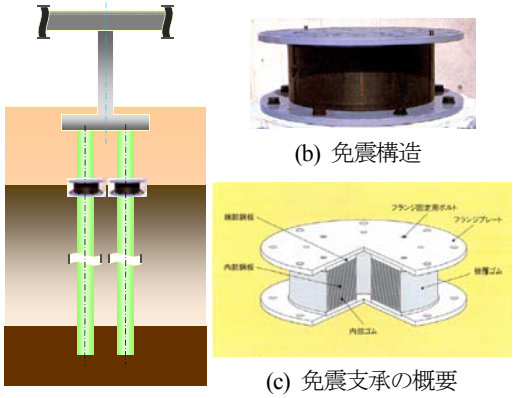
液状化地盤における橋梁杭基礎の免震構造を用いた耐震性向上策に関する一考察

五洋建設㈱　技術研究所　学生会員　○宇野　州彦
九州大学大学院　工学研究院　フェロー　大塚　久哲
五洋建設㈱　技術研究所　正 会 員　三藤　正明

１．はじめに

杭基礎の地震時特性に関しては，地盤－構造物系の動的相互作用に関する研究が多く[例えば 1)~4)]，液状化地盤においては，谷本ら [5)]が橋梁基礎の耐震性能照査法として，応答変位法を用いる場合においての課題を挙げている．液状化が生じる地盤においては，杭基礎構造物は地震時慣性力に加え，地震時の液状化・側方流動等で大きな断面力の発生する箇所が液状化層・非液状化層の層境界，あるいは液状化層中で土質定数が大きく異なる箇所において見られ，これらの箇所において杭の塑性化や損傷を招くことが知られている．

そこで本研究では，液状化層と非液状化層の層境界部に**図-1** に示すような免震構造を想定し，杭の層境界部に発生する断面力が低減できるかを解析的に検討した．



(a) 構造イメージ　(b) 免震構造　(c) 免震支承の概要

図-1　免震構造を想定した杭基礎のイメージ

２．モデル化手法および解析条件

今回の解析には，地震時の液状化による構造物被害予測プログラム FLIP[6)]を用いた動的有効応力解析を行った．FLIP を用いた液状化地盤と杭との相互作用を考慮した解析としては，いくつかの文献[例えば 7)]や研究報告 [8)]あり，モデル化に際しては，これらの手法を参考とした．解析モデルを**図-2** に示す．対象となる地盤は，図に示すような層からなり，D 層は線形平面要素で，それ以外はマルチスプリング要素でそれぞれモデル化し，飽和土において多重せん断メカニズムに基づく有効応力を考慮した．今回の対象地盤は，Bs 層の地下水位以深と Bsm 層が液状化地盤となる．地盤パラメータを**表-1** に示す．杭に関しては，外径 600mm のコンクリート充填鋼管杭を想定し諸元を設定した．また，杭の節点と対応する地盤の節点は相互作用ばねで連結した．ばねのモデル化にあたっては，今回のモデルは奥行き方向には単杭を想定していることから，奥行き方向の杭間隔は 10D（D：杭径）とした [8)]．解析全体のモデルを**図-3** に示す．対象領域は約 150m で深度方向には 36m モデル化している．解析に用いる入力地震動を**図-4** に示す．積分時間間隔は 0.01 秒とした．また動的解析における計算の安定化のための Rayleigh 減衰は，α=0.0, β=0.0002 とした．β に関しては，対象地盤の 1 次元の非液状化解析における動的変位が収束するまで計算した値で設定した．

