

直接基礎の地震時残留変位に関する繰返し載荷実験

○浅井隆一¹・白戸真大²・野々村佳哲³・福井次郎⁴

¹正会員 (独) 土木研究所 基礎チーム 交流研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

²正会員 (独) 土木研究所 基礎チーム 研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³正会員 (独) 土木研究所 基礎チーム (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁴正会員 (独) 土木研究所 基礎チーム 上席研究員 (〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

1. はじめに

現在、道路橋示方書¹⁾における直接基礎の設計は、レベル1地震動に対して震度法により行われているため、高橋脚のように上部構造の慣性力の作用位置が高くなると基礎寸法が必要以上に大きくなるという問題点がある。また、レベル2地震動に対しては照査を行わなくてもよいとされているが、このことは必ずしも確認されていることではない。さらに、ケーソン基礎や杭基礎では、レベル1地震動においても地盤抵抗の塑性化を考慮したり、過大な残留変位が生じないように規定されているが、直接基礎の設計ではこのような配慮はされていない。これらは、直接基礎は良質な支持層の上に設置されているため残留変位は生じにくいという考えに基づいたものであるが、地震時にフーチングの一方の端部が浮上り反対側の端部に荷重が集中した場合、地盤が塑性化して残留変位が生じ供用性に影響を及ぼす可能性がある。このような背景から、今後、直接基礎における地震時残留変位を考慮した合理的な耐震設計法の確立が必要であると考えた。そこで、本研究では、直接基礎の地震時残留変位に関する挙動を把握する目的で、実験模型を用いた繰返し水平載荷実験を行った。

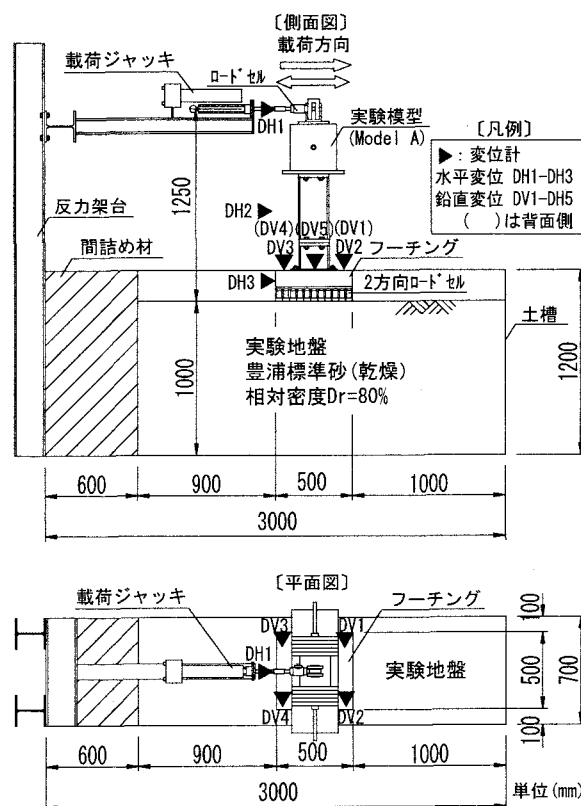


図-1 実験装置および計測位置概略図

2. 実験概要

(1) 実験装置

図-1に実験装置の概略図を示す。実験は、縦3 m × 横0.7 m × 高さ1.2 mの小型土槽内に層厚1.0 mの砂地盤を作成し、砂地盤上に実験模型を設置して行った。地盤には、乾燥させた豊浦標準砂を用いた。地盤の作成は10 cmの層厚ごと、空中落下法により砂を降らした後、地盤表面に隙間無くベニヤ板を敷き、その上をハンドバイプレータを用いて地盤表面全体に対して均等に締め固めを行った。地盤の相対密度の目標値は $D_r = 80\%$ とし、それを満足するよう落下高さ、撒出し量および締

固め時間を調整した。地盤の密度管理は、各層ごとに仕上がり地盤体積と投入した砂の重量とを計測したもののから算出した。実験模型は、実構造物の約1/10程度を想定して、フーチング平面寸法を0.5 m × 0.5 mとした鋼製の模型である。実験模型は、水平載荷高さを変えたModel AとModel Bの2タイプの模型を使用した(図-2)。水平載荷は、載荷ジャッキを用い変位制御により行った。また、載荷速度は、載荷ジャッキの性能から約1 mm/secとした。水平載荷位置は実験模型上部とし、載荷点には水平載荷中に生じる実験模型の鉛直変位を妨げないよう、鉛直変位が拘束されない構造の鋼製治具を使用した。計測項目は、載荷荷重(水平荷

