

柱状体基礎の地震時挙動に関する模型振動台実験

貴志 友基¹・福井 次郎²・大越 盛幸³・白戸 真大⁴・寿上 隆司⁵

¹正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室 研究員

²正会員 工修 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室 室長

³正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室 研究員

⁴正会員 工修 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室 研究員

⁵正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室 交流研究員

1. はじめに

兵庫県南部地震の後、平成8年に改定された道路橋示方書（以下、道示とする）では、橋全体として所要のじん性を確保するために、橋脚だけでなく、橋脚基礎に対しても地震時保有水平耐力法が導入されている¹⁾。地震時保有水平耐力法による基礎の設計においては、基礎の耐力や大変形時の挙動を算定する場合、地盤抵抗および基礎本体の非線形性を考える必要があるため、これらの現象を適切にモデル化しなければならない。

ケーソン基礎、鋼矢板基礎、地中連続壁基礎など、設計上1本の柱状体として取り扱うことができる基礎（以下、柱状体基礎とする）においては、過去に実施された多くの静的一方荷試験により、基礎地盤の静的な抵抗特性が解明されてきた。現行の道示では、それらのデータを反映して、柱状体基礎の静的安定計算法が提案されている²⁾。しかし、柱状体基礎の地震時動的挙動に対する地盤の減衰特性や履歴則等は、動的な繰り返し試験の実施例が少ないことなどにより、未だ十分に解明されていない。

ここでは、柱状体基礎と地盤の動的な挙動や抵抗特性を把握して、静的な抵抗特性との違いを明らかにするとともに、大地震時における合理的な柱状体基礎の設計法を確立するために必要な基礎データを得るため、ケーソン基礎を例に模型振動台実験を実施し、基礎と地盤の振動特性を調査した。

2. 実験の概要

実験は、三次元大型振動台（テーブル寸法8m×8m：建設省土木研究所所有）にせん断土槽（縦4m×横4m×高さ2.1m）を固定して行った。せん断土槽内には砂

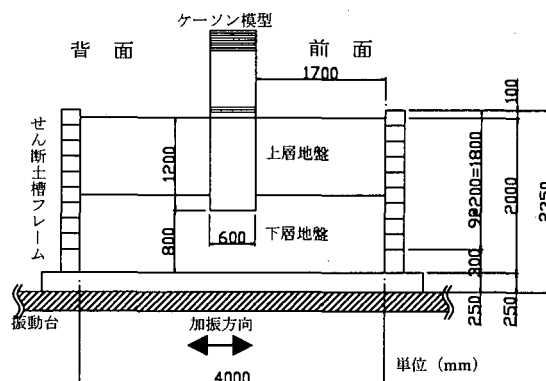


図-1 実験概要図

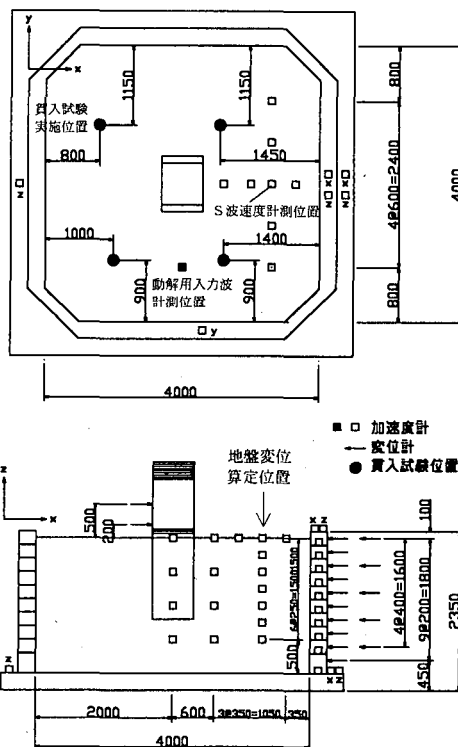


図-2 各センサー設置図

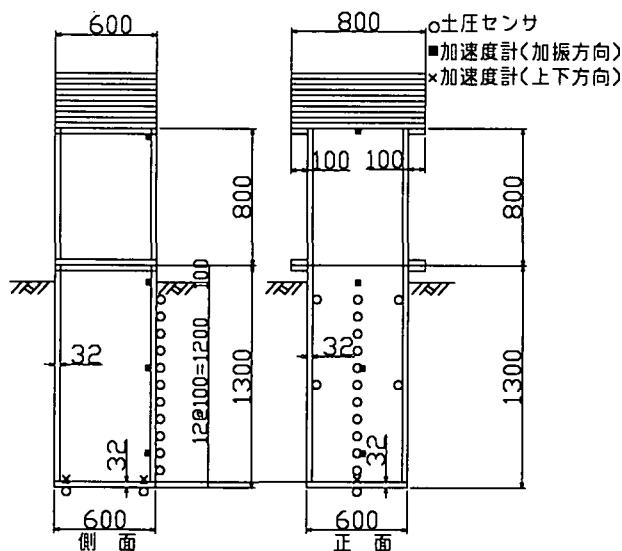


図-3 ケーソン模型 センサー設置図

地盤を作成し、砂地盤中に、実構造物の約1/10のケーソン基礎模型を設置した。ケーソン基礎模型は、加振に伴う模型自身の変形を計算上無視できるように、板厚32mmの鋼板を用いて十分な剛性を確保した。

