

(185) 直接基礎模型の振動試験解析

(財) 鉄道総合技術研究所 西村昭彦

同上 羽矢 洋

1. はじめに

鉄道においては構造物の上部工設計に限界状態設計法が導入されており、基礎構造物についてもそれに対応した設計手法を検討する必要があるが生じている。そのためには小変位から大変位領域に及ぶ基礎の支持力性状を検討することが必要と考えられる。筆者らは平成2年度に直接基礎模型を用いて大変位静的繰返し水平載荷実験を実施し、外力と変位の関係など支持力性状を把握した¹⁾。さらに、平成3年度において同じ模型を用いて振動実験を行い、直接基礎の動的外力と動的変位の関係など動的 support 力性状を把握した²⁾。本報告は、静的な繰返し試験で得られた荷重と変位の関係を用いて振動試験の動的性状を解析した結果について述べるものである。

2. 試験地盤概要

2.1 試験地盤の作成方法

試験地盤は静的試験および振動試験とも砂質土（稲城砂）を用い、鉄道総合技術研究所所有の試験土層および盛土振動台土槽内に輾圧、作成した。作成した地盤の条件はほとんど変わらなかったので振動試験の地盤について述べる。輾圧は600kgfの振動ローラーを用い、まき厚は30cmとし、仕上がり厚が25cmとなるように行った。試験地盤の大きさは3m×10m、厚さ1.5mである。

2.2 試験地盤に対する各種試験結果

(1) 平板載荷試験

作成した地盤の変形係数などを調べるために平板載荷試験を行った。載荷板は30cm×30cm正方形とし、土槽内2箇所において実施した。試験により得られた地盤の変形係数の値を表1に示す。この結果をみると値のばらつきは小さく、その平均値は197kgf/cm²、換算N値で8という結果を得た。

(2) オランダ式2重管コーン貫入試験

試験地盤に対して行ったオランダ式2重管コーン貫入試験結果を図1に示す。試験は振動実験の前後で行ったが、地盤強度はあまり変化していないことがわかる。

(3) 室内土質試験

室内土質試験の試料は深さ30cmの位置で1土槽につき2箇所から採取した。その結果を表2に示す。

3. 静的載荷試験

3.1 試験の種類

直接基礎模型は60cmと90cm正方形の2種類を作成し、上載荷重を変化させて静的載荷試験を実施した。試験の種類を表3に示す。載荷試験結果については、模型総重量3.4tのHS-90-3モデルの結果を示すが、他のモデルについても同様の結果が得られている。図2に90cm模型の全体図を示す。載荷高さはフーチング底面から1mとした。おもな測定項目は、荷重、模型の変位である。さらに、模型底面には2方向ロードセルと6分割の受圧板（幅15cm×奥行90cm）を設置

表1 平板載荷試験結果

	地盤変形係数 E_s (kgf/cm ²)
第1土槽	203 211
第2土槽	185 189
平均値	197 (換算N値=8)

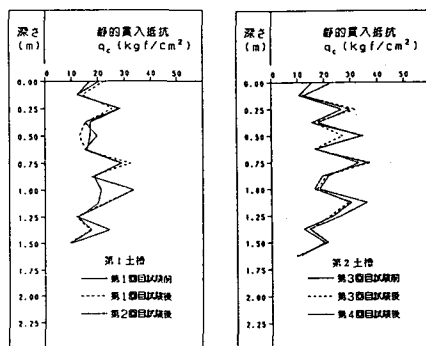


図1 サウディング結果

表2 室内土質試験結果

	第1土槽	第2土槽
細粒分(74μm以下)	17.0	19.5
最大粒径 mm	9.5	9.5
均等係数 U_c	14.1	17.5
土粒子の比重 G_s	2.68	2.69
含水比 w %	10.5	5.7
湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.44	1.44
間隙比 e	1.06	0.97
飽和度 S_r	26.5	15.8
粘着力 C kgf/cm ²	0.00	0.00
せん断抵抗角 ϕ 度	26.5	30.3

し、鉛直地盤反力とせん断地盤反力を計測した。また、載荷方法は次のとおりとした。

- ①制御方式：載荷時は変位制御、除荷時は荷重制御
- ②荷重様式：正負交番多サイクル載荷、繰返し回数3回
- ③荷重段階：4～8段階
- ④荷重保持時間：処女荷重、履歴内荷重とも0とする