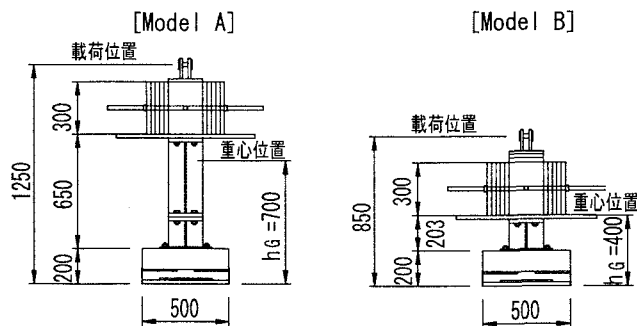


図-2 実験模型モデル概略図（正面図）

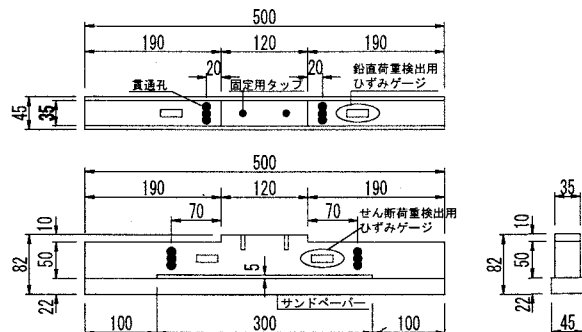


図-3 2方向ロードセル概略図

重), 水平変位 (3ヶ所), 鉛直変位 (5ヶ所) およびフーチング底面に設置した 11 個の 2 方向ロードセル (図-3) による鉛直力とせん断力である。

(2) 実験ケース

表-1 に実験ケースを示す。Model A, Model B ともに単調水平載荷実験と繰返し水平載荷実験を行った。繰返し水平載荷実験では, 図-4 に示すような, プレート境界型地震を模擬した繰返し回数の多い Type I と, 内陸直下型地震を模擬した繰返し回数が少ない Type II の 2 つの異なる載荷パターンを設定した²⁾。ここで用いられる降伏変位 δ_y は, それぞれの模型モデルに対して行った単調水平載荷実験における水平載荷荷重 H ~ 水平変位 δ 関係にて変位が急増し始める時の変位とした。また, 実験地盤は, 各モデルにつき 1 度全層の地盤を作成したのちは, 上部 30 cm (3 層) の地盤のみ入替えを行った。地盤の相対密度は, 下層から上層まで, ほぼ均一に目標値である $D_r=80\%$ 程度の地盤が作成できた。これは, 各実験ケース全てに対して同様の結果となり, 地盤条件は全ての実験ケースに対して一定であると考えられる。

表-1 実験ケース

模 型	載荷パターン	D_r (%)	地 盤*
Model A	単調水平載荷	82	a
	繰返し	Type I	78
	水平載荷	Type II	78
Model B	単調水平載荷	82	a
	繰返し	Type I	83
	水平載荷	Type II	82