図-1に、実験の概要図を示す。図-2に、地盤内に設置した各センサー位置を、また、図-3に、ケーソン基礎模型の形状・寸法、センサー設置位置を示す。表-1に、ケーソン基礎模型の諸元を示す。試験ケースはCase1、Case2の2ケースとし、Case2はCase1に対して気中部分の慣性力が1.5倍程度になるように定めた。表中の固有振動数は、地盤バネ定数をS波速度（後述）ベースで評価して求めた計算値である³⁾。

試験地盤の層厚は2.0mとし、乾燥させた豊浦砂を用いて作成した。地盤の下部1.0mは支持地盤、上部の1.0mは表層の地盤とみなし、相対密度の目標値を、それぞれ $Dr=80\%$ 、 50% に設定した。地盤は、空中落下法により作成を行い、目標の相対密度を満足するよう落下高さおよび撒き出し量を調整した。密度管理は、25cm毎に層厚による管理とモールドによる管理を行った。また、加振の前後で、コーン貫入試験およびS波速度の測定を実施し、地盤強度とS波速度の変化を計測した。

本加振の前に、試験地盤とケーソン基礎模型の共振点を確認するため、入力加速度10gal、加振周波数1~20Hzにてスウィープ試験を行った。地盤の固有振動数は12Hz前後であった。ケーソン基礎模型の固有振動数は明確に現れず、表-1の計算値との比較確認は出来なかった。次に、本加振での加振周波数を設定するため、入力加速度50galにて、周波数を変化させてケーソン基礎模型とせん断土槽フレームの変位を比較した。その結果、せん断土槽フレームの各段の相対変位量が、装置の移動限界値を超えないように配慮し、加振周波数を2Hzに決定した。

表-1 ケーソン基礎模型の諸元

ケース	Case 1	Case 2
供試体寸法	0.6×0.6×1.2m (根入れ長)	
上載荷重	12.5kN	17.2kN
上載荷重重心 (地表から)	76.2cm	87.1cm
模型重心 (地表から)	22.2cm	41.2cm
固有振動数 (計算値)	19.2Hz	11.3Hz

表-2 加振測定条件の一覧

Case		加振実験
1	入力加速度 (gal)	10~600
	加振周波数 (Hz)	2
	入力波形	正弦波
	加振時間 (秒)	10~20
	計測時間 (秒)	20~25
2	入力加速度 (gal)	50~600
	加振周波数 (Hz)	2
	入力波形	正弦波
	加振時間 (秒)	15
	計測時間 (秒)	25

本加振は、入力加速度を10~600galまで段階的に上げ、水平一方向に正弦波を入力して行った。加振および計測条件の一覧を表-2に示す。

3. 実験結果

3.1 地盤相対密度

モールドによる密度測定の結果、模型地盤作成時の相対密度は下部の支持地盤で $Dr=80\sim81\%$ 、上部地盤で $Dr=47\sim54\%$ となり、相対密度は、上部地盤では目標値に対して6~8%、下部地盤では1%のばらつきの範囲で得られており、目標通りの均一で締まった模型地盤が作成できたものと考えられる。

3.2 コーン貫入試験、S波速度の測定

加振前後での貫入抵抗と深度の関係を図-4に示す。加振前、加振後ともに、GL-1.0m付近までは深度の増加とともに貫入抵抗値も増加した。また、GL-1.0m以深の地盤では、貫入抵抗が上部の地盤と比較して大きくなり、反力が不足したために貫入が不能となる箇所が多かった。加振の前後を比較すると、GL-0.3m以深では、加振後2~6MN/m²程度貫入抵抗が増加しており、加振によって地盤が密な状態になっていた。しかし、GL-0.3m付近までは、先端コーンとロッドが自重で自沈し、表層近くの地盤は乱されて緩んでいることを確認した。