3.2 試験結果

図3に基礎底面におけるモーメントと加力点水平変位の関係を示す。縦軸のモーメントは加力点の水平引張り荷重にフーチング下端から加力点までの高さを乗じた値

に、フーチングの傾斜に伴う重心の偏心を考慮して補正した値である。この図から、水平引張り力から決まるモーメントの大きさに限界があることがわかる。図4に2方向ロードセルにより計測した鉛直地盤反力とせん断地盤反力の分布状態を示す。(a)図は浮上がり限界状態 ($M_0=B \cdot N/6$: 浮上がり限界モーメント B : フーチング幅 N : 模型総重量) のときの地盤反力分布を示す。(b)図は引張り力がほぼ最大値に達した状態での反力分布状態である。このときのフーチング傾斜角は 1.9° である。この図から引張り側端の1枚の受圧板に、総模型重量のほとんどに相当する地盤反力が生じていることがわかる。

3.3 最大地盤反力と極限支持力

表4に基礎の浮上りを考慮した最大地盤反力と、室内土質試験から求まる結果を用いて建造物設計標準(基礎・抗土圧構造物)³⁾により算出した極限支持力を示す。ここでいう浮上りを考慮した最大地盤反力とは、 $q_{max}=N/(B \cdot B')$ ($B'=B-2e$ e : 回転モーメント M と模型総重量 N から決まる偏心量) である。また、極限支持力は試験地盤から不攪乱土料として採取した試料に対する室内試験結果の平均的な値を用いて算出した。その結果、両者には若干の差がみられるが、地盤定数のばらつきを考慮すると概ね等しいと考えられる。また、図3の(b)の引張り側端の受圧板にかかる鉛直地盤反力から算出した鉛直地盤反力度は 21.6 t/m^2 となり、表1の値に比較的近い値となることがわかる。このことから、直接基礎の最大抵抗モーメントは地盤の極限支持力に偏心距離を乗じた値で決定されることが考えられる。

4. 振動試験

4.1 試験の種類

直接基礎模型は静的載荷試験と同じ60cmと90cm正方形の2種類とし、90cm正方形モデルについては上載荷重を変化させて振動試験を実施した。試験の種類を表5に示す。使用した盛土振動台は最大加振能力400gal、最大変位量50mmの性能をもつ。試験における主な測定項目は盛土振動台の加速度、地表面の加速度、模型基礎上下部の水平加速度、模型基礎4点の鉛直加速度とし、また、静的試験と同様模型底面の2方向ロードセルを設置し、鉛直地盤反力とせん断地盤反力を計測した。

試験は共振試験と応答性状確認試験の2種類とし、加振は正弦波を用いて行った。なおここでは応答性状確認試験の結果を記述する。この試

表3 試験の種類

	タイプ名	基礎の 大きさ (cm)	載荷方法	模型総 重量 t f
①	HS-60-1	60×60	正負交番多サイクル載荷 上載荷重…一定	1.00
②	HS-60-2			1.50
③	HS-60-3			2.00
④	HS-90-1	90×90	正負交番多サイクル載荷 上載荷重…一定	2.00
⑤	HS-90-2			2.70
⑥	HS-90-3			3.40

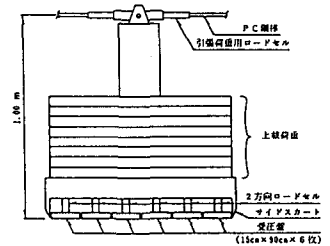


図2 90cm模型直接基礎全体図

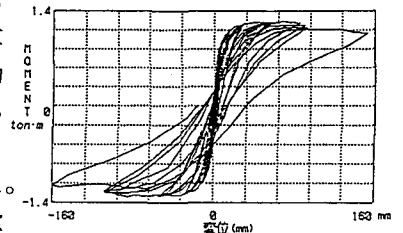
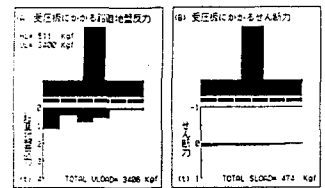
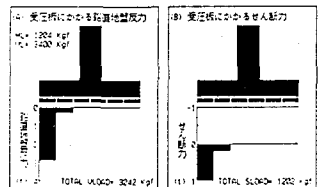


図3 モーメント-水平変位(上部加力点)曲線(HS-90-3)



(a)図



(b)図

図4 地盤反力分布状態図

験は直接基礎の応答倍率の変化、動的外力と動的変位の関係、動的支持力性状、振動モード特性の把握を目的に、振動数一定で入力加速度を増加させる方法で実施した。加速度は次の値を目標とした。

