta_R=62\text{cm}$)
505	20	1,319	1,824	2,265 ($\delta_R=62\text{cm}$)
505	30	1,978	2,483	2,352 ($\delta_R=62\text{cm}$)
505	40	2,638	3,143	2,405 ($\delta_R=62\text{cm}$)

表-3.6 作用力の算出結果 (D橋脚)

非液化化層中の作用力 P_{NL} [tf]	c_L [%]	液化化層中の作用力 $P_L \times c_L$ [tf]	全作用力 [tf]	残留水平変位に対する 荷重 [tf]
525	0	0	525	1,177 ($\delta_R=90\text{cm}$)
525	10	524	1,049	1,543 ($\delta_R=90\text{cm}$)
525	20	1,049	1,574	1,726 ($\delta_R=90\text{cm}$)
525	30	1,573	2,098	1,824 ($\delta_R=90\text{cm}$)
525	40	2,097	2,622	1,885 ($\delta_R=90\text{cm}$)

表-3.7 流動力の算定結果

			A橋脚	B橋脚	C橋脚	D橋脚
橋軸方向の残留水平変位 [cm]			100	56	62	90
鉛直方向部材 寸法 [m]	非液状化層	層厚 H_{NL}	3.70	3.60	2.85	3.30
		橋脚 h_a	1.85	1.40	1.50	1.90
		フーチング h_b	1.85	2.20	1.35	1.40
	液状化層	層厚 H_L	15.30	9.70	16.15	15.90
		フーチング h_c	1.15	0.80	2.15	1.60
		杭 h_d	14.15	8.90	14.00	14.30
橋軸直角方向の部材幅 [m]	橋脚 B_C	3.0×4 =12.0	3.0×2 =6.0	2.5×2 =5.0	2.5×2 =5.0	
	フーチング B_F	53.0	22.0	22.5	18.0	
	杭 B_P	51.5	20.5	21.0	16.5	
非液状化層の受働土圧相当の力 P_{NL} [tf]			2,060	893	505	525
液状化層の全上載圧相当の力 P_L [tf]			15,818	2,961	6,594	5,243
c_L [%]			21	31	28	24
液状化層中の作用力 [tf]			3,295	912	1,830	1,240
全作用力 [tf]			5,355	1,805	2,335	1,765

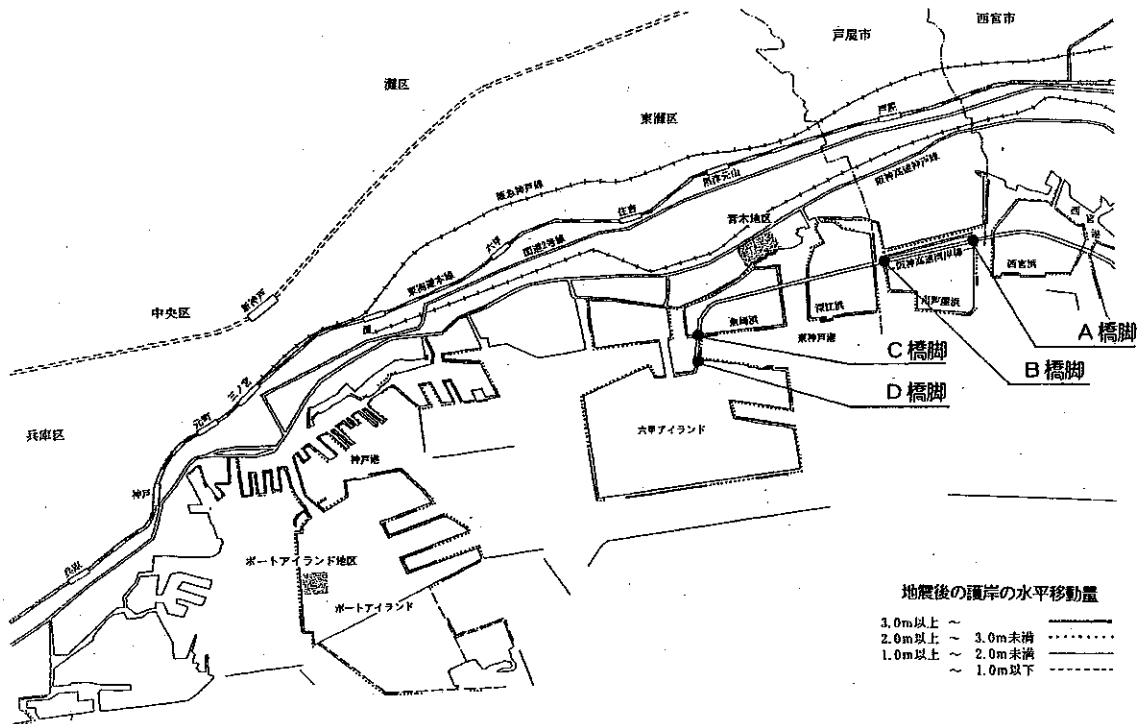
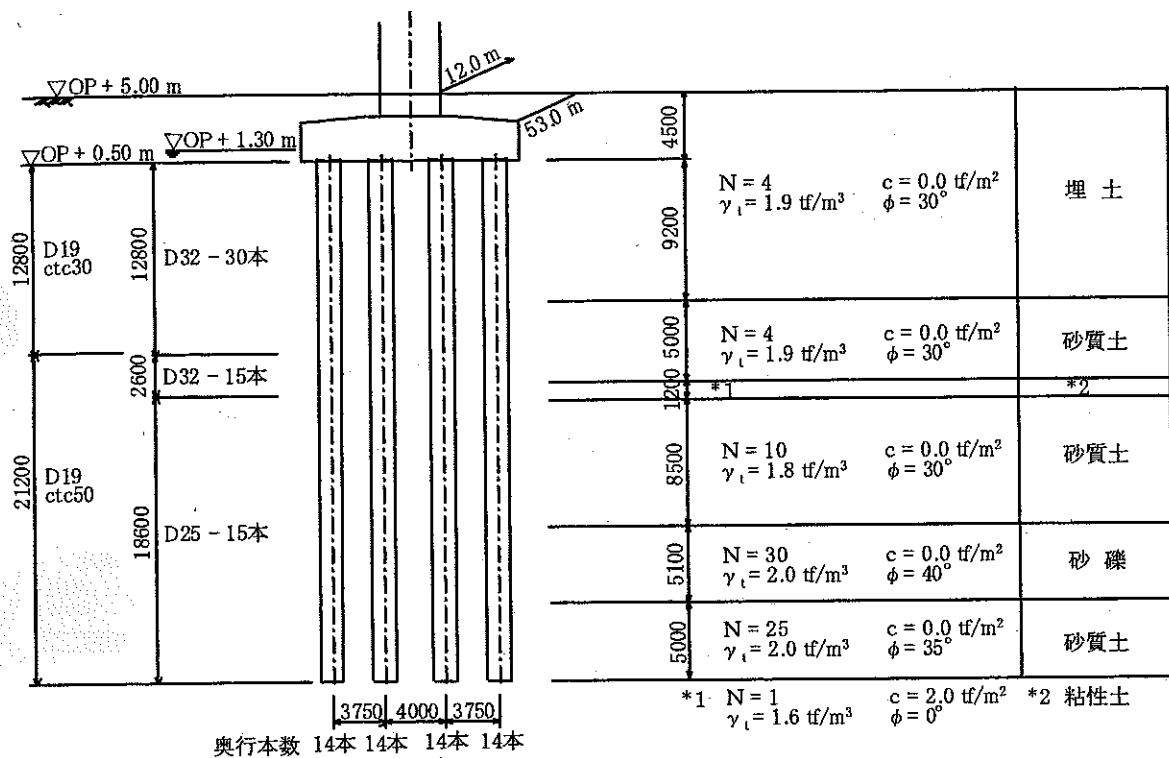
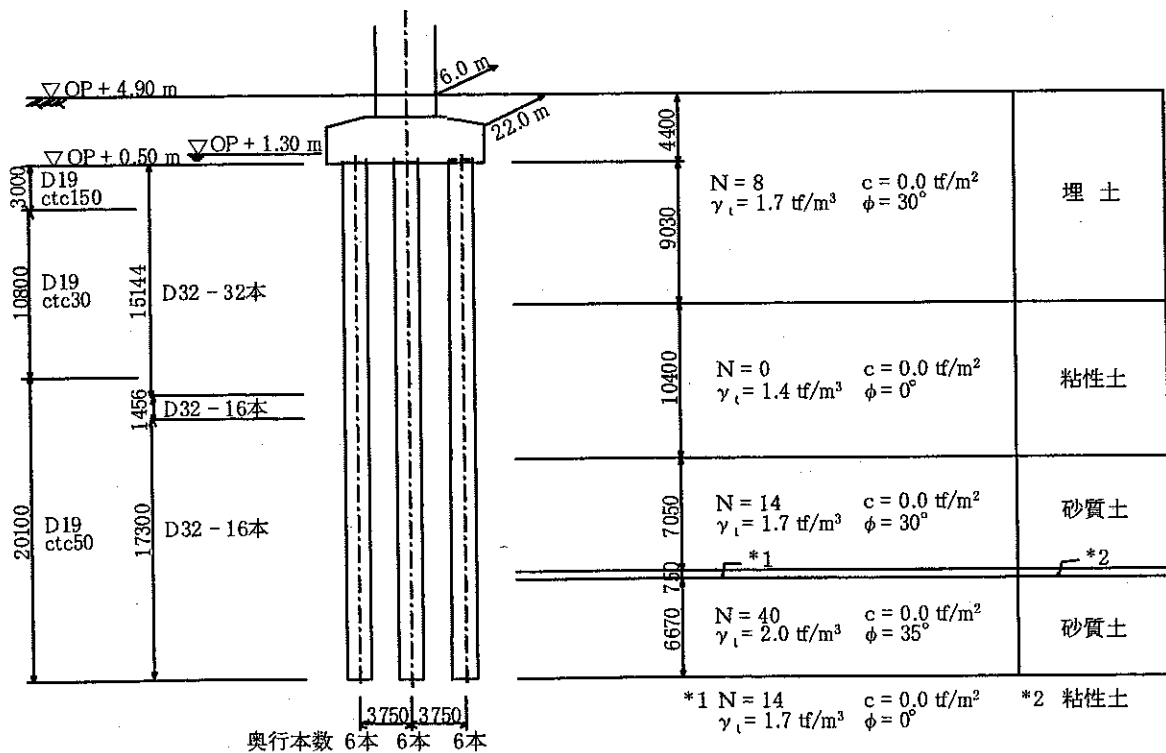