S波速度の測定の結果、Case1では上下部地盤とも加振前210m/s、加振後230m/sであった。Case2では上

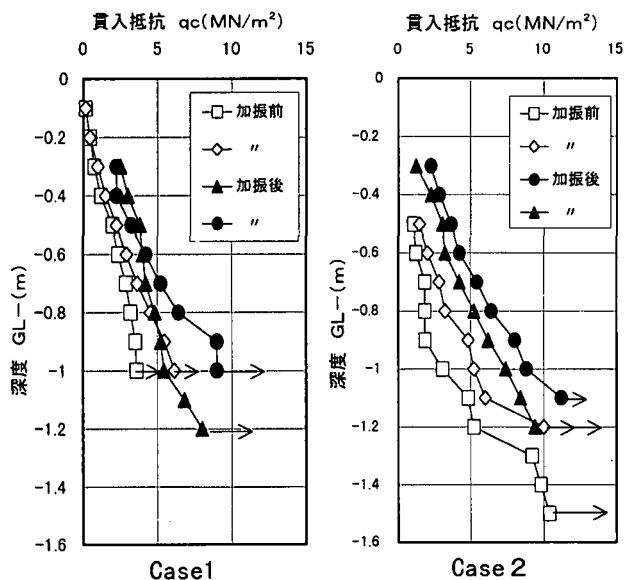


図-4 コーン貫入抵抗の深度分布

下部地盤とも加振前 210 m/s、加振後 250m/s であった。コーン貫入試験結果と異なり、S波速度の測定結果では、上下部地盤での差が明確に現れなかった。

3.3 セン断土槽の変位応答

図-5 1) ~ 2) に 300gal 入力時のせん断土槽の振動モード図を、同じく、図-5 3) ~ 4) には 500gal 入力時のせん断土槽の振動モード図を示す。縦軸は、砂

地盤の表面位置からの深度を示している。せん断土槽フレーム (以下、フレームとする) の変位は、フレーム各段に設置した加速度計の測定値を 2 回積分したものである。

300gal 入力時では、-0.4m より上部のフレームの変位が大きくなっている。これは、加振により地盤が沈下し、最上段のフレームが、地表面から突出した状態になり、地盤によるフレームの拘束が小さくなったことが原因と思われる。したがって、実験の途中で最上段のフレームの振動を抑制するために、2 段目のフレームと固定した。また、500gal 入力時では、-0.6m より上部での変位が急増し、位相のずれも目立っている。地盤が更に沈下したこと、入力加速度の増大などが理由で、砂自重とフレーム重量による慣性力が増大し、3 段目フレーム位置までの砂地盤の拘束が、相対的に小さくなったことが理由と考えられる。一方、Case1、Case2 とともに、300gal 入力時では -0.4m 以深で、500gal 入力時では -0.6m 以深で、フレームの変位が下部から上部へ伝播し、土槽がせん断変形している様子がわかる。両者のせん断土槽の変位応答には、顕著な差異は認められない。

3.4 地盤とケーソンの変位応答

せん断土槽の変位応答に関して、Case1 と Case2 の両者に大きな違いは認められない。ここでは、Case2 について地盤とケーソンの変位応答を比較する。

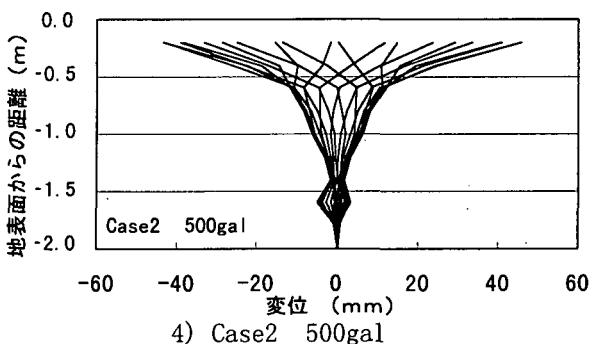
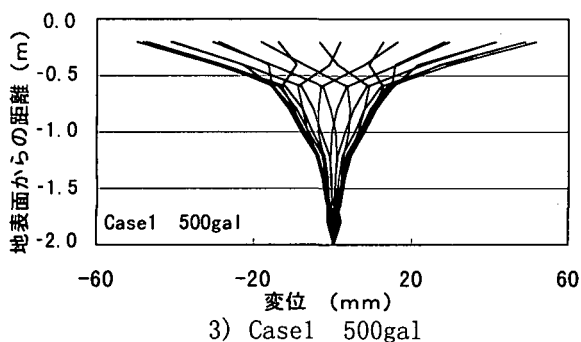
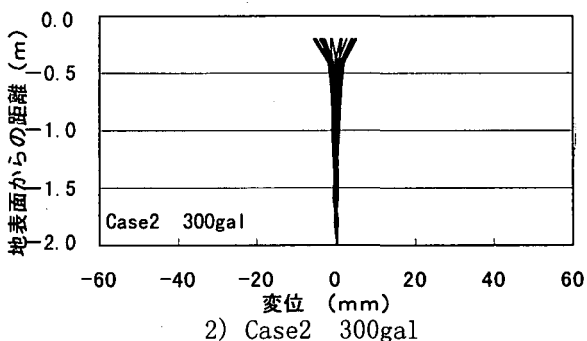
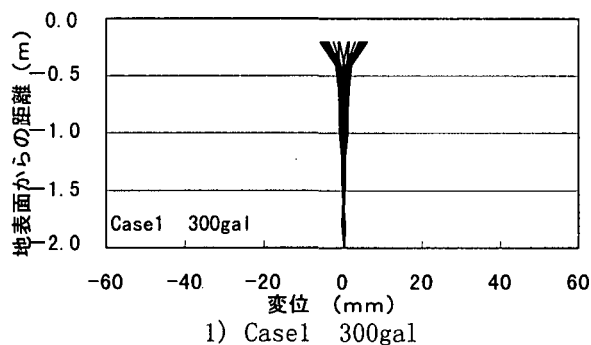


