

免震支承－橋脚－杭基礎－地盤の一体的な Pushover 解析*

(株)横河ブリッジ 正 員 清川昇悟
名古屋大学 フェロー 宇佐美勉†
正 員 葛西 昭

1. 緒言

耐震設計において構造物の耐震性能を評価する指標として要求性能と保有性能があり、このうち終局変位や使用性限界に相当する保有性能を求める手法として Pushover 解析は非常に有効な手法である。過去に鋼製橋脚に対して Pushover 解析による解析から、鋼製橋脚のもつ保有性能について検討を行っている研究は多数あるが、橋脚のみならず、基礎、地盤の影響を考慮した一体的なシステムとしてその保有性能をとらえるには至っていない。そこで、本研究では杭基礎、支承について橋脚との連成を考慮した Pushover 解析の手法を確立し、システム全体の持つ保有性能に対し解析的な検討を行う事を目的としている。

2. 解析方法

解析対象とする橋脚及び杭基礎のパラメータは II 種地盤を対象に震度法設計したものを用いる。免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) を対象としている。地盤のデータは表-1、構造物の各パラメータの値は表-2、3 に示す通りである。杭の本数は 9 本で、杭間距離を杭径の 2.5 倍とし正方形に配置した。なお、解析には汎用の有限要素解析プログラム ABAQUS を用いた。

LRB は文献 1) により提案されている手法を用いてモデル化する。このモデルは LRB 自身の大変形による $P-\Delta$ 効果を考慮できる高精度なモデルである。

本研究では地盤のモデル化について、非線形のパネ要素を用いて表したモデル (以下、パネモデルと称する:図-1) と、ソリッド要素を用いて有限要素分割したモデル (以下、メッシュモデルと称する:図-2) の 2 種類のモデルを用いた。

表-1 地盤条件 (II 種地盤)

	地盤の種類	層厚 (m)	平均 N 値	γ	γ'
第 1 層	粘性土	2.50	5	16.7	7.8
第 2 層	砂質土	4.00	10	16.7	7.8
第 3 層	粘性土	3.50	5	16.7	7.8
第 4 層	砂質土	3.50	15	18.6	7.8
第 5 層	砂質土	1.40	50	18.6	7.8

γ : 単位体積重量
 γ' : 水中単位体積重量

表-2 LRB のパラメータ

等価剛性 K_{Be} ($\times 10^6$ N/m)	1 次剛性 $K_{1,B}$ ($\times 10^6$ N/m)	2 次剛性 $K_{2,B}$ ($\times 10^6$ N/m)	降伏荷重 Q_d ($\times 10^3$ N)	支承高さ h_B (m)
34.15	160.21	24.65	199.18	0.125

表-3 橋脚、杭基礎の諸元

$\bar{\lambda}$	R_f	γ/γ^*	P/P_y	h (m)	B (m)	D_W (m)	t (m)	b_s (m)	σ_y	E (GPa)
0.35	0.35	4.00	0.158	11.374	2.085	2.085	0.04	0.232	313.6	205.8
E/E_{st}	ϵ_{st}/ϵ_y	杭種	L (m)	D_P (m)	t_P (m)	$\sigma_{y,P}$ (MPa)	E_P (GPa)	B_F (m)	D_F (m)	h_F (m)
30.0	7.0	鋼管杭	15.0	1.30	0.014	313.6	205.8	13.0	13.0	2.40

$\bar{\lambda}$: 柱細長比パラメータ, R_f : フランジ幅厚比パラメータ, γ/γ^* : 補剛材剛比/最適剛比, P/P_y : 軸力比, h : 橋脚高さ, B : フランジ幅, D_W : ウェブ幅, t : 板厚, b_s : 補剛材長さ, σ_y : 降伏応力, E : 弾性係数, E_{st} : ひずみ硬化係数, ϵ_{st} : ひずみ硬化開始ひずみ, L : 杭長, D_P : 杭径, t_P : 杭板厚, $\sigma_{y,P}$: 杭体の降伏応力, E_P : 杭体の弾性係数, B_F : フーチング幅, D_F : フーチング奥行き, h_F : フーチング高さ