図-3.1 解析対象橋脚の位置

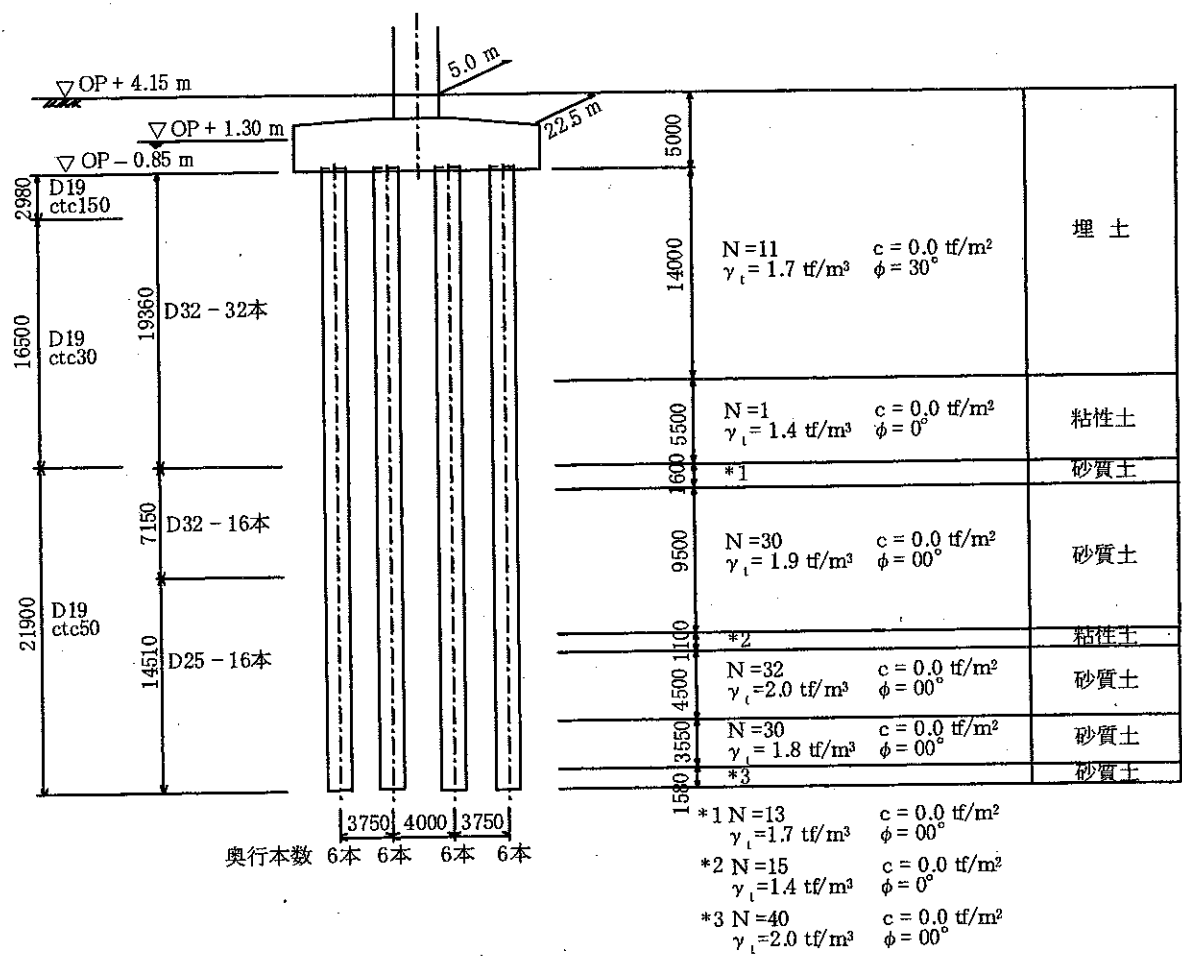


(a) A橋脚



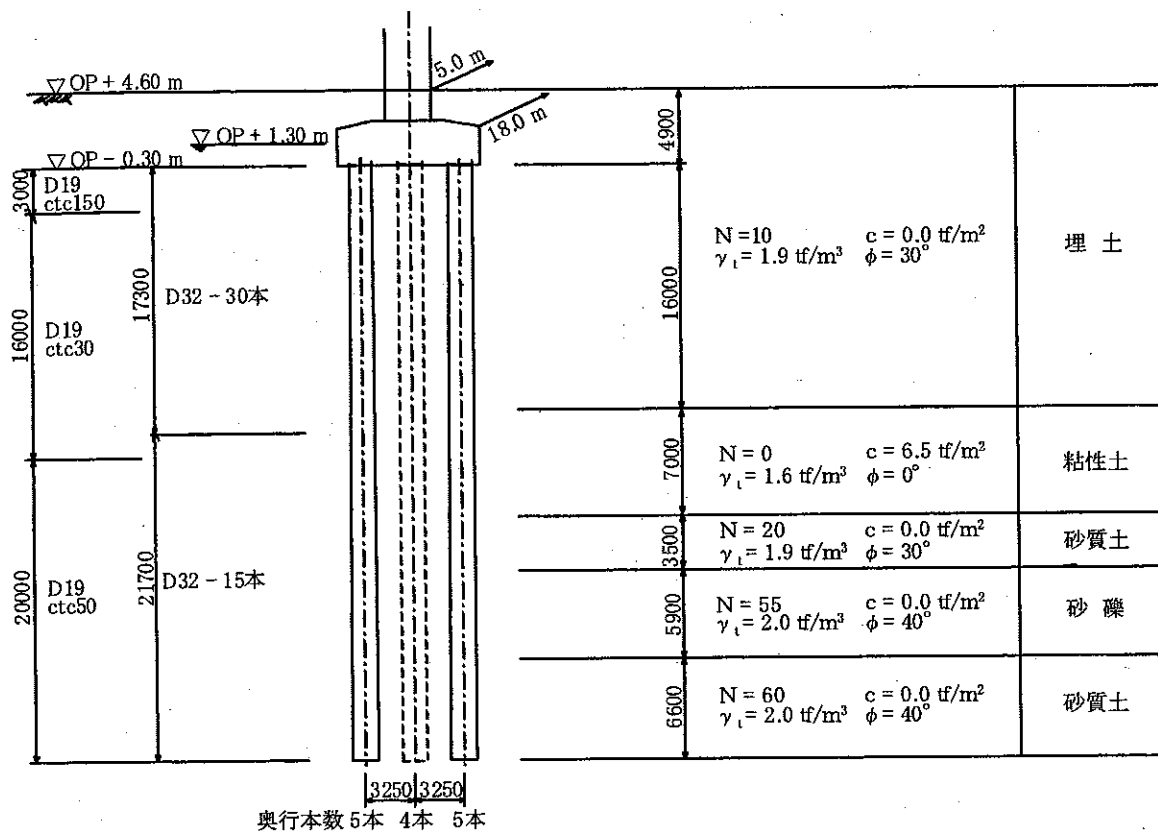
(b) B橋脚

図-3.2(1) 解析対象橋脚の基礎諸元及び解析上の地盤条件



(c) C橋脚

図-3.2(2) 解析対象橋脚の基礎諸元及び解析上の地盤条件



(d) D橋脚

図-3.2(3) 解析対象橋脚の基礎諸元及び解析上の地盤条件