図-5 セン断土槽の振動モード

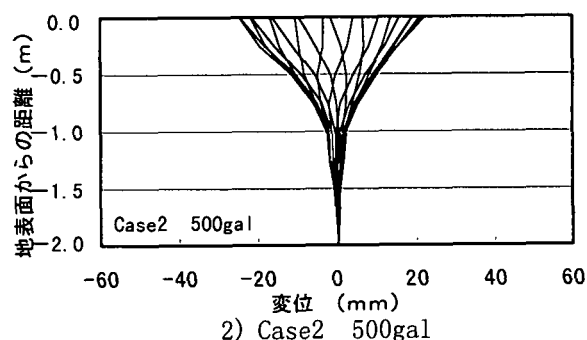
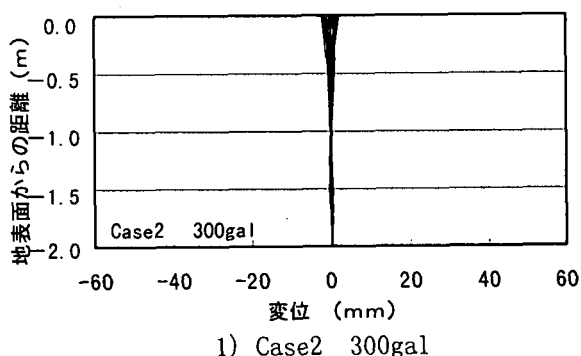


図-6 地盤の振動モード

a) 地盤の応答

図-6 1) ~ 2) に、300gal、500gal 入力時の地盤の振動モード図を示す。地盤変位は図-2に示す位置で、加速度計の測定値を2回積分して算出した値である。

(これ以降、地盤の変位は、断らない限り加速度計の測定値を2回積分したものとする。) 各深度の変位は、振動台との相対変位を表している。

300gal 入力時では、地盤変位量は少なく、下部から上部までほぼ同位相に振動している。地盤表面での変位量の最大値は、2mm 程度であった。

500gal 入力時の地盤変形は、ケーソン基礎模型が設置されている-1.0m より上部地盤と、それより下部の地盤では挙動が異なっており、地盤がケーソン基礎模型の影響を受けて変位している様子が伺える。更に、-0.6m 付近から上部の地盤では、位相のずれが大きくなっており、地盤表面の変位の最大値は、25mm 程度となっている。せん断土槽の変位と比較すると、-0.6m 以深の地盤変位は、せん断土槽とほぼ同じ値である。しかし、-0.6m より上部では、フレーム変位が急増するのに対し、地盤変位は急増しておらず、地盤とフレームの一体性が保たれていない。

b) ケーソン基礎模型の応答

図-7 1) ~ 3) に、300gal~600gal 入力時のケーソン基礎模型の振動モード図を示す。ケーソン基礎模型

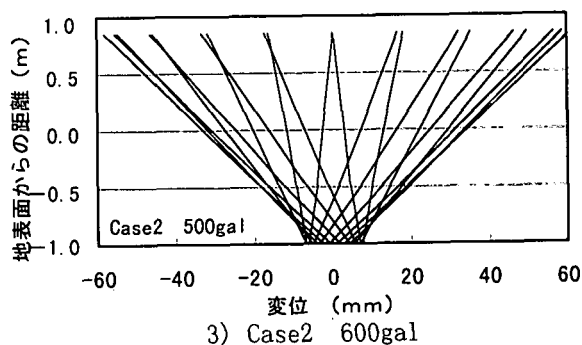
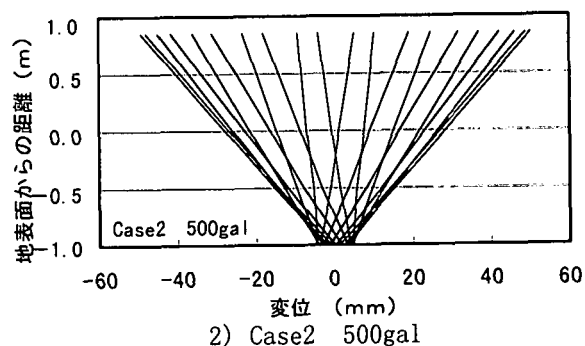
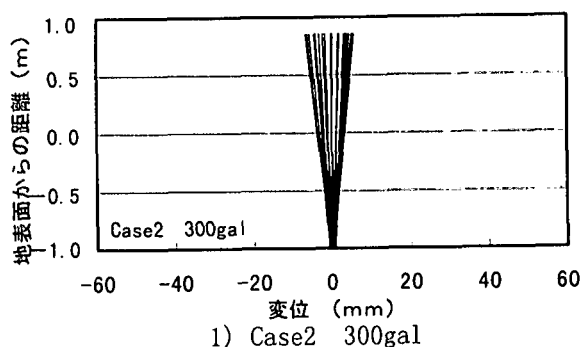


図-7 ケーソン基礎模型の振動モード

の変位は、図-2に示す加振方向に設置された加速度計の測定値を2回積分して算出した値である。各深度の変位は、振動台との相対変位を表している。ケーソン基礎模型は、地盤に対して剛性が高く、300gal~600gal 入力時の変位は、下部から上部にかけて剛体変形を示している。地盤表面位置での変位量の最大値は、300gal 入力時で3mm 前後、500gal 入力時で30mm 程度、600gal 入力時は35mm 程度となっており、地盤とほぼ同程度の変位である。

