第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

薄い液状化層が介在する地盤条件における杭基礎橋脚の液状化設計に関する試算

土井　達也[1]・井澤　淳[1]・鈴木　聡[2]・川﨑　佑斗[2]

[1]正会員　博（工）　（公財）鉄道総合技術研究所　鉄道地震工学研究センター　地震動力学研究室
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
[2]正会員　（株）複合技術研究所　解析技術部
（〒160-0004 東京都新宿区四谷1-23-6）

1. はじめに

液状化が発生する可能性がある地盤上に杭基礎橋脚を建設する場合，鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計[1)]（以下，耐震標準）では，液状化判定の結果によりその影響が大きいと判定された場合に液状化設計を行う．この液状化設計法の妥当性については，過去の地震において液状化が発生した箇所の構造物の応答や損傷をある程度の精度で把握できることが確認されている[2)]．

一方，1～2m程度の薄い液状化層が介在する地盤を対象とする場合は，これまでの経験上，液状化設計で構造物諸元が決まらない場合が多いが，液状化判定および液状化設計には大きな手間を要する．そこで本検討では，薄い液状化層を有する地盤上の杭基礎橋脚を対象に，液状化層の位置，非液状化層の諸元，構造諸元をパラメータとした非液状化設計および液状化設計を実施し，薄い液状化層の存在が耐震設計に与える影響について検討する．

2. 耐震標準における非液状化設計と液状化設計の概要

耐震標準では，液状化の影響を考慮する応答値算定手法として動的解析法と静的解析法による手法が示されているが，ここでは設計実務でよく用いられる静的解析法により，杭基礎橋脚の耐震設計を実施する手法について概説する．**図-1**に耐震標準に基づく橋りょう・高架橋の耐震設計フローを示し，非液状化設計と液状化設計それぞれについて説明する．

非液状化設計においては，応答値算定モデルを構築した後，構造物の耐力が十分低下するまでプッシュ・オーバー解析を実施し，構造物の破壊形態（曲げ破壊先行型，せん断破壊先行型）を確認するとともに，荷重～変位関係を算定する．次に，慣性力作用に対しては非線形スペクトル法（**図-2**参照）により，地盤の硬軟を表す地盤種別や，荷重～変位関係から求められる構造物の等価固有周期T_{eq}および構造物全体系の折れ曲がり点の震度k_{heq}より，所要降伏震度スペクトルを用いて応答塑性率を算定し，各

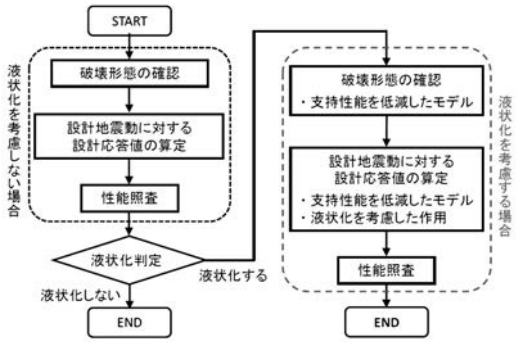


図-1　液状化を考慮した耐震設計フロー[3)]

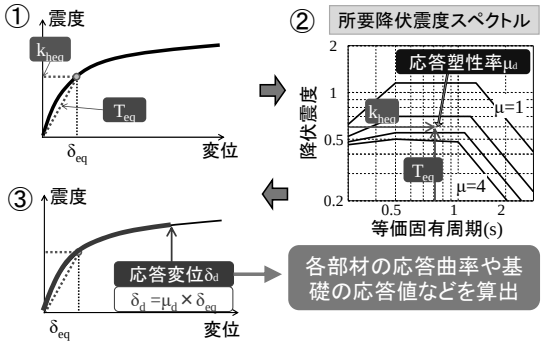
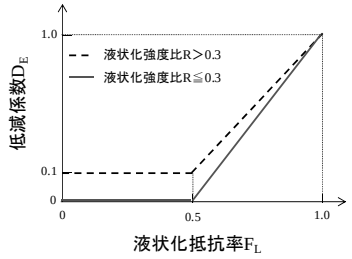
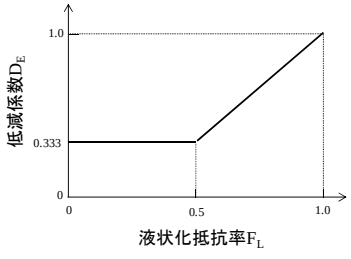


図-2　非線形応答スペクトル法の概要



(a) 0m≦z≦10m の場合



(b) 10m＜z≦20m の場合

図-3　地盤諸数値の低減係数D_E

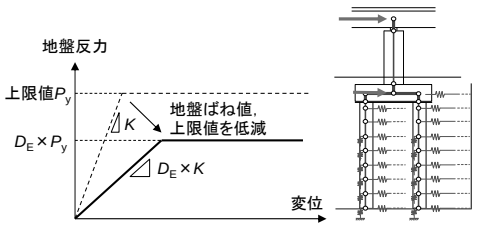


図-4　地盤反力係数の低減方法

部材の応答曲率や基礎の応答値などを算定する．さらに，G0地盤（岩盤）～G2地盤（洪積地盤など）を除く地盤では応答変位法により地盤変位作用に対する検討を行うが，このとき，慣性力作用と地盤変位作用の組み合わせを考慮する．

