

◆ 構造物模型実験特集 ◆

柱状体基礎の振動台実験

貴志友基* 福井次郎** 大越盛幸*** 白戸真大**** 寿上隆司*****

1. はじめに

基礎地盤の静的な抵抗特性は、過去に実施された多くの静的一方向載荷試験により解明されつつあり、これらのデータを反映して、ケーソン基礎、鋼管矢板基礎、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)の静的な安定計算法が提案されている¹⁾。一方、動的な繰り返し試験の実施例は少なく、柱状体基礎の地震時動的挙動に対する地盤抵抗の減衰特性や履歴則等は未だ十分に解明されていない。本実験は、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し、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的データを得るために、ケーソン基礎を例に模型振動台実験を実施したものである。

2. 実験の概要

実験は、土木研究所所有の三次元大型振動台(テーブル寸法8m×8m)上にせん断土槽(縦4m×横4m×高さ2.1m)を固定し、せん断土槽内に作成した砂地盤中に実構造物の約1/10の縮尺のケーソン基礎模型を設置した。

図-1に、実験の概要図を示す。地盤内に設置した各センサー位置を図-2に、またケーソン模型の

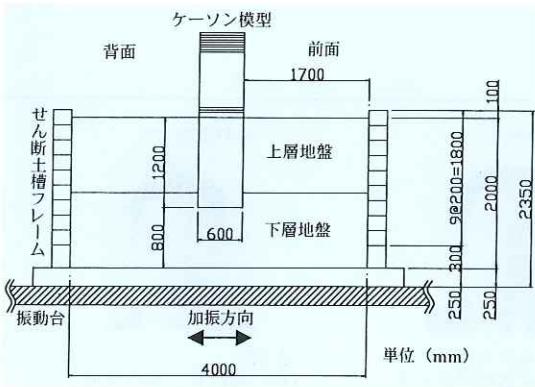


図-1 実験概要図

A Shaking Table Test on Dynamic Behavior of Caisson Type Foundation

形状・寸法、センサー設置位置を図-3に示す。ケーソン模型は、加振に伴う変形を計算上無視できる

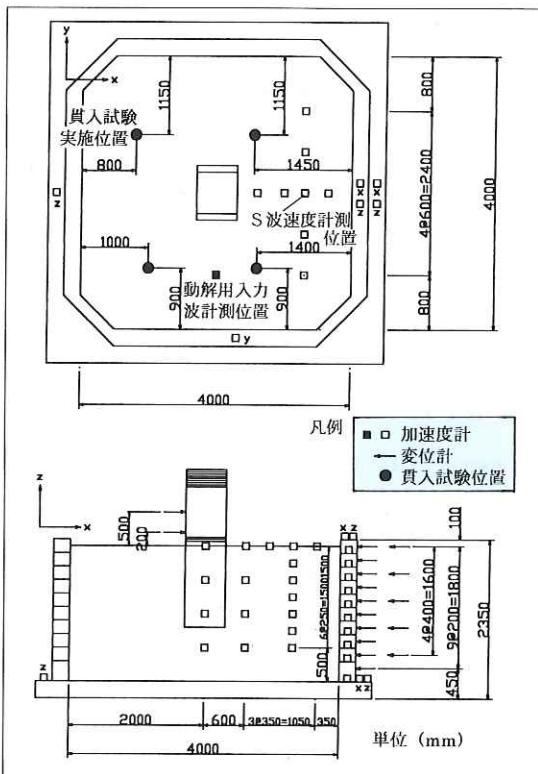


図-2 各センサー設置図

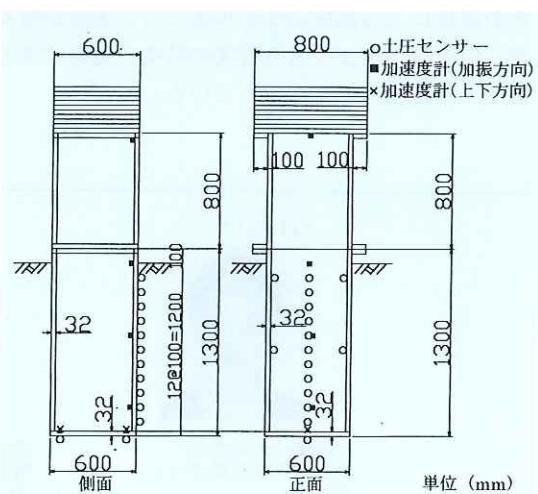


図-3 ケーソン模型、センサー設置図

表-1 ケーソン模型の諸元

ケース	Case1	Case2
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

剛性を確保するために、板厚32mmの鋼板を用いて製作した。

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-1にケーソン模型の諸元を示す。表中の固有振動数は道路橋示方書(以下、道示とする)に基き、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²⁾。

