

液状化地盤における杭基礎の地震時安全性照査

神戸市 渋谷光宣*

清水建設(株) 清水文夫** 前 孝一*** 出羽克之****

○鈴木康夫*** 藤川智*****

神戸新交通ポートアイランド線ポートターミナル駅は旧突堤の捨石層を支持層とする直接基礎で支持されていた。兵庫県南部地震により、当駅舎は周辺地盤も含めて沈下、傾斜等の被害を受けた。復旧には旧突堤捨石マウンド層を貫通し安定な洪積砂層を支持層とする場所打ち杭基礎が採用された。

基礎の耐震設計は、従来の震度法に加え、今回規模の地震に対する杭基礎の安全性確保を目的として動的解析による照査を行った。当該地盤は液状化層が厚く捨石層が不均一に混在する複雑な構成をしているので、液状化時の構造物と地盤の連成応答を評価できる動的二次元有効応力解析を実施した。照査の結果、場所打ち杭の配筋の構造細目に留意することにより、地盤が液状化した場合でも杭基礎の安全性を確保できることが確認された。

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、神戸新交通ポートアイランド線ポートターミナル駅の駅舎全体が約40cm沈下するとともに、橋軸直角方向に約1度傾いた。既設基礎は突堤内の旧捨石層を支持層とする直接基礎であったが、周辺地盤も含めて液状化の影響を受けたと考えられ、地震後の地盤調査結果から安定と判断された洪積砂層を支持層とする場所打ち杭基礎で復旧された。

基礎の耐震設計は震度法を基本とし、地盤の液状化に対しては水平方向地盤反力係数を低減することにより評価したが、上記のような複雑な地盤構成を考慮し、今回規模の地震時における地盤の液状化および構造物と地盤の連成応答を動的解析により評価し構造物の変形性能を照査することで安全性の検証を行った。

以下に、動的解析の概要、杭基礎の地震時安全性照査の考え方および検討結果について述べる。

キーワード：2段階設計地震動，液状化解析，
杭基礎の変形性能

* 神戸市港湾局 ， 078-322-5692
** 清水建設(株)神戸支店土木技術部 ， 078-393-2133
*** 清水建設(株)土木本部設計第一部 ， 03-5441-0592
**** 清水建設(株)土木本部設計第二部 ， 03-5441-0593
***** 清水建設(株)技術研究所(基礎研究室)， 03-3508-8101

2. 構造物および地盤の概要

(1) 構造物の概要および復旧工法

当駅舎は写真-1に示すようにコンコース階およびプラットホーム階からなる2階建てで、構造形式は、上部工が鋼単純非合成箱桁橋、下部工が鋼製門型ラーメン橋脚で直接基礎で支持されていた。復旧にあたっては、橋脚は現状のままで上部工はジャッキアップにより水平に戻し、施工中は既設直接基礎で橋脚を保持しながら駅舎直下に杭基礎を施工するマルチタスク工法を採用して工期の大幅な短縮を図った。復旧後の構造を図-1に示す。

(2) 地盤の概要

ポートターミナル駅は神戸港の新港第4突堤に位置し、KP-11m付近までは突堤を建設する際の



写真-1 被災後のポートターミナル駅

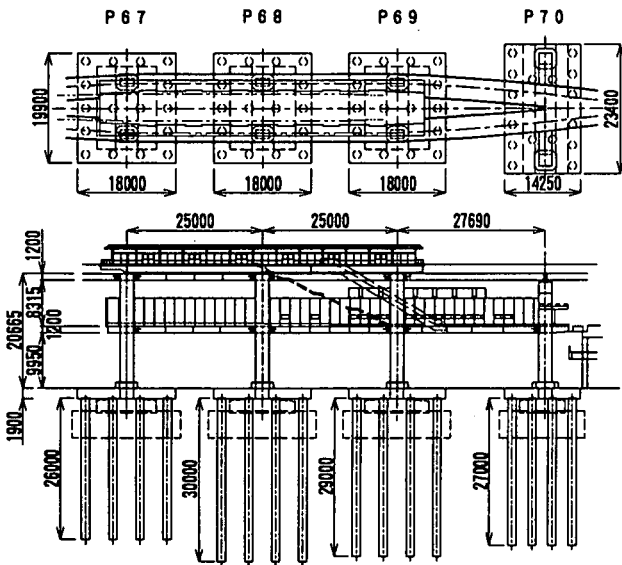


図-1 ポートターミナル駅復旧図

埋土層で、KP-1m～5m以深には大径の捨石層が厚く分布している。埋土層の下部は、薄く沖積層を挟んで砂質土層が優勢な洪積層からなっている。表層の埋立砂層および沖積砂層は液状化の可能性が高いと考えられる。

