

Pushover 解析を用いた 杭基礎-地盤系の非弾性挙動の評価

京都大学大学院
京都大学工学研究科
京都大学工学研究科
奈良県

学生員 小野祐輔
正会員 清野純史
フェロー 土岐憲三
古川愛子

1. はじめに

地盤-構造物系の相互作用の持つ影響は非常に大きいため、相互作用を適切に評価し設計に組み入れる事が望まれる。相互作用系のモデル化では、相互作用の効果を等価バネで表現する 3 自由度 2 質点系 Sway-Rocking モデル (以下、SR モデル) が用いられることが多いが、相互作用バネを適切に評価する体系化された手法は未だ確立されていない。そこで本研究では、Pushover 解析に基づいて相互作用バネの簡易な評価を試みた。また、有限要素法による詳細解析結果との比較を行い、Pushover 解析の妥当性を検討した。最後に、得られた相互作用バネを用いて相互作用効果が構造物の耐震性能に大きな影響を及ぼすことを確認した。

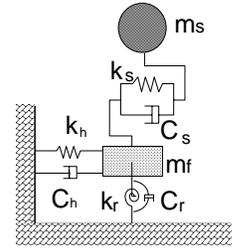


図-1 SR モデル

2. 解析モデル

解析対象構造物は図 2 のような橋脚を支持する杭基礎構造物とする。杭長は 20m である。基礎周辺の地盤モデルは図 3 に示すように N 値 50 以上の支持層の上に軟弱粘土層が 20m 堆積する地盤 A、支持層の上に軟弱粘土層が 15m 堆積し、さらにその上に比較的堅固な砂層が 5m 堆積する地盤 B とした。解析モデルは図 4 のような非線形梁要素とし、フーチングは剛体、各杭はフーチングに剛結とした。杭体の曲げモーメント - 曲率関係は軸力変動を考慮したトリリニアモデルを用いた。また、地盤の影響は地盤バネで表現し、水平方向地盤バネの復元力特性は完全弾塑性型モデル、鉛直方向は線形モデルとした。

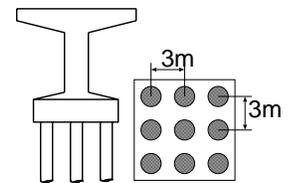
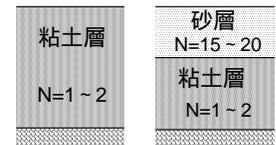


図-2 杭基礎構造物



(a) 地盤 A (b) 地盤 B

図-3 地盤モデル

3. 相互作用バネの算定

本研究では Pushover 解析に基づいて相互作用バネを算定することを目的としている。Pushover 解析とは、非弾性系に対する荷重漸増法のことであり、荷重を段階的に作用させることで構造物の保有性能を求めることができる。水平方向の相互作用バネを算定する際は、フーチング中心に水平力のみを段階的に作用させ、載荷点での水平力 - 水平変位関係を求めた。同様に回転方向の相互作用バネの算定に際しては、フーチング中心での曲げモーメント - 回転角関係を求めた。本研究では、相互作用バネを双曲線の Hardin-Drnevich 型モデル (以下、H-D モデル) でモデル化した。H-D モデルは本来、土の応力-ひずみ関係を表すものであるが、ここでは復元力-変位の関係を表すものとして拡張し、骨格曲線を次式で定義する。ここで、 K_0 は初期剛性、 Q_f は降伏力、 x_f は規準化変位を表している。

$$Q(x) = \frac{K_0 \cdot x}{1 + \left| \frac{x}{x_f} \right|} \quad x_f = \frac{Q_f}{K_0}$$

4. 解析結果

Pushover 解析結果を H-D モデルで同定した。得られた相互作用バネの初期剛性 (水平方向 K_h [MN/m]、回転方向 K_r [MNm/rad])、降伏力 (水平方向 Q_h [MN]、回転方向 Q_r [MNm]) を表 1 示す。水平・回転方向ともに杭径が大きくなるほど、初期剛性、降伏力ともに大きくなる。また、いずれのケースも地盤 A より地盤 B の方が初期剛性、降伏力ともに大きく、地盤による違いは回転方向よりも水平方向で顕著であり、水平方向の相互作用バネは地盤の影響を強く受けることが分かる。

表-1 相互作用バネの同定結果

| | 杭径 | K_h | Q_h | K_r | Q_r |
|---|------|---------|---------|---------|---------|
| A | 1.0m | 229.299 | 48.3471 | 7098.69 | 297.564 |
| | 1.2m | 336.866 | 71.0304 | 12578.5 | 383.906 |
| | 1.5m | 534.767 | 112.626 | 25339.9 | 585.376 |
| B | 1.0m | 394.973 | 122.544 | 7997.47 | 432.165 |
| | 1.2m | 557.952 | 170.106 | 13987.5 | 503.683 |
| | 1.5m | 802.768 | 277.157 | 27274.4 | 723.514 |

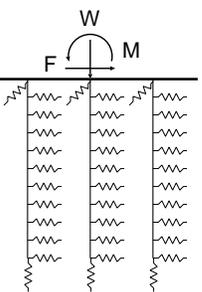


図-4 解析モデル

5. FEM 解析との比較

Pushover 解析の妥当性を調べるため、有限要素法 (FEM) による詳細解析¹⁾との比較を行った。ここでは杭体は全て弾性領域にある仮定し、地盤の非弾性特性を考慮した解析結果を比較した。両者の比較を図 5 に示す。両解析は比較的よい一致を示しており、また地盤の違いの影響は水平方向で顕著であるという共通の傾向を示す。砂地盤を含む地盤 B で、杭径の大きいケースでは Pushover 解析が有限要素法をやや上回る傾向が見られるが、この理由は群杭効果によるものと考えられる。本研究では、地盤バネ定数の群杭効果の補正係数は、文献²⁾に従い一律の値を採用しているが、実際は杭中心間隔に対して杭径が大きくなるにつれて低減効果を大きく評価する必要があるものと考えられる。解析結果は地盤バネや群杭効果の補正係数の影響を受けるため、これらの適切な値を決めることができれば Pushover 解析によって有限要素法と同精度の結果が期待できると考えられる。

