道路橋杭基礎の地震時地盤変位に対する耐震性能評価チャートの開発

愛媛大学　フェロー　森 伸一郎　学生会員○山崎 竜馬
西日本高速道路　特別会員　明石 達雄　森 春樹　冨田 雄一
西日本高速道路エンジニアリング四国　正会員　明石 行雄
芙蓉コンサルタント　正会員　須賀 幸一

1. はじめに

森[1]が提案している概念に基づき，地震時地盤変位に対する耐震性能を判断できる道路橋の既存杭基礎の耐震スクリーニングのための杭評価チャートを開発した[2]．本論文では，その解析方法と結果を述べる．

2. 解析モデル

(1) 杭の解析モデル

杭-地盤系は，Winkler ばねに支持された杭頭部が水平自由，回転拘束の境界条件を有する梁としてモデル化する．その地盤ばねと杭は線形とする．そして先端支持杭とし支持層貫入部分の抵抗は杭先端の境界条件に反映させ，水平ばね，回転ばねとしてモデル化し，水平方向地盤反力係数は道路橋示方書[3]により求める．

(2) 地盤と地盤変位の解析モデル

表層厚さ(H)を 10～30m で変化させる．地盤は均質な表層の 2 層系と 3 層系にモデル化する．支持層は N 値 50 で一定とし，2 層系モデルでは，表層平均 N 値(N_a)を 0.5～20 と変化させる．3 層系モデルは，表層第 2 層の平均 N 値(N_2)を 20，表層第 1 層の厚さ(H_1)を 10 m とし，表層第 1 層の平均 N 値(N_1)を 0.5～10 と変化させる．また，地震時地盤変位 u_g の鉛直方向分布は，均質表層地盤を仮定した場合，コサイン分布でモデル化できる．**図-1** に数値解析モデルを示す[3]．

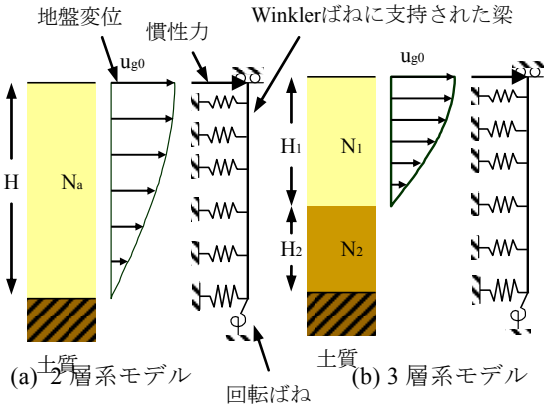


図-1　地盤と杭の解析モデル

3. 解析条件

直径 1.2 m の場所打ちコンクリート杭を想定し，支持層への根入れ長さは杭径と等しい．弾性係数は $Ec=2.5*10^7$ kN/m^2，$Es=2.0*10^8$ kN/m^2 とする．さらに鉄筋の段落としとして杭頭部から 10 m は鉄筋量 As=222.4 cm^2（D32 が 28 本），10~20 m 間ではその 1/2, 20 m を越えると 1/4 とした．**表-1** に杭の M-φ 関係を示す．実際には原点と降伏点を結ぶ等価剛性 EI_{eq} を用い，降伏で折れるバイリニア型で第 2 勾配はゼロとした．杭軸力変動は無視する．杭長 L は表層厚 H に等しい．杭評価チャートのパラメータは，H=10～30 m の 5 ケースと平均 N 値=0.5～20 の 6 ケースの組合せ 30 ケースで解析を行い，これらパラメータ空間での耐震性評価指標（塑性率 $m_{eq}=(n^2+1)/2$）で評価する．ここで，n：曲げモーメント超過率($n=M/M_y$)である．

表-1　杭の M-φ 関係

鉄筋量	ひび割れ時		降伏時		終局時	
	M_c (kNm)	φ_c (1/m)	M_y (kNm)	φ_y (1/m)	M_u (kNm)	φ_u (1/m)
As	382	$1.3*10^{-4}$	2196	$2.7*10^{-3}$	3368	$2.5*10^{-2}$
1/2As	353	$1.3*10^{-4}$	1204	$2.4*10^{-3}$	1798	$1.9*10^{-2}$

