

5号湾岸線基礎構造物の復旧

神戸第二建設部 設計課 加賀山 泰 一
大阪管理部 保全第一課 江 川 典 聰

要 約

阪神高速5号湾岸線は兵庫県南部地震により長大橋梁を中心に損傷が生じた。これら上部工の復旧と並行して基礎構造物の被災調査を継続してきたところ、埋立て地内の基礎構造物に損傷が生じていることが明らかとなった。基礎構造物はその被災の程度を分類し、各被災度ランクに応じた復旧設計を実施し、順次復旧工事を施工してきた。

本稿は、5号湾岸線の基礎構造物の中でも、特に、地盤流動の影響を受けたと考えられる埋立て地の護岸近傍に位置する基礎の復旧を中心に、その調査経緯ならびに復旧設計の考え方について述べるものである。

キーワード：液状化、地盤流動、残留水平変位、増し杭工法

まえがき

5号湾岸線は、大阪市港区天保山から神戸市東灘区向洋町東（六甲アイランド）に至る延長19.5kmの路線である。このうち、兵庫県南部地震により比較的大きな被害を受けた区間は鳴尾浜から六甲アイランドまでの10.5kmであった（図-

1）。この区間は、東から鳴尾浜、甲子園浜、西宮浜、南芦屋浜、深江浜、魚崎浜そして六甲アイランドという7つの埋立て地を結んでいる。それぞれの埋立て地を結ぶ橋梁は、幅200m～900mの水路を跨ぐため長大橋梁が多く、西宮港大橋（ニールセンローゼアーチ橋、中央支間長：252m）、東神戸大橋（3径間連続鋼斜張橋、支間割り：

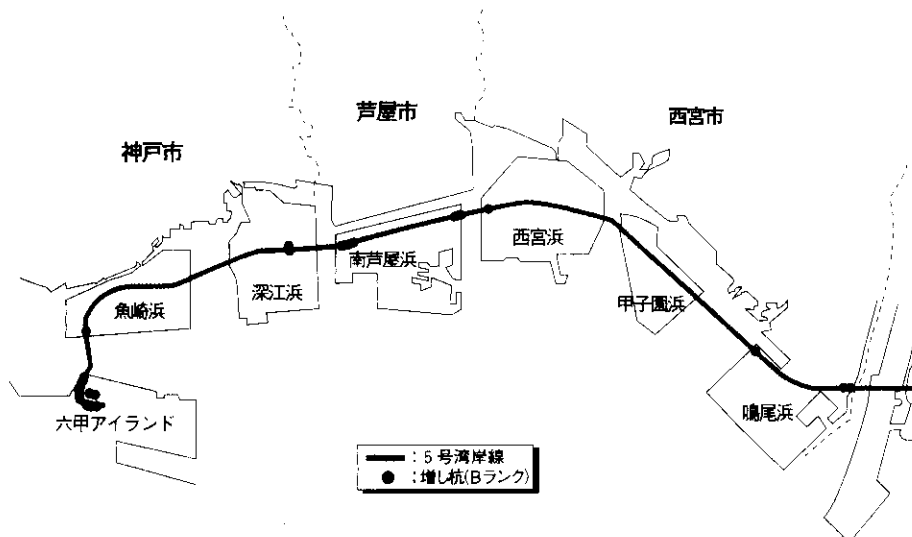


図-1 5号湾岸線の位置図

200m+485m+200m)、六甲アイランド橋（ローゼアーチ橋、中央支間長：217m）などが含まれている。

上部構造の被害は、上記の長大橋梁部において著しく、上部構造を支持する支承の破損あるいは脱落により路面の段差あるいは桁の横ずれなどの生じたものが大半を占めた。また、橋脚においては、全て昭和55年以降の道路橋示方書により設計されていることもあり、非常に軽微な損傷であったが、鋼製橋脚の一部でラーメン橋脚の水平梁にせん断座屈が見られた。このように直接視認できる損傷のほとんどは、上部工および橋脚において発生した。一方、直接視認できない基礎においても調査が進むにつれ、基礎の移動あるいは杭体のきれつなどの損傷が明らかになってきた。

5号湾岸線は、埋立て層の厚さが9mから22mの埋立て地盤上に建設されており、兵庫県南部地震により、これら基礎周辺地盤において液状化が発生し、さらに、水路の近傍では地盤が護岸とともに水路側へ移動した。この液状化に伴う地盤流動により、橋脚に水平変位の生じていることが認められたため、地震後にG.P.S.(Global Positioning System) 測量により橋脚位置を測定し、建設時点の座標値と比較することにより、橋脚の水平変位を調査した。また、基礎躯体においても、大きな地震力あるいは流動力を受けきれつなどの損傷を生じていることが考えられるため、ボアホールカメラ調査により、基礎の内部を観察した。

