

液状化が生じた地盤のせん断剛性・ひずみレベルの評価と基礎構造の応答評価への適用

三輪 滋¹・池田隆明²

¹飛鳥建設技術研究所

(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail: shigeru_miwa@tobishima.co.jp

²飛鳥建設技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail: takaaki_ikeda@tobishima.co.jp

液状化が発生する地盤における基礎構造物の被害は、地盤の震動変位が支配的であることが数多く報告されている。地震時の杭基礎の設計や診断を行うには、簡易に液状化時の地盤挙動を把握できれば非常に有効である。液状化時の地盤挙動が支配的であることから、液状化後のせん断剛性を評価できれば、等価線形解析によっても液状化の杭への影響を評価できると考えられる。そこで、兵庫県南部地震での液状化層のひずみレベルやせん断剛性を推定し、液状化の影響を考慮した等価線形解析と相互作用解析、応答変位法の組合せを提案し、その妥当性を検討する。また、様々な液状化地点での液状化層のひずみやせん断剛性を検討し整理することで、せん断剛性低下率を液状化抵抗率 F_L で規定する設定レベルの提案を行う。

Key Words: *Liquefaction, Soil-Pile-Interaction, Equivalent Linear Method, Shear Modulus, Shear Strain*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、埋立て地盤に建設された多くの構造物基礎が損傷し、それに伴って上部構造物の傾斜、移動、大破といった被害が発生した。これらの被害は、杭基礎の被害の検討結果¹⁾から、埋立てまさ土の液状化による地盤の震動変位が支配的であり、それは時間的には慣性力が作用する時間帯よりも遅れ、間隙水圧が上昇し液状化に至る過程あるいは液状化してからと考えられる¹⁾。このように、液状化の可能性の高い地盤における基礎構造物の耐震設計を考える上では、液状化した地盤の挙動を把握することが重要であるが、地盤調査が十分でない場合などは、液状化に関わる地盤データの設定が難しく、比較的簡単に液状化時の地盤挙動を把握できる方法があれば、非常に有効である。

等価線形解析においては、せん断剛性は解析中一定であり、非定常性が大きいと考えられる強震時の地盤挙動を時刻を追って検討するには困難がともなう。しかし、対象を限定し、基礎構造物の地震時挙動に対して液状化時の挙動が支配的であるならば、液状化後のせん断剛性を的確にとらえれば、杭への影響は評価できる可能性があると考えられる。

そこで本論文では、まず、兵庫県南部地震の地震

観測記録から液状化時の地盤のひずみレベルと等価せん断剛性を推定する。つぎに、ここで求めた液状化時のせん断剛性を用いて、液状化時のせん断剛性を考慮した等価線形解析とその結果を用いた相互作用解析を組合わせた方法および応答変位法を組合わせた方法を提案し、有効応力解析と比較して杭基礎構造物への影響を検討し、その妥当性を検討する。また、液状化が発生する場合、数%に達するような大きなひずみレベルにおける動的変形特性のデータがほとんどないことがこのような方法の適用性の妨げとなっていることから、兵庫県南部地震、およびそれ以外の地震における液状化地盤でのひずみレベル、せん断剛性を、地震観測記録や有効応力解析を用いて推定し、これらの結果を整理することで、液状化時のせん断剛性の設定レベルの提案を行う。

2. 兵庫県南部地震における液状化層のせん断ひずみとせん断剛性

(1) ポートアイランドの地震動記録にもとづいた液状化層のせん断剛性とせん断ひずみの検討

1995年兵庫県南部地震では、まさ土を用いた埋立地盤の激しい液状化により多くの噴砂が確認されて

表-1 ポートアイランドの記録に基づく
まさ土層の液状化時の剛性低下とせん断ひずみ

No.	文献番号	著者	剛性低下率	せん断ひずみ	検討方法
1	2	風間ら	0.04~0.06	1~2	鉛直アレー記録より地盤の応力-ひずみ関係を推定
2	3	国生ら	0.04~0.06	1~2.3	鉛直アレー記録から逆解析で同定
3	4	吉田ら	0.01~0.02	1~3	鉛直アレー記録から逆解析で同定
4	5	川瀬ら	0.06	4	相互相関係数のピークの伝播時間からS波速度を推定
5	6	鈴木ら	0.01	—	鉛直アレー記録から逆解析で同定
6	7	森尾ら	0.05	—	フェイスベクトル、相互相関による伝播速度、応力ひずみの関係
7	8	宮田ら	0.01~0.015	—	観測記録のピークの伝播速度
8	9	望月ら	0.05	—	相互相関解析

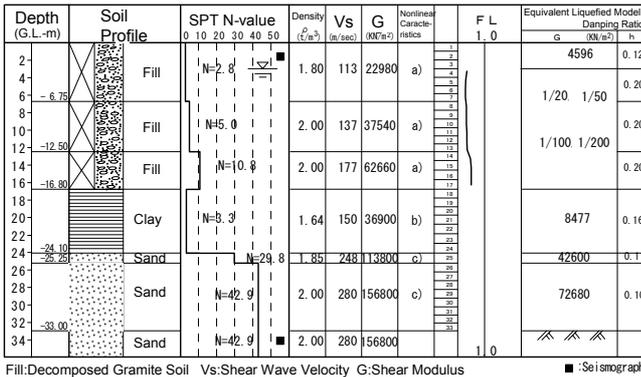


図-1 東神戸大橋の地盤モデル

いる。ここでは液状化したまさ土層で、せん断剛性がどの程度低下し、ひずみレベルがどの程度にまで達していたかを、既往の研究から整理した。

ポートアイランドで実施されている地震動鉛直アレー観測は、G.L.-84mの他に地表面と埋立まさ土層下端あるいは沖積粘性土層下端に地震計が設置され、詳細な地盤調査結果がある。そのため、記録の逆解析で地震時のせん断剛性やひずみを求めたり、観測記録そのものから、せん断ひずみを求める試みや、様々な手法により地震応答解析がなされ、その挙動が検討されている^{2)~9)}。これらの検討の中から、埋立まさ土層の地震時のひずみ、S波速度、せん断剛性等について記された主なものを整理すると、表-1のようになる¹⁰⁾。液状化の発生によりまさ土層のせん断剛性は初期剛性に対しておおよそ1/20~1/100程度にまで低下し、1%~4%のせん断ひずみが生じたと考えられる。これらは地震観測記録が得られた2深度間の平均的なせん断剛性低下、せん断ひずみであり、非液状化層が含まれることを考えるとこれらの推定値の下限に近い値であることが予想される。

