

模型ケーソン基礎の水平載荷実験 およびそのシミュレーション

西山誠治¹⁾, 羽矢 洋²⁾, 棚村史郎³⁾, 西村昭彦⁴⁾

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

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

³正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (基礎担当) (〒185 東京都国分寺光町 2-8-38)

⁴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 (基礎担当) (〒185 東京都国分寺光町 2-8-38)

従来、鉄道の設計標準によるケーソン基礎の地震時の設計法においては、基礎側面の地盤抵抗として基礎前面の水平方向ばねのみを考慮している。しかし、兵庫県南部地震規模の地震力を考慮する場合には、基礎が大きく変位し、基礎前面と地盤との間における鉛直方向のせん断抵抗を無視できないことが考えられる。そこで、過去に筆者らの実施した模型ケーソン基礎の水平載荷試験結果¹⁾を基礎前面のせん断地盤反力に着目して再考察し、また、従来の鉄道の設計手法に準じた解析手法と前面のせん断抵抗を考慮した解析手法の両方を用いてシミュレーションを行い、基礎前面のせん断抵抗が基礎の地震時の応答に及ぼす影響を検討する。

Key Words: Caisson foundation, Model test, Lateral loading test, Bearing capacity, Analytical simulation, Subgrade reaction coefficient

1. はじめに

ケーソン基礎が地震時に上部構造からの水平力を受けた場合、基礎底面に関しては鉛直方向ばねおよび水平方向せん断ばねが考慮でき、基礎側面に関しては基礎前面の水平方向ばねおよび鉛直方向せん断ばね、基礎側面のせん断ばねが考慮できる(基礎前面とは荷重作用方向の面とする)。従来鉄道の設計標準では、基礎側面の抵抗要素として基礎前面の水平方向ばねのみを考慮している。しかし、兵庫県南部地震規模の地震力を考慮する場合には、基礎が大きく変位し、基礎前面と地盤との間における鉛直方向のせん断抵抗を無視できないことが考えられる。

そこで、過去に筆者らの実施した模型ケーソン基礎の水平載荷試験結果¹⁾を周面せん断地盤反力に着目して再考察し、また、従来の鉄道の設計手法に準じた解析手法と前面のせん断抵抗を考慮した解析手法の両方を用いてシミュレーションを行い、基礎前面のせん断抵抗が基礎の地震時の応答に及ぼす影響を検討する。

2. 模型ケーソン基礎の載荷試験

(1) 試験条件および試験方法

模型ケーソン基礎の概要を図-1に示す。模型総重量は4.7tfであり、砂質土(稻城砂)を使用した人工地盤に設置した後、弾性域から大変位領域に及ぶ繰り返し水平載荷試験を実施した。制御方法は、載荷時には変位制御、除荷時には荷重制御とした。その際、載荷点に設置したロードセルと変位計によりケーソン基礎の荷重～変位関係を、ケーソン基礎の前面、背面および底面に設置した2方向ロードセルにより、これに作用する鉛直方向、

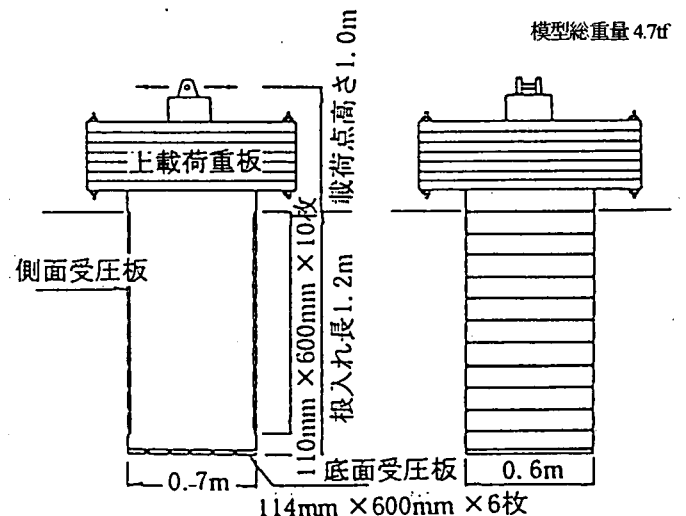


図-1 模型ケーソン基礎

水平方向地盤反力ならびにせん断方向地盤反力を測定した。なお、基礎側面には、テフロンシートを張り付け、側面地盤の影響を低減させている。

(2) 荷重～変位曲線

水平載荷力とケーソン基礎天端の水平変位量の関係を図- 2に示す。載荷初期において弾性的な挙動を示した後に、変位量が1 cm を超えるあたりから荷重の増加に対する変位量の増加比率が急増し、非線形性が顕著になることが伺える。しかし、水平変位量がケーソン幅の10% (6 cm) に至っても載荷力の低下はみられない。

