

道路橋杭基礎の地震時地盤変位に対する耐震性評価チャートの概念

愛媛大学大学院理工学研究科 フェロー 森 伸一郎

1. はじめに

構造物の基礎杭は、地震の際に周辺地盤の水平方向の地盤変位を受ける。このような地震時の地盤の水平変位に対する杭の耐震性能については、詳細な非線形動的解析手法から簡易な等価線形静的手法までのさまざまな数値解析手法により評価することができる。しかし、このような新たに認識された地震作用が考慮されていない膨大な数の既存構造物に対しては、簡易な等価静的な手法といえども限られた技術者と多大な時間を必要とするために、地震時地盤変位に対する脆弱性を評価する耐震性スクリーニングはほとんどなされていないという問題がある。この問題を解決するためには、一般技術者が利用できる耐震性スクリーニングのための簡便な評価技術の開発が必要である。

著者は設計規格に則り上部工慣性力に対して適切に設計されている既存杭基礎を対象に、地震時地盤変位に対する脆弱性評価が簡単で即座にできる性能評価チャートの作成方法に関する概念¹⁾を提案したが、本論文では、作成の前提条件²⁾を示す。

2. 提案する耐震性評価チャートの概念

図-1 に杭の設計に考慮すべき 2 種類の地震作用、すなわち、上部構造物と基礎の慣性力に起因する杭頭に作用する上部構造慣性力 P と地盤変位 u_g を示す。評価チャートの目的は、慣性力 P に対して適切に設計された既存杭に対して地盤変位 u_g によって増加する耐震脆弱性（耐震性能）の程度に基づいて潜在的な地震危険度の高い杭基礎をふるい分けることである。スクリーニングを目的とする評価チャートは、力学的な合理性を保ちながら、一般の技術者が容易に使うことができるように徹底した簡略化を図るとともに、多様な杭種・杭径・杭長・地盤に対応しやすく、多数の既存杭基礎に適用できるものとする必要がある。

提案する評価チャート作成の基本概念は、地震動と杭の断面仕様が与えられた場合に、表層地盤の特性値の平均と杭長の 2 つのパラメータを系統的に変化させるパラメトリックスタディを力学的数値解析により行い、2 つのパラメータ平面の格子点を条件とした数値解析の結果を基に平面上での補間による杭塑性率の等値線図である（図-2 参照）。

3. 杭塑性率推定チャート作成の前提条件

杭評価チャート作成のための前提条件を示す。

(1) 杭の地震時性能： 杭は、塑性率 m を性能指標として評価する。塑性率 m は、降伏時曲率 ϕ_y に対する応答曲率 ϕ の比 ($m = \phi / \phi_y$) で定義する。現行規格の設計地震力の下での既存杭の塑性率を求める必要がある。我が国の道路橋の杭では、大雑把には、塑性率 m が 1 であると仮定してもよい。

(2) 地震動： 設計規格での設計地震動は与条件である。想定される地震ハザードである地盤変位を設定する。

(3) 地盤モデル： 地盤は、地層構成、各地層の剛性・強度、表層厚さまたは支持層までの深さで特性づけられる。杭の設計の観点からは、表層の剛性および剛性のコントラストの強い層境界の有無と深さが要点である。最もコントラストの強い層境界は支持層の上面である。そこで、基盤層と一つの均質な表層から成る 2 層モデルを基本モデルとする。均質な表層は、表層厚さ H と標準貫入試験 N 値の平均値 N_a の 2 つのパラメータで代表させる（図-3(a) 参照）。杭基礎が採用される地盤では、表層の完新統は、やや締まった砂質層の上に軟らかい粘性土層に特徴づけられることもある。この場合、それらの層境界はもう一つのコントラストの強い部分となる。そこで、二つの均質な層からなる表が基盤層の上にある 3 層モデルを 2 番目のモデルとして採用する（図-3(b) 参照）。表層の上部層および下部層の平均 N 値を N_1 , N_2 とする。上部層と下部層の層厚を H_1 , H_2 とする。ただし、 $H_1 + H_2 = H$ 式(2), $(N_1 H_1 + N_2 H_2) / H = N_a$ 式(3)である。パラ

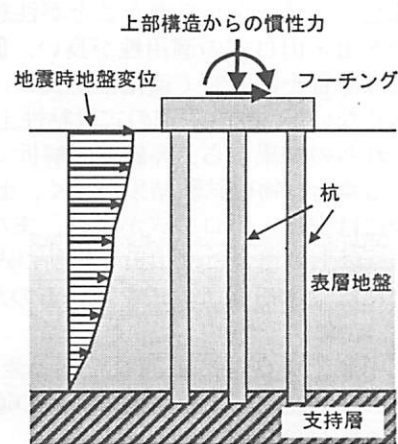


図-1 杭基礎に作用する 2 種類の地震作用

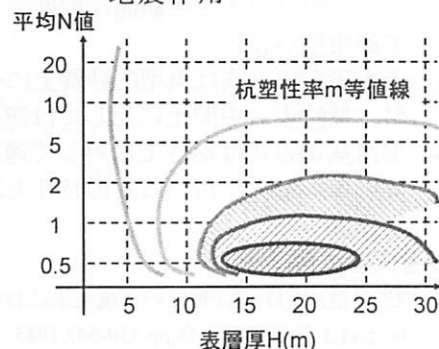


図-2 杭塑性率の等値線図によるチャート

メータが4つとなるので、組合せ数は大きくなる。地盤には地域性があり、数パターンでカバーできよう。提案概念に基づく開発事例²⁾では、対象地域の地盤の特徴を反映させて $H_1=10\text{ m}$, $N_2=20$ として固定した。 N_1 は式(3)で計算できる。