(2) 東神戸大橋の記録にもとづいた検討

ポートアイランドとは埋立年代の異なる、震央から約25km離れた神戸市東端の深江浜に位置する東神戸大橋の地震観測点の記録¹¹⁾により検討を行った。観測点は1964~1970年にまさ土で埋立てられた地点で、その地盤モデルを図-1に示す。表層の約17mがまさ土埋立層で、N値は比較的小さく3~11である。地盤はほぼ水平成層構造と考えられる。地震計はGL-2mとせん断波速度が300m/sに近いGL-33mに設

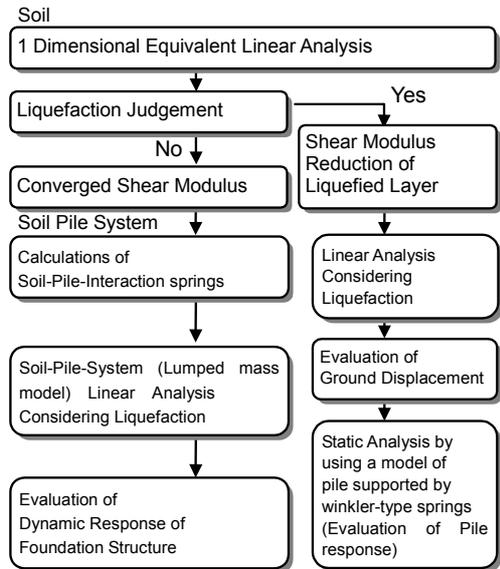


図-2 液状化を考慮した地盤の等価線形解析の
手順神戸大橋の地盤モデル

置されている。地表と地中の2点間の加速度記録を積分した変位記録の差から求まる、平均的なひずみは、最大約2%であるが、その間には沖積粘性土層や洪積の互層が含まれており、液状化したまさ土層にはさらに大きなひずみが生じていたと考えられる。

そこで、1次元有効応力解析法と1次元等価線形解析法を用いて、まさ土層の剛性低下やひずみを推定した。有効応力解析には多重せん断ばねモデル¹²⁾と井合の過剰間隙水圧上昇モデル¹³⁾を組み込んだ手法FLIP¹³⁾を、等価線形解析にはSHAKE¹⁴⁾を用いた。等価線形解析法は、地盤の非線形性を等価な線形材料として評価する方法であり、間隙水圧が有効拘束圧の75%程度まで上昇した地盤についても、地震動増幅特性をよく表現できるという報告¹⁵⁾はあるが、液状化が生じるような、非常に大きなひずみの生じる地盤までは、一般には評価が難しいとされている。ここでは液状化による地盤のせん断剛性の低下を考慮することにより、簡易に液状化した地盤の挙動を評価することを試みる。

まず通常の等価線形解析を行い、各層のせん断応力から液状化判定を行い、次に液状化する層に関しては、その影響を考慮して剛性を低下させ、そのほかの層は最初の検討で収束した剛性を適用した地盤モデルを用いて再度応答解析を行う。ここでは、この2段階の解析法を「液状化を考慮した等価線形解析法」と呼ぶ¹⁶⁾が、この方法により、いくつかのサイトで地盤挙動を評価できることを示している^{16)~17)}。この液状化を考慮した等価線形解析の手順を図-2に示す。なお、繰返し計算の中で液状化を考慮する等価線形化法もすでに提案されている¹⁸⁾。液状化層の剛性低下はポートアイランドでの検討結果を踏まえて、初期剛性の1/20,1/50,1/100,1/200の4ケースを考えた。液状化強度はN値を基にLiaoの方法¹⁹⁾により拘束圧で補正し、時松・吉見の方法²⁰⁾により設定した。液状化強度とこれに基づく有効応力解析の要素シミュレーション結果を図-3に示す。表-2に有効応

表-2 解析で用いるまさ土の液状化パラメータ

	Rle20	ϕ_f deg	ϕ_p deg	Parameter of dilatancy				
				S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
GL-3.00 ~6.75m	0.180	37.9	28	0.005	5.074	0.5	1.056	1.6
GL-6.75 ~12.5m	0.195	38.0	28	0.005	5.266	0.5	1.049	1.6
GL-12.5 ~16.8m	0.230	38.9	28	0.005	7.824	0.5	0.980	1.6

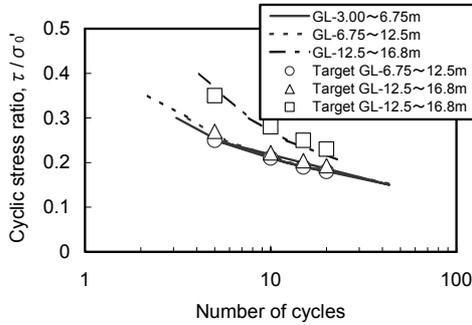


図-3 まさ土層の液状化強度

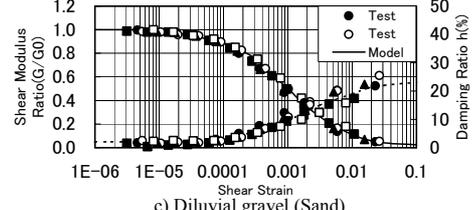
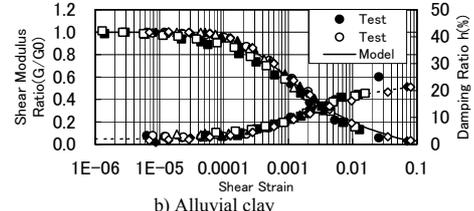
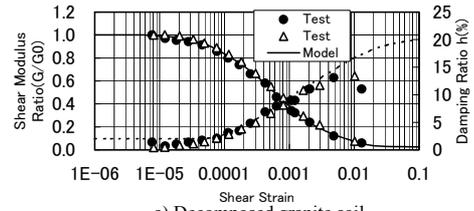