加速度段階：10, 50, 100, 200, 300, 350 gal

4.2 振動試験結果（応答性状確認試験結果）

(1) 入力加速度と模型天端応答加速度の関係

振動台の加振振動数を一定のまま、振動台加速度を10gal から次第に増加させたときの応答加速度（模型天端位置）を図5に示す。図はケース DS-90-2 の結果について表している。なお、本実験で最初に8.0Hz 一定で応答性状確認試験を行った後、次に4.0Hz で行っている。

結果をみると入力加速度に対する応答加速度の増幅率は入力値の増加にともない小さくなり、結果的に最大応答加速度は一定値に収束することがわかる。この性状は他のケースについてもみられた。このことは前年度実施した静的载荷試験で得られた荷重～変位関係でも水平载荷力が一定値に収束したこととよい対応を示している。

なお、DS-60 の結果については解析の項で示す。

(2) 振動モード

図6にDS-90-2（8Hz）の振動モード図を示す。振動モードは各試験でよく似た形状を示しており、入力加速度が小さい範囲では模型の振動は地表面振動と同位相に振動するモードとなるが、漸次入力速度を増加していくと節（ノード）が模型基礎下端に現れてくる。その結果、模型基礎下端と上端は逆位相の振動となり、さらに入力加速度を増加させていくとノードの位置は地表面付近から上方の模型重心位置に向かって上がってくるのがわかる。

(3) 履歴ループ

図7は基礎の慣性力によるモーメントと基礎の傾斜角の関係を示した図である。静的载荷試験結果と比較するため、静的実験での模型総重量と概ね一致する60cm模型（DS-60）について表した。図中に示す $M_2=428\text{kgf}\cdot\text{m}$ という値は静的载荷試験で得られた最大水平载荷力に地表面からの载荷点高さを乗じた値（最大抵抗モーメント）である。この結果から、直接基礎においては、地盤の支持力から定まる静的な最大抵抗モーメントと動的挙動時に地盤が発揮し得る抵抗モーメントは概ね一致することがわかる。

5. 振動試験の解析

5.1 履歴ループの考え方

静的载荷試験で得られる履歴ループを用いて、振動試験の解析を試みた。履歴ループの考え方は次のとおりとする。履歴ループの形状を図8に示す。

表4 最大地盤反力と極限支持力

試験ケース	最大地盤反力 (t/m^2)	基礎係数による 極限支持力* (t/m^2)
① HS-60-1	20.8	22.7
② HS-60-2	26.7	22.6
③ HS-60-3	20.8	23.6
④ HS-90-1	22.2	18.2
⑤ HS-90-2	18.0	19.2
⑥ HS-90-3	19.4	19.6

* 室内土質試験の結果より $C=2.2(\text{t}/\text{m}^2)$ 、 $\phi=30.0^\circ$ 、 $\gamma=1.65(\text{t}/\text{m}^3)$ とした

表5 振動試験ケース一覧

ケース名	基礎の大きさ (cm)	加振方法	模型総重量 (tf)
D S -60	60×60	①入力加速度10galの共振試験 ②加振振動数は一定、入力加速度を増加させる支持力確認試験	2.0
D S -90-1	90×90		2.7
D S -90-2			2.9
D S -90-3			4.0

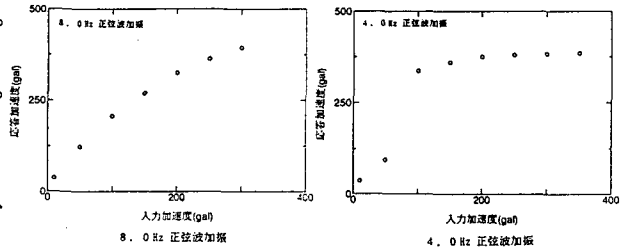


図5 入力加速度と模型天端応答加速度の関係[DS-90-2]

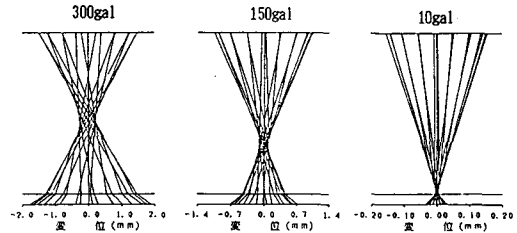


図6 振動モード図[DS-90-2, 8.0Hz加振]

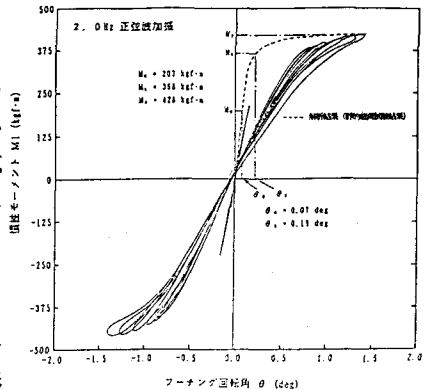


図7 振動試験結果と静的载荷試験結果の比較[DS-60]