試験地盤は、乾燥させた豊浦砂を用いて作成した。地盤の下部1.0mを支持地盤、上部の1.0mを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。地盤の作成方法は、空中落下法により行い、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密度管理を行った。また、加振前後には、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。

本加振前に、試験地盤とケーソン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にてスウェーブ試験を行った。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。

本加振は表-1に示す2ケースについて、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

模型地盤作成時のモールドによる密度測定の結果、下部の支持地盤はDr=80~81%で、ほぼ目標通りの締まった地盤であることを確認した。上部地盤もDr=47~54%となり、目標に近い地盤となっていた。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、均一な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

図-4に、加振前後での貫入抵抗と深度の関係を示す。加振前後ともに、GL-1.0m付近までは深度の増加に伴なって貫入抵抗値も増加する。

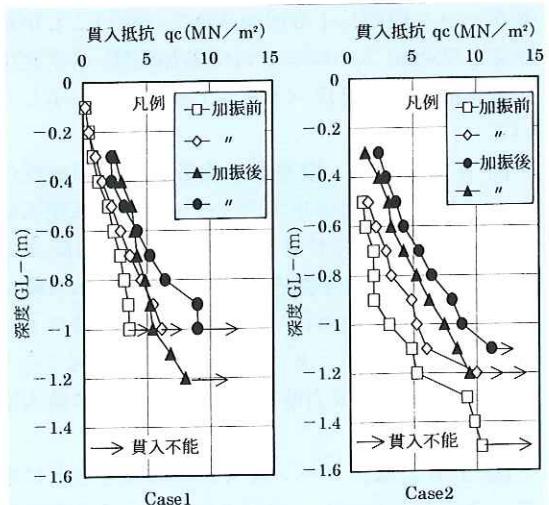


図-4 コーン貫入抵抗の深度分布

GL-1.0m 以深からは、上部の地盤と比較して貫入抵抗が大きくなり、反力不足のために貫入不能となる箇所が多かった。加振の前後を比較すると、GL-0.4m 以深では、2~6MN/m² 程度貫入抵抗が増加しており、加振によって密な状態になっていた。しかし、GL-0.4m 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たことが確認された。

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、Case2 では上下部地盤とも加振前 210 m/s、加振後 250m/s であった。S 波速度は、コーン貫入試験結果と異なり上下部地盤での差が明確に現れていない。

3.3 履歴曲線

図-5 に Case2 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(地表面)のせん断土槽フレーム天端との相対水平変位の履歴特性を示す。図では、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の任意の 1 ループを示す。ループ形状が乱れているが、この原因是、変位計取付け治具の振動による高周波成分の影響等が考えられる。100gal 入力時では、弾性的な挙動を示す。300gal 入力時では、履歴曲線は 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、ループ形状は 500gal 時点とほぼ同じ形状を保ちながら最大応答値が小さくなり、地盤の降伏によって振動台からの振動がケーソン模型に十分伝達されていないことがわかる。500gal 入力時までは応答加速度-水平変位の骨格曲線は、ほぼバイリニア型の特性を示している。

図-6 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回転角の履歴特性を示す。300gal 入力時までは、ほぼ弾性的な挙動を示すが、500gal 入力時から、ケーソン模型のロッキング(回転)とスウェイ(横揺れ)が起こり、ループ形状が円形に近くなっている。600gal 入力時は、図-5 と同様に最大応答値が下がる。