図-4 動的変形特性

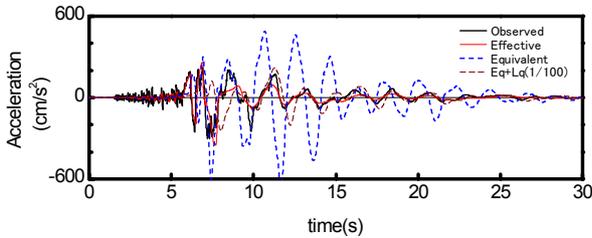
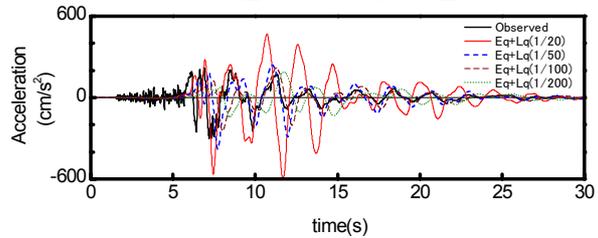


図-5 地表面応答加速度時刻歴の比較



Observed:観測記録 Eq+Lq:液状化を考慮した等価線形解析
Equivalent:等価線形解析 Effective:有効応力解析

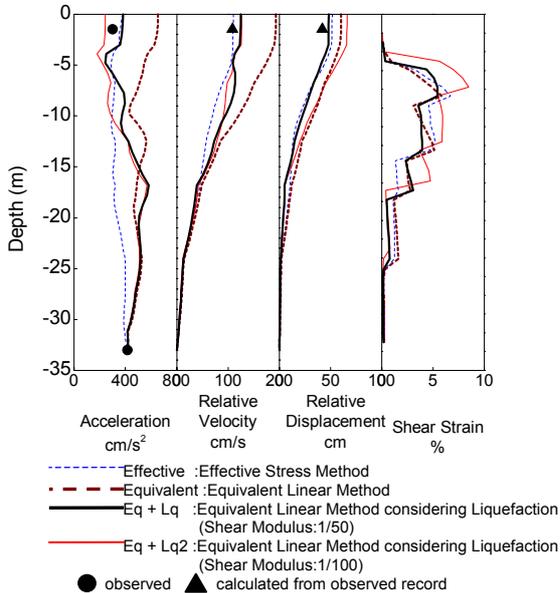


図-6 最大加速度分布の比較

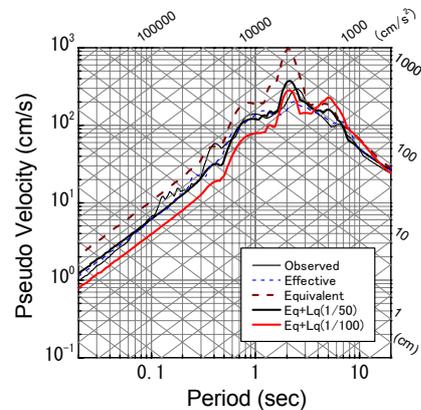


図-7 加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)
トリパタイト表示の比較

(3) 液状化層のせん断剛性の推定

力解析の液状化パラメータを示す。地盤の動的変形特性は、図-4に示すように近傍で得られた試験結果に基づいた。入力地震動には東神戸大橋で観測記録を、後ほど検討する建物の桁行き・梁間方向に変換した2成分のうち梁間方向のN334E成分を用いる。

最初の等価線形解析で得られた収束剛性(液状化層を除く)と、液状化判定結果を図-1に示す。まさ土層は全層液状化すると判断される。これを踏まえて液状化層のせん断剛性を低下させた液状化を考慮した応答解析の地表面加速度記録を観測記録、最初の等価線形解析、有効応力解析の結果と合わせて図-5に、最大応答値分布を図-6に、加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較を図-7に示す。

観測記録の加速度波形では、主要動の後半から、長周期成分が卓越し、振幅が減少しており、まさ土

層で液状化が生じたことが推察される。有効応力解析結果はこれをよく再現している。地下水位以下のまさ土層で過剰間隙水圧は、ほぼ初期有効上載圧まで達しており、液状化が発生したことを示している。まさ土層のひずみは3~6%に達している。

通常の等価線形解析の応答値は観測記録と比べ大きな違いが見られる。加速度波形は主要動の最初の2波以降において位相が進み振幅も非常に大きい。応答スペクトルは固有周期2秒の卓越が非常に大きく、一致度は低い。このように、通常の等価線形解析では、液状化過程や液状化した地盤の応答を評価するには困難が伴う。

液状化を考慮した等価線形解析(液状化層のせん断剛性を初期値の1/50, 1/100とした場合)の加速度時刻歴は、剛性が一定であることから、主要動の前半では位相遅れが見られるが、長周期化して振幅が減少し始める主要動の後半では周期、振幅などよく一致している。また、最大応答値も観測記録や有効応力解析の結果とよく一致する。せん断ひずみは有効応力解析結果ともほぼ一致し、3~7%程度である。応答スペクトルも、その形状、特に卓越周期が観測値に近い評価ができるのがわかる。このように、液状化の影響を考慮し、せん断剛性を適切に評価すれば、等価線形解析で地盤の液状化過程や液状化後の地盤震動を評価できると考えられる。