ケーソン基礎模型は、300gal 入力時はロッキング (回転) が卓越し、500gal、600gal 入力時は、スウェイ (横揺れ) が加わり、スウェイとロッキングの間には位相差が生じている。このような運動をすることで、回転中心が上方へ移動したと考えられる。

c) 地盤とケーソン基礎模型の応答の比較

図-8 1) ~ 2) に、300gal、500gal 入力時の地盤

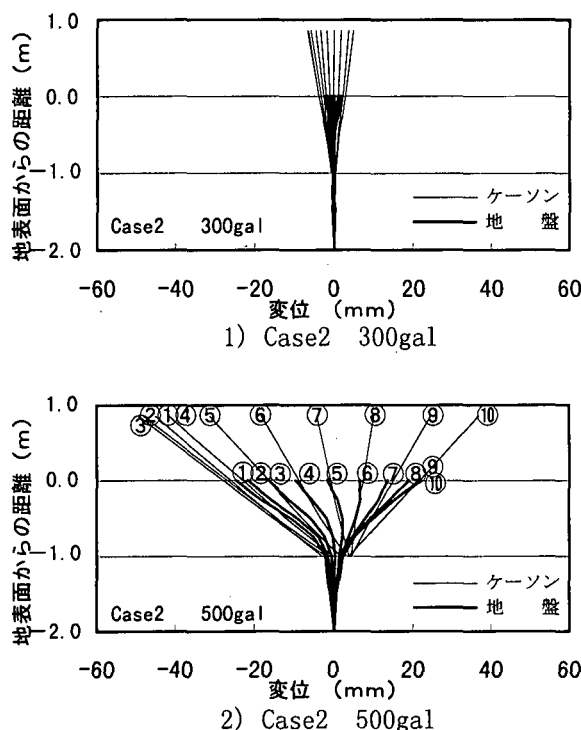


図-8 地盤とケーソン基礎模型の振動モード比較
とケーソン基礎模型の振動モードの比較図を示す。図-8 2) 中の番号は、同時刻でのケーソンおよび地盤の振動モードであることを示している。300gal 入力時の地盤とケーソン基礎模型の地盤表面位置での相対変位量は、1~2mm 程度となっている。500gal 入力時では、地盤の振動に強制されるようにケーソン基礎模型が振動している様子が伺える。また、ケーソン基礎模型の存在によって、地盤変位が影響を受けているため、-1.0m より上部では地盤変位が増加し、下部の地盤変位と違いが生じていると考えられる。500gal 入力時の地盤表面位置での相対変位量の最大値は、13~15mm 程度で、300gal 入力時の 1.5mm 程度と比較して、大きな値となっている。

3.5 水平地盤反力分布

図-9 は、ケーソン模型の前面に配置した圧力センサーより得られた水平方向地盤反力度の最大値の深度方向分布を、各入力加速度毎に Case1、Case2 の両ケースについて示したものである。図-9 中には、道示に基づいて計算したケーソン基礎の水平方向地盤反力度の上限値を併せて示しているが、これは加振前と加振後に行った、コーン貫入試験の貫入抵抗値をもとに求めた地盤定数を用いて算定したものである。

Case 1 では、500gal で上層地盤の水平方向地盤反力度の計測値が、計算による上限値を上回っている。Case 2 の場合は、300gal で、ほぼ上限値と同じ値を示し、500gal で道示の上限値を上回っている。道示では、上

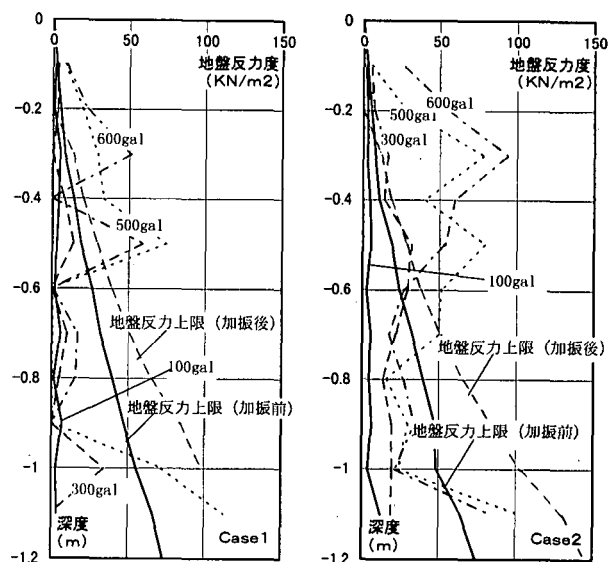


図-9 水平方向地盤反力度（最大値）の分布

層地盤で地盤反力度が上限値に達すると地盤反力度が下層地盤に再配分されると仮定している。しかし、実験結果では、500gal、600gal 入力時では、-0.6m より上部の水平方向地盤反力度は、計算による上限値を大きく上回っており、地盤反力度の再配分の傾向は見られない。また、500gal、600gal 入力時は、図-7 に示した振動モードに対応し、ケーソン下層の地盤反力度が大きくなっている。ただし、本実験で使用した土圧計測用の圧力センサーは、直径 5mm 程度の小さなもので、砂粒子と局部的に接触することで極端に大きな値を示すことも考えられるため、実験結果に対しては慎重な判断を要する。今後は測定精度を向上させ、再度検討を行う必要がある。

