

大地震力を考慮した直接基礎の設計法に関する考察

羽矢 洋¹⁾, 西村昭彦²⁾

¹⁾正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(基礎) (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

²⁾正会員 工博(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(基礎) (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

兵庫県南部地震のような地震力に対し安全な直接基礎の設計法を確立するためには、直接基礎の動的挙動、支持力性状の把握が重要である。

筆者らはこれまでも直接基礎に対し、大変位領域に及ぶ静的繰返し水平載荷実験および振動台を用いた大加速度加振実験を土被りのない状態と土被りのある状態で実施してきており、それらの結果については機会ある度に報告してきた。

本論文では、こうした実験結果に基づき、直接基礎の動的履歴特性の定式化を行うとともに、大地震力を考慮した直接基礎の設計法試案について報告する。

Key Words: *Spread Foundation, Earthquake, Shaking Table, Lateral Loading Test, Model Test, Analytical simulation, Design Method*

1. 現行の設計の考え方

鉄道では基礎構造物の設計基準に限界状態設計法が導入され¹⁾、1997年1月に運輸省から通達された。この中では地震力としてマグニチュード8、震央距離40km程度の海洋型地震を具体的に想定しており、設計震度が大きくなる。そのため、従来の許容応力度設計法に基づく直接基礎の安定の照査法を踏襲するならば、フーチング諸元が大きくなることになる。

そこで、本設計基準では、このような大きい地震力に対する安全性の照査法（地震時終局限界状態に対する検討）として、直接基礎の変形性能を考慮した設計の考え方を導入した。

一方、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震（マグニチュード7.2の都市直下型巨大地震）の持つ地震力は、先に述べた値を大きく上回るものであり、従って、このような大地震力を考慮した直接基礎の設計法の確立が急がれている。

こうした大地震力を考慮した基礎構造物の設計を行う場合、従来のような動的作用力を静的な作用力に置き換える、いわゆる震度法に依ることには限界があり、従って、上下部工を適切にモデル化した上で、動的解析を行うことが必要となる。

ここでは直接基礎を基礎とする一般的な橋梁橋脚

をイメージし、2質点3自由度モデルによる動的解析を行い、その検討結果から「大地震力を考慮した直接基礎の設計法」を考察する。

なお、本解析検討は、これまで筆者らが行ってきた「土被りを考慮した大変位領域におよぶ静的水平載荷実験」、 「土被りを考慮した大加速度振動実験」結果等を用い、シミュレーション解析を行うかたちで進めているが、実験および結果の掲載については紙面の都合によりほとんどを割愛せざるを得なかった。従って、実験詳細については文献2)、3)に依らるたい。

2. 静的実験結果のシミュレーション

静的載荷および動的実験は表1に示す3ケースで実施した。

この実験結果をシミュレーションするために図1に示す骨組みモデルを考慮した。モデルに付加する

表1 実験ケース一覧表

実施case	模型総重量	土被り量
case 1	3057 kgf	0.00 m (0.0B)
case 2	3789 kgf	0.45 m (0.5B)
case 3	3789 kgf	0.90 m (1.0B)

フーチングサイズ：90cm×90cm

水平地盤バネは土被りに応じてその数を増減させている。このバネの非線形性としては有効抵抗土圧（受働土圧）で完全降伏するバイリニアモデルで表し、また、フーチング底面の回転バネについても基礎の諸元、地盤強度から算定される最大抵抗モーメントで降伏するバイリニアバネを付加した（図2）。