図-5, 6 には、コーン貫入試験結果をもとに地盤バネ定数を設定し、道示モデルによる非線形静的解析(漸増載荷解析法)によって得られた骨格曲

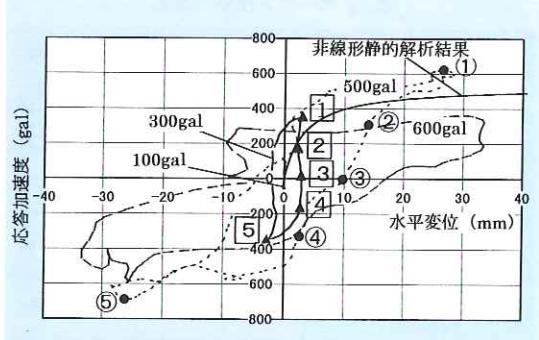


図-5 模型応答加速度-基礎天端相対変位

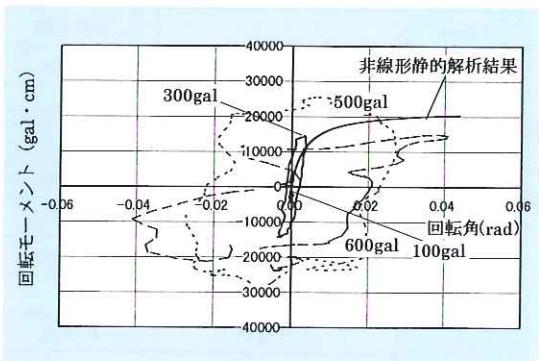


図-6 基礎天端の回転モーメント-回転角
線を併せて示す³⁾。履歴曲線は、地盤の塑性化による減衰が顕著になるまでは、静的解析によって概ね表現できると考えられる。なお、本実験では、ケーソン模型をせん断土槽内に設置した後、砂地盤を作成しているため、地盤の周面抵抗は期待できないと判断し、解析では周面地盤のせん断抵抗は考慮していない。

3.4 剛性比および等価減衰定数

図-5 より、入力加速度 100gal 時はほぼ弾性的な挙動をしているので、このときの履歴曲線の勾配を初期剛性とし、この値と各入力加速度時の最大変位時の割線剛性との比、および等価減衰

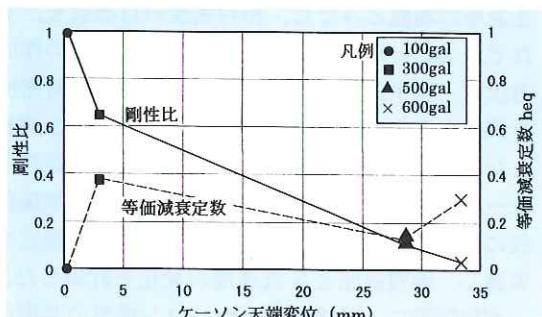


図-7 刚性比、等価減衰定数-基礎天端変位

定数と基礎天端での水平変位の関係を図-7に示す。剛性比は、入力加速度の増大に伴ない減少し、500gal 入力時には、初期の 10%まで減少している。等価減衰定数については、500gal 入力時に幅の狭い S 字形の履歴形状が顕著に現われるため 13%程度に減少している。

3.5 振動モード

図-8 に Case2 の 300gal および 500gal 入力時の振動モード図を示す。図中の番号は、図-5 中の各番号の状態に対応している。

a) ケーソン模型と地盤の挙動

300gal 入力時では、ケーソン模型の応答加速度と地盤の応答加速度の分布はほぼ同様で、同位相振動モードを示しており、地盤とケーソン模型は一体となって振動していることがわかる。ケーソン模型の挙動は、左右へのスウェイ運動が卓越している。しかし、500gal 入力時では、②～④にかけて下層地盤に対して上層地盤に位相の遅れが生じ、これに伴いケーソン模型も上端と下端で位相がずれた振動となっている。特に②～③では上端と下端の加速度の符号が逆転しており、ケーソン模型が回転し、スウェイ・ロッキング運動を起こしていることがわかる。

b) 地盤の水平抵抗

300gal 入力時のように地盤とケーソン模型が同位相に振動している場合、前面地盤に対するケ

ソン模型の相対加速度が正の時、ケーソン模型には前面地盤の水平抵抗が作用していることになる。300gal 入力時、①ではケーソン模型の根入れ長のほぼ全長に渡って前面地盤から水平抵抗を得ている。逆に、④、⑤の時点での相対加速度は負の値になり、背面地盤からの抵抗を受けていると考えられる。一方、500gal 入力になると、①の時点での相対加速度は、ケーソン模型の根入れ長のほぼ全長で負の値となっており、前面地盤の水平抵抗を受ける範囲は、ケーソン模型先端の極少ない領域となっている。②、③では、深度-0.4m 程度から以深の領域で前面地盤の水平抵抗が生じている。上層地盤の塑性化によって、ケーソン模型の挙動が、ロッキング運動の卓越した状態へと移行していると考えられる。

3.6 水平地盤反力分布

図-9 に Case1、2 の水平地盤反力度分布を示す。図に示す地盤反力度は、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各入力加速度時の地盤反力度の最大値である。また、加振前と加振後のコーン貫入試験で得られた貫入抵抗値から求めた地盤定数を用いて、道示に基づき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す。この結果、上層地盤の水平方向地盤反力度の計測値は、Case1 では 500gal で計算による上限値を上回っている。Case2 では 300gal で、