液状化設計については，対象地盤の液状化判定を行ったうえで，液状化の可能性があると判定された場合に実施する．液状化判定では液状化抵抗率F_Lと液状化指数P_Lを求め，P_Lに応じて，構造物に与える液状化の影響を以下のように考慮する．

$$F_L = R/L \tag{1}$$

$$P_L = \int_0^H (1 - F_L)\, w dz \tag{2}$$

$$w = 10 - 0.5z$$

ここで，F_Lは液状化抵抗率で，1.0 未満で液状化が生じる．Rは液状化強度比，Lは地震時最大せん断応力比である．wは液状化抵抗率の深さ方向の重み関数，zは地表面からの深さ(m)，Hは液状化の判定を考慮する表層地盤の厚さで，H≦20 m とする．

式(2)で算定したP_Lを用いて，構造物に与える液状化の影響を以下のように考慮する．

- P_L＜5：液状化の構造物への影響が小さい．一般に液状化設計は不要．
- 5≦P_L＜20：液状化の構造物への影響が大きい．液状化設計が必要．
- 20≦P_L：液状化の構造物への影響が極めて大きい．液状化設計が必要．

液状化地盤における地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトルは，P_L=20を境として2つに分類されている．さらに，**図-3**に示すように液状化抵抗率F_L，液状化強度比R，液状化層の深さzを用いて地盤諸数値の低減係数D_Eを算定する．

i) 5≦P_L＜20の場合，およびP_L≧20でD_E=0となる層がない場合は，**図-4**に示すように地盤反力係数Kと上限値P_yをD_E倍して低減させた応答値算定モデルを作成する．作成した応答値算定モデルを用いてプッシュ・オーバー解析を行い，P_Lの値に応じた液状化設計用の所要降伏震度スペクトルから慣性力作用に対する応答塑性率を算定し，各部材の応答曲率や基礎の応答値などを算定する．液状化時の地盤変位に対する影響については，非液状化設計で地盤変位に対する影響を検討することにより，検討を省略できる．

ii) P_L≧20でD_E=0となる層がある場合，慣性力設計ではD_E=0の層において最外縁の杭中心を囲む領域の地盤重量を考慮した慣性力を解析モデルに与える．地盤変位に対する影響は考慮しない．

なお，後述するように本検討では層厚2mの液状化層が1層の場合を検討対象とするが，液状化判定の対象となる20m以浅に介在する液状化層が2m以下である場合，P_L値が最大となる条件（液状化層上端が地表面にあり，F_L=0）でも

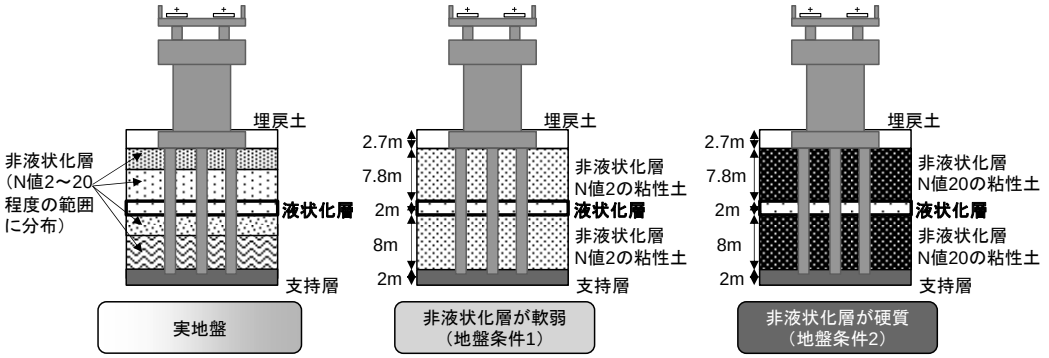
$$P_L = \int_0^2 (1 - 0) \cdot (10 - 0.5z) dz = 19 \tag{3}$$