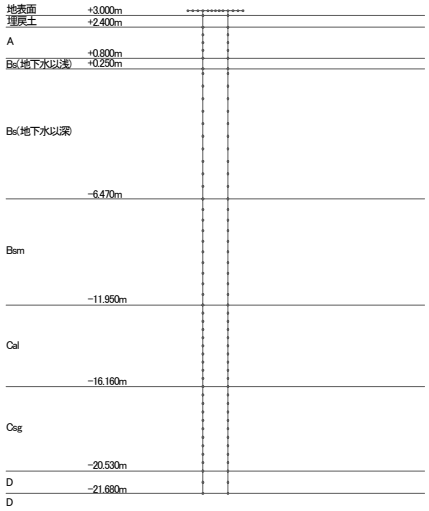


図-2　解析対象モデル

表-1　地盤パラメータ

パラメータ		埋戻土	A	Bs (地下水位以浅)	Bs (地下水位以深)	Bsm	Cal	Csg
密度	ρ(t/m^3)	1.94	1.94	1.94	2.04	1.84	2.04	2.04
間隙率	n	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
基準拘束圧	σma(kPa)	4.28	19.95	54.86	101.63	145.58	169.28	207.53
初期せん断剛性	Gma(MPa)	66.9	61.4	61.4	61.4	117.0	205.0	667.0
初期体積弾性係数	Kma(MPa)	174.5	160.1	160.1	160.1	305.1	534.6	1739.4
ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
初期せん断剛性の有効応力依存性	mG	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
初期体積弾性係数の有効応力依存性	mK	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
せん断抵抗角	φf(deg.)	28	33	33	33	35	36	37
粘着力	C(kPa)	0	0	0	0	0	0	0
履歴減衰の上限値	hmax	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
変相角	φp(deg.)				28	28		
液状化特性全体の規定パラメータ	W1				6.05	12.62		
液状化特性前半の規定パラメータ	P1				0.5	0.5		
液状化特性後半の規定パラメータ	P2				0.946	0.706		
液状化発生の下限値の規定パラメータ	C1				2.524	7.113		
液状化の終局状態の規定パラメータ	S1				0.005	0.005		

キーワード　液状化地盤，橋梁杭基礎，免震構造，有効応力解析，動的相互作用
連絡先　〒329-2746　栃木県那須塩原市四区町 1534-1　五洋建設株式会社　技術研究所　TEL 0287-39-2109

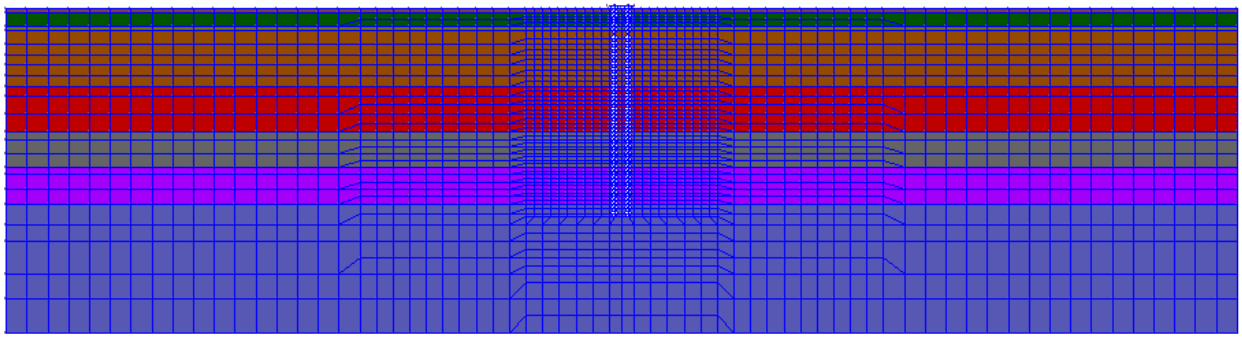


図-3　解析全体モデル

３．解析結果

解析結果を図-5，図-6 に示す．ここでは 7，杭に発生する曲げモーメントが大きかった加震開始 5 秒後と 8 秒後の結果を示している．結果から，免震構造を用いることにより杭中間部に発生する断面力が低減できることが分かる．また，免震構造を用いることで全体の応答が低減できること，杭に発生するモードにおいて高次モードの出現率が増えることで，杭頭に発生する曲げモーメントも低減できる可能性が示唆される．