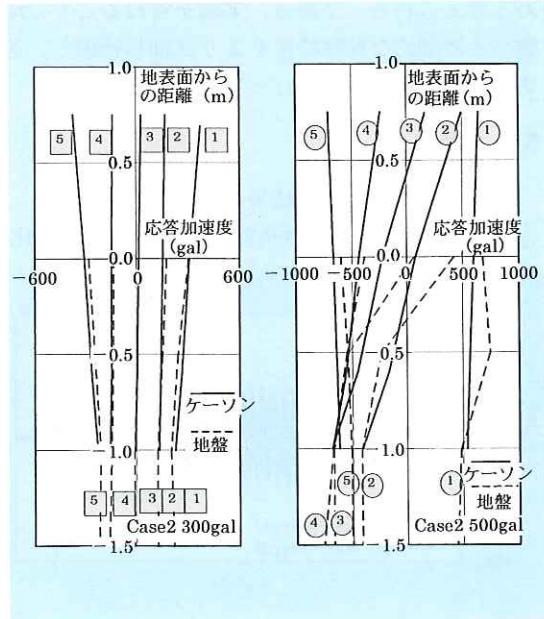


図-8 地盤とケーソン模型の振動モード

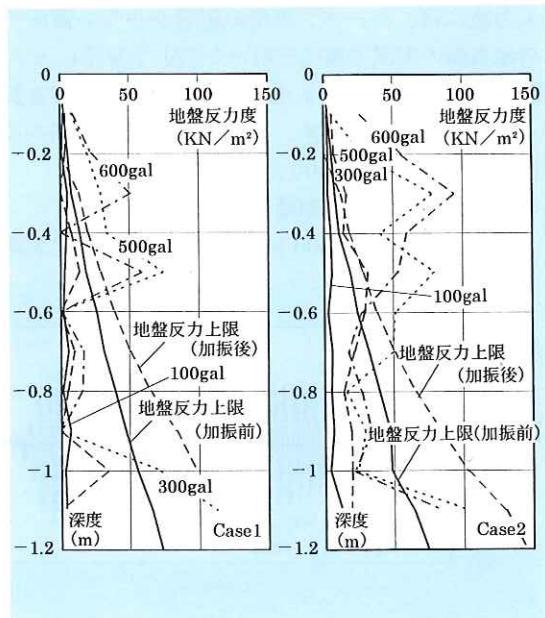


図-9 水平方向地盤反力度の分布

ほぼ上限値と同じ値を示しているが、500gal で上限値を上回っている。また、道示では上層地盤の地盤反応度が上限値に達すると、地盤反応度が下層地盤に再配分されると仮定しているが、実験結果からは、再分配の傾向は見られない。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、慎重な判断を要する。現行の道示では、柱状体基礎における受働抵抗の 3 次元的な広がりの効果を考慮して、水平方向地盤反応度の上限値の算出を行っているが、その設定方法を再検討する必要もあると思われる。今後は、センサーの感度や大きさ等を変え、測定の精度を向上させて再検討を行う予定である。

4. 動的解析結果との比較

ここでは、時刻歴応答解析によってケーソン基礎の挙動の数値シミュレーションを行い、実験結果と比較、考察を行った。解析は、図-10 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解析モデルを考え、動的解析を行った。ここで、地盤バネは基礎と地盤の相対変位を考慮した。地盤の水平および回転バネの非線形性および履歴特性は、非線形静的解析による骨格曲線を近似するよう H-D モデルにより設定した⁴⁾。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

Case2 について 300,500gal 入力時の基礎天端

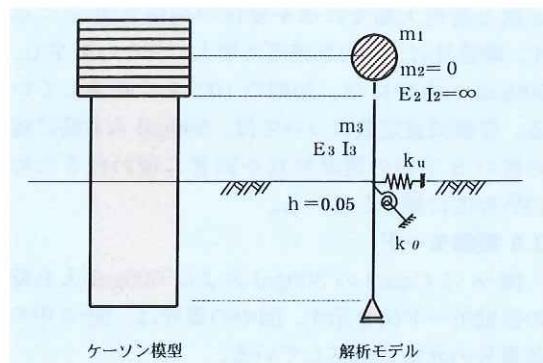


図-10 解析モデル

(地表面)での実験および解析による応答加速度の時刻歴を図-11 に示す。300, 500gal 入力時ともに、実験と解析の位相は一致し、応答加速度は、ほぼ同様の時刻歴波形を示した。最大応答加速度は、前者で実験 317gal に対して解析 354gal、後者で実験 381gal に対して解析 470gal であった。