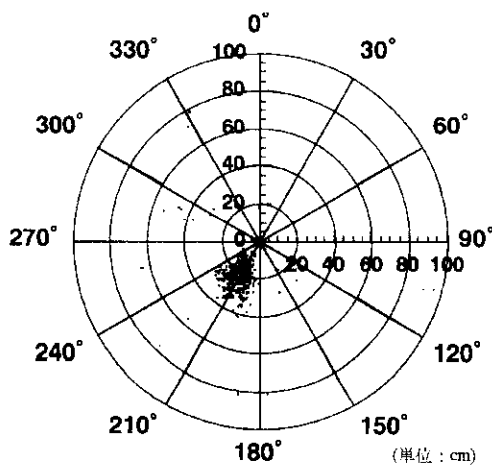


図-2 絶対変位ベクトル量・移動方向角（真北0°）

これらの結果より、主として基礎本体あるいは杭体のきれつおよび水平変位をもとに基礎の被災度を判定し、A～Dの4つのランクに区分した。それぞれの被災度ランクに対して、復旧方法を短期間のうちに決定し、復旧工事をすみやかに実施する必要があった。特に、液状化に伴う地盤の流動化によって残留変位を生じた基礎は、将来の地盤流動に対する補強ならびにきれつの生じた杭体に対する耐久性の確保が大きな課題であった。

以下に、それらに対する検討結果を中心に紹介する。

1. 橋脚基礎の被災状況

1-1 橋脚基礎の残留水平変位

5号湾岸線の基礎構造物における被災の特徴の一つは、液状化に伴う地盤流動の影響を受けたことである。この地盤流動により、50cmを超える残留変位が計測された橋脚基礎もあり、従来の設計では見込んでいなかった外力が作用した可能性があった。このような被災状況から考えると、橋脚基礎の水平変位量と杭の損傷度あるいは流動力との相関が判明してくれば、被災度判定において水平変位量は大きな判定因子となりうるものと考えた。そこで、橋脚基礎の水平変位量をG.P.S.を用いて測定することとした。この結果より、各埋立て地の橋脚基礎は平均的に南西方向に約20cm移動していることが明らかとなった（図-2）。これは断層の右ずれによる国家三角点の動きと、方向性・移動量ともにほぼ一致していることより、この平均的な移動は、構造物基礎の支持基盤より深い地殻の変動を代表しているものと考えられ、構造物の基礎に損傷を与えるものではないと考えた。したがって、橋脚基礎の移動量と損傷の相関を議論する場合は、この平均的な移動量を差し引いた値（以下「残留水平変位」という）で評価するのが妥当と考えた（図-3）。この平均的な移動に対して、各埋立て地の水路近傍に位置する橋脚基礎に注目すると、これらの基礎は護岸の崩壊に伴い、水路方向へしかも平均値よりかなり大き