剛性低下の程度を小さく1/20とした場合は振幅が低減せず、逆に大きな振幅の応答を示す。低下を1/200とした場合は、波形が長周期化し振幅も小さい。以上の検討から、兵庫県南部地震で東神戸大橋のまさ土埋立地盤は液状化により概ね1/50~1/100程度まで剛性が低下し、せん断ひずみは3~6%程度であったと推定され、ポートアイランドに比べて、同じかやや大きい程度であったと考えられる。

3. 杭基礎構造物の被害の検証

(1) 液状化を考慮した多質点系等価線形解析による基礎構造物の応答の評価

a) 解析モデル

液状化後の地盤の震動変位が杭基礎構造物の挙動に対して支配的であるならば、液状化後のせん断剛性を的確にとらえて、それを用いた応答を考えれば、杭への影響は評価できると考えられる。そこで液状化の影響を考慮した等価線形解析を多質点系モデルに拡張し、等価な地盤応答により杭基礎構造物の被害の評価が可能であることを検証する。

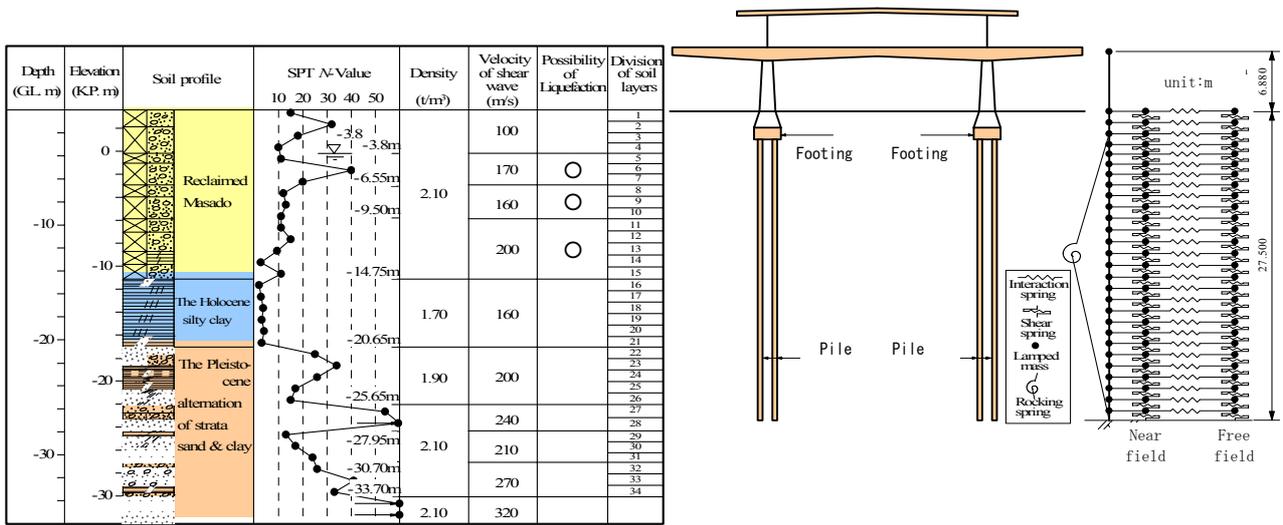
対象は東神戸大橋地震観測点と同じ埋立地内で被害を受けた杭基礎構造物²¹⁾である。三輪ら¹⁾は、自由地盤の応答を1次元有効応力解析で行い、その過剰間隙水圧の時刻歴を多質点系モデルに入力し、相互作用ばね・地盤ばねを低減する解析を実施し、被害過程と被害原因を明らかにしている。ここでは、これと比較して、まず、検討地点地盤モデルで1次元等価線形解析を実施する。次に多質点系モデルに

において、自由地盤・周辺地盤のせん断剛性は1次元等価線形解析で求めた収束剛性、液状化層についてはその影響を考慮して初期剛性を低下させ、相互作用ばねについては、これらのせん断剛性に基づいてMindlin-II解を用いて設定する。このようにして液状化の影響を考慮した地盤定数、相互作用ばねを与えた多質点系モデルによる線形解析により杭基礎構造物の地震応答解析を実施する。液状化層のせん断剛性は初期剛性の1/100と設定した。なお、多質点系の応答解析では減衰はひずみエネルギー比例型減衰とした。解析モデルを図-8に示す。G.L.-3.8mの地下水位以下、G.L.-14.75mまでのまさ土層が液状化の可能性のある層である。動的変形特性は図-4と同じである。多質点系モデルの入力地震動は、地盤の等価線形解析で得たG.L.-27mの波形とした。

b) 杭基礎の応答の評価

図-9に多質点系解析の最大応答値分布分布を有効応力解析の結果¹⁾と比較して示す。水圧上昇や液状化判定からG.L.-6.55m~G.L.-14.75mが液状化したと考えられる。曲げモーメントは構造物の加速度が最大の時刻(7.64秒前後)と地盤変形が最大の時刻(11.07秒前後)を示す。最大相対変位に関しては、有効応力解析と同等の結果である。しかし、有効応力解析では、構造物の加速度が最大の時刻において相対変位が小さいのに対し、液状化を考慮した等価線形解析では、せん断剛性が一定のため、その時刻においても、最大値と同程度の大きさの変位を示す。杭の曲げモーメントは全般的にやや大きい。有効応力解析で最大値を示したG.L.-6~-7m付近とG.L.-15m付近に大きなモーメントが生じている。液状化過程で地盤変形の影響が大きい時間帯(おおむね10秒以降)は有効応力解析の場合とほぼ同様な結果を示す。この応答は最大応答とほぼ一致し、杭の応答に対しては液状化過程、液状化後の地盤変形が支配的であることを示している。慣性力が大きいと考えられる時間帯の挙動は、等価線形解析ではせん断剛性が一定としているため異なるが、最大応答と同程度以下である。なお、両解析でのG.L.-7m付近の曲げモーメント分布の違いは、せん断ひずみが有効応力解析ではなめらかに変化するのに対し、等価線形解析では液状化層内で急激に変化するところがあることに起因すると考えられる。