4.2 応答加速度-変位の履歴

Case2 について、基礎天端(地表面)での実験と解析による応答加速度と水平変位の履歴を図-12 に示す。実験の履歴形状は、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、変位が大きくなる傾向にある。解析では、動的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、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応答加速度-変位の骨格曲線は、地盤の塑性化

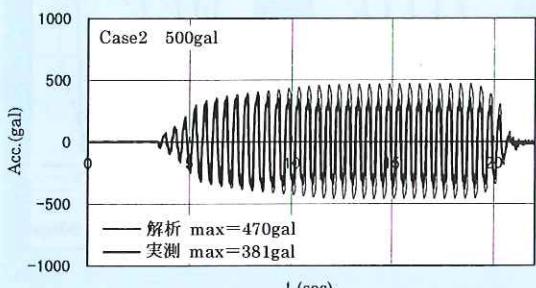
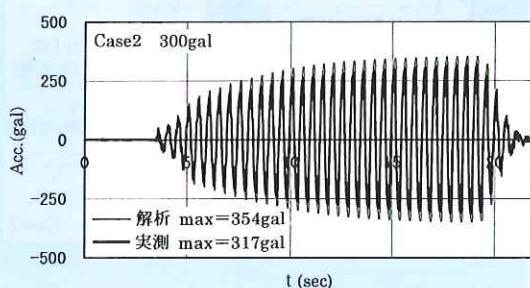


図-11 基礎天端の応答加速度の時刻歴

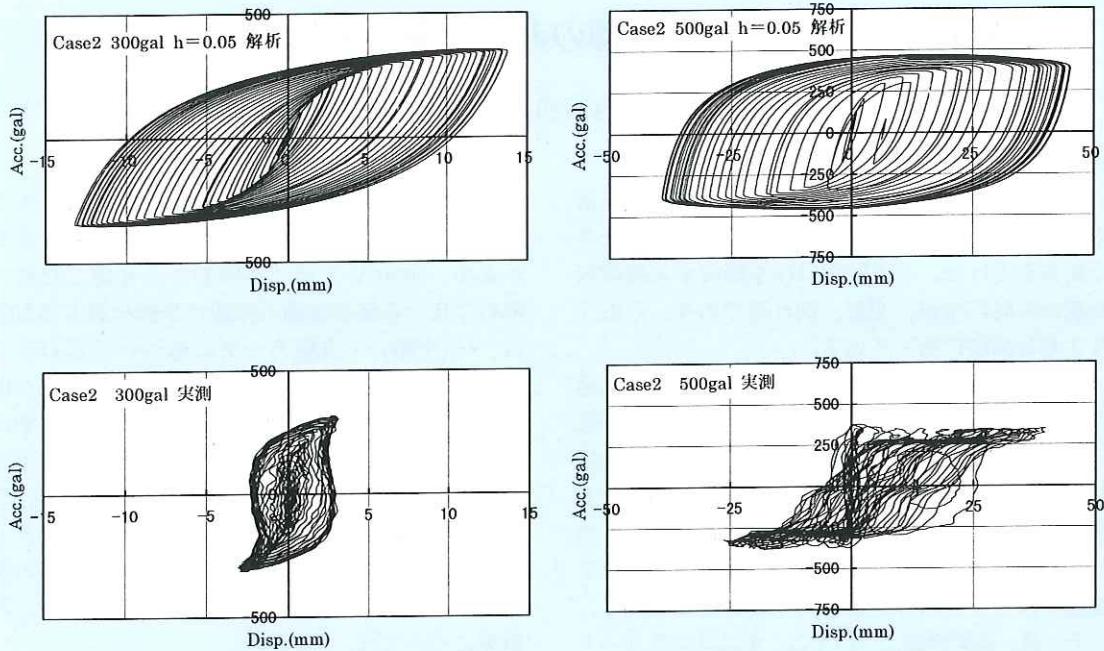


図-12 基礎天端の応答加速度-変位の履歴

- 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。
- ②上層地盤の水平方向地盤反力度が道路橋示方書に定める上限値を超えても地盤反力度は下層地盤へ再配分されなかった。今後は測定精度を向上させてデータを蓄積するとともに、地盤の抵抗機構について再検討する必要がある。
- ③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、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

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編,1996.12
- (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料,1997.3
- 技報堂出版(株)：橋梁の耐震設計と耐震補強,1998.4
- (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



建設省土木研究所
構造橋梁部
基礎研究室研究員
Yuuki KISHI



同 基礎研究室長
Jiro FUKUI



同 基礎研究室
研究員
Moriyuki OKOSHI



同 基礎研究室
研究員
Masahiro SHIRATO



同 基礎研究室
交流研究員
Takashi TOSHIGAMI