(3) 地盤反力分布

ケーソン前面および底面に設置したロードセルにより測定した地盤反力分布を図- 3～図- 5に載荷荷重毎に示す。なお、これらの図には後に述べる解析結果も併せ

て示している。これより、載荷力が大きくなるにしたがって地盤反力分布が大きくなり基礎前面の最大地盤反力の発生位置が次第に下方に移動していることが確認でき

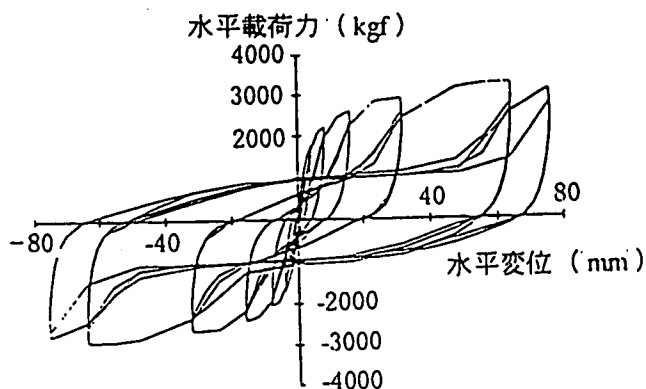
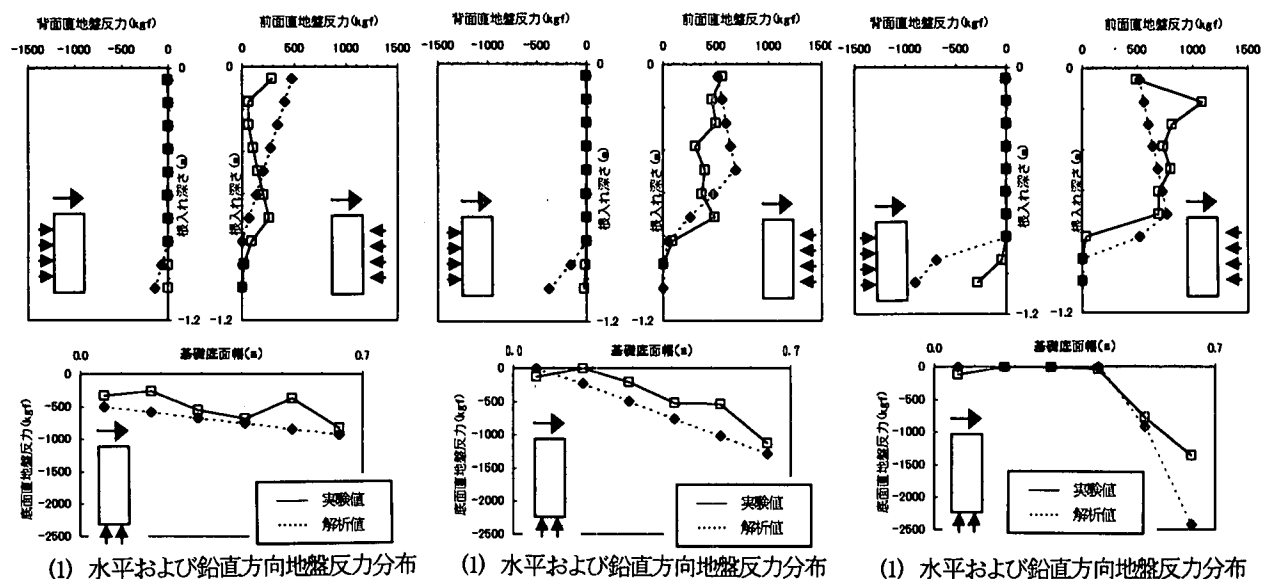