3.6 履歴曲線

図-10 に Case 2 の加振試験で得られたケーソン模型重心での応答加速度と、基礎天端（地盤表面位置）でのせん断土槽天端とケーソン基礎模型の相対水平変位の履歴特性を示す。それぞれ、入力加速度 100, 300, 500, 600gal でのケーソン模型の振動が定常状態になった時

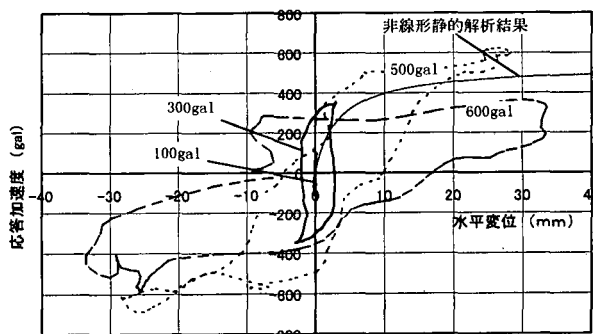


図-10 模型応答加速度-基礎天端相対変位

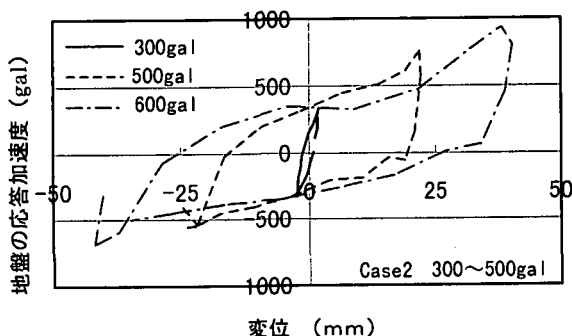


図-1 1 地盤表面位置での地盤の応答加速度と振動台との相対変位

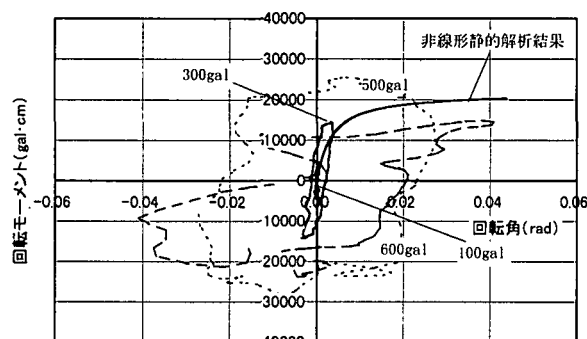


図-1 2 基礎天端の回転モーメントー回転角

の任意の1ループである。ここに、相対水平変位は、土槽天端に据え付けた梁に取り付けた治具を介して設置した変位計の計測値から求めている。また、ループ形状が乱れているが、この原因には、変位計取付け治具の高周波振動の影響等が考えられる。100gal 入力時では、履歴形状は弾性的な挙動を示し、300gal 入力時では、S字型のループ形状を示し始める。500gal 入力時では、相対変位が急増し、地盤が塑性化していることが確認できる。600gal 入力時では、地盤が更に塑性化し、履歴のループ形状は、500gal 時点とほぼ同様な形状を保ちながら最大応答値が下がっている。また、500gal 入力時までは応答加速度ー水平変位の骨格曲線は、ほぼバイリニア型の特徴を示している。

図-11 に、地盤表面位置での地盤の応答加速度と振動台に対する地盤の相対変位の履歴について、300～600gal の入力加速度毎に示すが、入力加速度の増加に伴ない、地盤自体の剛性が次第に低下している。また、図-4 のコーン貫入試験の結果においても、上層 30cm 程度の地盤では、貫入コーンが自沈してしまい、地盤の緩みが確認されている。これらのことから、上層地盤が緩い状態に変化し、ケーソン基礎模型の応答も、図-10 に見られるように低下したと考えられる。