*a: 全層入替え, b: 上部 30 cm 入替え

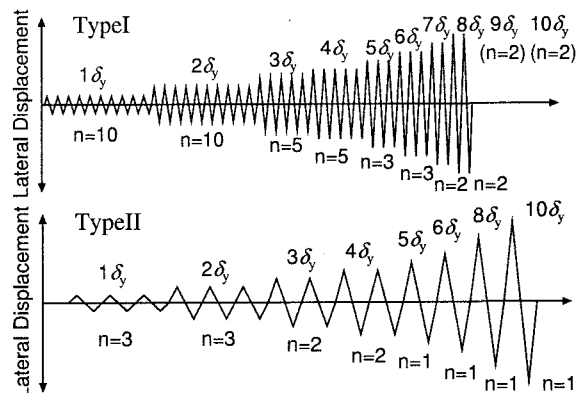


図-4 載荷パターン図

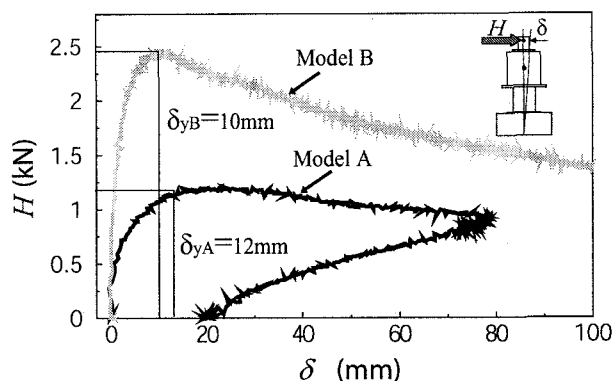


図-5 単調水平載荷実験 H - δ 関係

3. 実験結果

(1) 単調水平載荷実験

a) 水平荷重~水平変位関係

図-5 に, Model A, Model B に対する単調水平載荷実験における, 水平載荷荷重 H と載荷位置における水平変位 δ (計測器 DH1 における計測値) の関係を示す。この水平載荷荷重~水平変位関係から降伏変位 δ_y は, Model A で $\delta_{yA}=12$ mm, Model B で $\delta_{yB}=10$ mm となった。この降伏変位をもとに, 繰返し水平載荷実験における載荷変位を決定した。

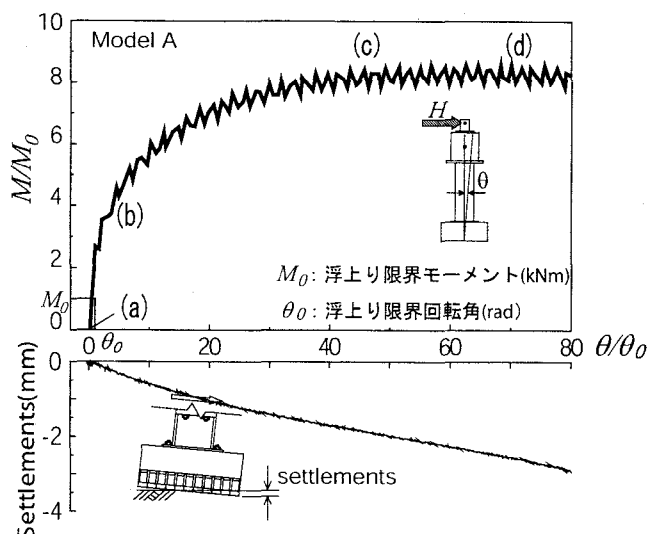


図-6 単調水平荷重実験 $M-\theta$ および沈下量- θ 関係

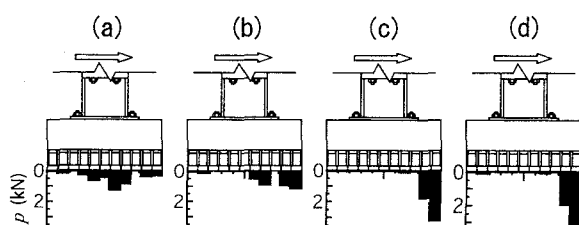


図-7 Model A 単調水平荷重実験 地盤反力分布

b) 抵抗モーメント～フーチング回転角関係

図-6 上段に、Model A の抵抗モーメント M とフーチング回転角 θ の関係を示す。ここで、抵抗モーメントとはフーチング底面に設置した各ロードセルの鉛直地盤反力に、それぞれフーチング中央までの距離を乗じたものであり、フーチング回転角はフーチング両端の鉛直変位より算出したものである。また、地盤反力分布よりフーチング底面が浮き上がったと判断された時の抵抗モーメントを M_0 、回転角を θ_0 とし、それぞれ無次元化した値の関係を示した。抵抗モーメントは上限値（最大抵抗モーメント）に達すると、一定値に収束しフーチングの回転角のみが増加する非線形の性状を示している。これは、道路橋示方書に示される地盤反力度の上限値を考慮した場合のモーメント～回転角関係に示される結果と同様であるが、その時、地盤は図-6 下段に示すように回転角の増加にともないフーチング押込み端部において沈下が生じていることがわかる。これまでの力をベースとした設計では、こうした沈下に関して検討されていなかったが、地震後の供用性を考えた時、このような地震時残留変位にも着目することが重要であると考えられる。