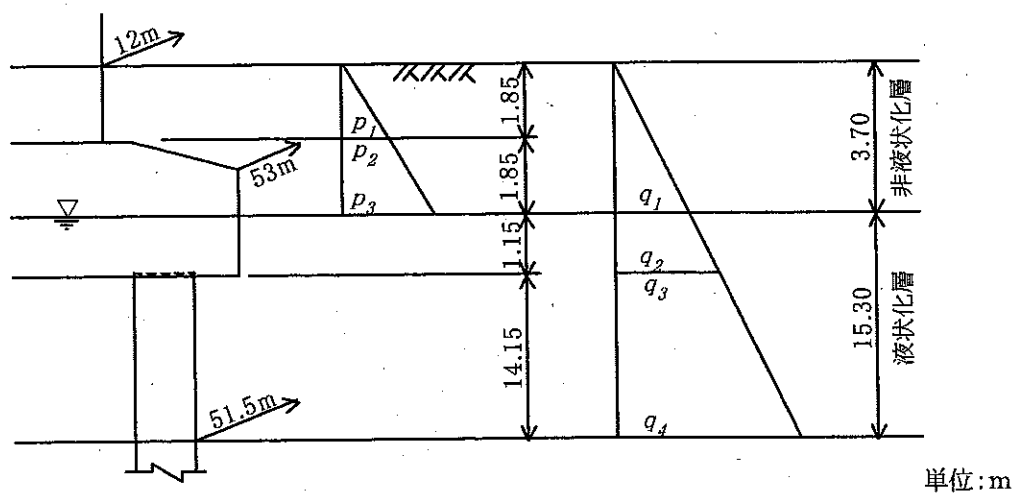


図-3.3 受働土圧及び全上載圧の算出 (A橋脚)

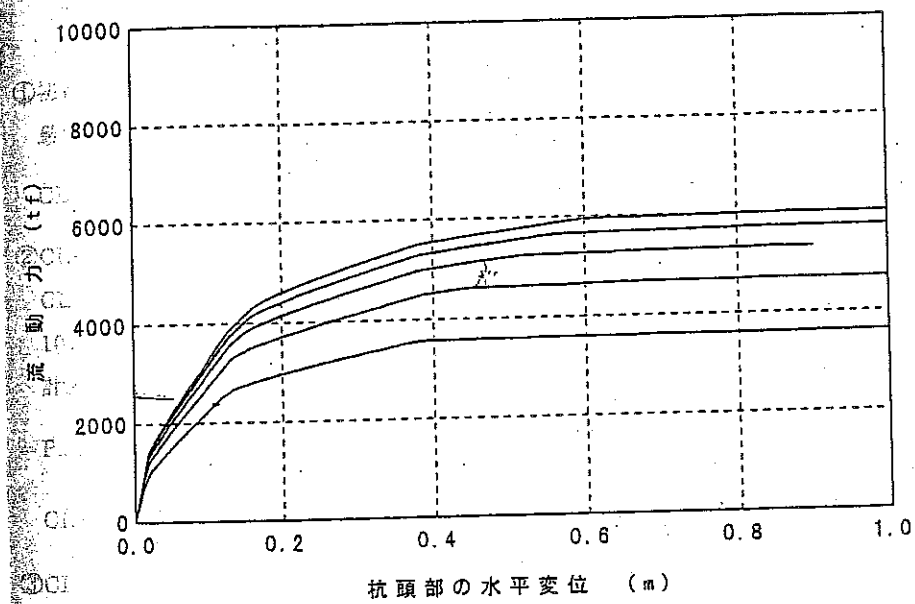


図-3.4 荷重-変位曲線 (A橋脚)

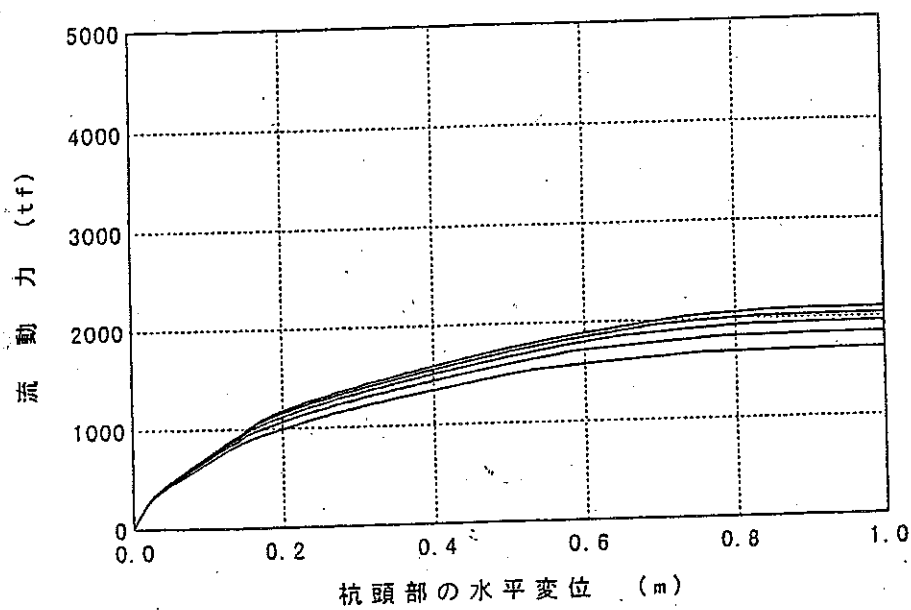


図-3.5 荷重-変位曲線 (B橋脚)

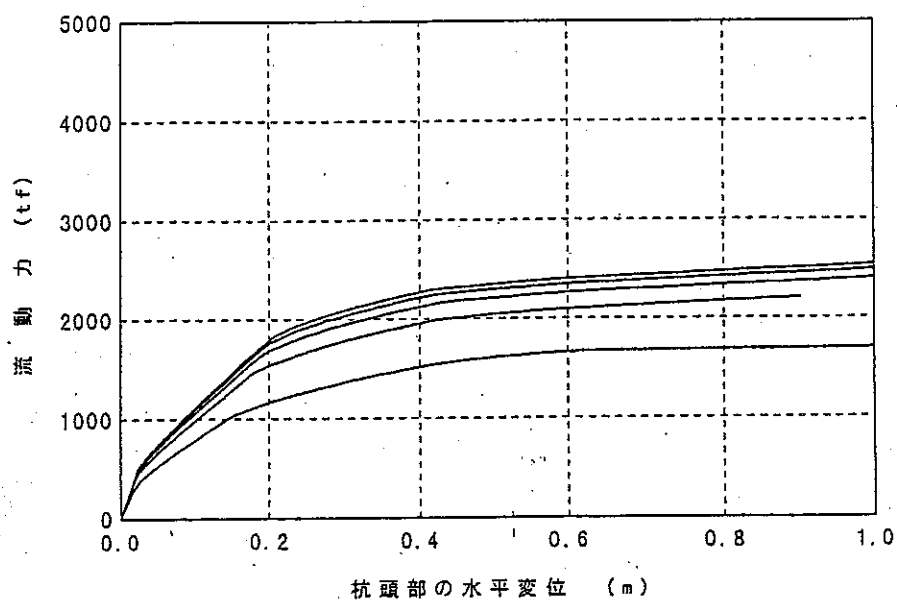


図-3.6 荷重-変位曲線 (C橋脚)

