

阪神高速道路 5 号湾岸線の基礎の復旧工事

阪神高速道路公団 正会員 渡辺尚夫
 阪神高速道路公団 正会員 石崎 浩
 阪神高速道路公団 北川隆司

1. はじめに

阪神高速道路 5 号湾岸線については、兵庫県南部地震により西宮港大橋側径間の落橋・東神戸大橋の支承の損傷・六甲アイランド大橋の桁のズレ等、上部工が被災したが、橋脚基礎をボアホールカメラ等により詳細に調査したところ、基礎杭部分にも損傷が認められたため、被災の程度により損傷ランクを分類し、交通開放後に各ランクに応じた基礎の本復旧工事を実施した。工法としては、基礎の補強を目的として杭を増し打ちし既設フーチングと一体化する“増杭基礎”、基礎の耐震性能の向上のため高圧噴射攪拌工法により基礎周囲に固結体を造成する“地盤改良”及び、杭鉄筋の耐久性を確保する目的で杭のクラックにエポキシ樹脂を注入する“杭頭注入”を組み合わせる施工した。

本稿は、主にこの復旧工事の施工について報告するものである。

2. 基礎の復旧方針

橋脚基礎の復旧にあたっては、各基礎についてボアホールカメラ等で調査した結果と残留変位により損傷ランクを分類し、復旧対象基礎及び工法を決定した。ボアホールカメラ等での調査結果による代表的な損傷パターンとしては、図-1に示すとおり、埋立土層（F1）及び沖積粘土層（Ac）内で杭の全般にクラックが発生しているもの、杭頭部及び埋立

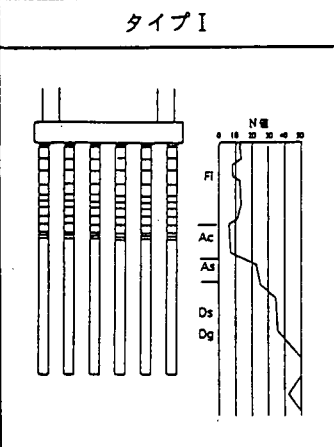
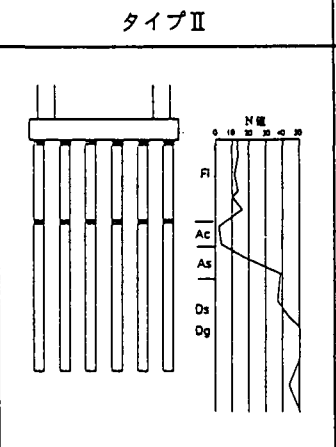
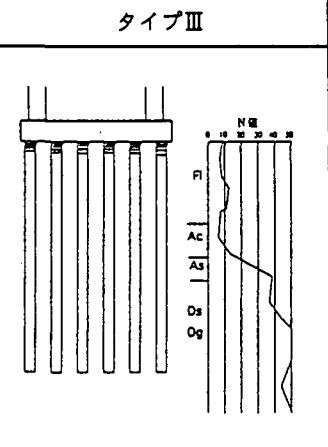
タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ
		
損傷位置： 埋立土層の内部及びAc層の内部 復旧工法：増杭基礎+杭頭注入	損傷位置： 杭頭部及び液状化層と非液状化層の境目または比較的厚手の薄いAc層の内部 復旧工法：地盤改良+杭頭注入	損傷位置：杭頭部 復旧工法：杭頭注入