図-10には、せん断剛性の違いが杭の応答に及ぼす影響を見るために、液状化層のせん断剛性が1/50と1/100の場合について、杭の応答を比較して示す。液状化層のせん断剛性の違いに関わらず、杭の曲げモーメントはせいぜい10~20%程度の違いであり、液状化層のせん断剛性の推定精度に倍半分程度の違いがあっても、杭の応答はおおよそ評価できるものと考えられる。同図には、地下水位以下のG.L.-3.8m~G.L.-6.55mも液状化した場合の応答も合わせて示すが、杭頭近くでの曲げモーメント分布の違いが明瞭であり、液状化の有無に関する判断の方が応答への影響が大きいことがわかる。



(G. L. ±m=K.P. +36m)

図-8 地盤柱状図と地盤-杭-構造物系の相互作用解析モデル

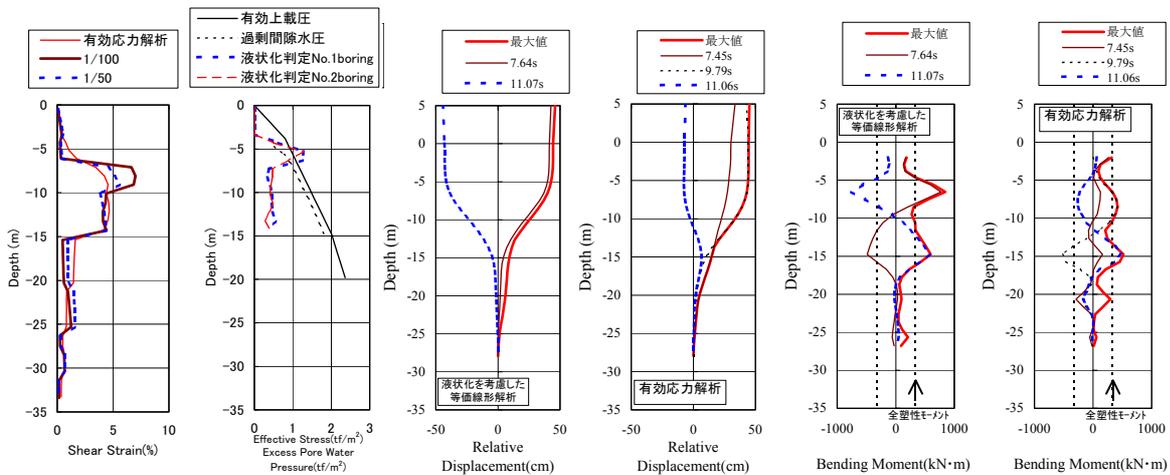


図-9 地盤-構造物連成系の最大応答値分布の比較

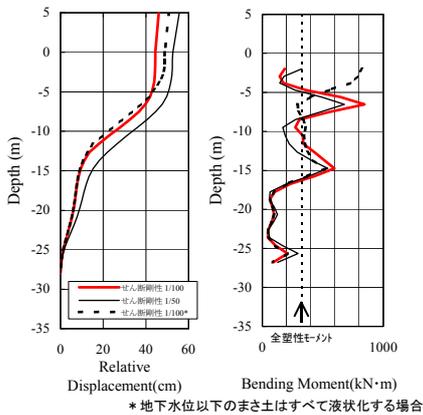


図-10 液状化層厚の影響

このように多質点系の等価線形法は、液状化の影響を適切に考慮すれば、損傷過程を時刻歴で追うのは難しいものの、液状化時の地盤変形の影響が支配的と考えられる杭基礎構造物の損傷の有無は判断でき、設計レベルにおいては有効な手法となると考えられる。なお、ここでは図示できないが、多質点系動的解析を行わず、液状化を考慮した地盤の等価線形解析と応答変位法を組合す方法でも同様な結果が得られ、簡易で有効な手法となると考えられる。

4. 様々な地点における液状化した地盤のせん断剛性・せん断ひずみの検討とその設定範囲

(1) 様々な地点での検討

液状化地盤のせん断剛性、せん断ひずみは、地盤の液状化強度特性、地震動の強度・継続時間などの地震動特性に影響を受けると考えられ、どの場合にも兵庫県南部地震の事例での検討範囲で設定できるとは限らない。そこで、兵庫県南部地震の他の地点、それ以外の地震で地震観測が実施されている地点などを対象にして、有効応力解析と液状化を考慮した等価線形解析の比較、あるいは観測記録と液状化を考慮した等価線形解析の比較を実施し、液状化時の液状化層のせん断剛性、せん断ひずみを推定した。

一例としてワイルドライフ観測点²²⁾の事例を示す。観測計器配置を図-11に示す。地表面加速度、P-5水圧計の過剰間隙水圧、2深度間の加速度記録の積分から得たせん断ひずみを図-12に示す。加速度でいう主要動が収束して、過剰間隙水圧が上昇し液状化に至る過程でせん断ひずみが最大となっており、兵庫県南部地震のように最初の数波で液状化にいたる衝撃的な地震動でない場合でも、液状化過程での地盤震動変位が大きいことがわかる。表層の非液状化