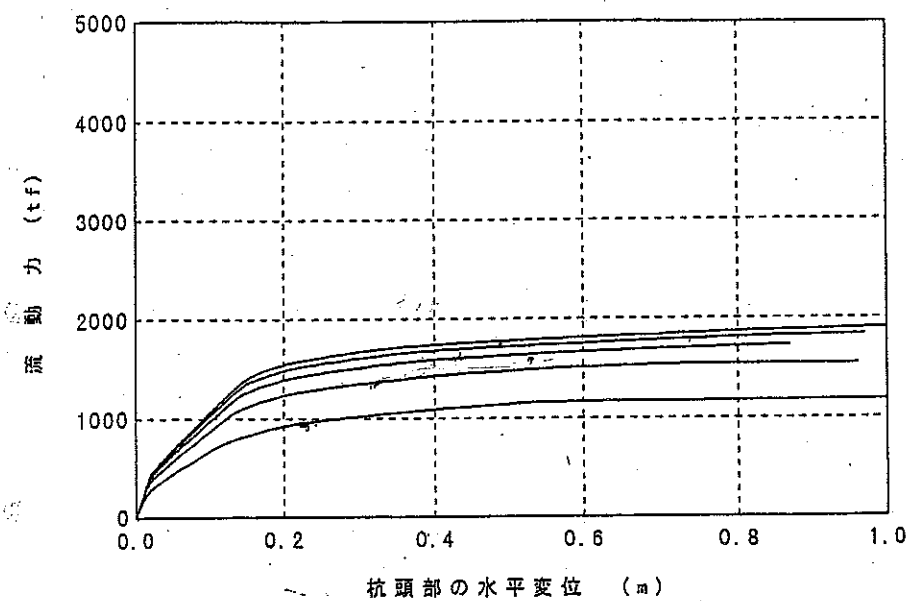


図-3.7 荷重-変位曲線 (D橋脚)

4. まとめ

平成7年兵庫県南部地震では、地盤の流動化により道路橋の基礎に大きな残留水平変位が生じ、これを契機にして、平成8年に改訂された道路橋示方書では、従来からの液状化に関する規定に加えて、流動化に対する耐震設計法が新たに規定された。

本資料では、地盤の流動化により残留水平変位が生じた阪神高速道路5号湾岸線の4基の橋梁基礎を対象として、杭及び地盤について非線形性を考慮したモデル化を行い、残留水平変位と整合するような荷重条件を逆解析により算定した。その結果、地盤の流動化が橋脚基礎に及ぼす影響は、地表面付近の非液状化層中の構造部材には受働土圧相当の力を、また、その下位の液状化層中の構造部材には全上載圧の30%程度の力を作用させることにより評価できることを明らかにした。

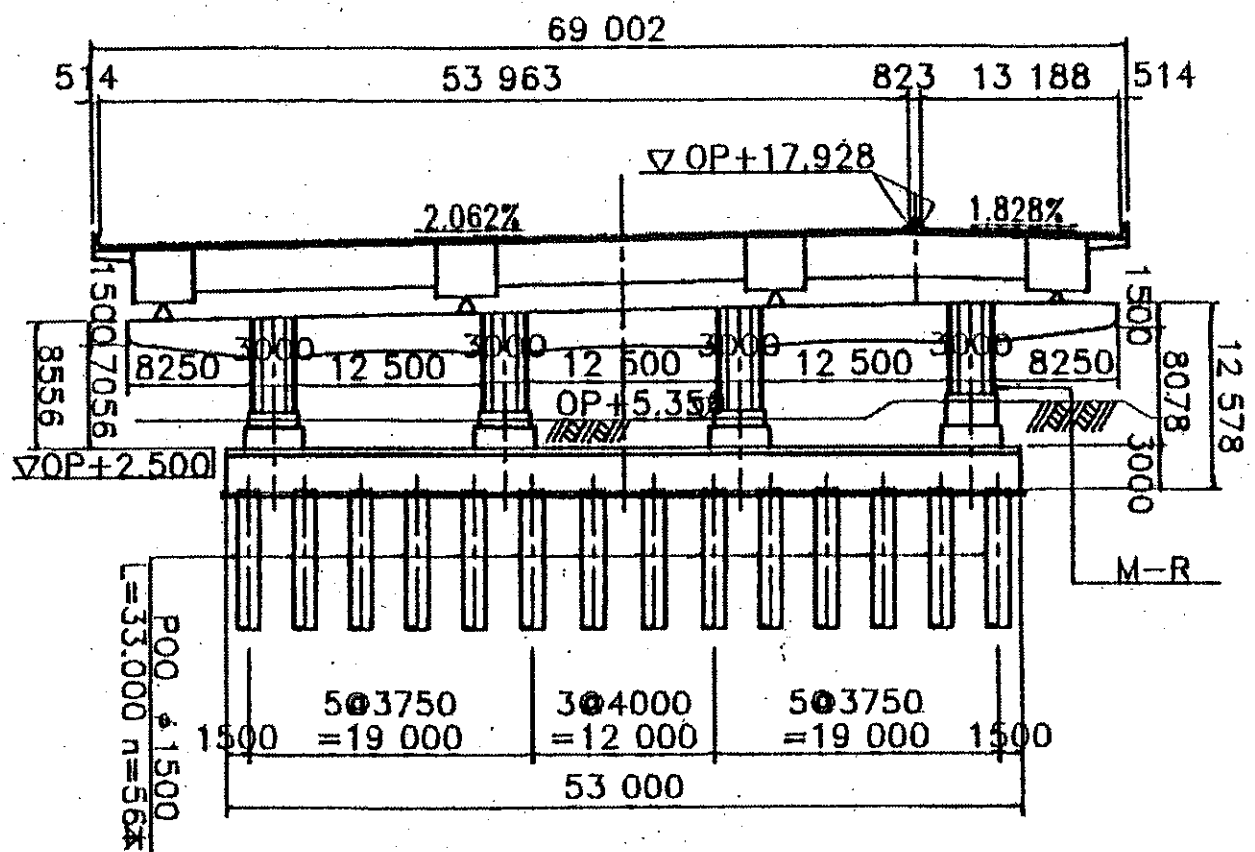
謝 辞

本解析に当たっては、阪神高速道路公団より貴重な資料を提供頂きました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

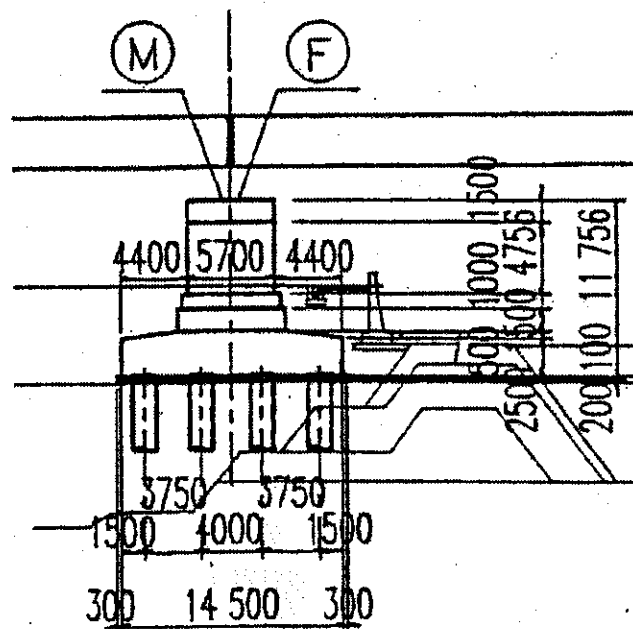
参考文献

- 1) 大塚久哲他：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、第5編、道路橋の被害、土木研究所報告、第196号、1996.3
- 2) 田村敬一、濱田禎、東拓生：流動化に対する耐震設計法、基礎工、第25巻、第3号、1997.3
- 3) Keiichi Tamura, Takuo Azuma and Tadashi Hamada: Seismic Design of Bridge Foundations against Liquefaction-Induced Ground Flow, Proc. of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, January, 2000
- 4) 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る仕様」の準用に関する参考資料（案）、1995.6
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説、1996.12
- 6) 松尾修：液状化の判定法と耐震設計、基礎工、第25巻、第3号、1997.3
- 7) 浜田正則、安田進、磯山龍二、恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、第376号、1986.12
- 8) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1995.12
- 9) Masanori Hamada, Ryoji Itoyama and Kazue Wakamatsu: The 1995 Hyogoken-Nambu (Kobe) Earthquake - Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Association for Development of Earthquake Prediction, August, 1995
- 10) 阪神高速道路公団、阪神高速道路管理技術センター：埋立地盤の橋梁基礎構造物に関する震災調査研究、1996.12
- 11) Keiichi Tamura and Takuo Azuma: Experimental Study of the Effects of Liquefaction-Induced Ground Flow on Bridge Foundation, Proc. of Thirteenth U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop, U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, October 1997
- 12) 濱田政則、若松加寿江：液状化による地盤の水平変位の研究、土木学会論文集、第596号、1998.6
- 13) 東拓生、田村敬一：流動化に伴う地盤変位地盤反力特性に関する検討、第25回地震工学研究発表会、1999.7
- 14) 東拓生、田村敬一：地盤の流動が橋梁基礎に及ぼす影響の解析的検討、土木技術資料、第43巻、第2号、2001.2