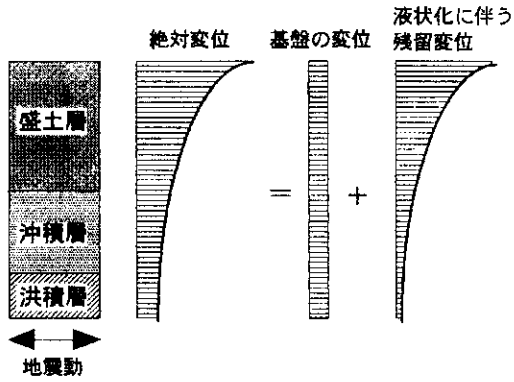


図-3 残留水平変位の概念図

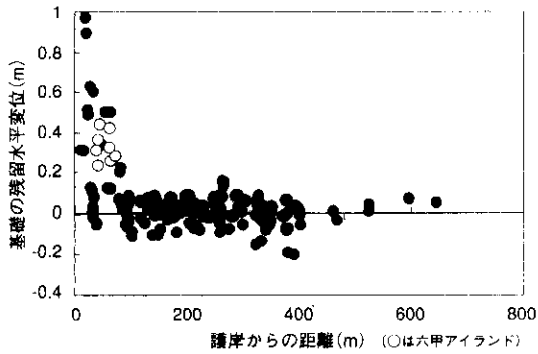


図-4 護岸からの距離と基礎の水平変位関係

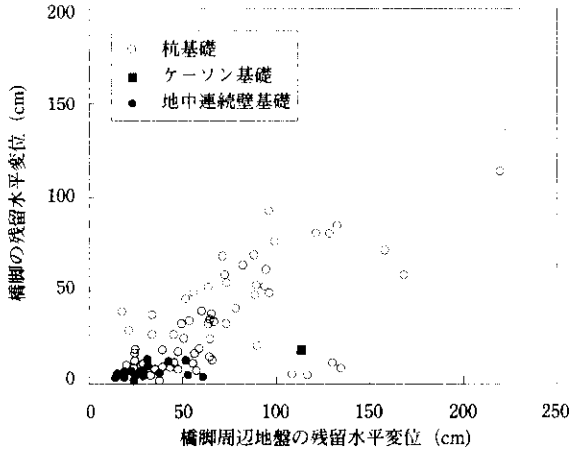


図-5 基礎周辺地盤と基礎の水平変位関係

く移動している。すなわち、方向性・移動量ともに他の基礎と比して極めて特異な挙動を呈しており、地盤流動による影響が寄与しているものと考えられる。ここで地盤流動の影響範囲が重要となるが、図-4に護岸からの距離と基礎の水平変位量との関係を示す(本図の水平変位量は平均値を差し引いた残留変位量をさす)。これより地盤流動の平面的な影響範囲は水路近傍の護岸より約100m以内であることが読みとれる。

一方、橋脚基礎の残留水平変位だけでなく、基礎周辺地盤の残留水平変位についても整理する必要がある。図-5に地盤の水平変位が比較的大きく生じた六甲アイランド、魚崎浜および深江浜における橋脚基礎の残留水平変位と基礎周辺地盤の残留水平変位との関係を示す¹⁾。この図から分かるように、地盤の水平変位に対して橋脚基礎の残留水平変位は1/2程度に留まっており、これは基礎の剛性が地盤流動に抵抗したためと考えられる。

これまで述べたように5号湾岸線の基礎の移動メカニズムを考える場合、地盤流動の影響を無視することはできない。そのため、後の3章でも述べるが、5号湾岸線の埋立て地水路近傍に位置する基礎の復旧に際しては、上記のような地盤流動の影響を復旧設計に反映させた。

1-2 被災度の判定

基礎の被災度は、主としてボアホールカメラにより観測された基礎本体あるいは杭体のきれつ、および前項で述べた残留水平変位をもとに判定し、A~Dの4つの段階に区分した(表-1)。その結果、Aランクに該当する基礎は1基も認められなかった。Bランクの基礎は26基、地盤改良あるいは杭頭部への薬液注入工法にて対応するC

表-1 基礎の被災度区分と復旧工法

ランク	定義	復旧工法
A	杭体の不連続が認められる。	該当基礎無し
B	杭頭から杭体にかけて一様にきれつがみられる。非常に大きな残留水平変位が認められる。	増し杭+杭頭注入
C	大半のきれつは杭頭部にみられる。基礎周辺地盤の変状が認められる。	地盤改良+杭頭注入もしくは杭頭注入のみ
D	損傷無しあるいは非常に軽微な損傷。	-

ランクの基礎が全体の約1/3、また、無損傷か、あるいは非常に軽微な損傷であるDランクに該当する基礎が全体の5割以上を占めた。

1-3 復旧工法

基礎の復旧は増し杭・地盤改良・杭頭への薬液注入の3つの工法を以下の方針のもと、表-1に示す組み合わせにて実施した。

- ① B, Cランクの基礎は、基本的にすべての基礎に対し、鉄筋の耐久性確保の目的で薬液注入を実施した。
- ② Cランクの基礎は耐力的には既設杭に問題はないと考えられるが、これらの基礎のうち基礎周辺地盤に沈下・ひび割れなどの変状が明らかに認められたもの、将来の地震により再度、液状化する可能性が高いものに対しては、液状化対策として地盤改良を実施した。
- ③ 各埋立て地の護岸近傍に立地し、地盤流動の影響を受けたBランクの基礎に対しては、将来の地盤流動対策として増し杭工法を実施した。

以上のうち本稿では、増し杭工法（Bランク基礎）についてその復旧設計における基本的な考え方、ならびに検討結果を記述する。

2. 増し杭工法による復旧

被災度Bランクの基礎は、各埋立て地の水路近傍に限られており、前述のとおり、地盤流動の影響を大きく受けたと考えられる。これらの基礎に対して、その周囲に杭を増し打ちし、既設のフーチングと増し打ちした杭を一体化するため、フーチングを拡大し、これにより基礎全体の剛性を高め、地盤流動に対する補強を行った。本章では、2-1で地盤流動メカニズム、2-2で増し杭設計事例について記述する。