(4) 杭モデル：フーチングの回転に起因する杭の軸力変動は無視する。本研究では、先端支持杭を想定し、杭の周囲摩擦は無視する。簡単化のため杭長 L は表層地盤厚さ H と等しいと仮定する。支持層貫入部の抵抗は回転ばねでモデル化し、その長さは杭径と等しい。回転ばね K_r は、杭径 D 、貫入長 d として、 $K_r=k_h D d^3/3$ で求める。

(5) 地盤物性：表層地盤の固有周期 T_g は $1/4$ 波長則により、その平均せん断波速度 V_{sa} として、 $T_g=1/4(H/V_{sa})$ で表される。土のせん断波速度 V_s は、 N 値を用いた経験式で求める。杭のばね算定に必要な水平地盤反力係数 k_h も N 値より推定する。支持層の N 値を 50 と仮定する。

(6) 地震時地盤変位：地震時の振動による地盤変位 u_g の深さ z 方向の分布は、2層モデルではコサイン分布で表される。3層モデルでは、表層の上部層内のみ地盤変位がコサイン状に分布すると仮定する。地表面変位 u_0 の振幅は、軟弱な地盤ほど振動変位が大きいという特徴を表現するため T_g の単調増加関数としてモデル化する。鉄道標準⁴⁾の推定式 $u_0=25.6T_g^{1.7}$ を参考にするなどの方法が考えられる²⁾。

(7) 慣性力と地盤変位の位相差：2種の地震作用は同・逆位相の2つを考慮し、応答を包落する。

(8) 数値解析法：図-3に示すように、杭は Winkler 型のばねで支持された線形弾性梁としてモデル化する。地盤の変位は杭を表す梁要素ばねを介して静的に作用させる。杭頭は回転を固定し、水平方向へは自由とする。支持層への杭根入れ部の地盤の抵抗は水平ばねと回転ばねでモデル化する。

(9) 杭の非線型特性：解析モデルにおける杭は線形弾性であるが、等価エネルギー則を適用して塑性率を推定する。杭の非線型特性はバイリニアとし、降伏時の曲げモーメントと曲率をそれぞれ M_y , ϕ_y および終局時のそれらを M_u , ϕ_u は与えられる。降伏までの勾配は K_1 、降伏を超えた範囲での勾配は K_2 とする。また、勾配の比 K_1/K_2 を a とする。線形静的解析の杭の応答から、等価エネルギー則⁵⁾を適用して求める(図-4参照)。等価エネルギー則が適用できれば、杭の曲げ剛性が同じであれば、異なる配筋に対しても容易にチャートの作成ができる。このとき塑性率 m は、線形解析の応答曲げモーメント M_e より得られる曲げモーメント超過率 $n=M_e/M_y$ と勾配比 a を用いて次式で容易に推定できる。

$$m=1+\sqrt{a^2+(n^2-1)a}-a \quad (K_2>0 \text{ の場合}) \quad m=(n^2+1)/2=1+(n^2-1)/2 \quad (K_2=0 \text{ の場合})$$

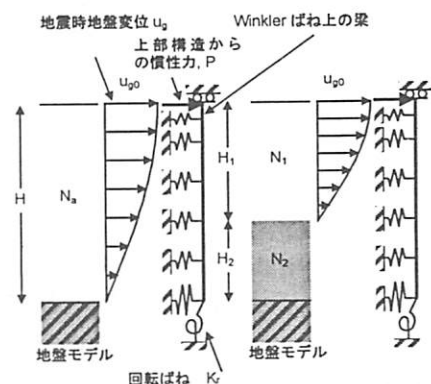
(10) 設計杭頭水平力の逆算：既存杭では $n=1$ の条件を満足するので、対象となる数値計算モデルを用いて設計水平力は容易に逆算できる。単位水平力 P_0 を載荷した際の曲率を ϕ_0 とすると、設計水平力 P は $P=\phi_y/\phi_0 \times P_0$ で求められる。

(11) 耐震脆弱性の指標と評価基準：杭の塑性率 m を耐震脆弱性指標とする。日本の道路橋基礎の場合、4未満は安全³⁾、4以上8未満は危険、8以上を特に危険と評価する。

4. 結 論

道路橋杭基礎の地震時地盤変位に対する耐震性評価チャートの概念を提案し、作成の前提条件を示すことができた。

参考文献：1) 森 伸一郎：地盤変位を考慮した既存杭基礎の耐震性簡易評価に関する考え方，地盤工学会四国支部平成19年度技術研究発表会講演概要集，pp.65-66，2007.10. 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. 5) 森 伸一郎，平田 昭博：エネルギー一定則による杭の地震時非線形応答の評価，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.1495-1496，2002.7



(a) 2層系モデル (b) 3層系モデル
図-3 地盤、地盤変位、杭の解析モデル

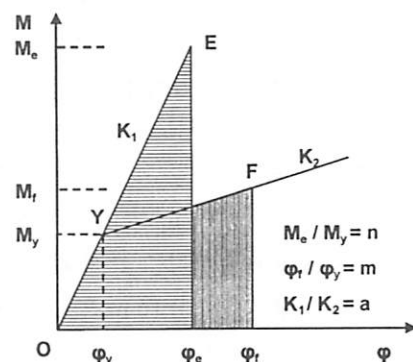


図-4 杭の $M-\phi$ 関係のバイリニアモデルと等価エネルギー則