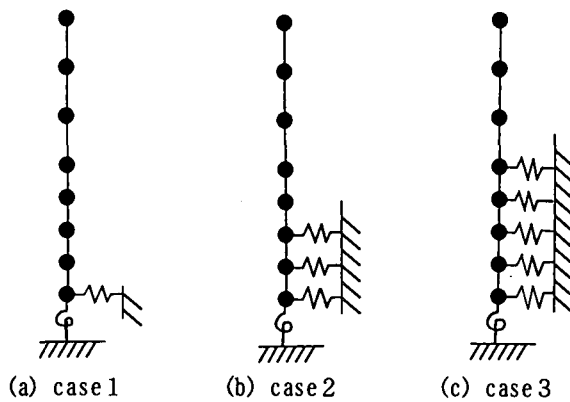
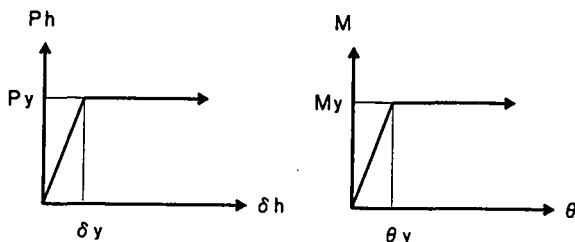


図1 静的解析用骨組み解析モデル概要



(a) 水平バネの非線形性 (b) 回転バネの非線形性
図2 静的モデルに付加する地盤バネの非線形特性

以下に各caseのシミュレーション結果を示す。なお、人工地盤の強度定数の把握を目的に平板載荷試験（φ30cm円形）および三軸試験（CD条件）を実施し、支持層については変形係数 $E_0 = 190 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ 、 $c = 0.01 \text{ tf/cm}^2$ 、土被り層は内部摩擦角 $\phi = 39^\circ$ 、 $c = 0.01 \text{ tf/cm}^2$ の物性値を得た。

(1) case 1 のシミュレーション

a) 最大抵抗モーメント

実験では最大回転モーメント $M_{\max}$ （最大抵抗モーメント）は $0.97 \text{ tf}\cdot\text{m}$ となった。

既に文献4)に詳しく述べているが、支持地盤が発揮し得る $M_{\max}$ は地盤の特性、フーチングの大きさとその底面に作用する荷重からテルツァギーの極限支持力を求めることによって、算定可能である。そこで、支持地盤の持つ $\phi = 40^\circ$ を用い最大抵抗モーメントを算定したところ、その値は $1.06 \text{ tf}\cdot\text{m}$ となり、実験値の $0.97 \text{ tf}\cdot\text{m}$ と概ね一致する結果となった。

b) 底面回転およびせん断バネ定数の決定

このcase 1 は土被りゼロの状態での実験であり、

水平載荷力による回転モーメントによって発生するフーチングの回転変位量は、フーチング底面の回転バネ定数にのみ依存するものと考えられる。

文献4)に示すように、土被りのない状態における $M \sim \theta$ の関係を解析的に表す手法として、

①作用モーメントゼロの状態から浮上り限界モーメント M_1 （フーチング底面での回転モーメントがこの値以下であれば、地盤反力は全フーチング幅に分布するものとする。この M_1 の値はフーチング幅 B と鉛直荷重 N を用い $M_1 = B \cdot N / 6$ により算定される。）までは、 $M \sim \theta$ の関係は初期の回転バネ定数 K_r を傾きとする。

② M_1 を超え最大抵抗モーメント $M_{\max}$ までは、 $M \sim \theta$ の関係は $K_r / 2$ を勾配とする。

③ $M_{\max}$ 以降は勾配はゼロとする。

平板載荷試験による変形係数を用い回転バネ定数を算定すると、初期の回転バネ定数 K_r の値は $440 \text{ tf}\cdot\text{m/rad}$ 、 $K_r / 2 = 220 \text{ tf}\cdot\text{m/rad}$ となる。

なお、底面せん断バネ定数についても平板載荷試験結果を用い算定した。

c) 実験結果のシミュレーション

上記検討で得られたバネ値を用い、解析を行った結果を図3に示す。この図より、解析による実験結果のシミュレーションが良好にできていることがわかる。なお、実験結果は骨格曲線で表した。