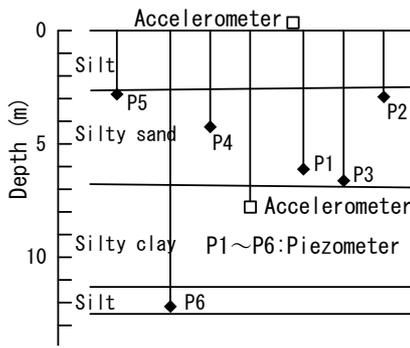


図-11 ワイルドライフ観測点の地盤構造と計器配置

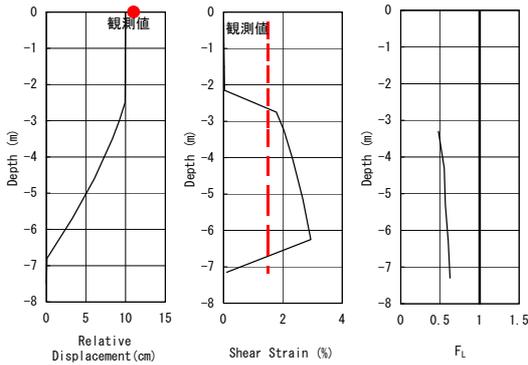


図-13 ワイルドライフ観測点における Superstitions Hill 地震の地震応答解析の最大応答値分布

層を含んだ平均的なせん断ひずみは 1.5%である。この地点に液状化を考慮した等価線形解析を適用した結果を図-13 に示す。液状化層のせん断剛性を 1/100 とした場合に、地表面相対変位を良く表し、そのときの液状化層のひずみは 2~3%であった。これは観測記録から得た非液状化層も含む平均的なせん断ひずみが 1.5%であったことと調和的である。また、観測記録の液状化後の部分の加速度応答スペクトルと解析のそれを図-14 に比較するが良い一致を示す。このような検討をいくつかの地点で実施した。

(2) 液状化した地盤のせん断剛性の設定範囲

様々な地震において、検討したせん断剛性低下程度を表-3 に整理して示す。等価 N 値が 10~15 以下の緩い砂層やまさ土層においては、 F_L が 0.6 を切って激しい液状化が予想される場合には、せん断剛性は 1/100 程度に低下し、せん断ひずみは 2%~6%の大きさとなるのが推定される。一方、 F_L が 0.6~0.8 の場合には 1/50 程度で、せん断ひずみは 1%と推定される。等価 N 値が 22 程度の密な砂層では、 F_L が 0.8 から 1.0 の範囲でその場合、せん断剛性は 1/40 程度、ひずみレベルは 1%~1.5%程度であった。締め固めによって地盤改良された地点では F_L は 0.7~0.9 でせん断剛性は 1/40~1/50 と推定された。

これらの事例を F_L とせん断剛性の低下の割合で整理したものを図-15 に、ひずみレベルと剛性低下の関係を図-16 に示す。 F_L の減少に伴いせん断剛性の低下も大きくなる。密な砂は F_L がせいぜい 0.6 程

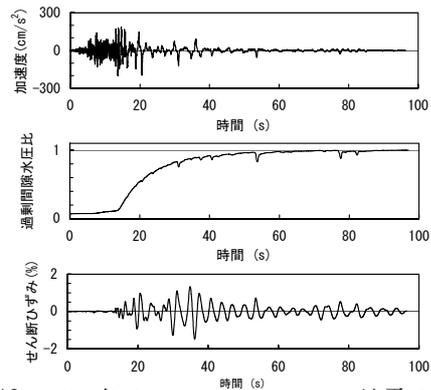


図-12 1987年 Superstitions Hill 地震での観測記録とせん断応力とせん断ひずみの時刻歴

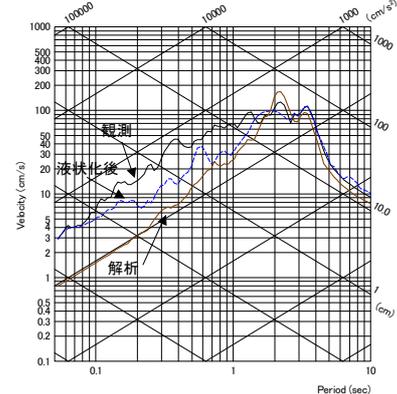


図-14 ワイルドライフ観測点における Superstitions Hill 地震の観測波と解析波の加速度応答スペクトルの比較 (h=5%)

度までで、せん断剛性の低下も初期剛性の 1/50 程度までにおさまっている。緩い砂では 0.3 程度まで F_L が低下し、せん断剛性も 1/50 を超え 1/100 程度まで低下する。ひずみレベルに着目すると、緩い砂では液状化の程度でひずみレベルが違い、せん断剛性が 1/50 程度の場合で 1~2%程度、1/100 の場合で 2~6%程度のせん断ひずみが生じている。密な砂はせん断剛性が 1/50 程度までしか低下せず、ひずみレベルは 1~1.5%程度である。このように、砂の締め固め方によってせん断剛性の低下やひずみレベルの程度に違いが見られるが、これは、図-15 に示すように、 F_L を用いた判定で評価できると考えられる。

なお、締め固め改良地盤は剛性低下は 1/50 程度であるが、ひずみが大きい。これはいずれも兵庫県南部地震の事例であり、地震動強度が大きかったこと、また、ひずみレベルの推定が数値解析のみによったため不確定な要因を含んでいることなどが、今後さらに検討の必要がある。

剛性低下とひずみの関係は、従来から用いられてきた動的変形特性の曲線に比べ、より大きなひずみレベルのものである。また、1%程度のひずみレベルで比べた場合、過剰間隙水圧の上昇の影響により剛性低下の程度が大きくなっている。このような大きなひずみレベルの動的変形特性のデータは、試験が難しいこともあってほとんどないのが現状である。風間ら²³⁾は一定ひずみ振幅の非排水繰返しせん断試