4. 地震作用の評価

杭頭部における曲げモーメントが降伏値となる慣性力（設計水平力 P_y）を求める．ある単位水平力 P を載荷した際の曲げモーメントを M とすると，P_y は $P_y=P\times M_y/M$ で求められる．

地震時地盤変位の鉛直方向分布は，地表面変位量を u_{g0} とすると，$u_g(z)=u_{g0}\times\cos(\pi z/2H)$で表される．$T_g$ は 1/4 波長則により $T_g=4H/Vs$（Vs：表層の平均せん断波速度）で求められる．Vs は経験式 $Vs=100N^{1/3}$ を利用した[3]．u_{g0} は鉄道標準[4]を参考に係数を修正して $u_{g0}=85.6T_g^{1.7}$ で求める．

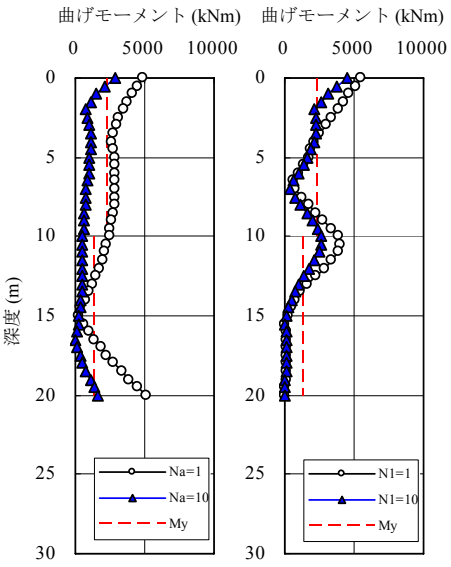
5. 解析結果と考察

例として，表層厚 20 m における曲げモーメント分布を**図-2** に示す．2 層系では杭先端で，3 層系では地中部の層境界である深度 10 m 付近で，また N 値が小さいほど大きな応力が発生している．これら応答曲げモーメントを基に，等価エネルギー則により塑性率が計算できる[2]．ここで，3 層系の層境界で大きな応力が

キーワード　杭，地盤変位，地震，評価，チャート
連絡先（790-8577 愛媛県松山市文京町 3，Email　mori@dpc.ehime-u.ac.jp）

発生しているが，同時に深さ 10 m で鉄筋が段落としされることから，それを考慮した評価が必要になる．**図-3**，**図-4** にそれぞれ杭頭部，地中部，1/2 の鉄筋段落としに対応した 2 層系，3 層系モデルの杭評価チャートを示す．この杭評価チャートでは，横軸が表層厚 H，縦軸が平均 N 値（N_a または N_1）であり，塑性率コンターを間隔 1 で描いている．解析を行った 30 ケースに相当する格子点以外は補間値である．段落としは n の違いで表され，容易にチャートが作成できる．

図に一例として DK 橋のケースをプロットした．DK 橋は H=25 であるが，上層は軟弱層で下層はやや硬質層であり，2 層系と 3 層系の適用が考えられる．両評価チャートに適用させ，安全側の判断をすることができる．DK 橋の平均 N 値は，2 層系では N_a=13，3 層系では N_1=5.9 である．別途実施した詳細な地盤構造と動的解析による地盤変位を反映させた解析結果と比べ，3 層系モデルは表層の軟硬層境界で大きな応力が発生するという特徴をよく表している．一般には，地盤構造により 2 層系または 3 層系のモデルの一方でも十分であるが，両者を適用して工学的判断に用いるのが望ましい．3 層系の場合，層境界深さの厳密さより N 値などのコントラストの程度の方を重視すべきである．