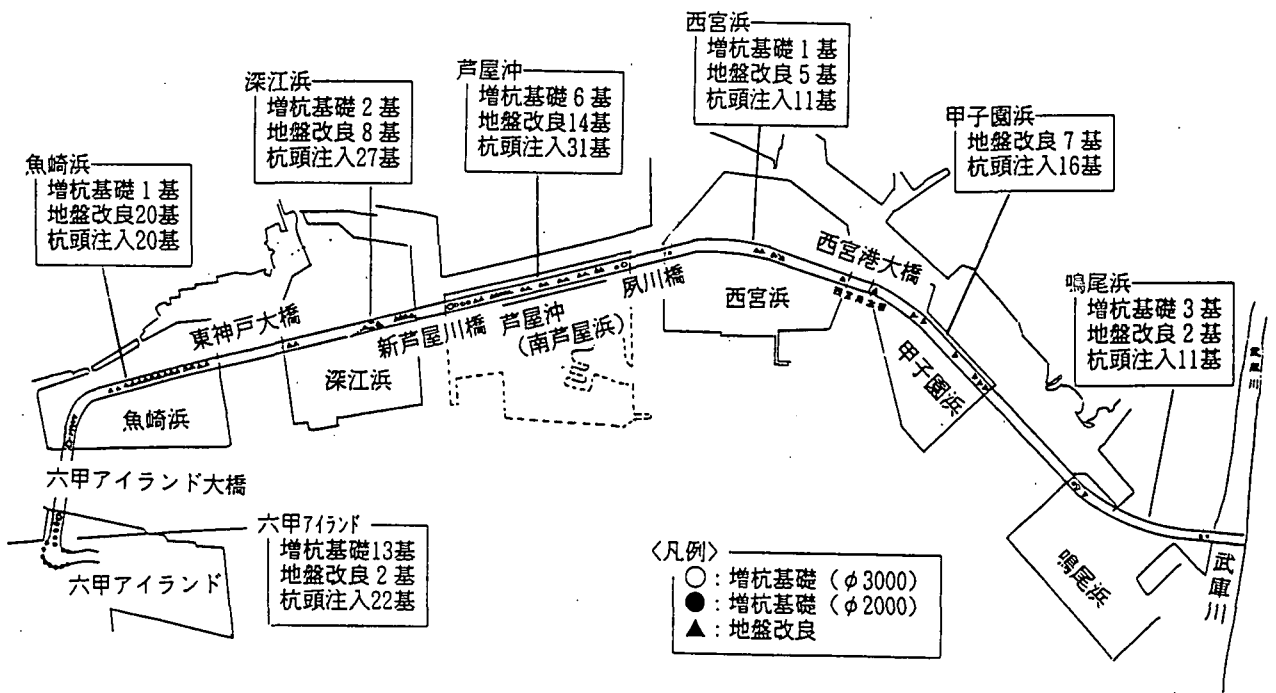
図-1 代表的な損傷パターン

土層と沖積粘土層の境界付近で杭にクラックが発生しているもの、並びに杭頭部にのみクラックが発生しているものの3タイプに分類された。また、残留変位は主に埋立地の水際線に近い橋脚に見受けられた。これらを踏まえて決定した復旧対象基礎の位置を示したのが図-2である。

増杭基礎については、比較的若材齢の埋立地である芦屋沖の水際線に近い橋脚及び六甲アイランド大橋の支点橋脚の4橋脚が杭径φ3000の増杭基礎であり、鳴尾浜・西宮浜の水際線に近い橋脚、深江浜の内陸部で

キーワード：震災復旧、増杭基礎、地盤改良、杭クラック補修

〒658 神戸市東灘区魚崎南町5-5-44 TEL078-412-0305 FAX078-412-0306



支承形式が可動支承であったことから比較的小さいフーチングとなっていた橋脚及び六甲アイランド内の橋脚全般がφ2000（ランプはφ1500）の増杭基礎となっている。

基礎形式が場所打ちRC杭以外のものについては、西宮港大橋のケーソン基礎及び魚崎浜連続地中壁基礎部で地盤改良を採用した。杭頭注入については、各基礎杭の損傷状況により注入長も含めて決定したが、本線杭基礎の約86%が対象となった。

3. 増杭基礎の施工

増杭基礎工は、既設基礎の周囲に杭を新設し、既設基礎と一体化することにより基礎の剛性の増加を図り、地盤流動に対して補強する工法である。増杭基礎工の概念図を図

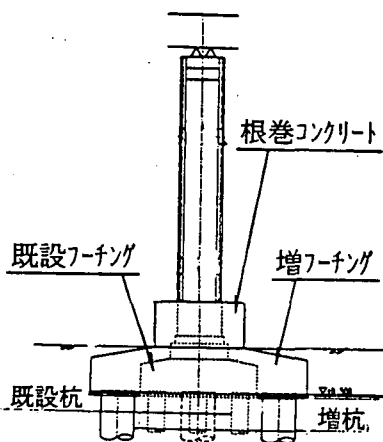
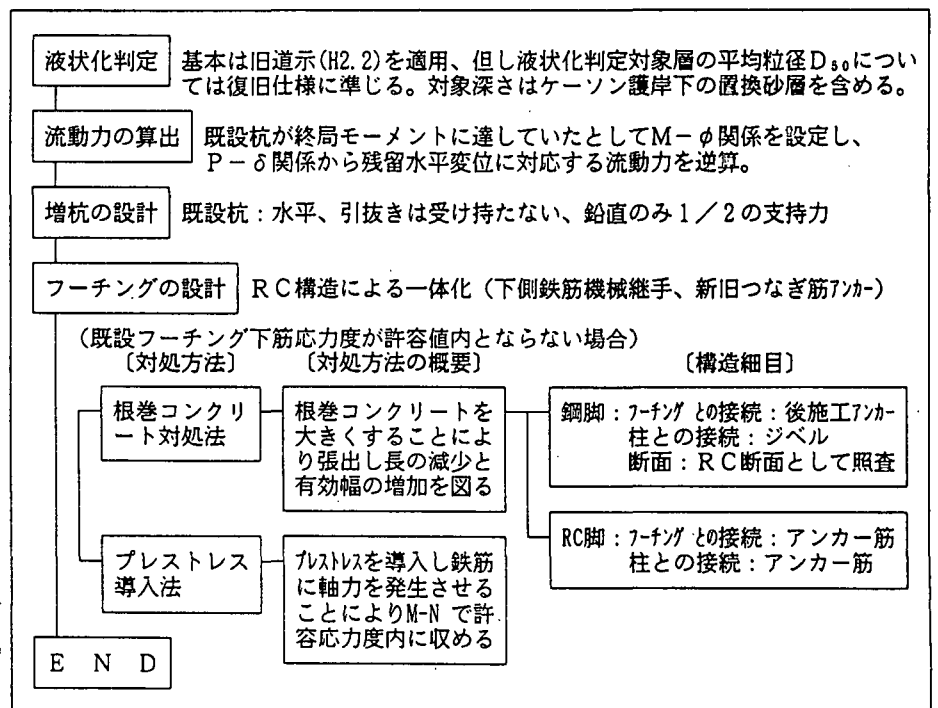