となり，必ずP_L＜20となる．このため，本検討では5≦P_L＜20となる地盤条件を検討対象とする．

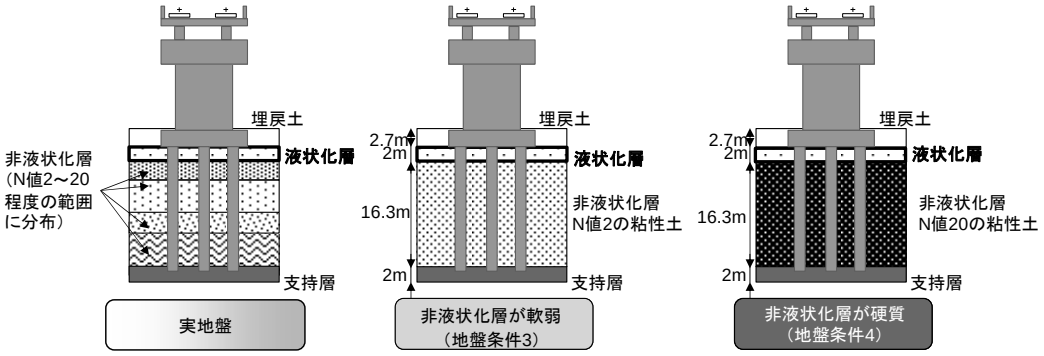
3. 試算の概要

(1) 地盤条件

本検討での地盤条件の設定にあたり，薄い液状化層および非液状化層の層構成や物性値を決める必要がある．**図-5**に地盤条件の設定の概要を，**表-1**に地盤条件を示す．表層地盤の全体層厚は液状化判定対象である20mと設定した．薄い液状化層の層数については，実際の地盤条件では複数層ある場合も考えられるが，本検討では単純な場合として1層の場合を検討した．また，薄い液状化層の層厚は2mと設定した．液状化層の位置については，**図-3**(a), (b)に示すように地表面からの深度zに応じてD_Eの値が変わるため，それぞれの場合で最もP_L値が大きい場合について検討することとし，液状化層の上端が地表面から10mの位置になる場合と，液状化層の上端が杭頭位置にある場合の2パターンを設定した．また，非液状化層は，実地盤でN値2～20程度の粘性土が分布している状況を考え，軟弱な側，硬質な側のそれぞれ最も極端な場合として，N値2の粘性土の場合と



(a) 液状化層の上端が地表面から 10m の深度の場合



(b) 液状化層の上端が杭頭位置の場合

図-5　地盤条件の設定の概要

表-1　地盤条件

(a) 液状化層の上端が地表面から 10m の深度

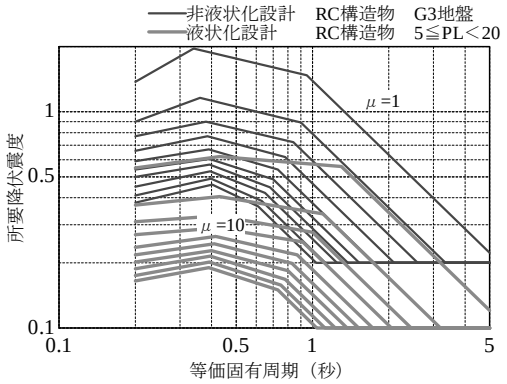
層番号	層厚 (m)	土質		*N* 値	土の単位体積重量(kN/m^3)		土の内部摩擦角 (deg.)	粘着力度 (kN/m^2)	地盤の変形係数 (kN/m^2)
					湿潤	水中			
0	2.70	埋戻土		-	15	5	-	-	-
1	7.80	粘性土	地盤条件 1	2	15	5	-	25.0	5530
			地盤条件 2	20	17	7	-	125.0	37761
2	2.00	砂質土（液状化層）		6	18	8	30.9	-	10016
3	8.00	粘性土	地盤条件 1	2	15	5	-	25.0	5530
			地盤条件 2	20	17	7	-	125.0	37761
4	2.00	砂礫		70	20	10	42.5	-	91446

(b) 液状化層の上端が杭頭位置

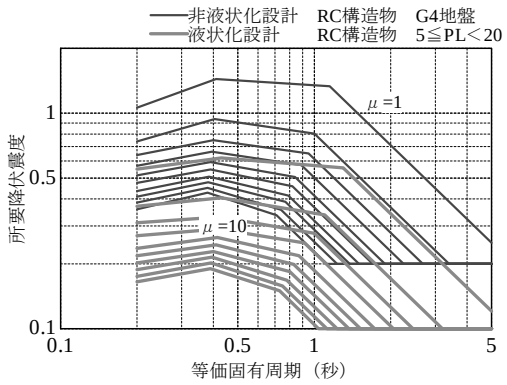
層番号	層厚 (m)	土質		*N* 値	土の単位体積重量(kN/m^3)		土の内部摩擦角 (deg.)	粘着力度 (kN/m^2)	地盤の変形係数 (kN/m^2)
					湿潤	水中			
0	2.70	埋戻土		-	15	5	-	-	-
1	2.00	砂質土（液状化層）		6	18	8	30.9	-	10016
2	15.80	粘性土	地盤条件 3	2	15	5	-	25.0	5530
			地盤条件 4	20	17	7	-	125.0	37761
3	2.00	砂礫		70	20	10	42.5	-	91446

N値20の粘性土の場合を検討した．液状化層の上端が地表面から10mの位置で非液状化層がN値2の粘性土の場合を地盤条件1，N値20の粘性土の場合を地盤条件2とする．また，液状化層の上端が杭頭位置にあり，非液状化層がN値2の粘性土の場合を地盤条件3，N値20の粘性土の場合を地盤条件4とする．**表-1**のN値以外の各パラメータは，橋脚の既設計事例を参考に設定した．