パネモデルはパネの抵抗特性を文献 2) の規定に準じて定めている。メッシュモデルは地盤の N 値より地盤要素の弾性係数を算定する。粘性土の塑性モデルには Mohr-Coulomb 則を用い、砂質土は弾性とした。

鉛直方向については LRB 頂部に表-3 に示すような荷重 P を載荷させる。この P は文献 3) に示される有効座屈長の概念に基づき、はり一柱の強度相関式より求める。また、杭頭部にはフーチングの重量を荷重として載荷する。水平方向には、慣性力作用位置である LRB 頂部とフーチングの 2 点に比例的に荷重を作用させ、Pushover 解析を行う。その際 LRB 頂部の載荷荷重 H_P とフーチング載荷荷重 H_F との比例関係は式 (1) とした。

$$H_F = H_P \frac{W_F}{W_U + C_P W_P} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $C_P = 0.5$, W_F : フーチング重量, W_P : 橋脚重量, W_U : 上部構造重量である。また、地盤メッシュモデルに関しては、上記の荷重に加え地盤要素に重力を載荷させる。

* **Key Words** : Pushover analysis , Pile Foundation , Soil , lead rubber bearing(LRB) , ductility

† 〒 464-8603 名古屋市千種区不老町 TEL 052-789-4617

橋脚の破壊基準は橋脚の有効破壊長領域の平均ひずみが $20\epsilon_y$ に達したときとする。また、基礎・損傷した場合その補修は困難であるため、基礎・大地震時でもできるだけ損傷を受けない方がよい。杭の破壊基準は杭の降伏時とする。LRB については道路橋示方書に規定されている LRB の許容せん断ひずみ 250%，即ち LRB 自身の水平変位量 δ が、LRB 高さ h_B の 2.5 倍に達したとき（せん断ひずみ $\gamma = \delta_B/h_B = 2.5$ ）とする。LRB、杭、橋脚のいずれかが破壊基準に達した時を構造物全体の破壊と定める。

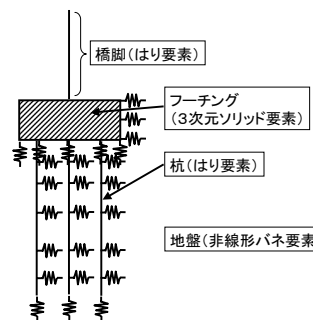


図-1 バネモデル

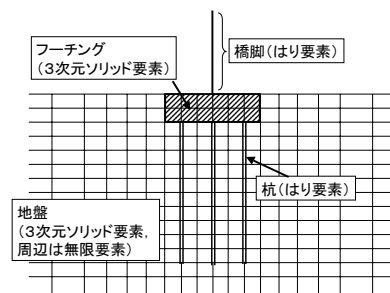


図-2 地盤メッシュモデル

3. 解析結果

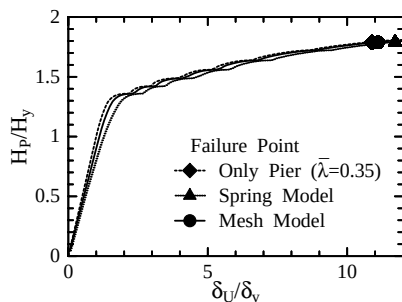


図-3 地盤モデルによる比較

地盤モデルによる比較

図-3 に橋脚—杭基礎—地盤一体系の Pushover 解析結果である水平荷重 H_P —水平変位 δ_U 関係を、バネモデル、メッシュモデルの2種類について示している。図-3 より、終局変位に着目すると、バネモデルの方が若干危険側の評価であるが、両モデルとも橋脚基部固定である橋脚単体の解析結果との差が 10% 未満であり、杭基礎—地盤の影響が非常に小さいと言える。また、両モデルの結果に大きな差異がないことから、詳細なメッシュモデルを用いずともバネモデルで杭基礎—地盤の挙動は十分推定可能であると言える。