表-3 様々な地点の液状化した地盤のひずみレベルとせん断剛性低下

地点	地震	対象の土質	観測最大速度 (cm/s)	等価 N 値 (Na)	ひずみレベル (%)	せん断剛性の低下	FL	検討方法
東神戸大橋	1995年兵庫県南部地震	まさ土	89	11	3-6	1/50-1/100	0.3-0.5	観測記録と有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較
深江浜	1995年兵庫県南部地震	まさ土	(102)	14	4-6	1/100	0.3-0.5	観測記録と有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析、被害状況の比較
ポートアイランド	1995年兵庫県南部地震	まさ土	91	14	2-5	1/50-1/100	0.3-0.5	観測記録と有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較 (ひずみレベルは液状化層のみを評価しているため本文P2の値とは異なる。)
西宮浜	1995年兵庫県南部地震	まさ土(改良)	(121)	18	5	1/40-1/50	0.6-0.9	有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較
六甲アイランド	1995年兵庫県南部地震	泥岩材	(74)	18	3-5	1/40	0.8-0.9	有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較
ワイルドライフ	1987Superstitions Hill地震	緩いシルト質砂	31	11	2-3	1/100	0.4-0.6	観測記録の分析および観測記録と液状化を考慮した等価線形解析の比較
境港1	2000年鳥取県西部地震	中砂	57	15	2-5	1/100	0.5-0.6	観測記録と有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較
境港2	2000年鳥取県西部地震	密な中砂	57	22	1-1.5	1/40	0.8-0.9	観測記録と有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較
釧路港湾	1993年釧路沖地震	密な砂	61	23	1	1/30-1/40	0.9-1.0	観測記録と有効応力解析、液状化を考慮した等価線形解析の比較
釧路西港	1994年北海道東方沖地震	緩い砂	19	11	1	1/50	0.6-0.8	観測記録と液状化を考慮した等価線形解析の比較

()は解析

*ひずみレベルは解析における液状化層のひずみレベルから評価

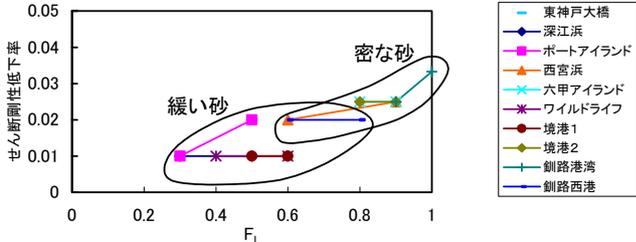


図-15 FLとせん断剛性低下率の関係

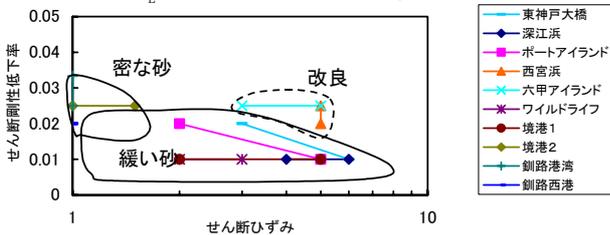


図-16 せん断ひずみとせん断剛性低下率の関係

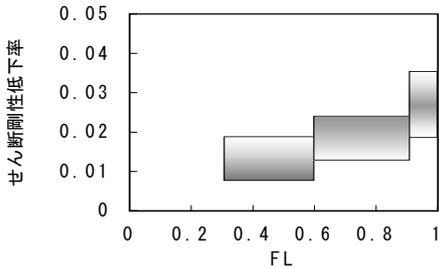


図-17 基礎構造を検討する場合の液状化の程度とせん断剛性低下率の関係

験に基づいて、過剰間隙水圧の上昇を考慮した剛性低下曲線を、まさ土について繰り返し回数 4 回に対して示している。これによれば、せん断ひずみが 1% でせん断剛性は初期剛性の 1/50、ひずみが 2~3% で剛性が 1/100 程度にまで低下し、ここでの検討結果と調和的である。また、建築基礎構造設計指針²⁴⁾では、等価 N 値(Na)の値により剛性低下率を示すおおよその指標として、Na=20 で 1/40、Na=10 で 1/130 程度を与えており、ここでの検討結果とほぼ同等である。

様々な土質材料のせん断剛性低下やせん断ひずみレベルを一括して示すには困難も伴うが、いくつかのサイト、いくつかの地盤材料に対して検討した、せん断剛性低下率は FL の値に対応してほぼ同程度の値を示した。土質材料の諸条件の違いが液状化抵抗を評価する際におおむね考慮されているものと考えれば、このような整理により、剛性低下率を規定して基礎構造物の応答を見るための地盤の挙動評価を行なうことができると考えられる。図-17 に基礎

構造の地震時挙動を検討する場合の液状化の程度とせん断剛性低下率の関係の指標を整理して提案する。このような大ひずみレベルのデータはまだ不十分であり、今後、室内試験や観測記録の分析の蓄積により、精度を高めることが可能と考えられる。

以上、液状化が発生した様々な地点の地震動記録を用いて、せん断剛性の低下、ひずみレベルを推定整理し、液状化抵抗率 FL を指標としたせん断剛性低下率のレベルを提案した。

5. 結論

基礎構造物に対して、液状化時の地盤震動変位の影響が大きいことを念頭におき、液状化時のせん断剛性を用いた杭基礎構造物の挙動の評価法を提案し、適用性を検討した。また、様々な地震や地点でのせん断剛性の低下の程度を検討し、液状化層のせん断剛性の設定レベルについて提案を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 最初に等価線形解析を行い、その結果に基づいた液状化判定により、液状化した地盤のせん断剛性をその液状化程度にあわせて低下させ、他の層は1回目の等価線形解析の収束剛性を用いて検討する2段階の解析を「液状化を考慮した等価線形解析法」と呼び、地盤応答だけでなく地盤構造物系の多質点系解析モデル、応答変位法モデルに拡張して提案した。
- 2) “液状化を考慮した等価線形解析”により、1993年兵庫県南部地震の東神戸大橋観測点の記録と比較することで、まさ土埋立地盤は液状化により、概ね 1/50~1/100 程度まで剛性が低下し、せん断ひずみは 3~6% 程度に達したと推定された。
- 3) “液状化を考慮した等価線形解析”による多質点系解析法を、杭基礎被害事例に適用し、損傷過程を時刻歴で追うのは難しいものの、地震時の液状化地盤中の杭の最大応答の評価に有効であること、また、せん断剛性の低下の程度が構造物基礎の応答に及ぼす感度はそれほど大きくないことを示した。
- 4) さまざまな地震における地震観測記録などをもとに、液状化層のせん断剛性低下の程度、せん断ひずみレベルを検討し整理した。緩い砂の場合、せん断剛性の低下は 1/100、せん断ひずみは 3~6% にもおおよぶこと、密な砂では剛性低下は 1/50 程度まで、せん