付属資料 1 橋脚一般図

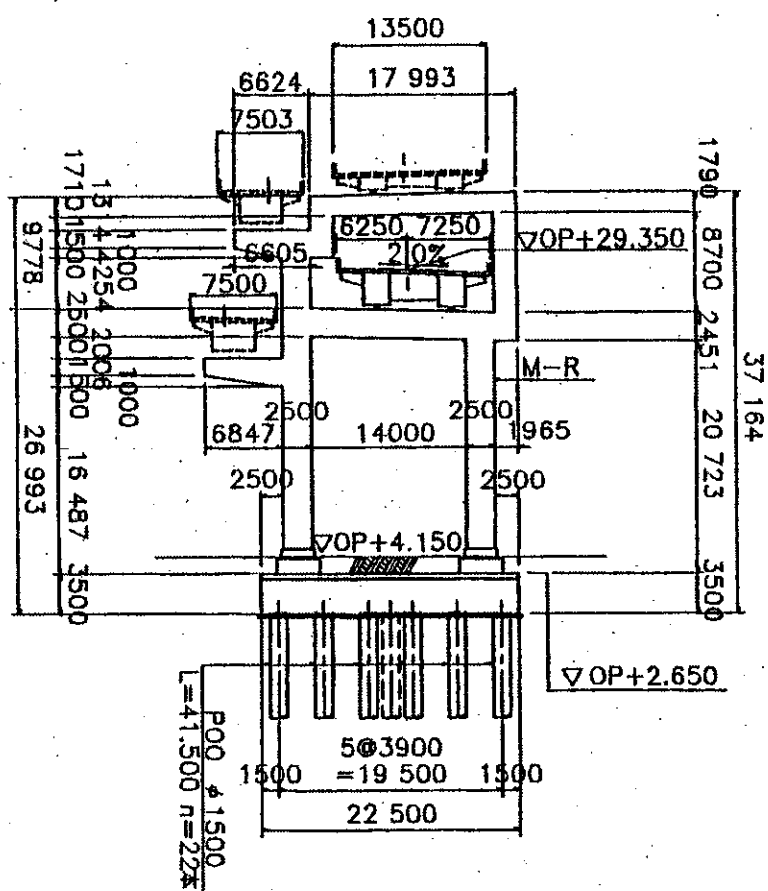


(a) 正面図

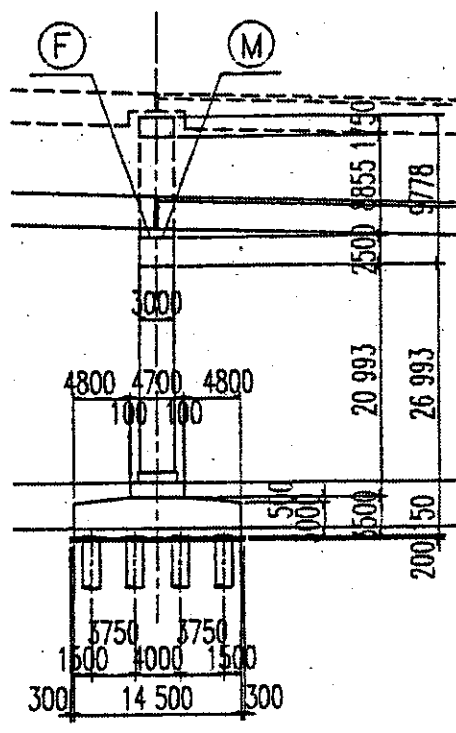


(b) 側面図

付図-1.1 A橋脚



(a) 正面图



(b) 侧面图

付图-1.3 C桥脚

付属資料2 フーチング底面に作用する鉛直力の算出

1. A橋脚

(1) 上部構造死荷重反力及び橋脚重量

設計計算書より両者の和は 5,629tf。橋脚重量については、平均板厚を 30mm と仮定し、ラーメン軸線の延長に単位長さ当たりの想定重量を乗じて、302tf と算出した。

(2) フーチング重量

$$A = 1/2 \times (5.5 + 14.5) \times 0.5 + 14.5 \times 2.5 = 41.25 [\text{m}^2]$$

$$V_1 = 41.25 \times 53.0 = 2,186 [\text{m}^3]$$

$$W_1 = 2,186 \times 2.5 = 5,465 [\text{tf}]$$

(3) 上載土砂重量

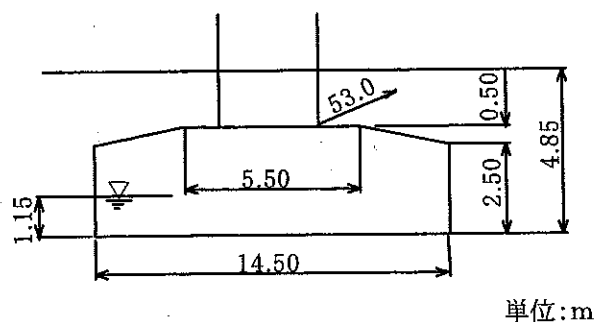
$$V_0 = 14.5 \times 53.0 \times 4.85 = 3,727 [\text{m}^3]$$

$$V_2 = V_0 - V_1 = 1,541 [\text{m}^3]$$

$$W_2 = 1,541 \times 1.7 = 2,620 [\text{tf}]$$

(4) 浮力

$$F = 14.5 \times 53.0 \times 1.15 \times (-1.0 \text{tf/m}^3) = -884 [\text{tf}]$$



2. B橋脚

(1) 上部構造死荷重反力及び橋脚重量

設計計算書より両者の和は 2,114tf。橋脚重量については、平均板厚を 30mm と仮定し、ラーメン軸線の延長に単位長さ当たりの想定重量を乗じて、245tf と算出した。

(2) フーチング重量

$$A = 1/2 \times (5.4 + 10.5) \times 0.5 + 10.5 \times 2.5 = 30.23 [\text{m}^2]$$

$$V_1 = 30.23 \times 22.0 = 665 [\text{m}^3]$$

$$W_1 = 665 \times 2.5 = 1,663 [\text{tf}]$$

(3) 上載土砂重量

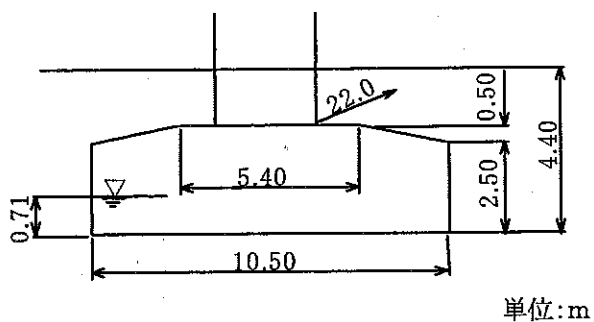
$$V_0 = 10.5 \times 22.0 \times 4.4 = 1,016 [\text{m}^3]$$

$$V_2 = V_0 - V_1 = 351 [\text{m}^3]$$

$$W_2 = 351 \times 1.7 = 597 [\text{tf}]$$

(4) 浮力

$$F = 10.5 \times 22.0 \times 0.71 \times (-1.0 \text{tf/m}^3) = -164 [\text{tf}]$$



3. C橋脚

(1) 上部構造死荷重反力及び橋脚重量

設計計算書が確認できなかったため、一般図の記載内容（支間長、支承条件、橋梁横断面等）から構造条件を推定の上、上部構造死荷重反力は 3,160tf と算出した。橋脚重量については、平均板厚を 30mm と仮定し、ラーメン軸線の延長に単位長さ当たりの想定重量を乗じて、300tf と算出した。

(2) フーチング重量

$$A = 1/2 \times (4.9 + 14.5) \times 0.5 + 14.5 \times 3.0 = 48.35 [\text{m}^2]$$

$$V_1 = 48.35 \times 22.5 = 1,088 [\text{m}^3]$$

$$W_1 = 1,088 \times 2.5 = 2,720 [\text{tf}]$$

(3) 上載土砂重量

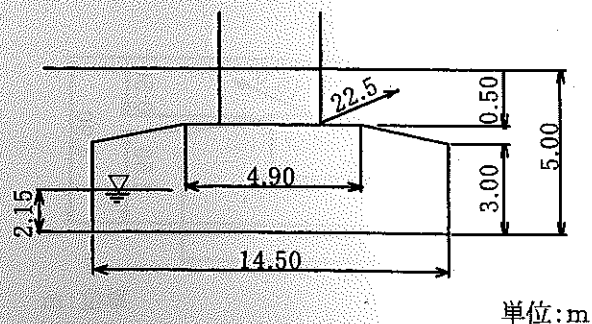
$$V_0 = 14.5 \times 22.5 \times 5.0 = 1,631 [\text{m}^3]$$

$$V_2 = V_0 - V_1 = 543 [\text{m}^3]$$

$$W_2 = 543 \times 1.7 = 923 [\text{tf}]$$

(4) 浮力

$$F = 14.5 \times 22.5 \times 2.15 \times (-1.0 \text{tf/m}^3) = -701 [\text{tf}]$$