図-3 増杭基礎工概念図

表-1 増杭基礎設計の概略フロー



- 3に示す。

増杭基礎工の設計の概略フローは表-1のとおりであるが、今回は基礎の損傷状況を考慮して、流動力と基礎の水平変位の関係を非線形解析により求め、実際に発生した残留移動量に相当する流動力を逆算し、増杭の設計を行った。

増杭の標準的な施工フローは図-4のとおりである。本稿では、特に今回特殊であった工種について紹介する。

3-1 増杭の施工

増杭については2m~3m径の場所打杭を増設したが、3m径の場所打杭については施工例が少ないことから、施工にあたって以下の点に配慮した。

- ・ケーシング引抜きを確実にを行うための全回転掘削機の回転トルク管理
- ・鉄筋籠建込みに長時間(約2日)を要することに対する2次スライム処理の実施(ポンプ循環方式)
- ・鉄筋籠重量の増大(最大約70t)に対する座屈防止用補強リング(図-5)

全回転掘削機のトルク管理については、機械性能からは掘削時の動摩擦力が0.5t/m²、掘削完了後の静摩擦力が0.65t/m²以上になると引抜きが困難になるが、試験施工の結果、掘削時にはフリクションカットを十分に行い、0.3t/m²に動摩擦力を抑えるように制御し、掘削完了後は半日毎にケーシングを回転させて周面摩擦力を軽減させるように施工した。3m径の場所打杭の施工サイクルは概ね1週間であった。

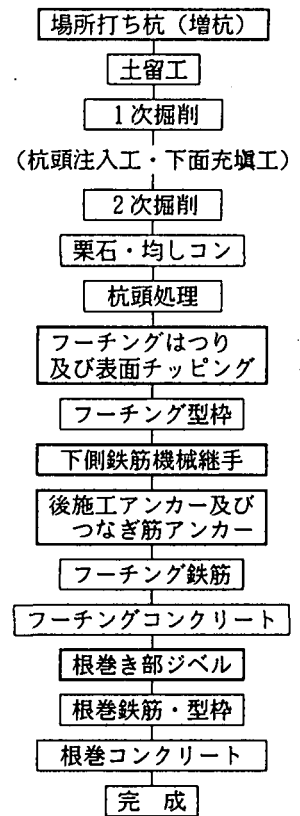
3-2 増杭と既設フーチングの一体化

増杭と既設フーチングとの連結についても一体化するよう以下のような配慮を行った。

- ・新旧フーチング下側鉄筋の接合
- ・新旧コンクリートつなぎ筋アンカーの施工

フーチング下側鉄筋の接合については、図-6に示すように、既設フーチングを既設杭前面まではつり、鉄筋を露出させて切断し、新設鉄筋と機械継手により接続させる方法を基本としたが、継手方法については、新設杭鉄筋との干渉もあるため、比較的接続時の自由度があるエンクローズ溶接継手も適宜採用した。継手位置については、鉄筋継手指針にある25D以上のずらしは不可能であったため、許容応力を低減してチェックした上で、できるだけ離すことを原則として概ね10D程度の継手離隔を確保した。

新旧コンクリートつなぎ筋アンカーについては0.25m²に1ヶ所の割合で、埋込長300の樹脂アンカーをフーチング上面及び側面に施工した。



※太線枠は増杭基礎特有工種

図-4 増杭基礎工施工フロー(鋼製橋脚の場合)