断ひずみは1~1.5%程度であることなどがわかった。これらの関係をもとに、液状化抵抗率 F_L を指標としたせん断剛性低下率の設定レベルを提案した。

謝辞:本研究には東神戸大橋地震観測点強震記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1)三輪滋, 池田隆明, 大岡弘: 1995年兵庫県南部地震で液状化した埋立て地盤に建つ鋼管杭基礎構造物の被害原因と被害過程の検討, 日本地震工学会論文集(投稿中)
- 2)風間基樹, 柳澤栄司: 神戸ポートアイランドの鉛直アレータを用いた兵庫県南部地震における地盤の応力-ひずみ関係の推定, 第23回地震工学研究発表会, pp185-188, 1995.
- 3)國生剛治, 佐藤清正, 松本正毅: 1995年兵庫県南部地震での地盤の非線形振動特性, 土と基礎, vol.43, No.9, pp39-43, 1995.
- 4)吉田郁政, 栗田哲史: 兵庫県南部地震の観測記録を用いたポートアイランド表層の逆解析土と基礎, vol.43, No.9, pp44-48, 1995.
- 5)川瀬博, 佐藤智美, 福武毅芳, 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.480, pp67-76, 1996.
- 6)鈴木猛康: ポートアイランドの強震記録を用いた地盤動的物性の同定解析, 第31回地盤工学研究発表会, pp1089-1090, 1996.
- 7)森尾敏, 北角哲, 日下部伸: ポートアイランド・鉛直アレー観測記録における波動の伝搬特性, 第31回地盤工学研究発表会, pp1093-1094, 1996.
- 8)宮田正史, 野津厚, 井合進: 兵庫県南部地震後の埋立地盤におけるせん断波速度の経時変化, 第31回地盤工学研究発表会, pp1131-1132, 1996.
- 9)望月雅弘, 神山真, 吉田勝: 相互相関からみたポートアイランド鉛直アレー記録の非線形応答特性, 土木学会第51回年次学術講演会, pp434-435, 1996.
- 10)三輪滋, 池田隆明, 鬼丸貞友: 兵庫県南部地震における埋立地盤の地震時挙動の検討(その2: 液状化したまさ土層に生じたひずみの検討) 第33回地盤工学研究発表会, 1998.
- 11)建設省土木研究所: 土木構造物における加速度記録 (No.21)土木研究所彙報, 第64号, 1995.
- 12)Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Vol.1, pp. 523-530, 1985.
- 13)Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 14) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Report EERC Univ. of California Berkeley*, 1972.
- 15)林宏親, 西川 純一, 谷口 啓二郎, 三輪 滋, 池田 隆明: 液状化アレー観測記録を用いた地盤の地震時挙動の検討, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1217-1222, 1998.
- 16)Miwa, S., Ikeda, T., Shimamoto, E. and Numata, A.: Earthquake Response Evaluation of Sites in Liquefied Areas, Proc. of 2nd Int. Symposium on The Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Vol.3, pp.1471-1478, 1998.
- 17)Miwa, S., Ikeda and Oh-oka H.: Study on Seismic Behavior of Liquefied Ground using Strong Motion Array Records of The 1995 Hyogoken-nambu Earthquake, Proc. 12WCEE, No.1325, 2000.
- 18)宇高竹和, 内田治, 田中典明, 佐藤博: 多重等価線形解析による液状化解析手法の提案, 土と基礎, Vol.48, No.8, pp.5-8, 2000.
- 19)Liao, S. S. C. and Whitman, R. V.: Overburden Correlation Factors for SPT in Sand, *J Geotech Engng, ASCE*, Vol.112, No.3, pp.373-377, 1986.
- 20)Yoshimi, Y., Tokimatsu K., Kaneko, O. and Makihara, Y.: Undisturbed Cyclic Shear Strength of a Dense Niigata Sand, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.131-145, 1984.
- 21)加藤史彦, 佐竹啓一, 廣瀬智治, 大岡弘, 時松孝次: 兵庫県南部地震で側方流動を受けた鋼管杭基礎建物の損傷調査, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 365-370, 1998.
- 22)Holzer, T. L., Youd, T., L. and Hanks, T., C.: Dynamics of Liquefaction during 1987 Superstition Hills, California Earthquake, *Science*, Vol.244, pp.56-59, 1989.
- 23)風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.161-177, 1999.
- 24)日本建築学会: 建築基礎構造設計指針(第2版), pp.68-69, 2001.

(2003. 6. 29 受付)

SHEAR MODULI AND STRAIN IN LIQUEFIED GROUND AND APPLICATION TO EVALUATION FOR RESPONSE OF FOUNDATION STRUCTURE

Shigeru MIWA and Takaaki IKEDA

It is effective to evaluate behavior of liquefied ground easily for seismic design of foundation structure. Effect of liquefaction to pile foundation will be evaluated by equivalent linear analysis, if rigidity of liquefied ground is evaluated properly because behavior of liquefied ground mainly affected to damage of deep foundation. In this paper, shear strain and rigidity of liquefied layer during Hyogoken-nambu earthquake are estimated and combination of equivalent linear analysis considering liquefaction and soil-structure-interaction analysis is proposed. Also applicability of this method is examined. Reduction ratio of rigidity related liquefaction resistance is proposed from analysis of shear strain and rigidity in some liquefied points.