(a) 2 層系モデル　　(b) 3 層系モデル

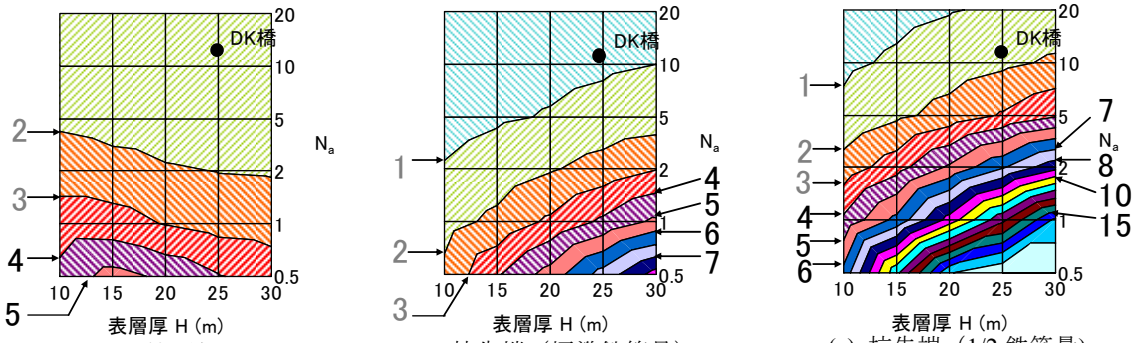
図-2　杭の曲げモーメント分布（表層厚 H=20 m）

6.　結論

新たに提案された概念に基づいて，2 層系，3 層系モデル，鉄筋段落としに対応した杭基礎の地震時地盤変位に対する耐震性を一般技術者でも判断できる杭評価チャートが作成できることを示した．

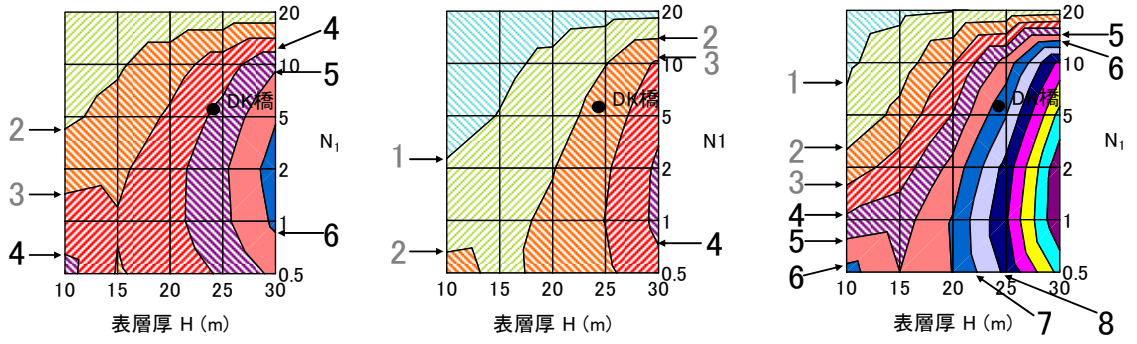
謝辞：　本研究の成果は，地盤工学会内に設置された NEXCO 西日本四国支社耐震性評価手法検討委員会（委員長，矢田部龍一教授）で審議戴き，委員の皆様に多くのご意見を戴きました．記して謝意を表します．

参考文献：1) 森伸一郎：道路橋杭基礎の地震時地盤変位に対する性能評価チャートの概念と前提条件，土木学会全国大会，2008（投稿中）2) Shinichiro Mori and Ryoma Yamazaki: Evaluation of Performance of Existing Pile Foundation against Seismic Soil Displacements, Proc. 5th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, March 4-5, 2008, 2008. 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説　V 耐震設計編，1996.12　4) 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，1999.10.



(a) 杭頭部　　(b) 杭先端（標準鉄筋量）　　(c) 杭先端（1/2 鉄筋量）

図-3　2 層系モデルによる杭評価チャート（塑性率 m_{eq} の等値線図）



(a) 杭頭部　　(b) 地中部（標準鉄筋量）　　(c) 地中部（1/2 鉄筋量）

図-4　3 層系モデルによる杭評価チャート（塑性率 m_{eq} の等値線図）