非液状化設計用および液状化設計用の所要降伏震度スペクトルの一例を**図-6**に示す．非液状化設計に比べて液状化設計では慣性力作用が低下するため，橋脚く体の破壊の照査については，非液状化設計のほうが厳しくなる．一方，液状化設計における杭体の破壊や基礎の安定の照査については，非液状化設計に比べて慣性力作用が低下するが，**図-4**に示すように地盤反力係数を低減した影響により，基礎の地



(a) 非液状化設計（G3 地盤）用と液状化設計（5≦P_L＜20）用の比較



(b) 非液状化設計（G4 地盤）用と液状化設計（5≦P_L＜20）用の比較

図-6　上部工（RC 構造物），L2SpII 地震動に対する所要降伏震度スペクトルの一例 [1)]

表-2　検討ケース

ケース	く体諸元（**図-8** 参照）	液状化層の位置，層厚	非液状化層の地盤条件	地盤種別	液状化指数 P_L	薄い液状化層の低減係数 D_E
Case 1	仕様①	地表面から 10m，液状化層厚 2m	N 値 2 粘性土（地盤条件 1）	G4（普通～軟弱地盤）	7.18	0.333
Case 2	仕様②					
Case 3	仕様③					
Case 4	仕様④					
Case 5	仕様①		N 値 20 粘性土（地盤条件 2）	G3（普通地盤）	7.34	0.333
Case 6	仕様②					
Case 7	仕様③					
Case 8	仕様④					
Case 9	仕様①	層上端が杭頭位置，液状化層厚 2m	N 値 2 粘性土（地盤条件 3）	G4（普通～軟弱地盤）	12.9	0.100
Case 10	仕様②					
Case 11	仕様③					
Case 12	仕様④					
Case 13	仕様①		N 値 20 粘性土（地盤条件 4）	G3（普通地盤）	13.2	0.100
Case 14	仕様②					
Case 15	仕様③					
Case 16	仕様④					

盤抵抗も同時に小さくなる．つまり，作用と抵抗の双方が低下する影響を受けることになり，これらの影響の大小により，非液状化設計，液状化設計のどちらのほうが厳しいかが決まる．

(2) 検討ケースおよび構造物諸元

本検討では，一般的な杭基礎橋脚の設計条件の中から，橋脚のく体高さと上部工荷重を2パターンずつ変化させた条件を設定した．検討ケースを**表-2**に，各ケースの非液状化設計で考慮した地盤変位を**図-7**に，考慮したく体諸元を**図-8**に示す．橋脚のく体高さは5mと15mとし，上部工荷重は橋脚の起・終点にそれぞれ同一の桁長（L=10m，L=30m）のRC桁とした場合を想定した．上部工重量はL=10mの場合で2500kN，L=30mの場合で9500kNとした．橋脚く体高さおよび上部工荷重により，杭の配置や橋脚く体の断面形状と配筋仕様を変化させた4種類の諸元にて検討した．なお，杭は，直径D=1.5mの円形断面とし，種類は場所打ち杭とした．また，各ケースに