図-12 に、ケーソン模型重心位置の応答加速度によって、基礎天端に作用するモーメントと基礎天端の

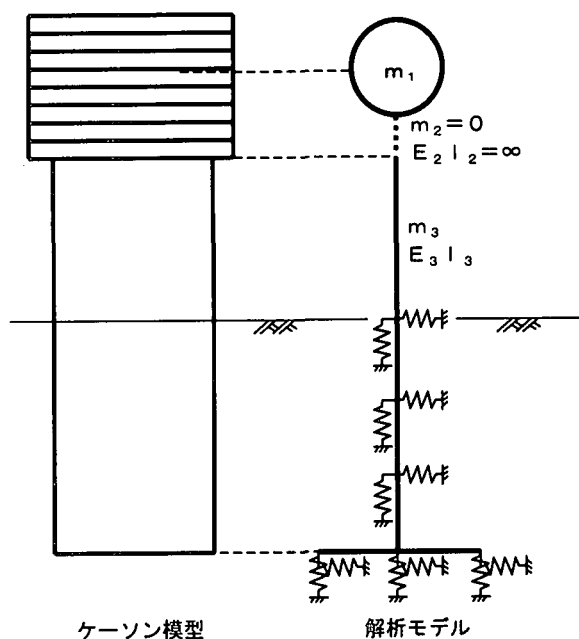


図-1 3 非線形静的解析のモデル

回転角の履歴特性を示す。300gal 入力時までは、図-10 と同様にほぼ弾性的な挙動を示すが、500gal 入力時からケーソン模型に位相差のあるロッキングとスウェイが起り、ループ形状が円形に近くなっている。600gal 入力時は、図-10 と同様に最大応答値が下がっている。

コーン貫入抵抗値から求めた地盤定数をもとに地盤パネを設定し、図-13 に示す道示の解析モデルによって非線形静的解析(漸増載荷解析法)を行い、これによって得られた骨格曲線を、図-10 および図-12 に併せて示す⁴⁾。地盤の塑性化による減衰が顕著になるまで(本実験結果については500gal 入力時まで)の履歴曲線は、静的解析によって概ね表現できると考えられる。なお、本実験では、ケーソン模型をせん断土槽内に設置した後

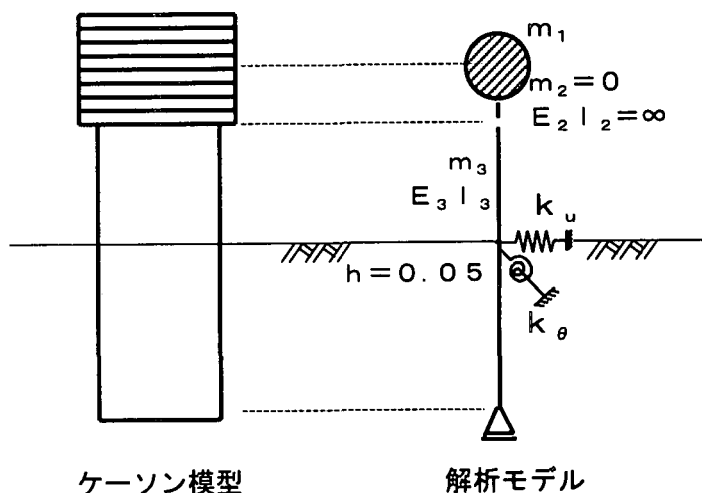


図-1 4 動的解析モデル

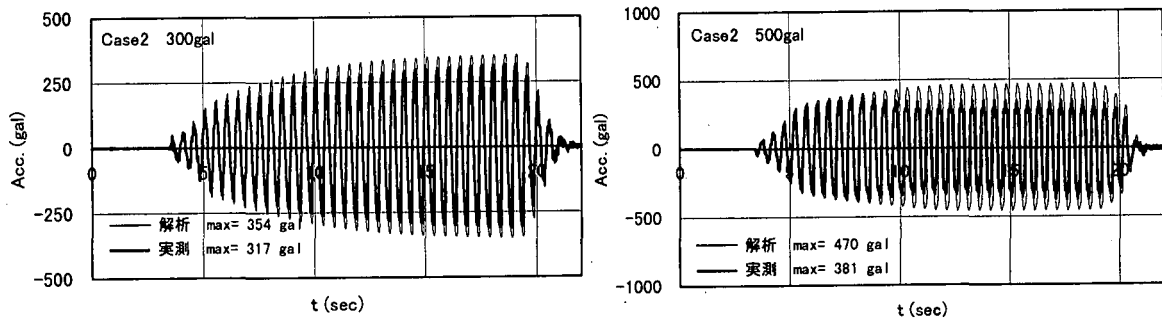


図-15 基礎天端応答加速度の時刻歴

で砂地盤を作成しているため、地盤の周面抵抗は期待できないと判断し、非線形静的解析では周面地盤のせん断抵抗は考慮していない。

4. 時刻歴応答解析結果と実測応答の比較

時刻歴応答解析によって、ケーソン基礎の動的な挙動を数値シミュレーションし、実測の応答値との比較、考察を行った。解析モデルには、図-14に示すように、地盤バネを地表面での水平、回転の集約バネに置き換えたものを考えた。ここで、地盤バネは基礎と地盤の相対変位を考慮したものである。地盤の水平および回転バネの非線形性と履歴特性は、3.6での非線形静的解析による骨格曲線を、H-Dモデルによって近似するように設定した⁵⁾。入力波には、ケーソン模型の影響が少ない箇所での地表面の実測加速度を用いた(図-2参照)。せん断土槽では、振動エネルギーの逸散減衰が実地盤と比

較して小さいため、解析に用いた地盤バネには、減衰比として0.05を与えた。

4.1 応答加速度の時刻歴

図-15に、Case2の300, 500gal入力時の基礎天端(地盤表面の位置)での時刻歴応答解析結果と実測による応答加速度の時刻歴を示す。解析結果と実測値の応答加速度の時刻歴は、300, 500gal入力時共に位相は良く一致しており、波形もほぼ同様の形状を示している。最大応答加速度は、300gal入力時で、実験317galに対して解析354gal、500gal入力時で実験381galに対して解析470galであった。