4. D橋脚

(1) 上部構造死荷重反力及び橋脚重量

設計計算書が確認できなかったため、一般図の記載内容（支間長、支承条件、橋梁横断面等）から構造条件を推定の上、上部構造死荷重反力は 1,500tf と算出した。橋脚重量については、平均板厚を 30mm と仮定し、ラーメン軸線の延長に単位長さ当たりの想定重量を乗じて、280tf と算出した。

(2) フーチング重量

$$A = 1/2 \times (4.4 + 9.5) \times 0.5 + 9.5 \times 2.5 = 27.23 [\text{m}^2]$$

$$V_1 = 27.23 \times 18.0 = 490 [\text{m}^3]$$

$$W_1 = 490 \times 2.5 = 1,225 [\text{tf}]$$

(3) 上載土砂重量

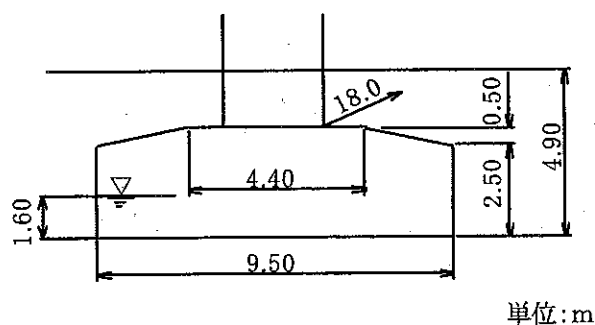
$$V_0 = 9.5 \times 18.0 \times 4.9 = 838 [\text{m}^3]$$

$$V_2 = V_0 - V_1 = 348 [\text{m}^3]$$

$$W_2 = 348 \times 1.7 = 592 [\text{tf}]$$

(4) 浮力

$$F = 9.5 \times 18.0 \times 1.6 \times (-1.0 \text{tf/m}^3) = -274 [\text{tf}]$$



付属資料 3 受働土圧及び全上載圧相当の力の算出

1. A橋脚

(1) 単位長さ当たりの受働土圧

$$p = K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

K_p : 受働土圧係数 (=4.14)

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$p_1 = 4.14 \times 1.7 \times 1.85 \times 12.0 = 156.2 \text{ [tf/m]}$$

$$p_2 = 4.14 \times 1.7 \times 1.85 \times 53.0 = 690.1 \text{ [tf/m]}$$

$$p_3 = 4.14 \times 1.7 \times 3.7 \times 53.0 = 1,380.2 \text{ [tf/m]}$$

(2) 非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧相当の力

$$P_{NL} = 1/2 \times 156.2 \times 1.85 + 1/2 \times (690.1 + 1,380.2) \times 1.85 = 2,060 \text{ [tf]}$$

(3) 単位長さ当たりの全上載圧

$$q = \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$q_1 = 1.7 \times 3.70 \times 53.0 = 333.4 \text{ [tf/m]}$$

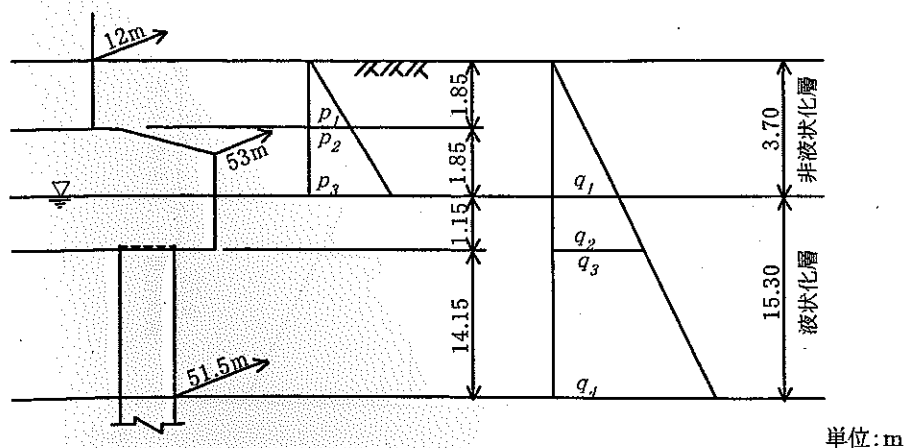
$$q_2 = 333.4 + 1.8 \times 1.15 \times 53.0 = 443.1 \text{ [tf/m]}$$

$$q_3 = 323.9 + 1.8 \times 1.15 \times 51.5 = 430.5 \text{ [tf/m]}$$

$$q_4 = 323.9 + 1.8 \times 15.3 \times 51.5 = 1,742.2 \text{ [tf/m]}$$

(4) 液状化層中の構造部材に作用する全上載圧相当の力

$$P_L = 1/2 \times (333.4 + 443.1) \times 1.15 + 1/2 \times (430.5 + 1,742.2) \times 14.15 = 15,818 \text{ [tf]}$$



2. B橋脚

(1) 単位長さ当たりの受働土圧

$$p = K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

K_p : 受働土圧係数 (=4.14)

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$p_1 = 4.14 \times 1.7 \times 1.4 \times 6.0 = 59.1 \text{ [tf/m]}$$

$$p_2 = 4.14 \times 1.7 \times 1.4 \times 22.0 = 216.8 \text{ [tf/m]}$$

$$p_3 = 4.14 \times 1.7 \times 3.6 \times 22.0 = 557.4 \text{ [tf/m]}$$

(2) 非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧相当の力

$$P_{NL} = 1/2 \times 59.1 \times 1.4 + 1/2 \times (216.8 + 557.4) \times 2.20 = 893 \text{ [tf]}$$

(3) 単位長さ当たりの全上載圧

$$q = \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$q_1 = 1.7 \times 3.6 \times 22.0 = 134.6 \text{ [tf/m]}$$

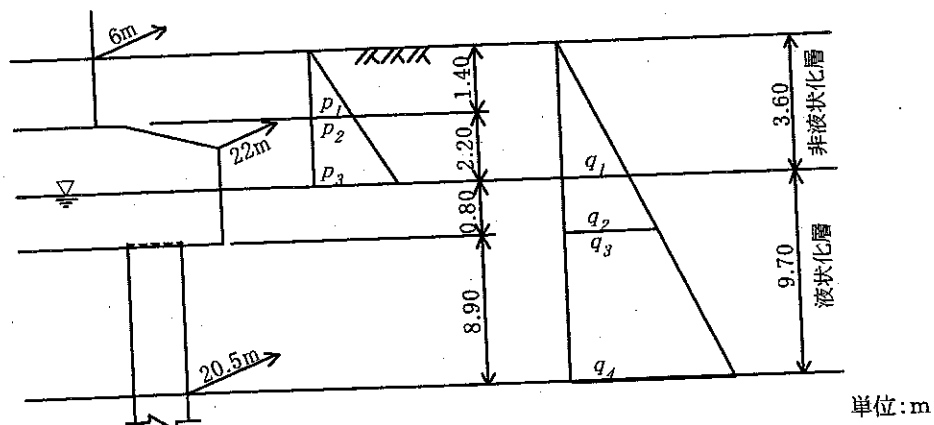
$$q_2 = 134.6 + 1.8 \times 0.8 \times 22.0 = 166.3 \text{ [tf/m]}$$

$$q_3 = 125.5 + 1.8 \times 0.8 \times 20.5 = 155.0 \text{ [tf/m]}$$

$$q_4 = 125.5 + 1.8 \times 9.7 \times 20.5 = 483.4 \text{ [tf/m]}$$

(4) 液状化層中の構造部材に作用する全上載圧相当の力

$$P_L = 1/2 \times (134.6 + 166.3) \times 0.8 + 1/2 \times (155.0 + 483.4) \times 8.9 = 2,961 \text{ [tf]}$$



3. C橋脚

(1) 単位長さ当たりの受働土圧

$$p = K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

K_p : 受働土圧係数 (=4.14)