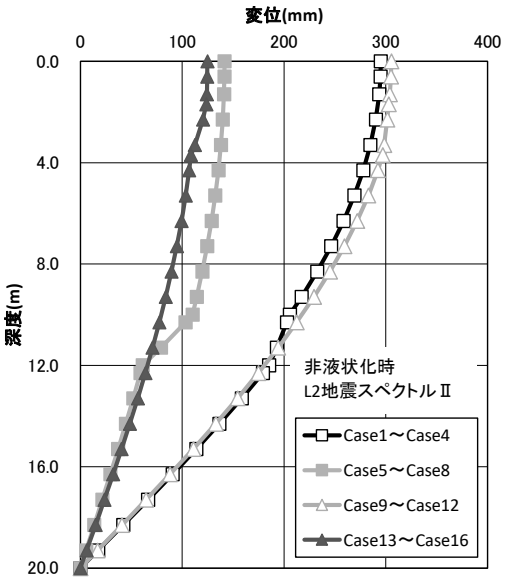
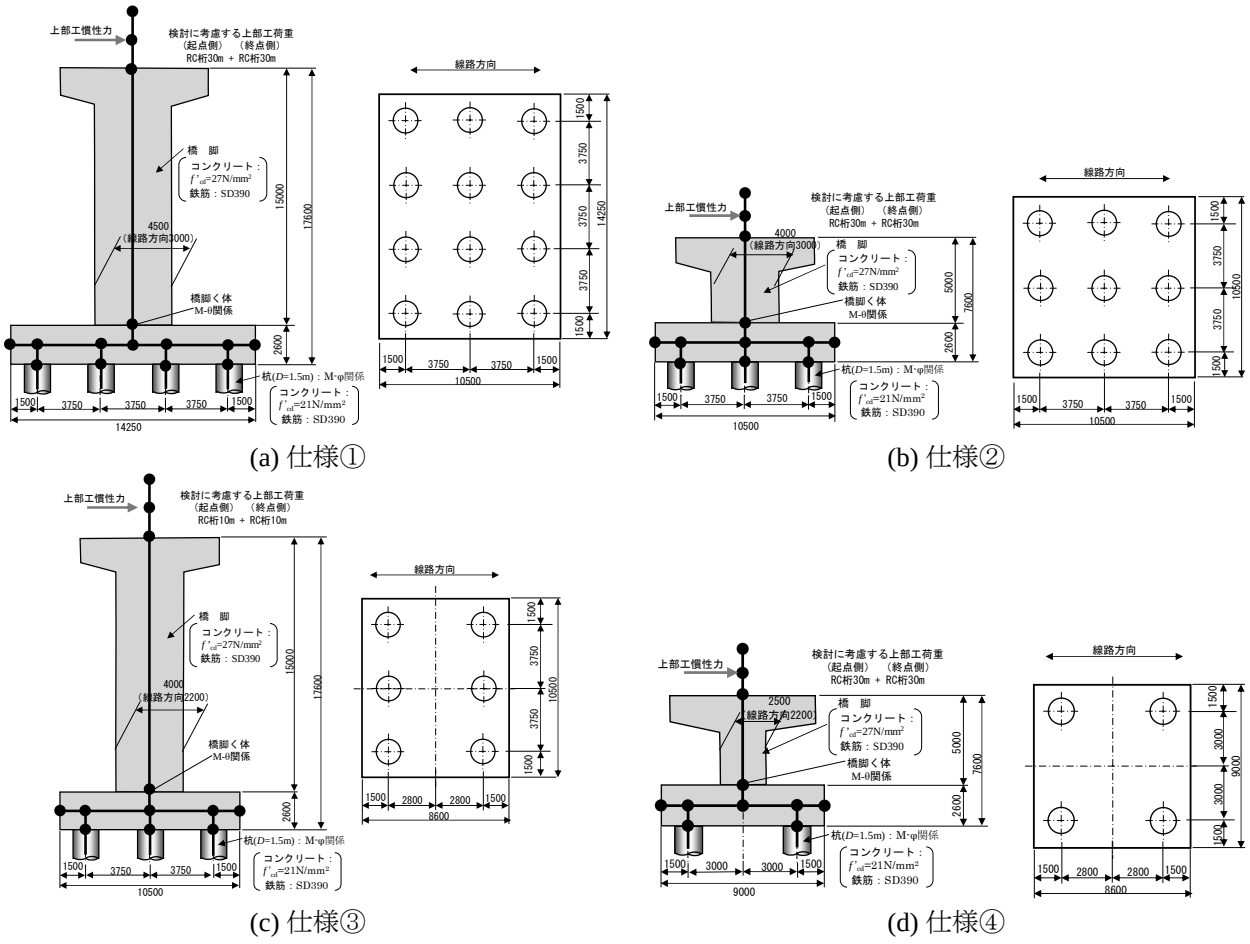


図-7　非液状化設計で作用させた地盤変位

おける基礎橋脚の諸元を**表-3**に示す．表中の杭の鉄筋比は，杭頭部（2D区間）と杭頭部以外の2種類の



(a) 仕様①　(b) 仕様②

(c) 仕様③　(d) 仕様④

図-8　く体諸元

値を示しており，（　）内に杭頭部以外の鉄筋比の値を示す．

プッシュ・オーバー解析に用いる応答値算定モデルの作成にあたって，せん断スパンが明らかである橋脚く体は，橋脚く体基部からスラブ上面までをせん断スパンに設定したM-θ関係で非線形特性を考慮した．杭部材は，曲げモーメントが曲線分布と予想されることから，要素長を杭径Dに対して0.5D～1.0Dになるように設定して，非線形特性をM-ϕ関係で設定した．このとき，コンクリートの材料特性は，橋脚く体：f'_{cd}=27 N/mm²，杭：f'_{cd}=21 N/mm²とし，鉄筋の種類はSD390を用いた．なお，橋脚の基部以外の部材とフーチング部材は剛体としてモデルを作成した．

非液状化設計での慣性力作用に関係する地盤種別は，モード解析法による固有値解析の結果より，地盤条件1，3ではG4地盤（普通～軟弱地盤），地盤条件2，4ではG3地盤（普通地盤）となった．

杭基礎の地盤抵抗モデルは，鉄道構造物等設計標準・同解説　基礎構造物[4]（以下，基礎標準）に準じて，杭周面の水平地盤ばね，杭先端の鉛直地盤ばね，杭周面の鉛直ばねを考慮した．杭周面の水平地盤ばねは，杭周面の水平地盤反力係数に抵抗面積を乗じた地盤定数を初期勾配とし，有効抵抗土圧を上限値としたバイリニア型の非線形モデルとした．液状化時の設計では，耐震標準に準拠した液状化判定の結果，L2地震動スペクトルIIでP_L=7程度となり，液状化による地盤諸数値の低減係数D_Eは0.333または0.1となった．このため，液状化層の範囲では地盤ばね値と上限値を**表-2**に示すD_E=0.333または0.1を乗じて低減した．