2-1 地盤流動メカニズムの推定

(1)地盤流動メカニズム

地盤流動の発生メカニズムと基礎への影響を検討するに当たり、地盤流動がどの時点で発生するかが重要な因子となる。ここでは、イ)流動が地震主要動時に発生する場合、ロ)流動が地震主要

動後しばらくしてから発生する場合の2ケースが考えられる。

イ)の場合、地盤は完全な液状化状態に達していないため、土としての性状を残し、土圧作用としての荷重が大きい。一方、ロ)の場合、地盤は完全な液状化状態に達しており、液状化層の基礎に及ぼす流動力はイ)の場合よりも小さなものであると推定されるが、逆に地下水位以浅の不飽和土層における荷重が支配的である。

実際の現象がイ)ロ)あるいはその中間のいずれであったかを見極めるのは困難であり、地震動や地盤の特性にも左右されると思われるが、過去の震災事例、例えば新潟地震の際の昭和大橋の落橋原因の一つとされている地盤流動は、地震動がおさまって1~2分後に発生したとの報告²⁾などより、どちらかといえばロ)の方が現実的であると考えた。

そこで、湾岸線の中で特に水平移動量の大きかった新夙川橋の海P134橋脚および六甲アイランド北端に位置する海P216橋脚を例として、上述の考え方を検証するため検討した被災要因分析について記述する。

(2)被災要因分析

1) 検討条件

海P134橋脚は杭頭部より液状化層底面までほぼ一様にひび割れが発生しており、10m程度間隔をあけて粘土層下端付近で最大ひび割れが発生しており、残留水平変位量は約100cmである。また海P216橋脚は杭頭から10m程度下方までほぼ均等にひび割れが発生しており、残留水平変位量は約60cmである。計算は杭体および地盤バネの非線形性を考慮した静的解析により行った。計算ケースを表-2に示す。

2) 計算結果

表-3に海P134橋脚の計算結果を示す。同表より以下の内容が指摘できる。

- ①土質定数に乗じる係数 D_E が2/3の場合は慣性力が $k_h = 1.7$ 、 $D_E = 0$ （突出杭）の場合は $k_h = 0.5$ 程度で終局状態に至るものの、このときの水平変位は25cm程度であり、実際の変位に比べ小さい。逆に地震主要動時に流動現象が生じたと

仮定した時、実際の水平変位量100cmは終局状態を遥かに上まわっており、損傷実体と合致しない。

②一方、地盤流動のみ考慮した場合は、杭が健全であれば流動圧が20tf/cm²以上にならないと終局状態に至らない、しかもこの時の変位は15cm

程度であり被災状況と一致しない。

③杭体の損傷を考慮して損傷部の初期剛性を降伏後の剛性とすると、実際の残留水平変位に対応する流動圧は約13tf/cm²となり、この値は、円弧すべり計算によるすべり発生力および地下水位以浅の不飽和土層の受動土圧とほぼ対応する値となっている。

表-4に海P216橋脚の試算結果を示す。同表より以下の内容が指摘できる。

①地盤健全時においては、海P134橋脚の結果と同様に、終局時の水平変位量が実際の変位に比べ小さい。

②地盤流動のみ考慮した場合は、杭が健全であれば流動圧が17tf/cm²程度で終局状態となる。流動圧のみでも杭の被害は起こりうる結果であるが、残留水平変位60cmを発生させるには、流動圧が20tf/cm²以上必要であり、海P134橋脚の結果と一致しない。

③杭体の損傷を考慮すれば残留変位に対応する流動圧は約16tf/cm²となり、海P134橋脚の結果と

表-2 計算ケース

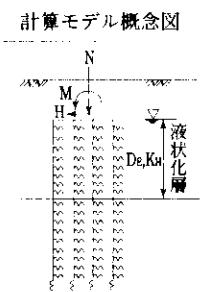
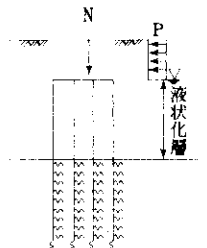
	計算モデル概念図	計算ケース
地震力		① D _E 考慮 ② D _E =0
側方流動		① 杭体健全状態 ② 最大ひびわれ部より上位の杭体の剛性を降伏後の剛性としたもの。他は健全状態