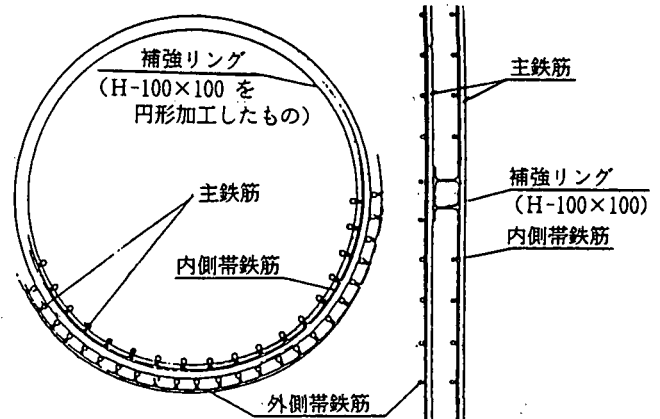


図-5 場所打ち杭鉄筋籠の補強リング

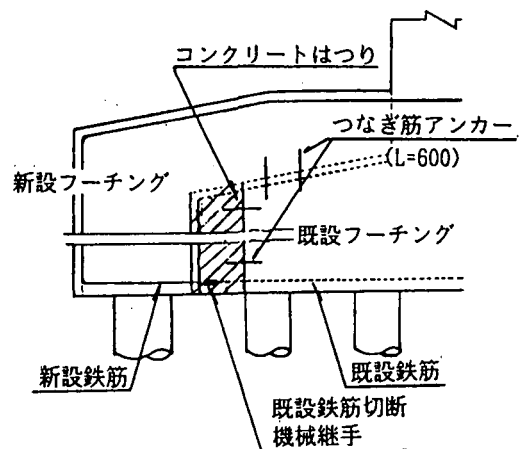


図-6 新旧フーチングの接合

新フーチングコンクリートについては、マスコンクリートとなるためその対策について検討し、リフト分割打設及び湛水養生で対処した。なお、旧コンクリートの上に打設するコンクリートについては、比較的打設厚の薄

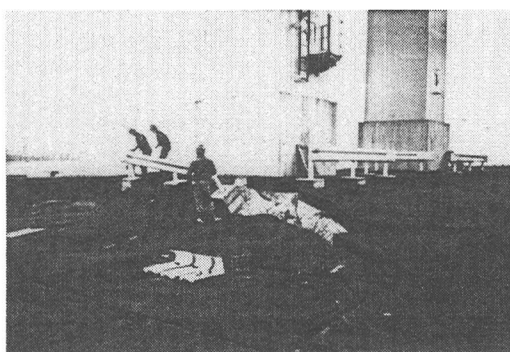


写真-1 着手前

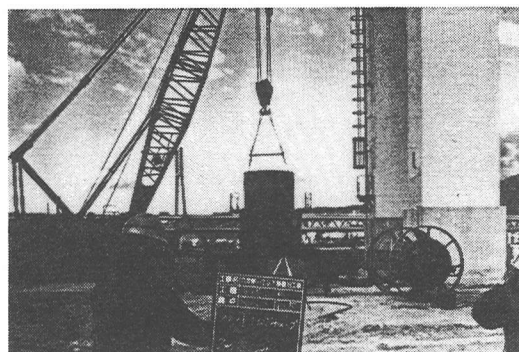


写真-2 増杭施工状況

い場合マスコンクリートの要因よりも旧コンクリートの拘束度の方が卓越して影響するようであり、ひびわれ指数が低くなる傾向が見られた。打設後のクラック調査結果としては、乾燥収縮によるクラックが見受けられる程度

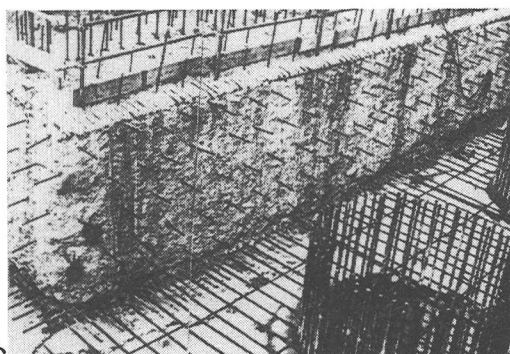


写真-3 既設フーチングはつり完了

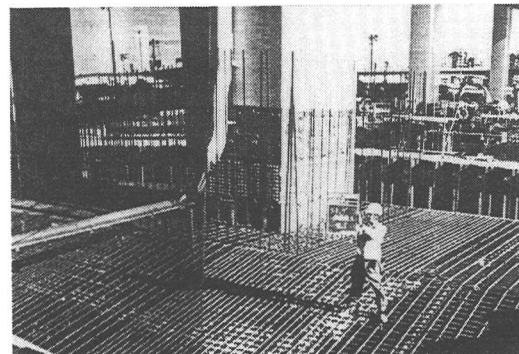


写真-4 配筋状況

であり、今回はかぶりを考慮し 0.4mm以上のクラックを有害と判定して補修し埋戻した。

増杭に伴い既設フーチング下筋がストレスオーバーになるものについては、主に根巻きコンクリートを増大させることにより有効幅の増加を図り対処したが、この場合の応力伝達については、根巻きコンクリートの主筋を既設フーチングに樹脂アンカーさせる後施工アンカーを施工するとともに、鋼製橋脚においてはスタッドジベルを溶接して対応した。