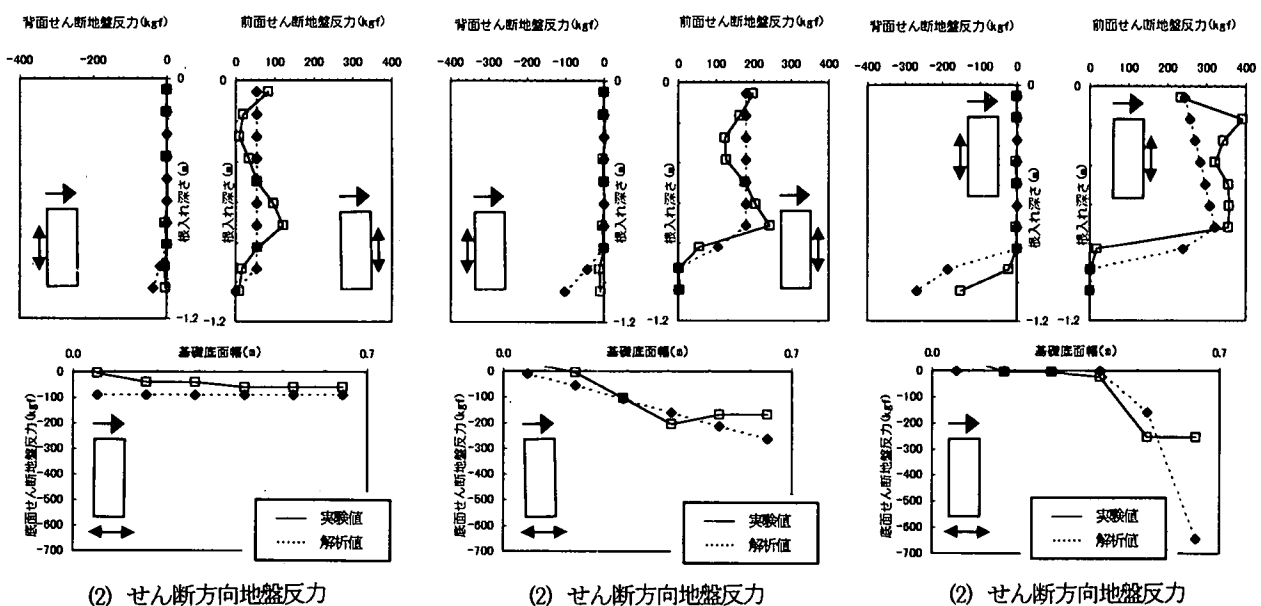
図-2 水平載荷力と水平変位の関係



(1) 水平および鉛直方向地盤反力分布

(1) 水平および鉛直方向地盤反力分布

(1) 水平および鉛直方向地盤反力分布



(2) せん断方向地盤反力

(2) せん断方向地盤反力

(2) せん断方向地盤反力

図- 3 地盤反力分布(h=1.0tf)

図- 4 地盤反力分布(h=2.0tf)

図- 5 地盤反力分布(h=3.0tf)

る。この理由として、地盤反力には上限値が存在し、均一な砂質地盤と仮定するなら地表面に近いほどその上限値は小さく、深くなるにしたがって増加すること、さらに載荷時のケーソンの挙動が基礎底面付近を中心とするような回転運動からなるためと考えられる。また、基礎底面における地盤反力分布は載荷力が大きくなるにしたがって地盤反力の生じる範囲が減少し三角形分布を示す。ここで、ケーソン前面および底面のせん断地盤反力は、水平地盤反力および鉛直地盤反力が生じている部分にのみ発生し、水平および鉛直地盤反力に応じて大きくなることが分かる。

ここで、図-6に基礎前面の水平方向地盤反力とせん断地盤反力の比（摩擦係数）を示す。これより、せん断方向には水平方向地盤反力の0.2～0.6倍の地盤反力が生じていることが分かる。摩擦係数の値は深さに応じて大きくなり、水平荷重の増加によっても若干増加することが分かる。

図-7に底面の鉛直方向地盤反力とせん断地盤反力の比を示す。その分布は0.1～0.5程度であったが、明瞭な傾向はみられなかった。これは、底面の浮き上がり、交

番載荷による地盤の乱れ等の影響と考えられる。

3. シミュレーション

(1) 解析モデル

荷重変位曲線、および地盤反力分布を考慮し、図-8に示すような解析モデルを設定した。ここで、従来の設計計算ではケーソン躯体を1本棒に集約した骨組モデルを用いて解析を行っていたが、今回のシミュレーションではせん断ばねに関する解析を行うため、ケーソン外枠を剛な梁部材でモデル化を行い、模型基礎の2方向ロードセル設置位置に相当する部位に、それぞれ直方向、せん断方向の節点ばねを設置した。