表-3 海P134橋脚試算結果

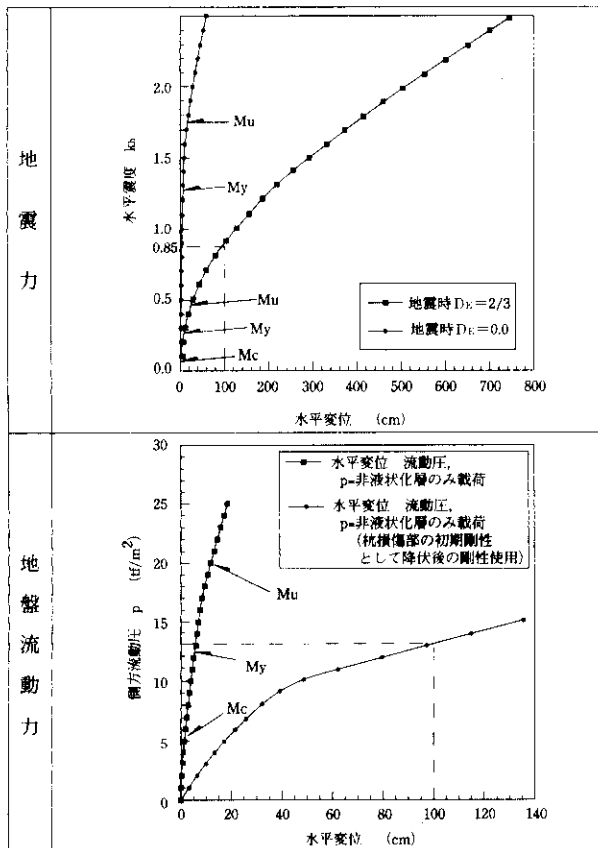
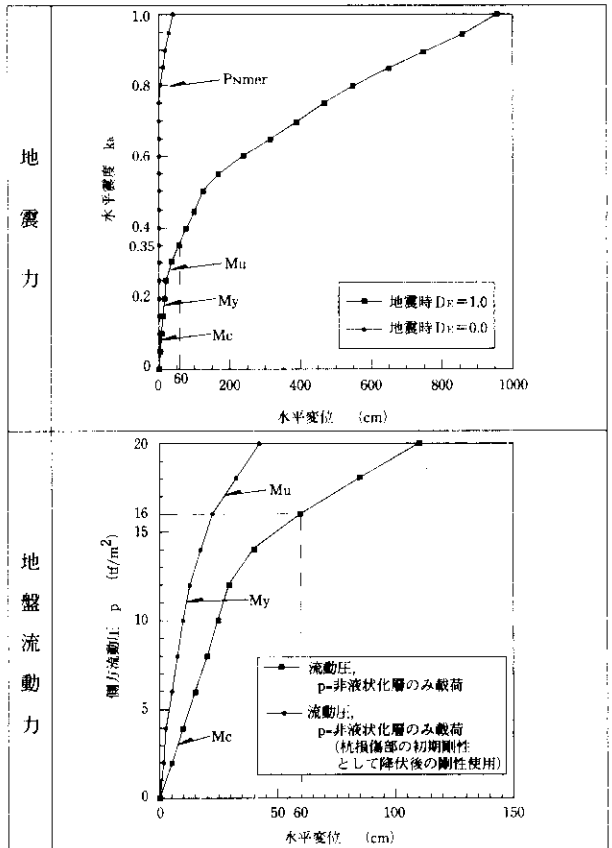