6. 相互作用を考慮した必要強度スペクトル

Pushover 解析によって得られた相互作用バネを用いて SR モデルを構築し、軟弱地盤中 (地盤 A) に位置する杭基礎を持つ橋脚の必要強度スペクトルを求めた。また、基礎固定の 1 自由度モデルとの比較を行い、相互作用が必要強度に与える影響について検討した。上部構造物は剛性比 0.02 のバイリニアモデルで減衰定数は 2%、重量は 10MN、杭基礎の減衰定数は水平・回転方向ともに 10%、重量は 20MN とした。橋脚の高さは 12m、基礎の慣性モーメントは 4362MN・m² とした。入力地震動としては 1995 年兵庫県南部地震の加速度波形の NS 成分を用いた。得られた必要強度スペクトルを図 6 に示す。図より、相互作用を考慮することで、基礎固定の必要強度を低減できること、この低減効果は杭径が小さいほど大きいことがわかる。杭径が大きいケースでは塑性率が大きくなると基礎固定の必要強度を上回る場合もあるが、杭径が小さいケースでは全ての塑性率で基礎固定の必要強度を低減する効果が示されている。必要強度の低減のみを考えるなら杭径を小さくすればよいが、過度に基礎を弱くすると、上部構造物を安全に支えるという基礎本来の役目を失うことになる。こうした兼ね合いの中、安全性を確保した上で必要強度を低減する有効な手法が望まれる。

7. 結論

本研究では Pushover 解析によって相互作用バネを算定する手法を構築した。また有限要素法解析結果との比較を行い、Pushover 解析の妥当性を検討できた。最後に解析結果を用いて杭基礎を持つ橋脚の必要強度スペクトルを算出し、相互作用を考慮することにより必要強度が低減できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 小野祐輔: 地盤-構造物系の相互作用を考慮した必要強度スペクトルに関する研究, 京都大学修士論文, 1999.
- 2) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 下部構造編, 耐震設計編, 1996.12.

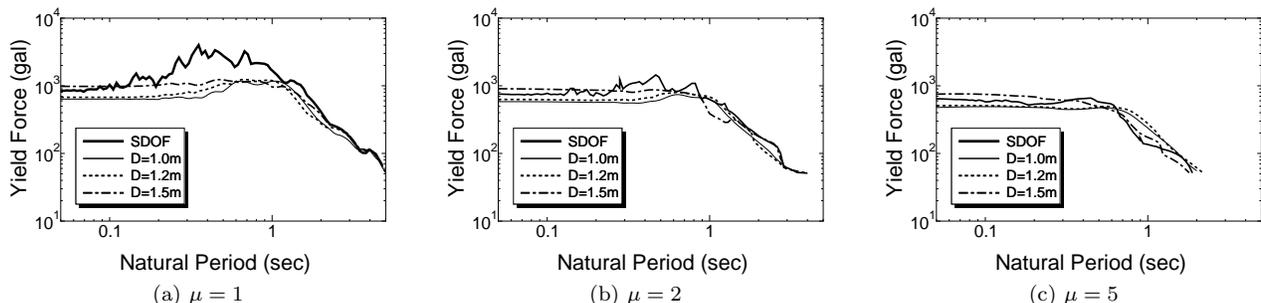


図-6 必要強度スペクトル

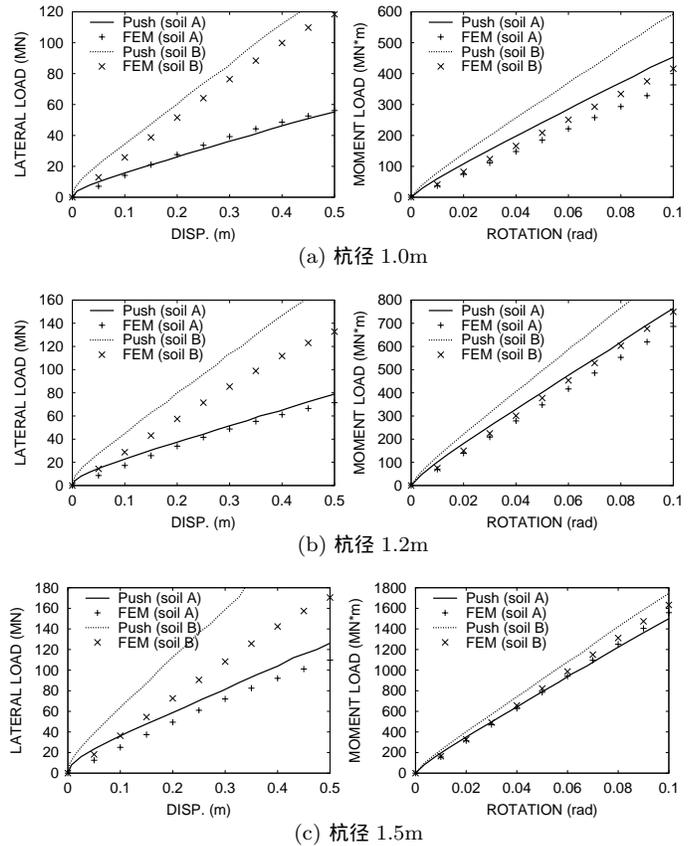


図-5 Pushover 解析と有限要素法の結果の比較