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$p_1 = 4.14 \times 1.7 \times 1.5 \times 5.0 = 52.8 \text{ [tf/m]}$$

$$p_2 = 4.14 \times 1.7 \times 1.5 \times 22.5 = 237.5 \text{ [tf/m]}$$

$$p_3 = 4.14 \times 1.7 \times 2.85 \times 22.5 = 451.3 \text{ [tf/m]}$$

(2) 非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧相当の力

$$P_{NL} = 1/2 \times 52.8 \times 1.5 + 1/2 \times (237.5 + 451.3) \times 1.35 = 505 \text{ [tf]}$$

(3) 単位長さ当たりの全上載圧

$$q = \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$q_1 = 1.7 \times 2.85 \times 22.5 = 109.0 \text{ [tf/m]}$$

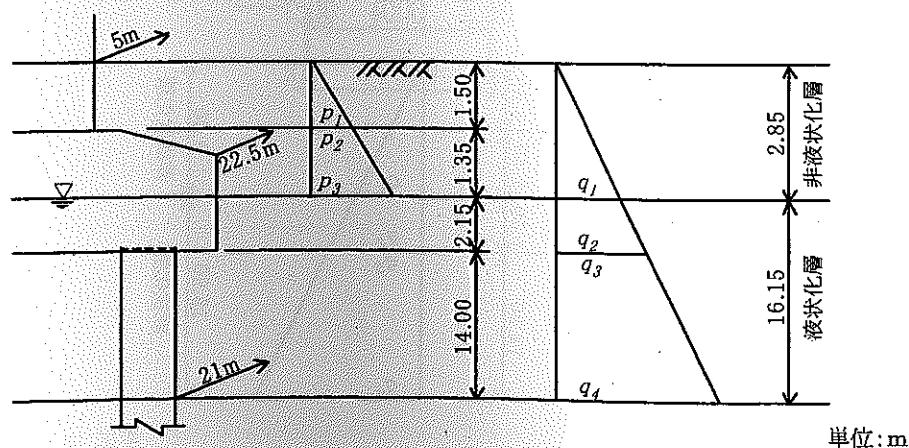
$$q_2 = 109.0 + 1.8 \times 2.15 \times 22.5 = 196.1 \text{ [tf/m]}$$

$$q_3 = 101.7 + 1.8 \times 2.15 \times 21.0 = 183.0 \text{ [tf/m]}$$

$$q_4 = 101.7 + 1.8 \times 16.15 \times 21.0 = 712.2 \text{ [tf/m]}$$

(4) 液状化層中の構造部材に作用する全上載圧相当の力

$$P_L = 1/2 \times (109.0 + 196.1) \times 2.15 + 1/2 \times (183.0 + 712.2) \times 14.0 = 6,594 \text{ [tf]}$$



4. D橋脚

(1) 単位長さ当たりの受働土圧

$$p = K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

K_p : 受働土圧係数 (=4.14)

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$p_1 = 4.14 \times 1.7 \times 1.9 \times 5.0 = 66.9[\text{tf/m}]$$

$$p_2 = 4.14 \times 1.7 \times 1.9 \times 18.0 = 240.7[\text{tf/m}]$$

$$p_3 = 4.14 \times 1.7 \times 3.3 \times 18.0 = 418.1[\text{tf/m}]$$

(2) 非液状化層中の構造部材に作用する受働土圧相当の力

$$P_{NL} = 1/2 \times 66.9 \times 1.9 + 1/2 \times (240.7 + 418.1) \times 1.4 = 525[\text{tf}]$$

(3) 単位長さ当たりの全上載圧

$$q = \gamma \cdot z \cdot B$$

ここに、

γ : 土の単位体積重量 (=1.7[tf/m³])

z : 深さ[m]

B : 基礎幅[m]

$$q_1 = 1.7 \times 3.3 \times 18.0 = 101.0[\text{tf/m}]$$

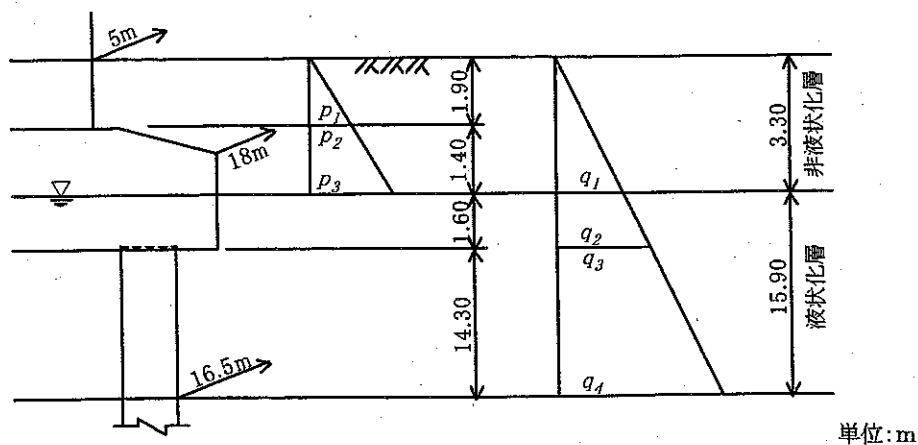
$$q_2 = 101.0 + 1.8 \times 1.6 \times 18.0 = 152.8[\text{tf/m}]$$

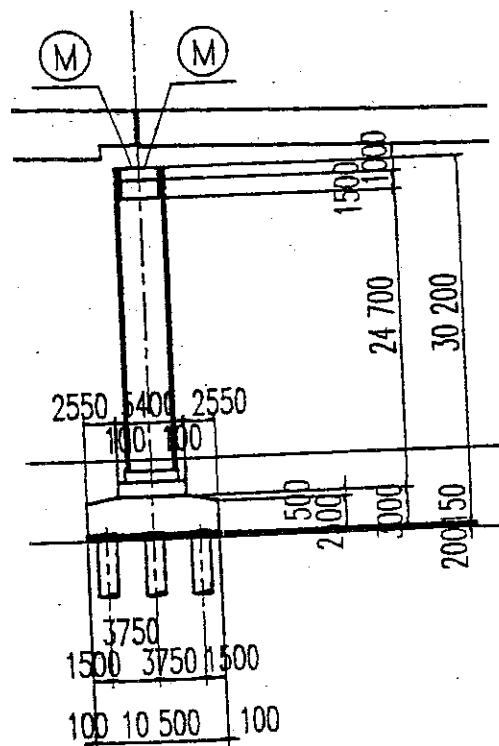
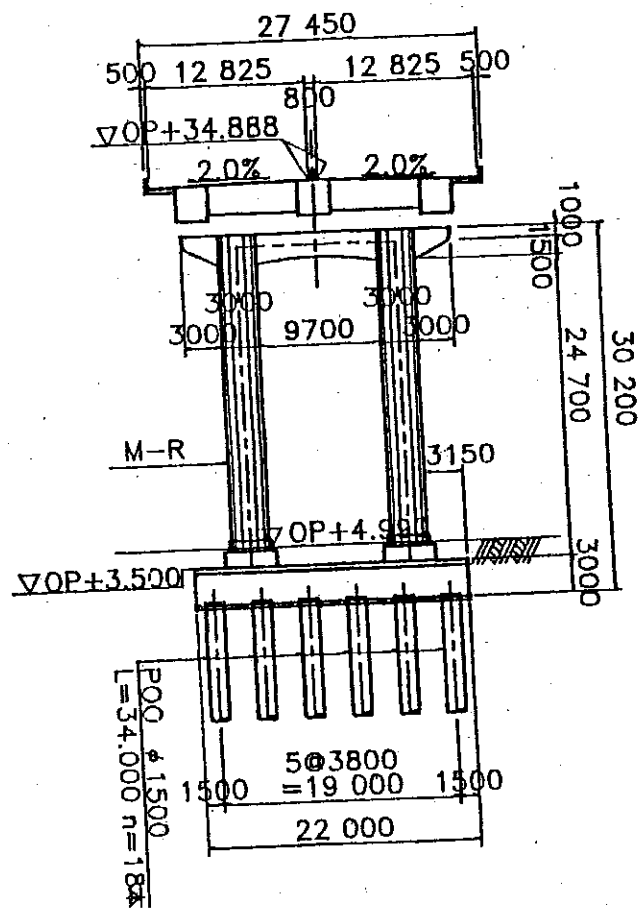
$$q_3 = 92.6 + 1.8 \times 1.6 \times 16.5 = 140.1[\text{tf/m}]$$