3. 動的解析

(1) 解析目的および解析手法

復旧工の耐震設計は、震度法による設計に加え、

- ①今回規模の地震に対して、基礎が十分な耐力と変形性能を有することを照査する。
- ②液状化時の非線形性の強い地盤応答が杭基礎に与える影響を評価する。

ことを目的として動的解析を行った。

解析には、液状化時の地盤の非線形応答と構造物と地盤の連成応答を時刻歴で計算できる有効応力法による動的二次元非線形解析プログラム(ALISS)^{1) 2)}を用いた。当解析は液状化現象を非排水条件下で評価し、せん断変形モデルに修正Ramberg-Osgoodモデル³⁾、間隙水圧モデルにおわんモデル⁴⁾を使用した。

(2) 解析条件

a) 解析モデル

駅舎部の4基の橋脚のうち、液状化層が厚く荷重条件が厳しいP69橋脚の橋軸方向を対象として解析を行った。

メッシュ分割および解析結果出力位置を図-2に示す。上部工は、橋脚を梁要素で、プラットホーム階とコンコース階を集中質量でモデル化した。下部

工は、杭を梁要素で、フーチングをソリッド要素でモデル化し、杭頭とフーチングの結合部は固定とした。奥行き方向の杭は1本の杭に集約してモデル化した。また、杭、橋脚は線形要素として取り扱い、降伏時曲げ剛性を用いた弾性応答値からエネルギー一定則を適用して弾塑性応答値を求めることとした。

地盤の側方境界は鉛直方向固定、水平方向ローラーとし、底面境界は鉛直、水平方向とも固定とした。また、基礎の三次元効果を評価するために地盤の解析幅を基礎幅の2倍とした。

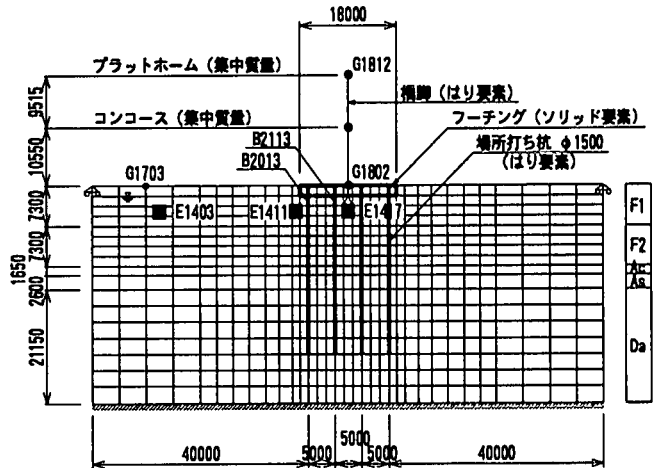


図-2 メッシュ分割・解析結果出力位置

b) 地盤定数

地盤の基本物性値は復旧工事に先だてて実施した地盤調査結果等に基づいて設定した。解析に用いた地盤定数を表-1に示す。

表-1 解析用地盤定数

土質	単位体積重量 (γ , t/m ³)	平均N値	平均せん断波速度V _s (m/s)	初せん断剛性G ₀ (t/m ²)	動的ポアソン比	平均有効応力 σ (t/m ²)	平均細粒分率 FC(%)
F1	1.80	6	170	5310	0.33	4.82	9.7
F2	1.80	27	240	10580	0.33	10.66	5.6
Ac	1.50	3	180	4960	0.33	13.99	63.0
As	1.85	15	245	11330	0.33	15.51	17.7
Da	1.85	35	305	17560	0.33	25.60	20.0