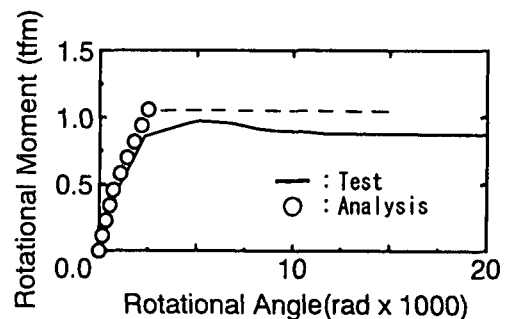


図3 静的実験結果のシミュレーション（case 1）

(2) case 2, 3 のシミュレーション

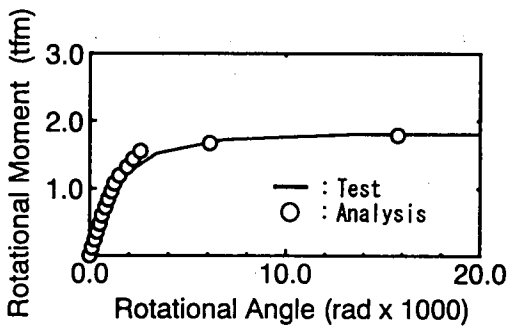
最大抵抗モーメント $M_{\max}$ の値は支持地盤の ϕ と各caseの土被りを考慮して算出した値を用い、また、底面回転バネ定数 K_r および底面せん断バネ定数は case 1 の値をそのまま用いた。

土被り層については平板載荷試験を行っていないことから、水平バネ定数の決定は支持層地盤の $\phi = 40^\circ$ と土被り層の $\phi = 39^\circ$ の違いを考慮し、支持地盤の変形係数（ $E_0 = 190 \text{ kgf/cm}^2$ ）の10%減の 170 kgf/cm^2 としてバネ値を算定した。

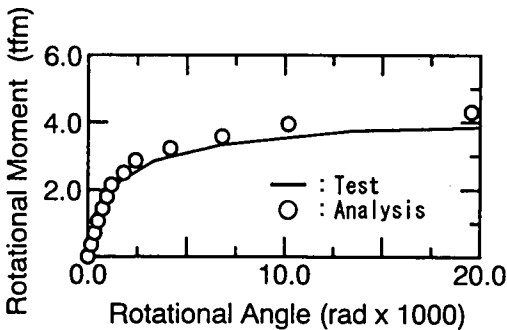
また、水平バネの非線形特性として有効抵抗土圧（受働土圧）で降伏するようなバイリニアバネを考

慮したが、この値については各質点の深さに応じ、 $\phi = 39^\circ$ より算定した。

図4にシミュレーション結果を示す。



(a) case 2 の結果の比較



(b) case 3 の結果の比較

図4 静的実験結果のシミュレーション

これらの結果をみると、case 2、3とも良好に実験結果をシミュレートできていることがわかる。

3. 動的実験結果のシミュレーション

はじめに述べたように、直接基礎を基礎とする一般的な橋梁の橋脚に対し動的解析を行う場合、

- ・上部工とフーチング付近に質量が集中している
 - ・壁式橋脚の場合においても、橋軸方向は比較的にスレンダーな構造形式であることが多い
- ことを考慮し、動解では2質点3自由度モデルを考え、これによる実験結果のシミュレーションを行った。なお、積分手法はニューマークの β 法を用いた。

(1) 解析モデル概要

解析モデルは図5に示すように2質点とし、上部の質点には水平の1方向、下部の質点には水平および回転の2自由度を持たせ、水平地盤バネと回転バネを付加した。

(2) 非線形履歴特性の定式化

水平バネは、case 1の場合、静的モデルで考慮した底面せん断バネを付加した。また、土被りのある

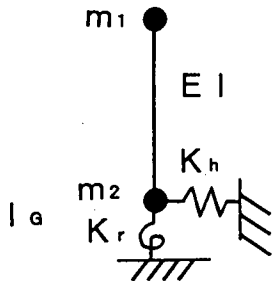


図5 動的解析で考慮するモデル

case 2、3については底面せん断バネの他、静的モデルで付加した3個あるいは5個の水平バネを集約させて付加した。なお、水平バネは線形としている。一方、底面の回転バネの履歴特性としてはトリリニアバネを考慮し、この往路のルールとして、静的解析で得られた $M \sim \theta$ 関係を用いることとした。