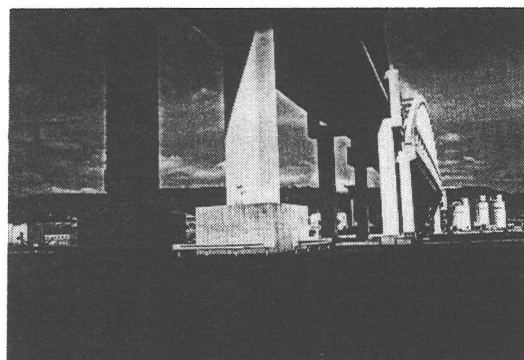


写真-5 復旧完了

今回の増杭基礎の一例として、六甲アイランドにおける施工状況を示したのが写真-1～5である。

3-3 特殊な増杭基礎部

① 芦屋沖東護岸側増杭基礎

本橋脚の増杭については、 $\phi 3000$ の全回転掘削機により掘削した後、 $\phi 2500$ の鋼管を溶接しながら建て込む鋼管合成杭となっている。杭施工にあたっては、当工区は桁下空間が約7mと低いため施工基面の盤下げを行い、さらに全回転掘削機をフーチング基面まで吊り下ろし、写真-6のようなショートブームの100tクレーンを用いることにより対処した。

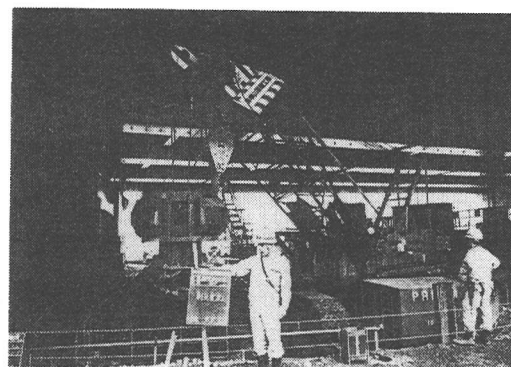


写真-6 桁下制約下での杭施工状況

② 六甲アイランド北護岸側増杭基礎

増杭は $\phi 3000$ RC杭であるが、護岸に近い潮流の影響を

検討した結果、捨石部の流速が40cm/sと想定されることから、コンクリート標準示方書における水中コンクリート施工時の流速限度の目安値5cm/sを大きく超えるため、捨石層に係る鋼矢板を先に打設し潮流を抑えて増杭の施工を行った。

③鳴尾浜東護岸側増杭基礎

杭形式は、杭上部の作用断面力が大きい部分はφ2000の鋼管合成杭、杭下部はφ1800のRC杭という、形式による段落とし方式を採用している。施工法は、φ2000のリップ付き鋼管をケーシングとして所定の深度まで掘削し、さらに鋼管内にφ1800のケーシングを挿入して所定の深度まで掘削した後に鉄筋を建て込み、コンクリートを打設しながらφ1800ケーシングを引抜いて杭を構築した。

④深江浜内陸部増杭基礎

既設フーチング下側鉄筋が少ないためストレスオーバーとなることから、橋軸方向にプレストレスを導入し、フーチングに軸力を作用させることにより耐力を確保する構造となっている。プレストレスの導入力としては、約2700tの軸力が必要であり、PC鋼材SWPR7B(19×φ12.7)を12本配置した。初期緊張力は、本構造をPRC構造と考えて許容引張応力度を $0.7\sigma_{Pu}$ と $0.85\sigma_{Py}$ の小さい方の値で設定し、上記必要導入力にリラクゼーション等の減少量を加味して1本あたり254.4tとした。

4. 地盤改良の施工

基礎の液状化対策としての地盤改良工の工法選定については、現場条件のうち特に桁下空間の制約を受けることを考慮して検討した結果、施工機械が比較的コンパクトな高圧噴射攪拌工法を採用することとした。高圧噴射攪拌工法とは、空気を伴った超高压水を地盤中に回転して噴出させて地盤を切削し、そのスライムを地表に排出させるとともに硬化材を同時充填させ円柱状の固結体を造成する工法である。この工法を用いて図-7に示すように既設基礎周囲に固結体を造成した。なお、改良長については、基本的に沖積粘土層に2m程度貫入することとした。ただし、西宮港大橋のケーソン基礎については、護岸側についてFEM解析を実施し改良範囲を決定した。また、魚崎浜連続地中壁基礎部については、ボアホール調査結果に基づき改良長を決定した。