地盤ばねの算出条件を表-1に示す。ここで、地盤ばねは、前背面における水平方向の地盤ばね（ kh ）、せん断ばね（ khs ）、底面における地盤ばね（ kv ）およびせん断ばね（ kvs ）を考慮し、基礎標準²⁾の算出式をもとに設定した。

側面のせん断ばねは基礎標準には示されていない。通常、せん断地盤ばねは鉛直方向地盤ばねの1/5～1/2といわれていること、また基礎標準においては底面のせん断地盤反力係数は底面の鉛直方向地盤反力係数の1/3と設定していることから、基礎前面のせん断地盤反力係数は水平方向鉛直ばねの1/3とした。

各地盤ばねは、図-9に示すように地盤反力が上限値に達するまでは線形とし、上限値に達したあとは一定値を示す弾塑性型のばねとした。基礎前面の水平方向ばね反力に関しては有効抵抗土圧を上限とした。基礎前面のせん断ばね反力は試験結果を考慮して、発生している直応力と内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c をもとに定めたせん断抵抗土圧を上限値とした。したがって、極限状態では有効抵抗土圧に比例した上限値を有することになる。底面のせん

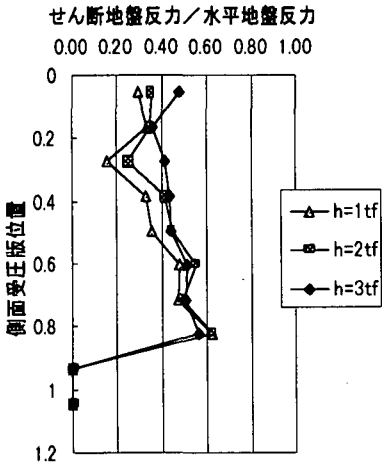


図-6 基礎前面の水平方向地盤反力とせん断地盤反力の関係

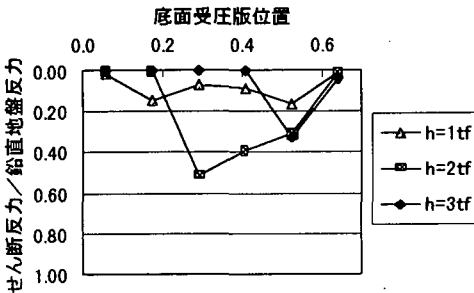
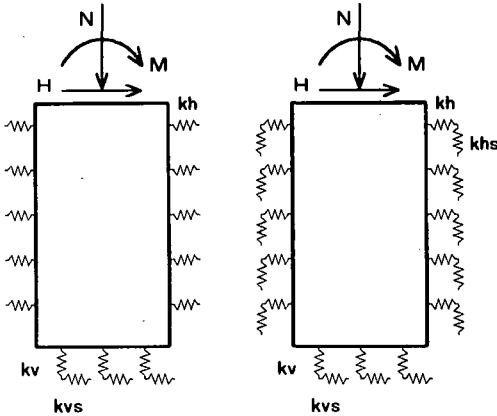


図-7 基礎底面の鉛直方向地盤反力とせん断地盤反力の関係



(1)側面せん断ばねなし (設計標準での手法) (2)側面せん断ばね考慮

図-8 解析モデル

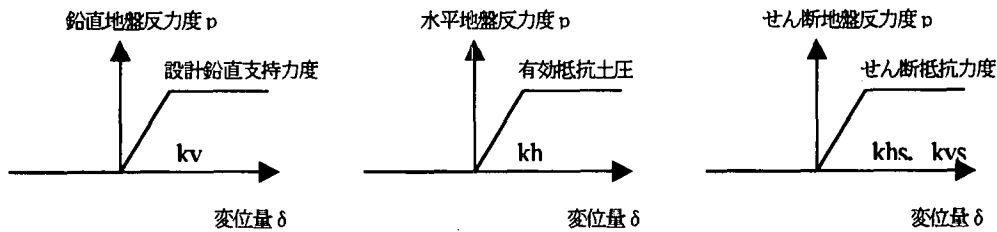


図-9 地盤ばねモデル

断ばねについても、水平方向底面の直応力をもとに定めたせん断抵抗力を上限值とした。ただし、底面のせん断地盤ばね反力の上限值については交番载荷の影響により、底面地盤が乱され、せん断抵抗力が低下していることを考慮し、粘着力 C は考慮していない。なお、地盤と模型基礎（鋼製）との間の摩擦角は土の内部摩擦角 ϕ の $1/2$ とした。