この理由としては、先ず、直接基礎のように浅い剛体基礎の場合、荷重と変位の関係にはフーチングの水平変位の影響は小さく、そのほとんどが $M \sim \theta$ の影響に因るものと考えられることである。次に、先に述べたように静的解析では底面バネだけでなく、土被りの大きさに応じた水平バネの非線形性を考慮した上で、精度の良い $M \sim \theta$ 関係が得られること、そして三つめとして、直接基礎の実務設計を考慮すると、地盤調査で得られる土質強度定数を用い静的解析による $M \sim \theta$ 曲線を作成することで、動的解析モデルが容易に作成可能であることが挙げられる。そこで、図3、4の $M \sim \theta$ 曲線上で、最初に明瞭な折れ点が認められる点を第1折れ点、次に概ね回転モーメントの最大値に達した状態を第2折れ点とし、各々の値をピックアップし、表2にまとめた。

表2 動的解析に用いる定数

	K_{r1} (tfm/rad)	K_{r2} (tfm/rad)	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)
case 1	650	325	0.0007	0.0025
case 2	870	438	0.0010	0.0026
case 3	1970	583	0.0011	0.0023

また、復路のルールは、静的載荷実験で得られた履歴ループの戻り特性を考慮し、case 1では図6に示す原点指向の履歴性状を、case 2、3については図7に示すように M_0 点までは原点指向で、それを越えた場合の戻り勾配を土被り厚さに応じて変化させた。つまり、戻りの勾配 K_c と初期の勾配 K_a の間に次式を当てはめた。