4.2 応答加速度-相対変位の履歴

図-16に、Case2について、基礎天端(地盤表面の位置)での実測と解析による応答加速度と、土槽天端とケーソン基礎模型の相対水平変位の履歴を示す。実験の履

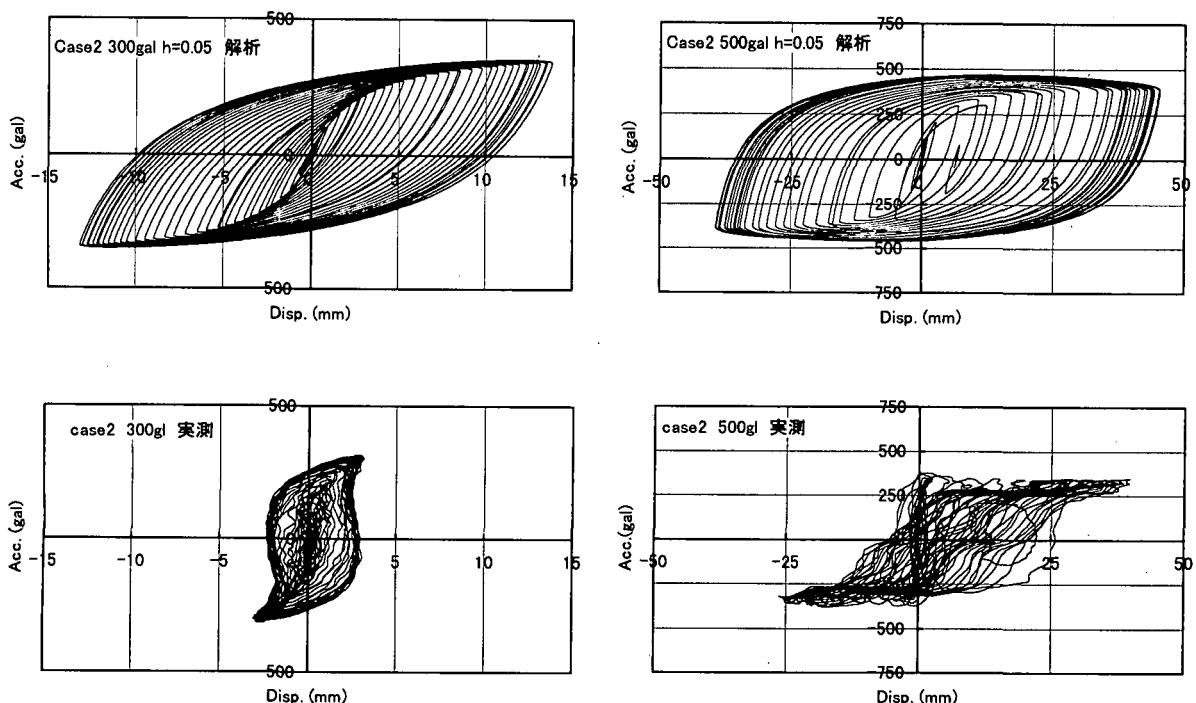


図-16 基礎天端応答加速度-変位の履歴

履歴形状は、S字形を示し、特に 500gal 入力時では、これが顕著である。一方、解析の履歴形状は実験と異なり、変位が大きくなる。解析では、地盤バネの履歴特性としてH-Dモデルによる近似を行っており、その骨格曲線や履歴特性の設定が実際と多少異なるためと考えられる。今後は、いろいろな地盤条件で実験を重ねることで、地盤バネの動的な履歴特性をより詳細に把握し、適切な履歴モデル設定を行っていく必要がある。

5. おわりに

本実験では、以下の結果を得た。

- ①土圧計により求めた水平方向地盤反力度は、上層地盤において道示に定める上限値を超えても下層地盤へ再配分されなかった。一方、道示の非線形解析モデルは、スウェーとロックの位相差が大きくなるまでは、実験の挙動を比較的良く再現した。今後は測定精度を向上させてデータを蓄積し、地盤の抵抗機構について再度確認する必要がある。
- ②地盤とケーソン基礎模型は、相互に影響を及ぼし合っ
て振動している。また、地表面位置での振動台を基準とした変位量の最大値は、ほぼ同等である。
- ③応答加速度－変位の骨格曲線は、地盤の塑性化による減衰が顕著になるまでは、ほぼバイリニア型の特性を示し、以降は応答値が低下する。
- ④既存の履歴モデルによる動的解析では、実際の挙動を表現しきれないため、今後は、様々な地盤条件での試験データを蓄積し、適切な履歴モデルを設定する必要がある。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編 1996. 12
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編 1996. 12
- 3) (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 1997. 3
- 4) 技報堂出版(株)：橋梁の耐震設計と耐震補強 1998. 4
- 5) (社) 土木学会：動的解析と耐震設計(第1巻)地震動・動的物性 1989. 12