土の構成式のパラメータは、地盤調査結果や既往の動的変形特性試験、液状化強度試験を基に設定した。

c) 入力地震動

ポートターミナル駅はポートアイランドの対岸に位置し、捨石層の存在を除くとポートアイランドの地盤構成に近いことから、入力地震動は図-3に示すポートアイランドのKP-79mにおいて観測された加速度記録を用いた。解析方向(橋軸方向)が

南北方向で、加速度も卓越していることから、NS成分を用いた。また、継続時間は16秒とした。

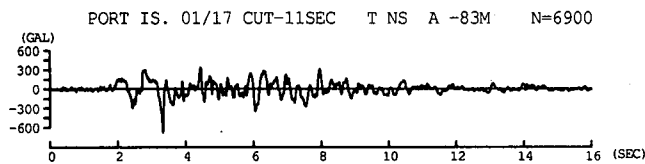


図-3 入力地震動

(3) 解析結果

a) 地盤および上部工の応答

加速度の時刻歴応答を図-4に、埋立砂層(F1)の過剰間隙水圧比の時刻歴応答を図-5に示す。

応答加速度は、フーチング上面(G1802)で437gal、プラットホーム階(G1812)で1417galとなり、上部工の応答倍率が3倍以上になっている。これは、上部工の固有周期がフーチング上面における加速度スペクトルの卓越周期とほぼ一致しているためである。表層地盤が液状化して剛性がかなり低下したため、地表面(G1703)での応答値(442gal)が基盤(679gal)より減少し周期が長くなっていることがわかる。

埋立砂層(F1)の過剰間隙水圧比の時刻歴応答をみると、主要動の始まった約2秒後から上昇を始め、約4秒後には周辺地盤(E1403)で90%以上、杭近傍(E1411)および杭間(E1417)でも80%前後まで上昇しており、短時間で液状化に至ったと推定される。地盤の最大ひずみは周辺地盤で約4%、杭近傍および杭間で約1%となっており、杭によるひずみ抑制効果は認められるものの、今回規模の地震時には液状化の抑止効果はなく全層にわたって液状化が生じたと推定される。

b) 杭の断面力

端部の杭の杭頭における断面力の時刻歴応答を図-6に示す。この値は集約した5本分の値であり、降伏時剛性に対する弾性応答値である。

今回の解析結果より、杭の軸力、曲げモーメント、せん断力の最大値が発生する時刻にずれが生じていることがわかる。最大軸力発生時刻は、上部工の最大加速度発生時刻にほぼ一致する。この時、地盤は完全に液状化しておらず地盤の抵抗が残っている。最大曲げモーメントは、上部工の最大加速度発生時刻より遅れ液状化後に生じている。この時、上部工の加速度は50%程度に落ちている。最大せん断力の