(2) 解析結果

a) 荷重変位曲線

解析により得られたケーソン基礎天端での荷重変位曲線を载荷試験結果の骨格曲線とともに図-10に示す。これより、前面のせん断ばねを考慮した方が、実験結果をよくシミュレートできることが分かる。ここで、基礎標準²⁾で設定している基礎の降伏点は、天端での水平変位量が $600\text{mm} \times 0.012 = 7.2\text{mm}$ に達したときであり、この場合、水平荷重で約 2.0tf 作用時となる。同変位量での前面のせん断抵抗を考慮していない場合の水平载荷重は約 1.7tf となり、約15%抵抗力の低い結果となる。

b) 地盤反力分布

周面せん断ばねを考慮した場合の解析により得られた地盤反力分布を载荷試験結果の地盤反力分布とともに図-3～図-5に示す。これより、定性的に解析結果はよく実験結果に合っていることが分かる。また、直応力とせん断地盤反力には相関関係のあることが認められたが、解析でもこれを良く表現できていることが分かる。ただし、今回の解析では、せん断方向のばねについては、一律鉛直地盤反力、水平方向ばねの $1/3$ としているため、解析で設定した線形範囲ではせん断地盤反力が一定の値となっている。

これらのばね値およびその上限値は、設計計算上は安全側に考慮すれば良いと考えられる。しかし、詳細に検討を行う場合は、直応力に依存した摩擦抵抗的な機構で支持するような設定を行った方が実状にあっているものと考えられる。

4. まとめ

表-1 解析条件

基礎底面地盤のゆるみ係数	$\beta v = 1.0$
土の粘着力度	$c = 1.8(\text{tf/m}^2)$
土の内部摩擦角	$\phi = 30^\circ$
側面地盤のN値	平均 7
側面地盤のN値	8
基礎底面と土の付着力度	$c' = c$
基礎底面と地盤との摩擦角度	$\delta b = \phi / 2$
基礎側面と地盤との摩擦角度	$\delta s = \phi / 2$
各地盤の変形係数	$E0 = 25\text{N}(\text{kgf/m}^2)$
基礎前面の形状係数	$\alpha h = 1.35$
基礎側面影響係数	$\alpha s = 1.00$
基礎前面の水平方向ばね値の上限値	$A(\alpha h Kp - K0) \sigma v$
基礎前面のせん断方向ばね値の上限値	$A(\alpha h Kp \sigma v \tan \delta s + c)$
基礎底面の鉛直方向ばね値の上限値	地盤の極限鉛直支持力
基礎底面のせん断方向ばね値の上限値	$A(\sigma v \tan \delta b)$

各記号、各ばね値の算出は基礎標準による

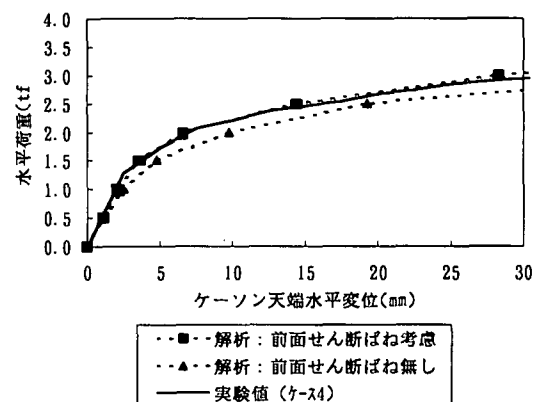


図-10 荷重変位曲線（実験および解析結果）

以上より、兵庫県南部地震規模の大地震を考慮した場合、基礎前面のせん断地盤反力の影響を考慮した方が実際の現象をよく説明できることが分かった。今後、さらに検討を重ね、適切な基礎前面せん断抵抗力の設定方法とともに、合理的な地震時の解析手法を提案していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 棚村 史郎, 久楽 博, 羽矢 洋, 西村昭彦, 模型ケーソン基礎の大変位水平载荷試験(その3), 第28回土質工学会, 1993.6
- 2) 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎・抗土圧構造物 平成9年3月