表-3　本検討における杭基礎橋脚の諸元

く体諸元	橋脚く体高さ	上部工荷重	杭配置	橋脚く体			杭	
				断面形状	引張鉄筋比	せん断補強鉄筋比	引張鉄筋比	せん断補強鉄筋比
①	15m	RC桁30m	3本×4本	3.0m×4.5m	0.560	0.571	0.270 (0.270)	0.413 (0.344)
②	5m		3本×3本	3.0m×4.0m	0.198	0.571		
③	15m	RC桁10m	2本×3本	2.2m×4.0m	0.305	0.347	0.270 (0.172)	
④	5m		2本×2本	2.2m×2.5m	0.271	0.347		

4. 試算結果と考察

一例として，Case 1のプッシュ・オーバー解析による荷重変位曲線を**図-9**に示す．非液状化時と液状

化時の結果を比較すると，本検討では，構造物全体系の折れ曲がり点と原点を結んだ割線剛性が液状化により若干低下する程度であった．本検討では，液状化層厚が2mと薄いため，液状化による構造物への影響が少なかったためと考えられる．L2地震動スペクトルIIの所要降伏震度スペクトルを用いて算定した最大応答震度k_hは，非液状化時でk_h=0.584，液状化時でk_h=0.520となることから，液状化設計で考慮する慣性力は，非液状化時に比べて1割程度小さくなった．全ケースの構造物の等価固有周期，応答変位，最大応答震度を**図−10**に示す．各ケースとも，非液状化設計と液状化設計で荷重〜変位関係にそれほど大きな差は生じなかったため，等価固有周期には大差はない．一方，応答変位や最大応答震度は各ケースとも液状化設計で小さくなっている．つまり，液状化設計で考慮する慣性力作用は，非液状化時より小さくなっていることがわかる．

L2地震動に対する安全性の照査は，耐震標準および基礎標準に準拠して行った．安全性の照査は，式(4)で橋脚く体と杭の破壊の照査を行うとともに，式(5)，(6)により基礎の安定の照査を行った．なお，本照査に用いる構造物係数γ_iは，L2地震動に対する安全性の照査のため1.0を用いた．

橋脚く体の破壊の照査：　$\gamma_i \cdot \theta_d/\theta_{nd} \leq 1.0$

杭の破壊の照査：　$\gamma_i \cdot \phi_d/\phi_{nd} \leq 1.0$　(4)

ここで，橋脚く体は，部材角θ_dが損傷レベル3の制限値であるθ_{nd}以内となることを照査した．杭は，部材の曲率ϕ_dが損傷レベル3の制限値ϕ_{nd}以内であることを照査した．

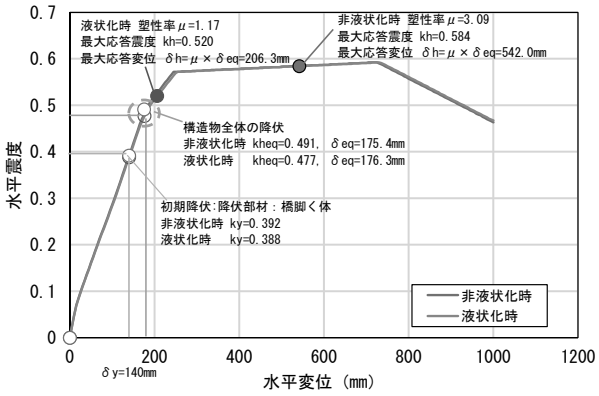
地盤の破壊に対する照査：　$\gamma_i \cdot V_d/R_{vd} \leq 1.0$　(5)

ここで，V_dは杭頭部の設計鉛直力で，R_{vd}は，設計鉛直支持力である．本照査に用いる設計鉛直支持力は，杭先端沈下量が杭径の10%に至るときの終局支持力に相当する．