①トリリニアとする。

②第3勾配に移るまでは、原点指向のバイリニアとする（同図(a)）。

③第3勾配に移った後、除荷された場合は、まず点Aを目指し、つぎに点Bを目指す。

④荷重Pの符号が反転した場合、まず点Cを目指し、次に剛性Kを1/2にして第3勾配との交点を目指す。

⑤C～D間で荷重増分の符号が反転した場合は、A' 点を目指す。その後は直前に経験した経路に戻る。

なお、この計算に用いる α などのパラメータは静的載荷試験の履歴ループから決定した。その値は表6ようになる。

5.2 解析結果

(1) 入力加速度と模型先端応答加速度の関係

振動台の加振振動数を一定のまま、振動台加速度を10gal から次第に増加させたときの応答加速度（模型先端位置）の関係を図9に示す。図はDS-60（3.5Hz）とDS-90-2（8Hz）の結果について表している。結果をみると計算値と実験値はかなりよく一致しており、最大応答加速度は一定値に収束することが静的載荷試験の履歴ループで説明できることがわかった。

(2) 振動モード

図10にDS-90-2（8Hz）の解析で得られた振動モード図を示す。この図と図6を比較すると、入力加速度が小さい範囲では模型の振動は地表面振動と同位相に振動するモードとなるが、漸次入力加速度を増加していくと節（ノード）が模型基礎下端に現れ、模型基礎下端と上端は逆位相の振動となり、さらに入力加速度を増加させていくとノードの位置は地表面付近から上方の模型重心位置に向かって上がっていく性状をよくとらえていることがわかる。

6. おわりに

以上述べた直接基礎模型の振動試験の結果をまとめると次のようになる。

①振動試験における履歴ループの形状は静的載荷試験と類似の結果となる。

②加振加速度に対する応答値はある一定値に収束することがわかったが、その値は静的載荷試験で確認された地盤の発揮し得る最大抵抗モーメントに概ね一致する。

③静的載荷試験から求めた履歴ループを用いて振動試験の動的性状を説明することができる。

参考文献

- 1) 西村, 羽矢, 神田: 模型直接基礎の大変位水平載荷試験（その1, 2）, 第26回土質工学研究発表会, 1991. 7
- 2) 西村, 羽矢: 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
- 3) 日本国有鉄道: 建造物設計標準解説（基礎構造物・抗土圧構造物）, 昭和61年3月

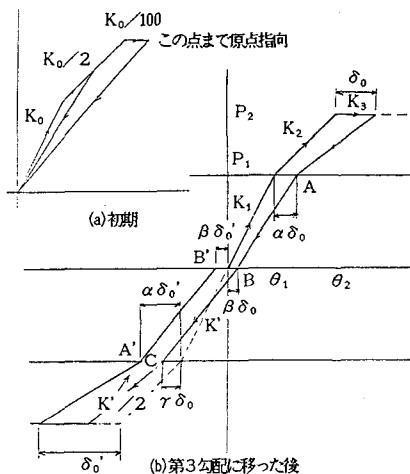


図8 履歴ループの形状

表6 基礎の非線形パラメータ

	α	β	γ
HS-60-3	0.482	0.162	0.125
HS-90-3	0.345	0.125	0.059

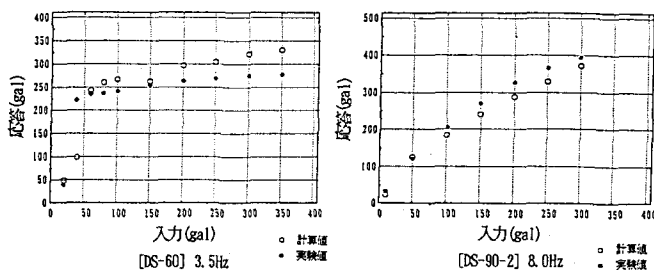


図9 入力加速度と先端応答加速度

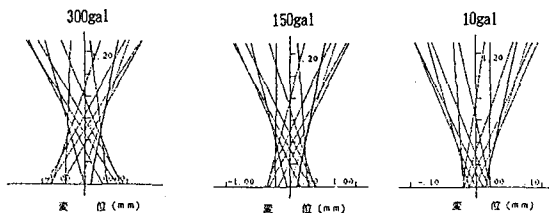


図10 振動モード図(DS-90-2, 8.0Hz加振)