$$K_c = \alpha \cdot K_a$$

$$\alpha = \frac{D_t}{B}$$

B : フーチング幅
D_r : 土被り厚

case 2 ---- $\alpha = 0.5$,
case 3 ---- $\alpha = 1.0$

ただし、 α の最小値としては原点对称側ループの第2勾配延長線が θ 軸と交差するA点までとする。

また、周辺および支持地盤が自立性の粘性土地盤の場合は、過去に実施した実験結果⁵⁾の履歴特性を考慮し、たとえ土被りがある場合においても原点指向とする。

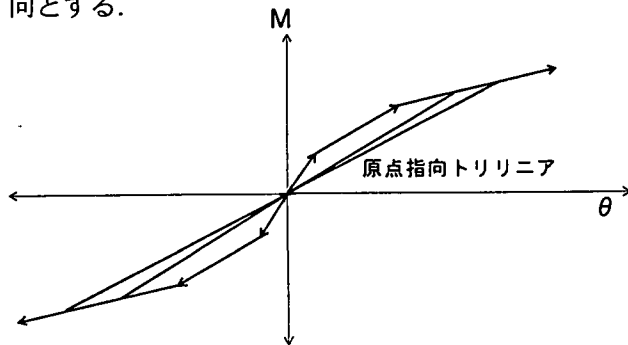


図6 case 1で考慮する回転バネの履歴特性

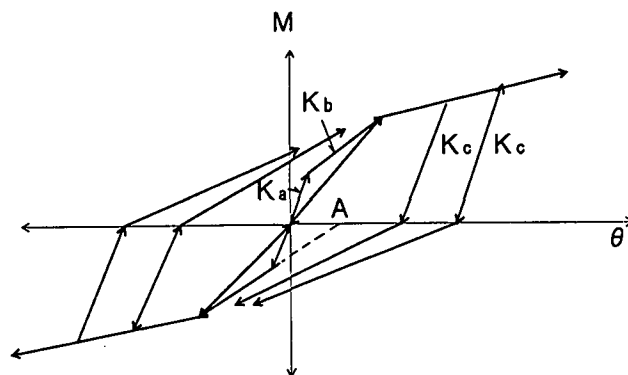
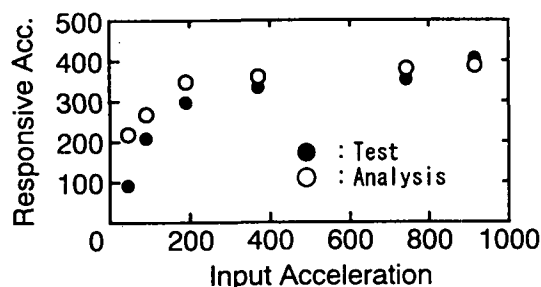


図7 case 2, 3で考慮する回転バネの履歴特性

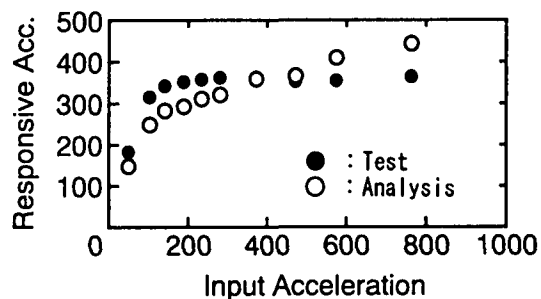
図8に、このモデルによる動的解析結果を示す。

解析に用いた入力波は実験と同じ6 Hzの正弦波で、目標加速度までは徐々に増加させていき、過渡応答を極力抑えたと共に、振動性状が定常状態になったときの応答値をピックアップしている。

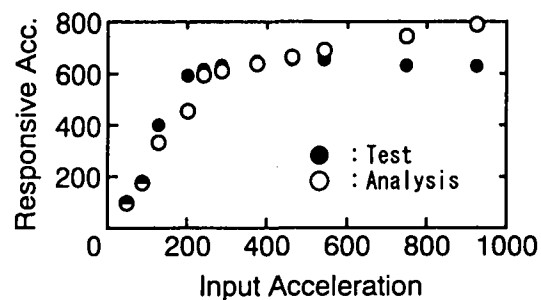
実験値については模型直下の地盤加速度および模型天端応答加速度の関係で表し、解析値は加振加速度と天端応答加速度値で表した。



(a) case 1の動的解析結果



(b) case 2の動的解析結果



(c) case 3の動的解析結果

図8 動的解析結果

この図から、case 1では良好にシミュレーションできていることがわかり、case 2, 3については大加速度入力時で解析値が実験値を上回る傾向がみられるものの、600gal入力程度までは比較的良好にシミュレーションできていることがわかる。

4. おわりに

以上述べたように、2質点3自由度モデルによる動的解析によって、土被りのある直接基礎の挙動が良好にシミュレート可能となった。

現在、「兵庫県南部地震規模の地震力を考慮した直接基礎の設計法」の確立を目標に、ここに紹介した解析・検討手順に基づく、実物基礎へのキャリブレーションを行っている。また、今後は兵庫県南部地震で変状の生じた直接基礎の例を調査し、この考え方を適用し、検討を行うことをも考えている。結果がまとまれば紹介していく予定である。

参考文献

- (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—基礎構造物・抗土圧構造物, 平成9年4月
- 羽矢, 室野, 西村: 土被りのある直接基礎模型の静的載荷実験, 第32回地盤工学研究発表会, 1997. 7
- 羽矢, 室野, 西村: 土被りのある直接基礎振動実験結果(その2), 第52回土木学会年次学術講演会, 1997. 09
- 羽矢, 西村, 下村, 室野: 直接基礎の限界状態設計法試案, 基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム, 1995. 5
- 羽矢, 西村: 模型直接基礎振動実験結果(その1, 2), 第28回土質工学研究発表会, 1993. 6