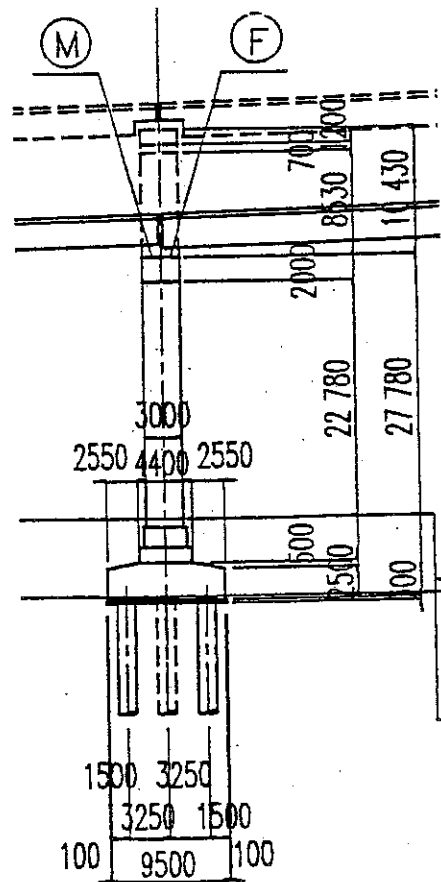
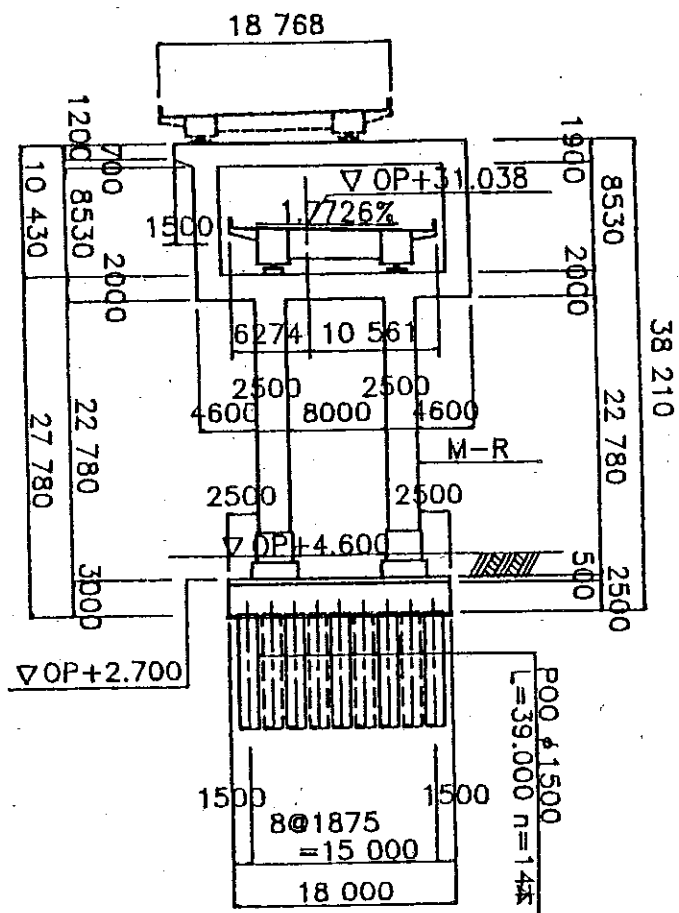
$$q_4 = 92.6 + 1.8 \times 15.9 \times 16.5 = 564.8[\text{tf/m}]$$

(4) 液状化層中の構造部材に作用する全上載圧相当の力

$$P_L = 1/2 \times (101.0 + 152.8) \times 1.6 + 1/2 \times (140.1 + 564.8) \times 14.3 = 5,243[\text{tf}]$$







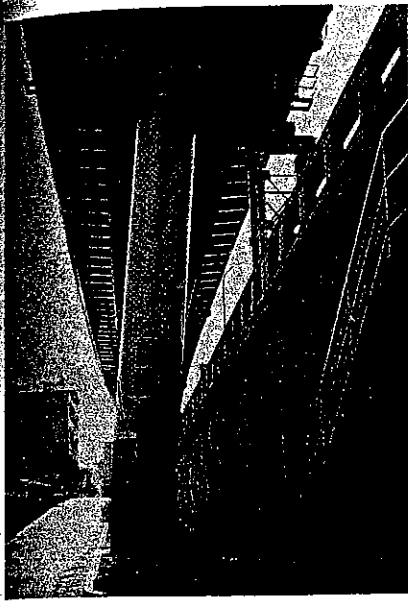


写真-5・47 神585橋脚の損傷と橋脚の傾斜 (中詰めコンクリートの直上で鋼板が座屈している)

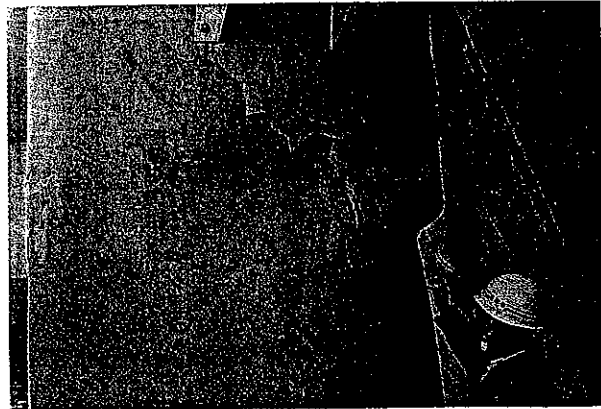


写真-5・48 神585橋脚の座屈状況

図-5・10 阪神高速道路5号湾岸線 西宮港大橋

本橋は阪神高速道路湾岸線の本線であり、甲子園浜と西宮浜を結んでいる。主径間の上部構造はニールセコーゼ桁、大阪側の橋脚は鋼ラーメン橋脚となっている。その大阪側の側径間の単純合成桁が落下した。本橋の概要、被災状況および被災メカニズムについては、4.6を参照のこと。

2.3.11 新夙川橋

(1) 橋梁の概要

新夙川橋は、阪神高速道路5号湾岸線の一部として、西宮浜と芦屋浜との間の夙川航路を跨ぐ橋として平成5年に完成した。一般図を図-5・12に示す。

上部構造は、平成2年の道路橋示方書により設計された3径間鋼床版ゲルバー箱桁橋で、橋長は310mである。芦屋浜側(西側)の橋脚海P-134付近上に料金所があるため、幅員は28mから69mまで変化している。支点条件は、埋め立て地にある端支点が可動、航路内の中間支点が固定である。

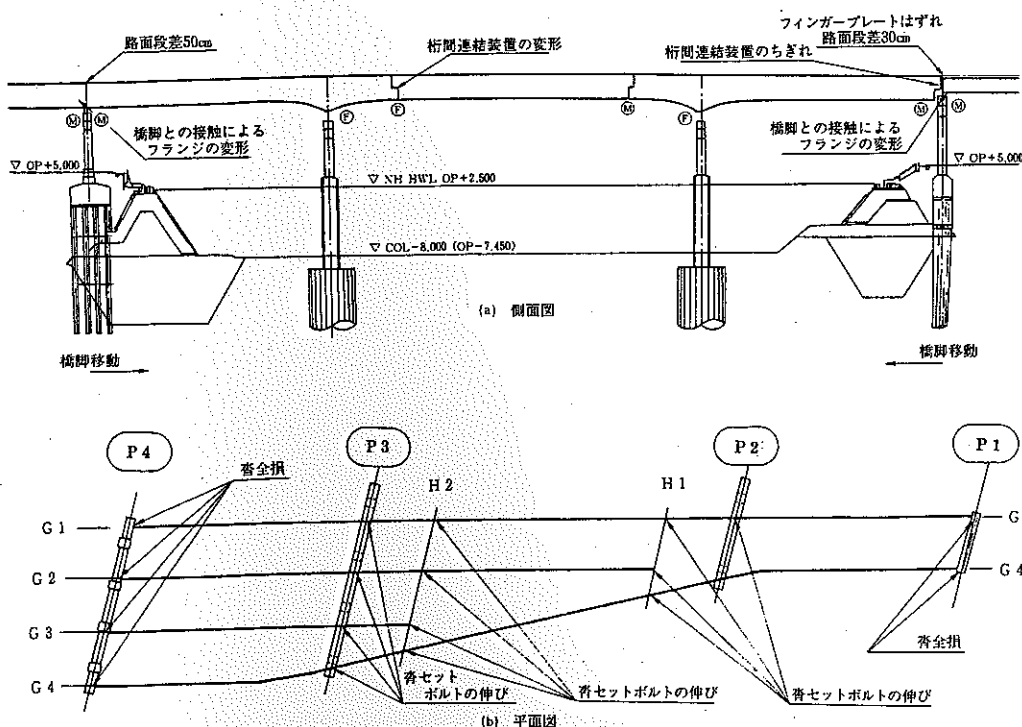


図-5・12 新夙川橋の被災状況 (単位: mm)