さらに、本工法での液状化対策工の効果確認のため、過剰間隙水圧の変化をシミュレートした解析モデルによって応答解析を行い、図-8に示すように完

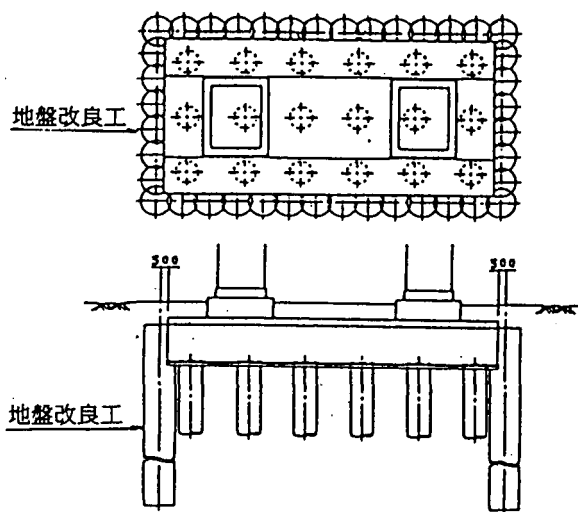


図-7 地盤改良配置図

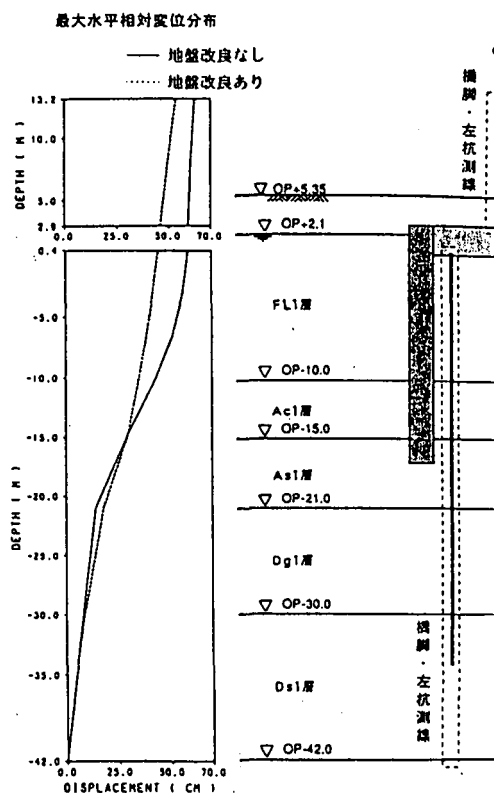


図-8 地盤改良応答解析結果例

全液状化時に杭の相対変位を抑える等の地盤改良の有効性を確認した。

高圧噴射攪拌工法における3重管の回転引上げについては、標準的にはラフタークレーンで吊り上げる方式をとるが、梁下等上空制限のある箇所では、短尺ロッドを使用し、人力により接続及び切り離しを行うことにより、最小で3mの上空制限の箇所で施工を行った。また、地下埋設物と近接する箇所については、ガイド管を設置し、排泥が流出しないように施工した。

造成した固結体については、適宜確認ボーリングを行い採取コアを目視するとともに一軸圧縮強度試験により管理したが、良好な改良状況であった。

なお、地盤改良に伴い多量の汚泥が発生するため、その処理及び処分方法について検討した結果、処理方法については、排泥タンク又はピットにおいて固化させてから搬出処分する現地固化処理方式を採用した。処分地については、非常に多量の汚泥のため、処分地を探索し民間処分場への処分も含めて調整した。

5. 杭頭注入の施工

場所打ちRC杭の杭鉄筋の耐久性を確保するため、クラック部にエポキシ樹脂による注入を行った。

注入材料の選定については、セメント系・樹脂系それぞれについて試験注入を行った結果、樹脂系について充填が確認されたことからエポキシ樹脂を採用することとした。また、注入方法については、一度に多数のクラックを対象として注入すると大きなクラックに重点的に充填され、小さなクラックには充填されない傾向が見られたため、施工時間を考慮して1ステップ50cm～1mのダブルパッカーにより各クラックを注入しながらステップアップする方式とした。

ここで、各杭のどのステップを注入するかについては、すべての杭をクラック調査する必要がある。しかしながら、すべての杭をボアホールカメラで調査することは工費及び工期の面で問題があるため、簡易な方法として、ダブルパッカーで水を圧送し流量・圧力を制御・記録することによりクラック位置及び幅を推定する方法（水押しテストと呼ぶ。）を考えた。

水押しテストの試験施工による (kg/cm²)

圧力Pと流量Qの関係（P-Q曲線）と、ボアホール調査結果におけるクラック幅を図-9に示す。このとき、注入圧力P=10kg/cm²における単位時間当たりの流量（Q₁₀値と表示）とボアホール調査結果のクラック幅との間に相関が見られたことから、各杭の各ステップにおいて水押しテストによりクラック位置を調査し、Q₁₀値を指標としてクラック幅を推定することにより施工時の規定注入量を算定して注入を行うこととした。