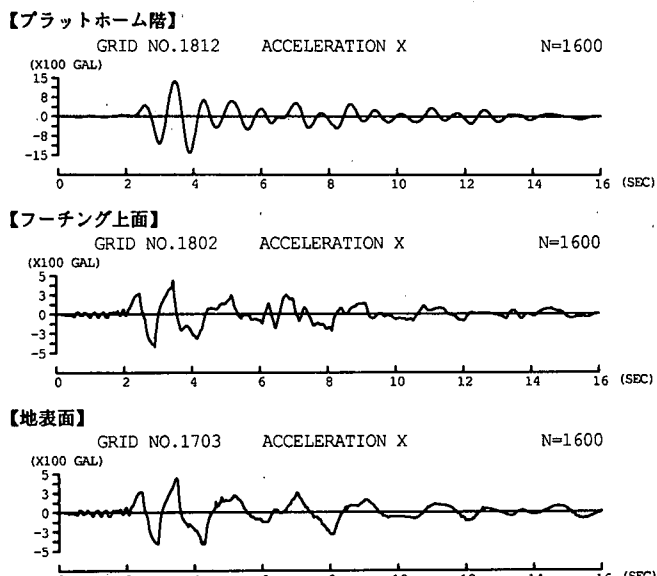


図-4 加速度の時刻歴応答

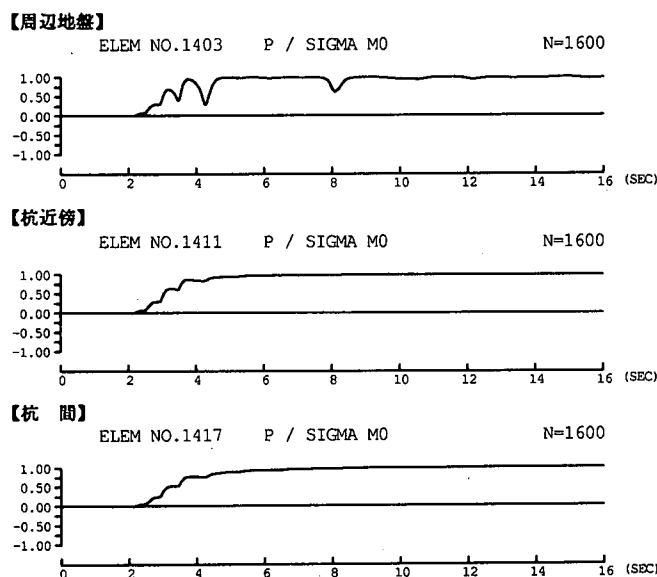


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴応答

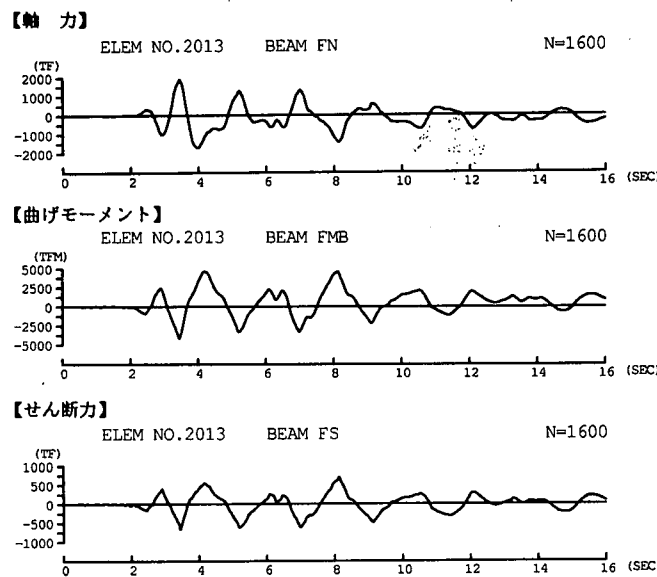


図-6 杭の断面力の時刻歴(端部)

発生はさらに遅れ、液状化後の地盤のひずみが最大値に達する時刻にほぼ一致する。

以上より、杭の安全性照査は、上部工の慣性力の影響が卓越する主要動時と地盤変形の影響が卓越する液状化時の2時点において行うこととした。

4. 杭基礎の安全性照査

(1) 検討方法

杭の安全性に対する照査は、以下の3項目について行った。

- ① 杭の軸方向押込み力 ≤ 杭の極限支持力
- ② 杭の軸方向引抜き力 ≤ 杭の極限引抜き力
- ③ 杭体の応答塑性率 ≤ 杭体の許容塑性率

杭の極限支持力および極限引抜き力は、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」⁶⁾により算定した。杭頭反力は、動的解析結果に鉛直地震動の影響を加算して算定した。

杭基礎の耐震性能の目標として、全ての杭を許容できる損傷以下に抑えるという考え方を採用した。杭の変形性能照査は、曲げ破壊が先行することを確認した上で、曲げモーメントと曲率の関係で表すものとし、「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」⁶⁾5章に準じ、以下の手順で行った。

- ① 杭の断面諸元および軸力に応じてM~φ図を作成する。
- ② 動的解析により求められた弾性応答値からエネルギー一定則を適用して弾塑性応答値を求め、次式により応答塑性率 μ_r を算定する。

$$\mu_r = \phi_r / \phi_y$$

- ③ 許容塑性率 μ_a を次式により算定し、応答塑性率が許容塑性率以下となることを確認する。

$$\mu_a = 1 + (\phi_u - \phi_y) / (\alpha \phi_y)$$

ここに、 ϕ_r : 弾塑性応答曲率

ϕ_y : 降伏時曲率

ϕ_u : 終局時曲率

α : 安全係数 (= 1.5)