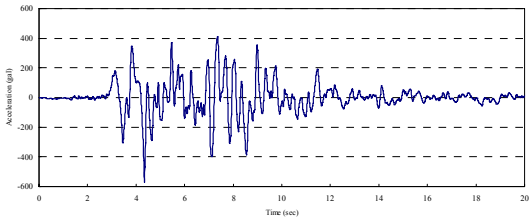


図-4　入力地震動

４．まとめ

以上の検討内容により得られた知見を以下に示す．

1) 液状化地盤の層境界部に免震構造を用いることにより，杭に発生する断面力を低減することができ，免震構造を用いることによる耐震性向上策の可能性を示すことができた．
2) 杭中間部に免震構造を用いることで，杭をはじめ構造物全体の応答を低減できることが推察される．また杭の高次モードが比較的発生することにより，地盤との動的相互作用がより大きくなると考えられることから，杭頭に発生する断面力の低減にも繋がると示唆される．

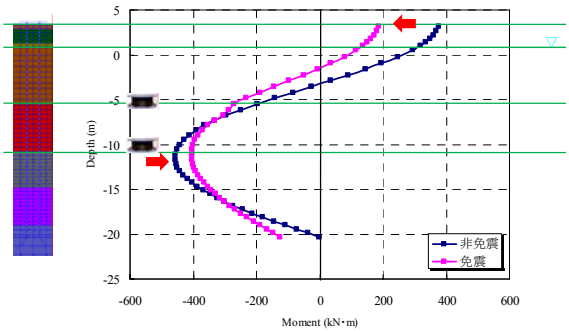


図-5　杭に発生する曲げモーメント（t=5.0[s]）

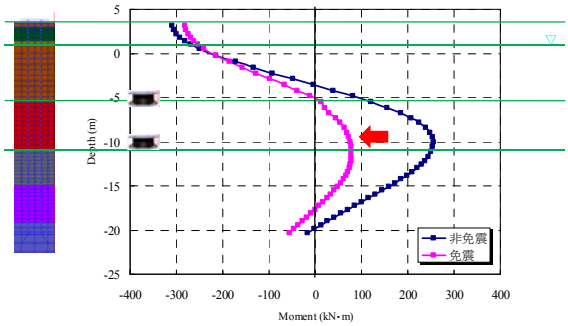


図-6　杭に発生する曲げモーメント（t=8.0[s]）

【参考文献】

1) 宇野州彦，大塚久哲，三藤正明：橋梁杭基礎に対する地盤液状化と地震時慣性力の影響に関する実験的研究，第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会，I-35，2011.3
2) Kunihiko Uno, Hiroo Shiojiri, Kazuhiro Kawaguchi and Masataka Nakamura : Analytical Method, Modeling and Boundary Condition for the Response Analysis with Nonlinear Soil-Structure Interaction，The 14th World Conference on Earthquake Engineering，No.14-0156，2008.10
3) 宇野州彦, 塩尻弘雄, 李京奉：PML を用いた FEM 地盤モデルの動的挙動特性　－地震動入力による応答と表面波に対する影響評価－，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）［特］地震工学論文集，Vol.66，No.1，pp.95-104，2010.
4) 冨澤幸一，西本聡，橋本至：2003 十勝沖地震の液状化に伴う橋梁基礎杭の変状事例，液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム，(社)地盤工学会，pp.217-220，2004.12
5) 谷本俊輔，杉田秀樹，高橋章浩，林和幸：液状化時の地盤変位を考慮した橋梁基礎の耐震性能照査法に関する試算検討，液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム，(社)地盤工学会，pp.185-188，2004.12
6) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soil and Foundations，Vol.32，No.2，pp.1-15，1992.
7) 溜幸生，小堤治，井合進，芥川博昭：液状化地盤と杭の相互作用を考慮した大型振動台実験の２次元有効応力解析，第 42 回地盤工学研究発表会，pp.1665-1666，2007.7
8) 第２期ＦＬＩＰ研究会　杭基礎作業部会：杭基礎のモデル化手法の検討　平成１４年度成果報告書，2003.7