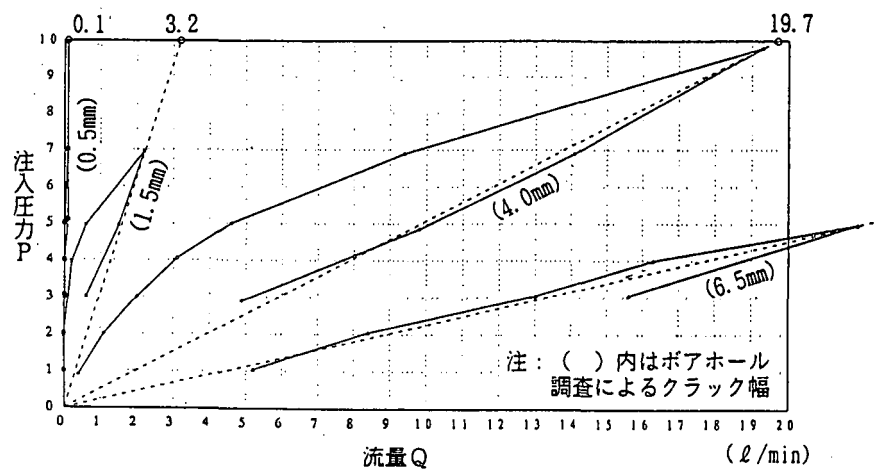


図-9 水押しテストにおける圧力と流量の関係（試験施工時）

なお、クラック幅推定の相関式には誤差を含むことから範囲的な指標に変換することにより施工の簡略化にもつなげるように、水押しテストの結果から推定するクラック幅を5段階に区分し、それぞれの区分において規定注入量及び最大注入圧力を設定して、規定注入量あるいは最大注入圧力に達したら注入を完了させることとした。

試験施工により求めたQ₁₀値とクラック幅の関係及びクラック区分と規定注入量の設定は表-2のとおりである。

表-2 Q₁₀値とクラック幅の関係及びクラック区分と規定注入量の設定

クラック区分	Q ₁₀ 値 (l/min)	平均クラック幅	規定注入量
A	1未満	0.5mm	3,200cc
B	1以上5未満	1.0mm	5,900cc
C	5以上10未満	2.0mm	11,200cc
D	10以上40未満	3.5mm	19,200cc
E	40以上	5.0mm	27,000cc

注) パッカー区間長は50cm、杭径は1.5m

以上を踏まえた杭頭注入の施工手順は図-10のとおりである。

ここで、施工時の水押しテスト結果とボアホール調査結果との対比の一例を図-11に示す。本例では、概ね杭頭から2m範囲、沖積粘土層(Ac)内部及び沖積粘土層と接する埋立土層(F1)並びに沖積砂層(As)との境界付近にクラックが多く見受けら

れる。なお、ボアホール調査結果と比較すると、概ね両者の結果は整合しているが、中にはボアホールでクラックが認められても水押しテストではクラックが見られないという状況があった。これは、ボアホールカメラで視認する箇所にはクラックが発生していても、杭を貫通する所までのクラックではなかったということが考えられる。なお、水押しテストでクラックが認められたステップについて、一部杭頭を露出させ目視確認したが、杭外周でも水押しテスト結果と整合してクラックを確認した。