(2) 杭の支持力照査

杭の支持力は主要動時に端部の杭で最も厳しくなるが、以下に示すように押込み側、引抜き側とも極限值以内となり支持地盤は塑性化には至らなかった。

$$R_{max} = 633 \text{ tf} < R_u = 1429 \text{ tf} \quad \therefore \text{O.K.}$$

$$R_{min} = -302 \text{ tf} < P_u = -899 \text{ tf} \quad \therefore \text{O.K.}$$

(3) 杭体の安全性照査

a) 杭の断面諸元

場所打ち杭の断面配筋は、図-7に示すように上部、中間部、下部の3段階に変化させた。動的解析の結果、杭体に生じる断面力は道路橋示方書の半無限長の計算式とは異なり、地盤の変位が大きく影響し沖積層と洪積層の層境界近傍で大きな断面力が生じることがわかった。そこで、主鉄筋の段落しの位置および帯鉄筋量は動的解析の結果を基に決定することにより杭体の安全性を確保した。

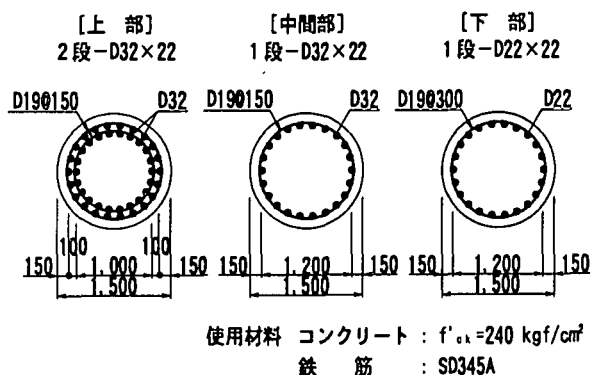


図-7 場所打ち杭の断面諸元(φ1500)

b) 曲げに対する照査

道路橋示方書によると杭の曲げ耐力および変形性能は軸力に依存するため、軸力の変動に伴いM~φ関係も変化する。そこで、全ての検討時点および全ての部位で応答塑性率を求める代わりに、変形性能を以下に示す構造特性係数で表して弾塑性応答値を算定し、終局曲げモーメントと比較することにより曲げ耐力の照査を行った。⁷⁾

$$M_p = D_s \cdot M_E \quad D_s = 1 / \sqrt{2 \mu_a - 1}$$

ここに、 M_p : 弾塑性応答値

M_E : 弾性応答値(動的解析結果)

D_s : 構造特性係数

μ_a : 許容塑性率

端部の杭に対する主要動時の曲げ耐力照査結果を図-8に、液状化時の曲げ耐力照査結果を図-9に示す。全ての部位で杭体の安全性が確保されていることを示しているが、主要動時に引抜き側の杭の中間部が最も厳しくなっている。これは、上部工の慣性力により端部の杭に大きな引抜き力が作用し杭の曲げ耐力が低下したこと、沖積砂層の間隙水圧の上昇により沖積層と洪積層との層境界近傍で曲げモーメントが生じたことによると考えられる。

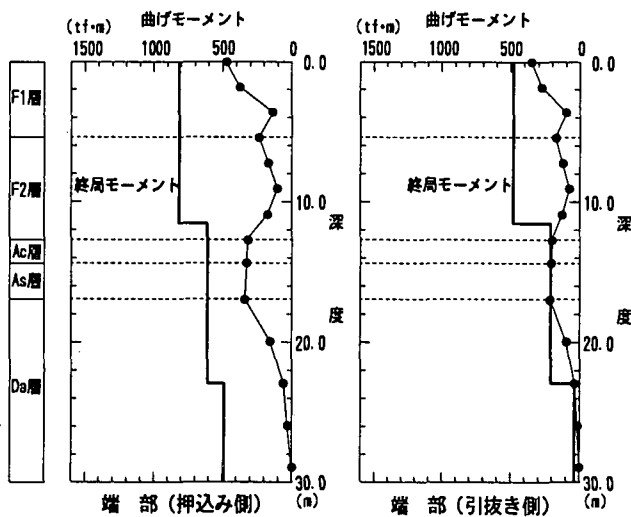


図-8 杭の曲げ耐力照査結果(主要動時)