表-4 海P216橋脚試算結果



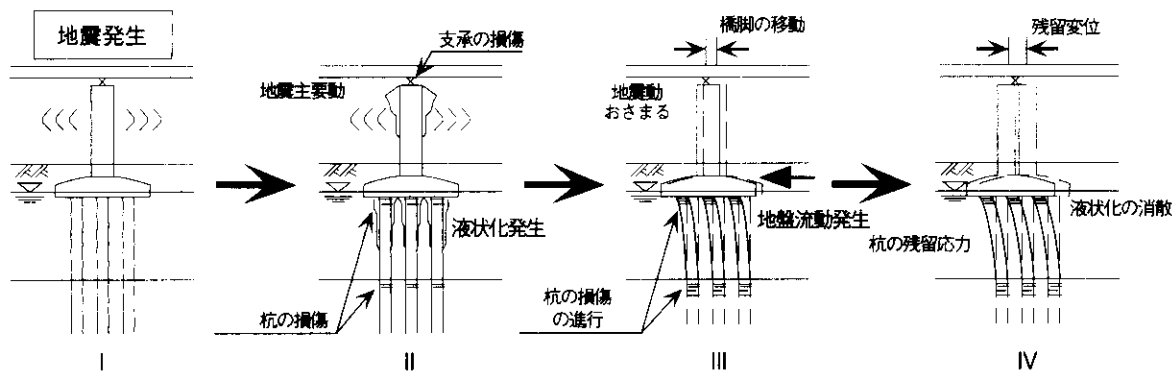


図-6 地盤流動発生メカニズム

おおむね一致する。

以上の検討結果と実測の残留水平変位量から判断して、図-6に示すように、まず地震主要動時に液状化現象・支承部の破損・杭体の損傷などが発生し、その後、護岸の移動を皮切りに、地盤流動が急激に進行し、護岸と橋脚との間のひび割れを埋めるようなかたちで流動圧が発生し、杭体の損傷も進行したものと考え、以後の設計を行った。

ここに示した地盤流動による被災要因分析手法は、不飽和土層の受動土圧を基礎背面に作用させ、杭～地盤系に静的非線形解析³⁾を実施するというものである。以下に本手法に基づいた増し杭の実設計について、海P216橋脚基礎を例として記述する。

2-2 増し杭の復旧設計事例

(1) 既設杭基礎の諸元

既設の基礎はφ1500mm、L=39.0m、n=14本の場所打ち杭基礎である。また、フーチングの寸法は、18.0m（橋直方向）×9.5m（橋軸方向）×2.5m～3.0m（厚さ）である。

(2) 耐震設計上の地盤面

液状化の判定方法、ならびに液状化層の土質定数の低減は、道路橋示方書V耐震設計編（平成2年）によった。本設計で道路橋示方書と異なるのは以下の点である。

1) 液状化判定対象層の平均粒径 D_{50}

「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」（復旧仕様）に準じ、

$$0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 20\text{mm}$$

とした。

2) 液状化判定の対象深さ

震災後の地質調査結果より、ケーソン護岸下置換砂層が動いていることが確認されたため、液状化判定対象深さは置換砂層を含むものとした。

(3) 増し杭の設計

増し杭の杭種は、施工性、用地上の制約、荷重の規模などを考慮し、場所打ち杭とし杭径φ2500mmまたはφ3000mmに対し杭本数・配置を数ケース設定し、以下の条件のもと比較検討した。

1) 増し杭と既設杭の荷重分担

既設杭の鉛直ばね値は、震災による損傷を考慮するとともに、フーチングの設計に対して安全側となるように、通常の1/2とし、また既設杭の曲げ剛性は、損傷状況に応じて設定した。

2) フーチングの補強方針

増し杭は既設フーチングの外側に配置されるため、これらの増し杭と既設のフーチングとが一体的に挙動するよう、フーチングを拡大ならびに増厚する必要がある。フーチング拡大の工法は、施工性を考慮して上側への増厚とした。

また、フーチングの一体化工法としては、RC構造とPC構造が考えられるが、PC鋼材挿入のための穿孔は可能であるが、既設杭がありプレストレスの導入が正確に把握できないなどの理由により、RC構造とした。

(4) 設計地盤流動力の算出

本項では3-1にて述べた考え方に基づき、設計に用いる地盤流動力を求めるため、慣性力作用時と流動力作用時との二段階の解析を行う。

1) 地震慣性力作用時の計算

まず健全な既設杭に対し地震主要動時の挙動解析を行った。この時液状化層の地盤反力係数については、液状化過程をシミュレートした地盤の非線形応答解析と、その応答値を構造系モデルに多点入力し地盤～構造系とを連成させた数値解析結果から、液状化層全体で平均して $D_E=0.1$ をみるものとした。この条件下での地震主要動時解析結果から、杭体には地震慣性力の作用により杭頭部および地中部（液状化層下端付近）に降伏曲げモーメントを上回る断面力が発生することが判明した（図-7）。したがって、これらの部位については杭に損傷が生じたと考え、終局モーメント（ M_u ）との割線剛性を初期剛性としたモーメント-曲率（ $M-\phi$ ）関係を設定し（図-8参照）、2）に示す流動圧作用時の計算を行った。