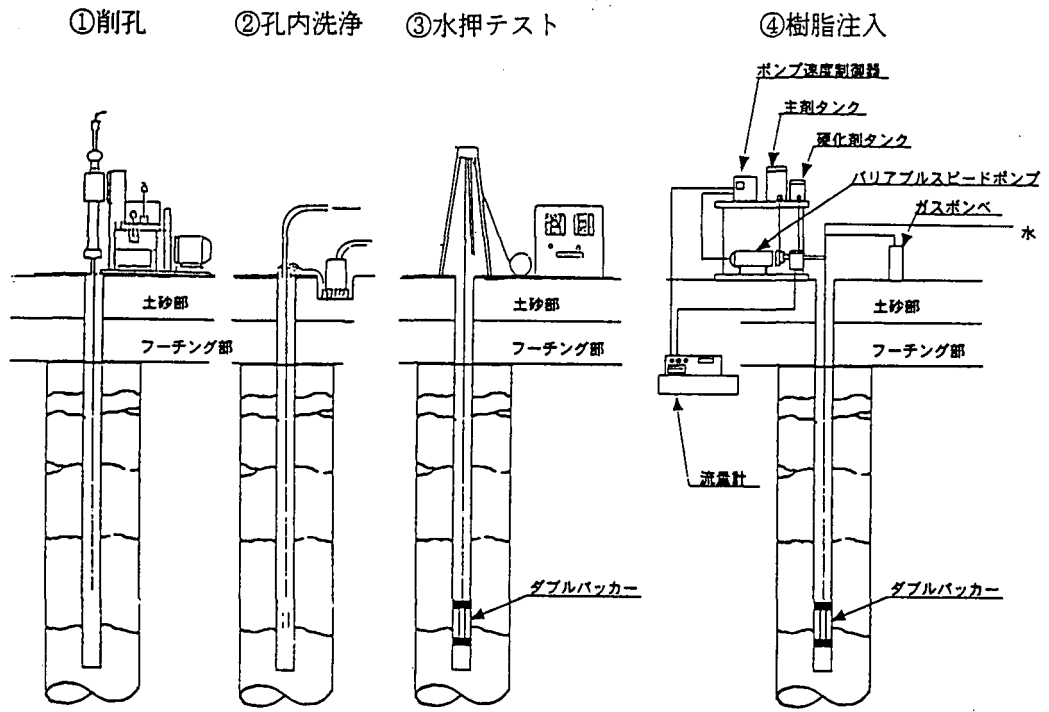
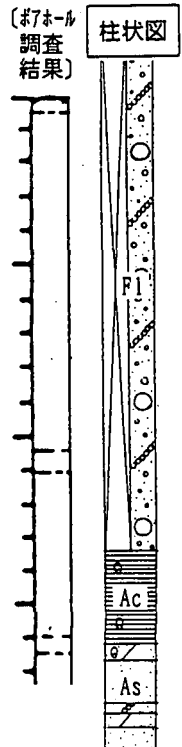


図-10 杭頭注入工施工フロー

〔水押しテスト結果(クラック区分表示)〕

区間(m)	杭番号																												
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-4	B-5	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	E-1	E-2	E-4	E-5	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	
0.0~0.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
0.5~1.0	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
1.0~1.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
1.5~2.0	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
2.0~2.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
2.5~3.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
3.5~4.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
4.5~5.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
5.5~6.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
6.5~7.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
7.5~8.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
8.5~9.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
9.5~10.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
10.5~11.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
11.5~12.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
12.5~13.5	C	C													B	A													
13.5~14.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
14.5~15.5	D	D	D	D	D	D	C	C	C	D	D	C	B	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	C	A	A	A	A
15.5~16.5	C	B	B							B	B	B			B	A													

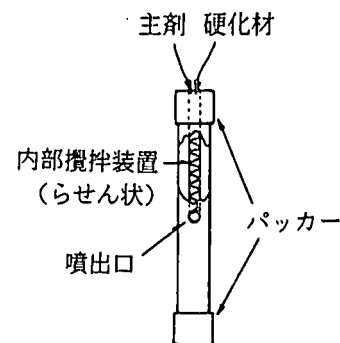


注1) 区間は杭頭部を0mとして深度方向に表示
 注2) ボアホール調査は杭番号E-1で実施
 注3) ボアホール調査結果は破線で密着クラックを表示

図-11 水押しテスト結果とボアホール調査結果との対比例(芦屋沖での一例)

今回の杭頭注入においては、特に深い位置のクラック注入の際、注入時間が長くなるため、通常の陸上部での主材と硬化材の攪拌では可使用時間の問題が発生することから、図-12に示すように今回は主材と硬化材を別々に投入し、パッカー内部で攪拌する先端二液混合方式を採用した。これにより、クラック深度に対しての可使用時間の問題を解消した。

注入後は適宜確認ボーリングを行い充填状況を確認するとともに、気密試験によりエアが抜けないことを確認した。



主剤と硬化材を別々に投入すると、らせん状の内部攪拌装置を通過する際に攪拌混合されて、噴出する。

図-12 先端二液混合方式におけるダブルパッカー内部模式図

6. その他

その他の工種としては、フーチング下の地盤が沈下し、既設のフーチングとの間に隙間が見受けられたため、発泡モルタルを充填する下面充填工を実施した。充填は、フーチング上面から穿孔し、混練プラントの発泡モルタルをグラウトポンプで圧送して片押しにて別の穿孔部から噴出させる方式とした。下面充填工の結果、充填量より逆算すれば、フーチング下面の隙間は約10～15cmであった。

7. おわりに

阪神高速道路5号湾岸線については、震災後応急復旧工事を行い早期に交通開放したため、供用下での本復旧工事ということで、変状計測を行い管理するなど非常に神経を使う工事であった。また、早期復旧を目指す中で他団体の復旧工事とも輻輳したが、関係官庁・施工業者各位の御協力により無事完了した。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 「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」, 建設省道路局
- 2) 「ジェットグラウト工法 技術資料」, 日本ジェットグラウト協会, 平成7年4月