この時のフーチング底面における地盤反力分布を図-7 に示す。それぞれ、図-6 上段中の記号位置における地

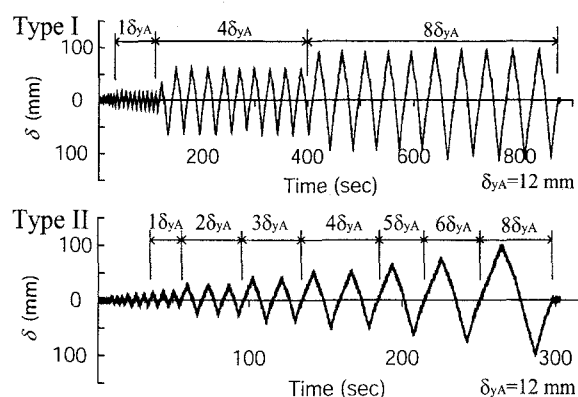


図-8 Model A 繰返し荷重パターン図

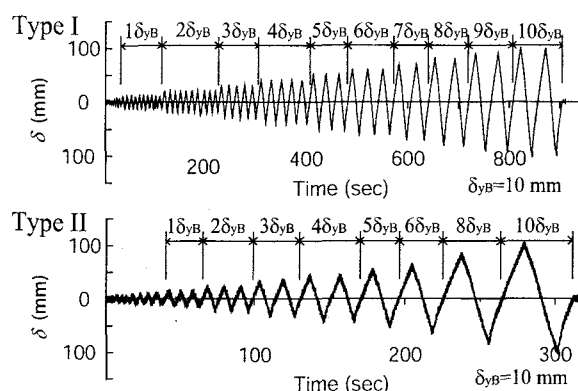


図-9 Model B 繰返し荷重パターン図

盤反力分布である。実験模型を設置した状態 (a) から、フーチングの回転角の増加とともにフーチングの浮上りが生じ、地盤反力分布は (b) のような三角形分布となる。抵抗モーメントが最大値に達する (c) では、フーチング端部で模型重量のほとんどを負担する状態となり、その後は (d) に示す通り地盤反力の増減はほとんどなく回転角のみ増加している。すなわち、フーチング設置面が地盤の極限支持力に達した後は地盤反力の増加はないため、抵抗モーメントは一定値に収束し、極限支持力に達した荷重に対して地盤は塑性化し沈下するため回転角のみ増加すると考えられる。

(2) 繰返し水平荷重実験

a) 繰返し水平荷重の時刻歴

繰返し水平荷重実験における各実験模型モデルおよび荷重パターンを図-8、図-9 に示す。それぞれ、降伏変位 δ_{yA} および δ_{yB} を基準に、荷重ジャッキのストローク限界までの変位 (± 100 mm) 内の荷重パターンを設定した。ただし、Model A の Type I 荷重パターンに関しては、荷重ジャッキ操作上のミスで荷重変位と繰返し回数が設置していたものと違った荷重となったが、繰返し荷重回数は Type II よりも多いことを考慮して結果を考察することとする。

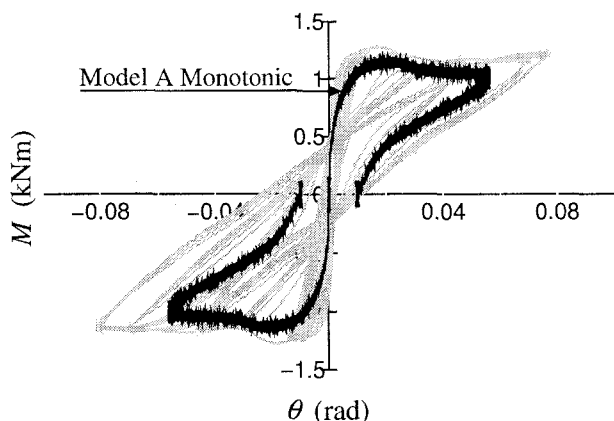


図-10 Model A Type I M - θ 関係

b) 抵抗モーメント～フーチング回転角関係

Model A における Type I 荷重パターンでの、抵抗モーメント M とフーチング回転角関係 θ を図-10 に示す。履歴ループは、 $1\delta_y$ より小さい範囲では原点指向の傾向がみられるが、 $1\delta_y$ を越える範囲では残留変位が生じるために、残留変位が大きくなるにつれて徐々に原点から離れる傾向にある。