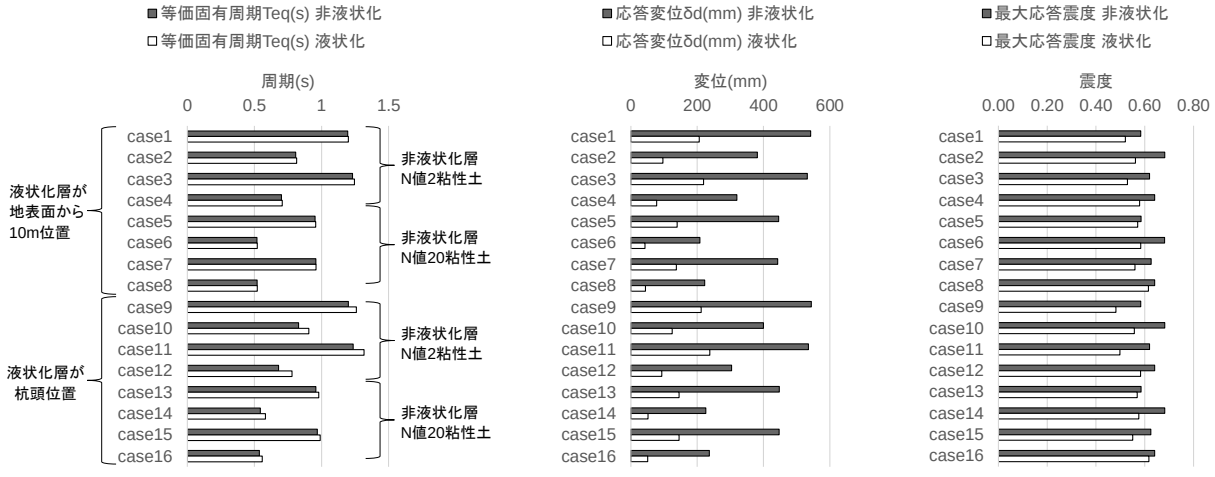
回転安定に対する照査：　$\gamma_i \cdot \theta_d/\theta_{Ld} \leq 1.0$　(6)

ここで，設計応答値θ_dは，フーチングの天端中心位置での最大回転角であり，設計限界値θ_{Ld}は，30/1000 radである．なお，L2地震時の液状化時の基礎の水平安定の照査については，構造計画段階で液状化時の基礎の過大な変位の発生を避けるための配慮（支持層や地表面の傾斜のある場所を避けて建設位置を選定する，常時荷重の偏心を小さくする，地中梁を有するラーメン高架橋または剛なフーチングを有する杭基礎を採用する，等）を行う前提で省略できる[5]こととされている．本論文では上記条件を満たすと仮定し，検討を省略する．

以下，本論文では$\gamma_i \cdot \theta_d/\theta_{nd}$などといった（構造物係数）×（設計応答値）／（設計限界値）の値を「照査値」と呼ぶ．また，本論文では性能項目（く体，杭部材の破壊，基礎の安定）ごとに非液状化設計，液状化設計の両方を行い，照査値が大きい場合について，「設計が厳しい」と表現する．