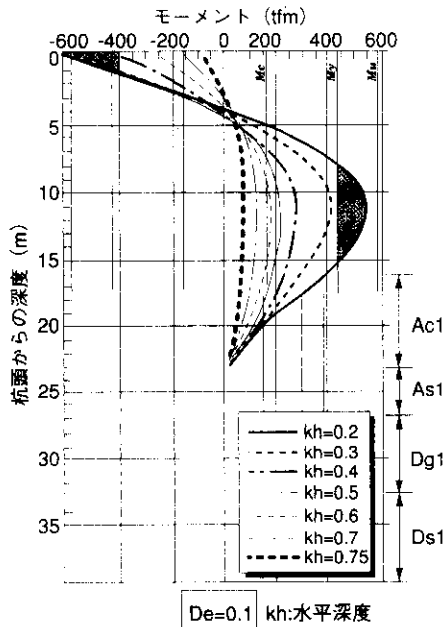


図-7 慣性力作用時の計算結果

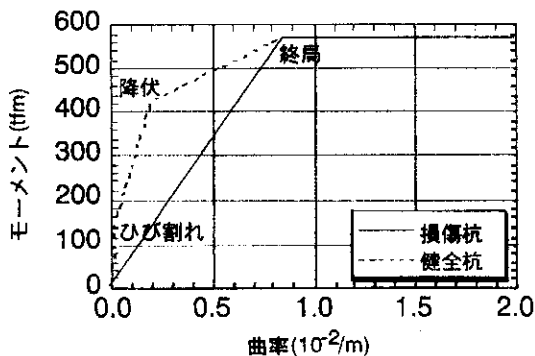


図-8 損傷を考慮した杭の $M-\phi$ 関係の一例

2) 流動圧作用時の計算

流動圧は地下水水位以浅の不飽和土層における構造物（フーチングおよび脚柱）に受動くさびとしての荷重とし、橋軸方向に作用させるものとした。ただし、ここでは簡便な方法として図-9に示すように受動くさびの平面的な拡がりのみを考慮することとした。また液状化層の地盤ばねについては、地盤流動量が橋脚の移動量を上回っていることから考慮しない（ $D_E=0$ ）こととした。これらより流動荷重合力を算出すると約1150tfとなった。

次に1）の結果より設定した杭体各部位の $M-\phi$ 関係に基づき、荷重（流動圧）を徐々に載荷し、荷重-変位（ $P-\delta$ ）関係を求めた（図-10）。同図より、流動荷重の拡がりを考慮した場合（約

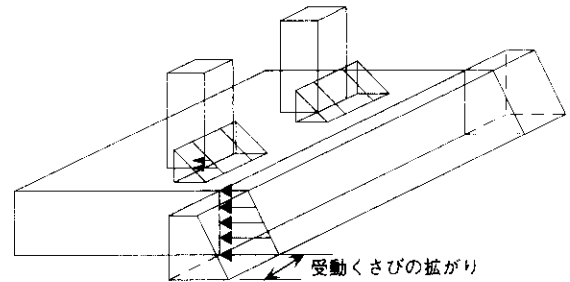


図-9 流動圧の作用方法

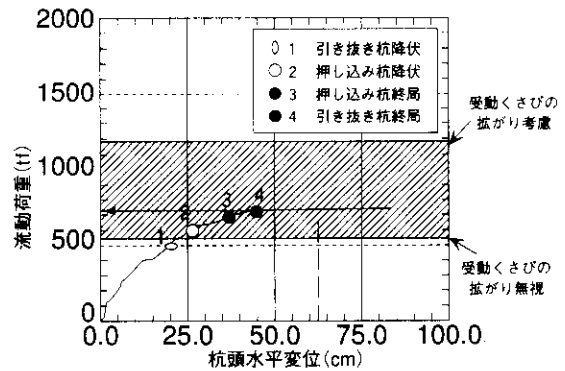


図-10 流動荷重-杭頭水平変位関係

1150tf) は基礎の終局耐力を上回り、計算上は無限に水平変位が発生する結果となる。一方、拡がりを無視した場合についても荷重を算出したところ、流動荷重は約500tfとなり、この荷重による基礎の水平変位は約25cmとなった。したがって、実際の流動荷重が上記の範囲内にあると考えれば、実際の残留水平変位60cmが説明可能となる。