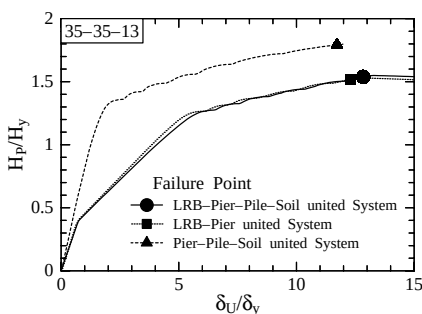


図-4 $H_P \sim \delta_U$ 関係

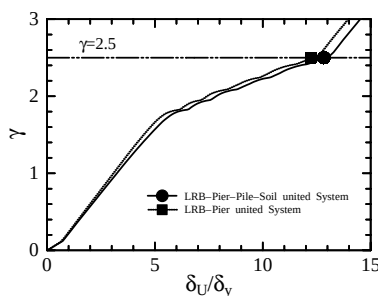


図-5 LRB のせん断ひずみ $\gamma \sim \delta_U$ 関係

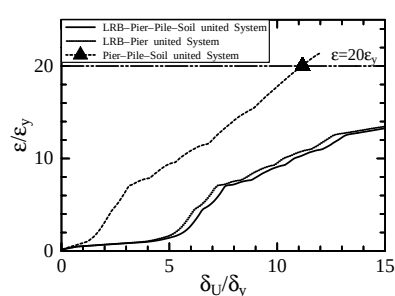


図-6 橋脚基部の平均ひずみ $\epsilon \sim \delta_U$ 関係

図-4 に LRB—橋脚—杭基礎—地盤一体 Pushover 解析の結果である水平荷重 H_P —水平変位 δ_U の関係を示す。図-4 には同時に LRB—橋脚一体系の解析結果、橋脚—杭基礎—地盤一体系の解析結果を示している。また、LRB のせん断ひずみ γ の進展状況を図-5 に、橋脚基部の平均ひずみ ϵ の進展状況を図-6 に示す。これらの結果より、以下の考察が得られる。

LRB の影響について

LRB—橋脚—杭基礎—地盤一体系の解析結果と橋脚—杭基礎—地盤一体系の解析結果を比較すると、橋脚の剛性に対し LRB の剛性が低く、LRB の変形が卓越的となるため $H_P \sim \delta_U$ 関係において強度の低下が顕著に見られる。またそれに伴う変形能の向上が期待されたが、LRB が破壊基準に達した為、構造物全体の变形性能はさほど向上していない。しかし、実橋梁の場合、補修の容易性から LRB が先に破壊する破壊形態は好ましいと言える。

杭基礎—地盤の影響について

LRB—橋脚—杭基礎—地盤一体解析の結果と LRB—橋脚一体系の解析結果を比較すると、終局変位の差は小さく、杭基礎—地盤を考慮する事の影響はほとんどないといえる。これは、杭基礎と地盤を一体としてみたときの見かけの剛性に対し、橋脚の剛性が小さいため、橋脚の変形が卓越的となり、橋脚基部固定である LRB—橋脚一体系での解析と変わらぬ結果を与えたと考えられる。また、杭は構造物の終局時においても発生する応力が降伏応力の 40% 以下であった。これらの結果より、Pushover 解析において杭基礎—地盤を考慮する必要性は小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 清川昇悟, 葛西昭: $P-\Delta$ 効果を考慮できる免震支承の解析モデル, 第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 1999 年 12 月。
- 2) 日本道路協会 (1996): 道路橋示方書・同解説書, IV 下部構造編
- 3) 日本道路協会 (1996): 道路橋示方書・同解説書, V 耐震設計編