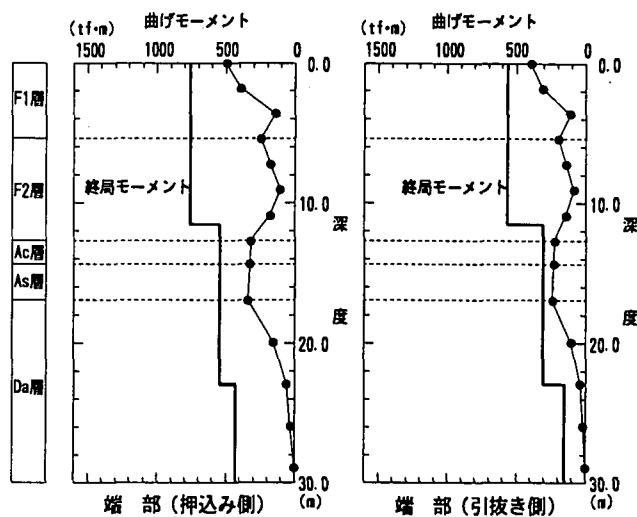


図-9 杭の曲げ耐力照査結果(液状化時)

また、杭頭部における塑性率を用いた変形性能照査結果を図-10に示す。主要動時は終局曲げモーメントが最も小さくなる端部引抜き側について、液状化時は曲げモーメントが最も大きくなる中央部押し込み側について検討した。応答塑性率は以下に示すように許容値以下となり、引張鉄筋は降伏するものの所要の変形性能を有しており大きな損傷には至らないことが確認できた。

主要動時： $\mu_r = 2.4 < \mu_a = 3.3$ ∴ O.K.

液状化時： $\mu_r = 2.5 < \mu_a = 2.6$ ∴ O.K.

c) せん断に対する照査

せん断力も液状化時に地層境界近傍で大きくなるため、帯鉄筋量を増しせん断耐力を増加させることにより杭体の安全性を確保した。

5. フーチングおよび橋脚の安全性照査

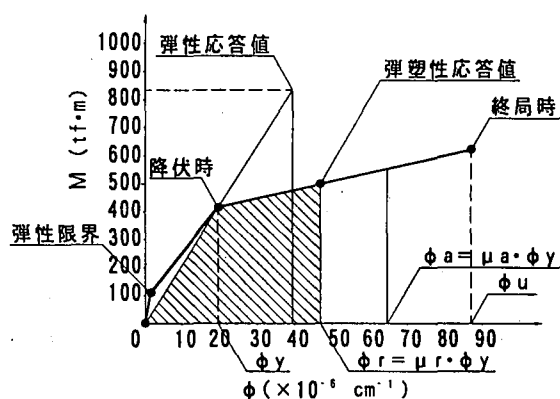
(1) フーチングの安全性照査

フーチングの曲げに対する照査は、曲げ破壊が先行することを確認した上で、下側引張部および上側引張部について各々有効幅を設定し、杭と同様に塑性率を用いて行った。せん断に対する照査は全幅有効として行った。検討時点は上部工反力、杭反力が大きくなる主要動時とし、断面力は動的解析結果に鉛直地震動の影響を考慮して算定した。

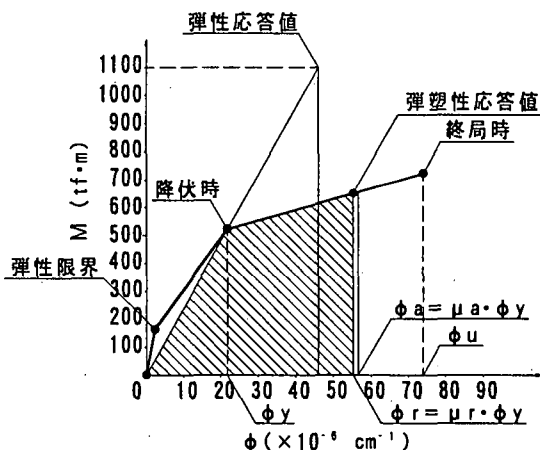
(2) 鋼製橋脚の安全性照査

橋脚基部においても塑性率を用いて変形性能照査を行った。終局曲げモーメントの算定に用いる箱形断面のフランジプレートの限界ひずみは、周辺支持板の実験結果より $\epsilon_{max} = 5\epsilon_y$ (ϵ_y : 降伏ひずみ)と