したがって、流動荷重が700tfにおいて杭頭およ

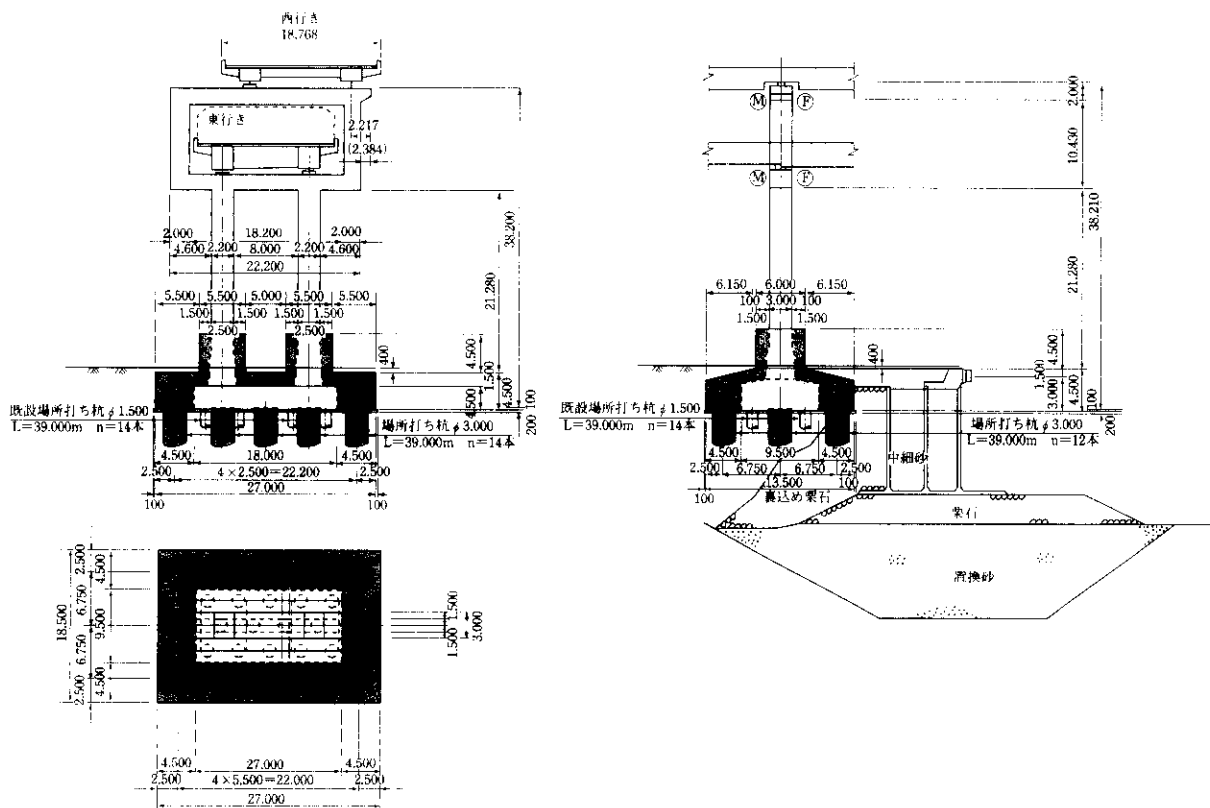


図-11 増し杭設計後の構造一般図

び地中部が終局曲げモーメントに達し、実際の杭体のひび割れ状況とほぼ対応していることより、残留水平変位60cmに対応する値として、700tfを流動荷重とした。このようにして逆算された流動荷重により増し杭後の設計諸元に対する安全性の照査を実施した。図-11に、増し杭設計後の構造一般図を示す。

あとがき

5号湾岸線の基礎構造物の復旧は、復旧仕様に準拠してなされたが、特に液状化判定や地盤流動対策については、明確にされていない点もあり、また確立された手法が存在しない状況下での、まさに試行錯誤の復旧であった。このような復旧の中でも本稿においては、主に増し杭工法による復旧について、被災状況を考慮し、液状化に伴う流動圧の設定に至る考え方を中心に記述した。

2-3で紹介したように復旧工法としてはこのほかに、杭頭部に充填材を注入する工法あるいは、基礎の周囲に高圧噴射攪拌工法によりセメントモルタルの柱列杭を施工し、基礎の剛性を高める補強工法も試みた。これらの工法を適用するに際し

ても種々の検討を重ねたが、これらに関する紹介は、別の機会に譲りたい。

5号湾岸線の基礎復旧に関し、終始熱心なご討議を賜った阪神高速道路震災復旧対策技術委員会基礎構造物小委員会（委員長、大阪大学 松井保教授）の委員の方々ならびに多くの貴重なご助言をいただいた建設省土木研究所基礎研究室および振動研究室の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江: 1995年兵庫県南部地震液状化, 地盤変位および地盤条件, (財)地震予知総合研究振興会, 1995.
- 2) 新潟地震30年事業実行委員会, 学術技術誌編集委員会: 新潟地震と防災技術, 1994.6.
- 3) 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.
- 4) 「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.