単調水平荷重実験の履歴ループと比較すると、ほぼ同様の形状となったが単調水平荷重実験の方が多少小さくなる傾向となった。ここで、荷重および変位が負となる履歴ループに関しては、単調水平荷重実験結果の正負を逆にして描いたものである。

c) フーチングの回転挙動

Model B の Type I 繰返し荷重実験における $2\delta_{yB}$ と $10\delta_{yB}$ 荷重時のフーチング回転挙動を図-11 に示す。それぞれ、荷重パターンにおける同変位サイクル中の最後の 1 サイクルの挙動を示した。荷重変位の小さい $2\delta_{yB}$ ではフーチング中央の上下運動を伴わない回転挙動を示す。一方、 $10\delta_{yB}$ の場合になるとフーチング中央が上下運動する挙動となる。これは、フーチング中央に比べ、フーチング端部地盤の残留変位が大きくなる影響であり残留変位が大きくなる程こうした傾向が顕著となる。

d) フーチングの沈下量

Model A および Model B における Type I と Type II のフーチング沈下量を示したものを図-12 に示す。ここで、図に示すフーチング沈下量とは、各変位サイクル終了後フーチングの回転角がゼロとなった時点でのフーチング鉛直変位の平均であり、フーチング中央の地盤沈下量である。一方、フーチング回転角 θ は、各変位サイクルにおけるフーチングの最大回転角である。Type I、Type II とも回転角が大きくなるにしたがい沈下量は大きくなる。また、同じ回転角に対しては繰返し回数の多い Type I の沈下量の方が大きいことがわかる。Model A と Model B を比較すると同じフーチン

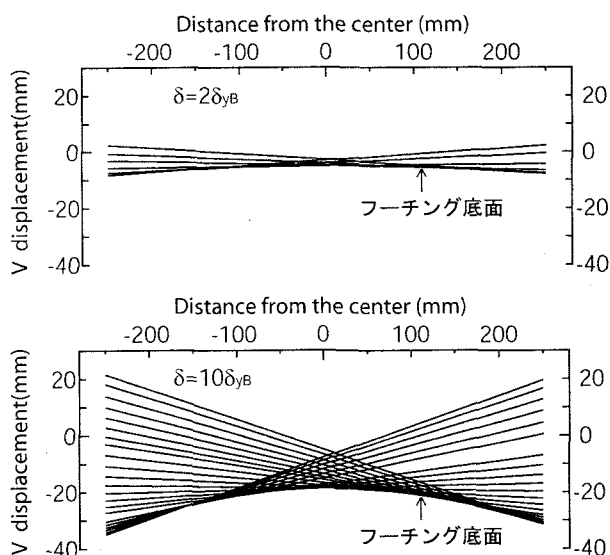


図-11 Model B Type I フーチング回転挙動

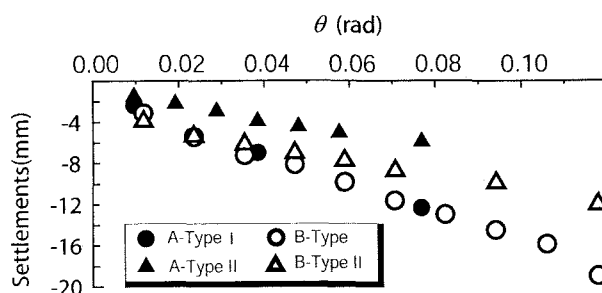


図-12 フーチング回転角～地盤沈下量関係

グ回転角に対して Model B の方が若干沈下量が大きくなる結果となった。

4. まとめ

本研究では、直接基礎の地震時残留変位に関する挙動を把握する目的で、実験模型による単調水平荷重実験および繰返し水平荷重実験を行った。その結果、地震力によるフーチングの回転により残留変位が生じ、その形状はフーチング中央に比べ端部で大きくなった。また、残留変位の大きさは作用回転角が大きいほど、繰返し回数が多いほど大きくなる傾向となった。

今後は、直接基礎の地震時残留変位を定量的に予測できる数値解析法の検討を行い、直接基礎の合理的な設計法の提案に向けた研究を進めていきたい。

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，2002.3
- (社) 土木学会 地震工学委員会 地震時保有水平耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会：第 5 回橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会，pp.104-109，2002.10