した。⁸⁾ 検討時点は基部における断面力が大きくなる主要動時とし、鉛直地震動の影響を考慮した。



[主要動時 (端部 引抜き側)]



[液状化時 (中央部 押し込み側)]

図-10 杭の変形性能照査結果

6. まとめ

ポートターミナル駅の復旧にあたり、震度法による設計に加え動的解析による照査を行った結果、以

下のことが明らかになった。

①有効応力解析を行うことにより、液状化地盤における地盤変位の影響を考慮した杭基礎の照査が可能となった。検討は、軸力が卓越する主要動時と曲げおよびせん断が卓越する液状化時の2時点について行う必要がある。また、今回規模の直下型地震時には、緩い砂地盤は短時間で液状化に至るため、主要動時における地盤の剛性低下や液状化時における上部工の応答に留意する必要がある。

②地盤が液状化する場合でも、地盤改良を行わずに杭の耐力および変形性能の向上を図ることにより対処が可能ながわかった。この場合、地盤の変位を考慮して主鉄筋の段落しや帯鉄筋量の決定を行う必要がある。

③動的解析結果を用いた復旧工の安全性照査結果を表-2に示す。

表-2 安全性照査結果一覧表

部 位	照査項目	照査方法	照査結果	判定
杭	押 込 力	極限支持力以下	$R=633 < R_u=1429$	O.K.
	引 抜 力	極限引抜力以下	$P=302 < P_u=899$	O.K.
	変形性能	主要動時 許容塑性率以下	$\mu_r=2.4 < \mu_u=3.3$	O.K.
7-7'ノック	変形性能	液状化時 許容塑性率以下	$\mu_r=2.5 < \mu_u=2.6$	O.K.
		下側引張 許容塑性率以下	$\mu_r=1.5 < \mu_u=6.4$	O.K.
	上側引張 許容塑性率以下	$\mu_r=3.4 < \mu_u=9.4$	O.K.	
橋 脚	変形性能	基 部 許容塑性率以下	$\mu_r=3.5 \leq \mu_u=3.5$	O.K.

各部材とも降伏点は越えているものの所要の変形性能を有している。応答塑性率は概ね2~4の範囲であり、重大な損傷には至らないことが確認できた。

今回実施した検討を踏まえ、解析上次のような課題が挙げられる。

- ①上部工および杭の非線形挙動の影響評価
- ②鉛直地震動を同時に考慮した場合の影響評価
- ③引張力が作用する杭のじん性の評価

これらの研究成果を踏まえ、液状化現象を考慮した簡便な設計法の開発が望まれる。

【参考文献】

- 1)大槻明、渡辺浩平、竹脇尚信：不整形地盤における二次元建屋地盤系液状化解析，土木学会論文報告集，368，1-5，363-372，1986。
- 2)Fukutake, K., A. Ohtsuki, M. Sato, and Y. Shimoto: Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 977-992, 1990.
- 3)龍岡文夫、福島伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力-ひずみ関係のモデル化について，生産研究，第30巻，9-10，1978。
- 4)福武毅芳、松岡元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈，土木学会論文報告集，412，Ⅲ-12，240-248，1989。
- 5)道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（平成6年2月 日本道路協会）
- 6)道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編（平成2年2月 日本道路協会）
- 7)建築耐震設計における保有耐力と変形性能（1990 日本建築学会）
- 8)鋼構造塑性設計指針（1975 日本建築学会）

SAFETY EVALUATION OF PILE FOUNDATIONS SUBJECTED TO LIQUEFACTION

Mitsunobu SHIBUYA, Fumio SHIMIZU, Koitsi MAE
Katsuyuki DEWA, Yasuo SUZUKI, Satoshi FUJIKAWA

On the occasion of restoration works for Port Terminal Station on Kobe New Transit Port Island Line struck by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, we modified spread foundations to pile foundations in order to improve the aseismicity.

In addition to the seismic coefficient method, we evaluated the safety of pile foundations for strong earthquake by two-dimensional dynamic effective stress analyses which simulates the response of soil-structure system under liquifaction. From the results of evaluation, we could ensure the safety by considering structural details in terms of reinforcing bar arrangement.