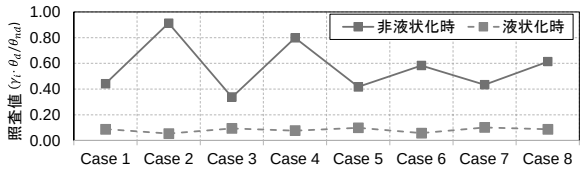


図−9　Case 1の荷重変位曲線

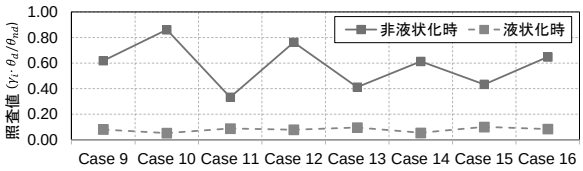


(a) 等価固有周期　(b) 応答変位　(c) 最大応答震度

図−10　全ケースの構造物の等価固有周期，応答変位，最大応答震度

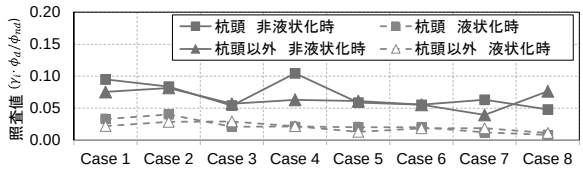


(a) 液状化層上端が地表面から 10m 位置のケース

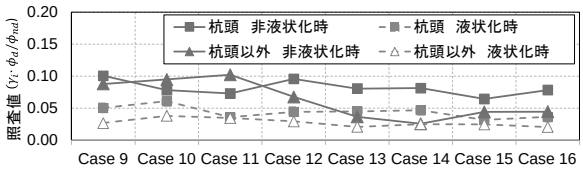


(b) 液状化層上端が杭頭位置のケース

図-11 く体の破壊の照査結果

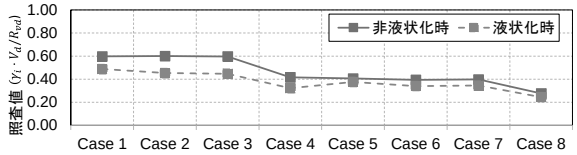


(a) 液状化層上端が地表面から 10m 位置のケース

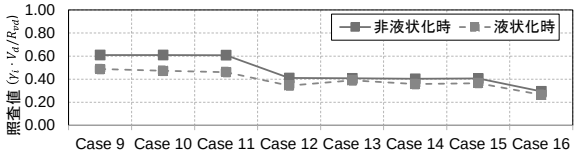


(b) 液状化層上端が杭頭位置のケース

図-12 杭の破壊の照査結果

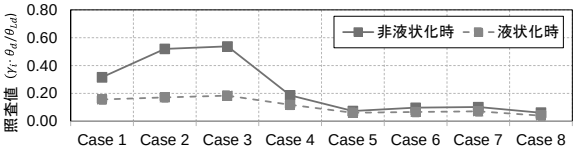


(a) 液状化層上端が地表面から 10m 位置のケース

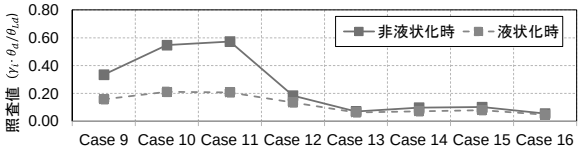


(b) 液状化層上端が杭頭位置のケース

図-13 地盤の破壊の照査結果



(a) 液状化層上端が地表面から 10m 位置のケース



(b) 液状化層上端が杭頭位置のケース

図-14 回転安定の照査結果

橋脚く体の破壊の照査結果を**図-11**に示す．また，基礎の安定の照査結果として，杭の破壊の照査結果を**図-12**に，地盤の破壊の照査結果を**図-13**に，回転安定の照査結果を**図-14**に示す．**図-11**より，く体に関しては上述した慣性力作用の低下のみの影響を受けるため，く体の照査は非液状化設計のほうが液状化設計より厳しくなっている．一方，**図-12**～**図-14**をみると，基礎の安定の照査はいずれも非液状化設計のほうが照査値が大きい，つまり非液状化設計のほうが照査が厳しくなっている．3章で示したとおり，液状化設計では慣性力作用が非液状化設計に比べて低下するが，地盤諸数値の低減係数D_Eにより基礎の地盤抵抗も同時に小さくなる．本検討に用いた地盤条件では，慣性力作用の低下による影響が大きいものと考えられる．

これらの結果から，本検討で検討した薄い液状化層が介在する地盤条件においては，液状化設計が決定要因になる性能項目がないことを確認した．なお，非液状化層がN値20の粘性土の場合（地盤条件2，4）では，非液状化層がN値2の粘性土の場合（地盤条件1，3）に比べて，非液状化設計と液状化設計の照査値の値が近くなる傾向があることが確認された．このため，非液状化設計で照査値に余裕のない（照査値が1.0に近い）設計を実施した場合に，液状化設計の照査値も非液状化設計と同様に余裕がない状態になることが考えられる．ただし，実際の薄い液状化層が介在する地盤で非液状化層がすべてN値20程度の粘性土のような硬質地盤に該当することは稀であると考えられるため，一般には問題にならないと考えられる．

5. まとめ

本検討では，設計実務上の負担軽減を目的に，杭基礎橋脚を対象に，液状化層の位置，非液状化層の諸元，構造諸元をパラメータとした非液状化設計および液状化設計を実施し，液状化設計を省略できる条件について検討した．本検討で得られた知見を以下に示す．

(1) 液状化層の層厚が2m以下の場合は，液状化指

数P_Lが必ず20未満となり，鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計における，P_Lが20以上（液状化の影響が極めて大きい）地盤には該当しない．

(2) 橋脚く体については慣性力作用の低下の影響により，液状化設計では非液状化設計よりも照査値が小さくなり，液状化設計では設計が決まらない．

(3) 基礎の安定については，慣性力作用の低下の影響と地盤抵抗の影響の双方を受けるが，今回検討したような液状化層が2mと薄い場合には，すべてのケース，性能項目で液状化設計では非液状化設計よりも照査値が小さくなり，液状化設計では設計が決まらない．

(4) 非液状化層がN値20の粘性土の場合では，非液状化層がN値2の粘性土の場合に比べて，非液状化設計と液状化設計の照査値の違いが小さくなる．非液状化層がN値20の粘性土の場合に非液状化設計で照査値に余裕のない（照査値が1.0に近い）設計を実施した場合に，液状化設計の照査値も非液状化設計と同様に余裕がない状態になることが考えられる．ただし，実際の地盤で非液状化層がすべてN値20程度の地盤に該当することは稀であると考えられるため，一般には問題にならないと考えられる．

今後は，本試算結果をもとに液状化設計を省略できる条件を提示するフローの作成や，液状化層が2層以上ある場合の省略条件の検討などに取り組んでいきたい．

参考文献

1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計，丸善，2012.
2) 井澤淳，西岡英俊，室野剛隆：東北地方太平洋沖地震における液状化地盤上の鉄道高架橋に関する検証解析，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，2012.
3) 井澤淳，山本昌徳，神澤拓，小島謙一：エネルギー法により液状化の影響を考慮した鉄道橋脚の応答値算定手法に関する基礎的検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 15, No. 1, pp. 39-51, 2020.
4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　基礎構造物，丸善，2012.
5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計　橋梁および高架橋耐震照査の手引き～静的非線形解析による照査～，2017.