

# 載荷高さや死荷重を変化させた砂地盤上 直接基礎橋脚模型の水平交番載荷実験に基づく 支持力曲面および残留沈下量の検討

川田 草貴<sup>1</sup>・西岡 英俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: a17.5phd@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: nishioka@civil.chuo-u.ac.jp

直接基礎には、死荷重等の鉛直荷重による常時の作用に加えて、地震時には水平方向慣性力の組み合わせによって基礎底面に作用する荷重に偏心・傾斜が生じる。基礎にかかる荷重に偏心・傾斜が生じる場合の極限鉛直支持力は偏心・傾斜が無い場合と比べて低下することが分かっているが、地震時の載荷経路においても既存の評価方法が適用できるのかについては検討の余地がある。また水平方向の載荷が鉛直方向の変位に与える影響については詳しく分かっておらず、定量的な評価方法の開発と検証が必要である。そこで本研究では直接基礎橋脚模型に地震時の載荷経路を模擬して水平交番載荷実験を行った。その結果から、いくつかある地震時の極限支持力の評価方法を検討した他、地震動の繰り返し回数や水平荷重の大きさが沈下に影響を及ぼすことが分かった。

**Key Words:** shallow foundation, ultimate bearing capacity, residual settlement, horizontal loading test

## 1. 研究背景

重心位置が比較的高い位置にある橋脚等を支持する直接基礎の耐震設計においては、橋脚重心位置に作用する水平方向の慣性力が支配的である。この慣性力によって直接基礎の底面には水平力とモーメントが作用し、基礎に水平・回転変形を生じさせ、結果的に構造物の重心位置に水平変位を生じさせる。この時に基礎にかかる荷重は、死荷重等による鉛直荷重と慣性力による水平荷重との組み合わせで、偏心・傾斜が生じることになる。

直接基礎にかかる荷重に偏心・傾斜が生じる場合の極限鉛直支持力度  $q_u$  (kN/m<sup>2</sup>) は常時と比べて低下することが Meyerhof の実験によって分かっており<sup>1)</sup>、例えば鉄道分野<sup>2)</sup>では、粘着力の無い地盤上の根入れの無い直接基礎の極限鉛直支持力度  $q_u$  を Terzaghi の式を基本として、Meyerhof が提案した以下の方法に基づいて評価している。

$$q_u = i_\gamma \beta \gamma B_e N_\gamma \quad (1)$$

$$i_\gamma = (1 - \delta / \phi)^2 \quad (2)$$

$$\delta = \tan^{-1}(H/V) \quad (3)$$

$$B_e = B - 2e \quad (4)$$

$$e = M/V \quad (5)$$

ここで、 $i_\gamma$ : 補正係数、 $\beta$ : 形状係数 (連続基礎の場合は  $\beta=1/2$ )、 $\gamma$ : 支持地盤の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $B_e$ : 有効幅(m)、 $N_\gamma$  は支持力係数、 $\phi$ : 内部摩擦角(°)、 $\delta$ : 荷重の傾斜角(°)、 $H$ : 基礎底面に作用する水平力(kN)、 $V$ : 基礎底面に作用する鉛直力(kN)、 $B$ : 基礎幅(m)、 $e$ : 偏心量(m)、 $M$ : 基礎底面に作用するモーメントである。

なお、基準類によっては寸法効果の補正も考慮する場合もあるが、本研究では模型実験の範囲ではその影響は比較的小さいと考えられることから、寸法効果の補正は考慮しないこととする。すなわち、Meyerhof の荷重の偏心・傾斜を考慮した  $q_u$  の評価方法は、偏心に対しては基礎幅を式(4)に示す有効幅  $B_e$  に低減し、傾斜に対しては式(2)に示す補正係数を乗算することで低減して評価している。既述のように地震時にも直接基礎にかかる荷重に偏心・傾斜が生じるため、地震時の  $q_u$  の評価にもこの方法が使われることが多い。

### (1) 最大抵抗モーメント $M_m$ と支持力曲面について

実務的には、橋脚のように重心位置が比較的高い構造物に用いられる直接基礎の設計においては、回転抵抗の

照査における最大抵抗モーメント  $M_m$  を算出している。

これは、図-1に示すように、回転角が大きくなるとフーチングが浮き上がっていき、これに伴って有効幅が徐々に減少し、最終的にフーチング端部地盤が全て塑性化して抵抗モーメントが最大値に達する状態を意味する。この時に地盤反力分布形状を矩形分布と仮定すれば、次に示す式(6)により最大抵抗モーメント  $M_m$  を算出することができる<sup>2)</sup>。

$$M_m = \frac{BV}{2} - \frac{V^2}{2q_u L} \quad (6)$$

なお、式(6)中の  $q_u$  は、式(1)に示す Meyerhof の偏心・傾斜荷重作用時の極限鉛直支持力度の計算方法に従って計算を行うため、最大抵抗モーメント  $M_m$  の算出には数回程度の簡単な収束計算が必要となる。

しかし、この Meyerhof の方法は偏心量・傾斜角を保ったまま荷重を増加させた実験から提案されたものであるため、地震時の載荷経路と差異がある。具体的な載荷経路の違いを支持力曲面で説明する。直接基礎の支持力は、鉛直力  $V$  だけでなく水平力  $H$ 、モーメント  $M$  との連成効果で決定する。支持力曲面は、図-2のように地盤が極限支持力に達したときの  $V$ 、 $H$ 、 $M$  の組み合わせを  $V$ 、 $H$ 、 $MB$  の三次元空間にプロットしたときに示す、ラグビーボール状の曲面である。すなわち、 $V$ 、 $H$ 、 $M$  の組み合わせが支持力曲面上に達した時に基礎は極限支持力状態にあることになる。Nova らはこの支持力曲面を、次に示す放物線関数でモデル化している<sup>3)</sup>。

$$h^2 + m^2 + \xi^2 (1 - \xi)^{2\zeta} = 0 \quad (7)$$

$$h = \frac{H}{\mu V} \quad (8)$$

$$m = \frac{M}{\psi BV} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{V}{V_m} \quad (10)$$

ここで、 $V_m$ ：偏心・傾斜の無い場合の極限鉛直支持力、 $\mu$ ： $H$ - $V$  平面の原点における接線勾配、 $\psi$ ： $M$ - $V$  平面の原点における接線勾配である。 $\mu$  については、原点において  $H = \mu V$  が成り立つことから  $\mu = \tan \phi$ 、すなわち摩擦係数となる。また  $\psi$  について Nova らは、Meyerhof による補正を選択する場合は 0.33、Vesic による補正を選択する場合は 0.48 であるとしている<sup>3)</sup>。このほか、文献 4)、5) では水平交番載荷実験から  $\psi = 0.48$  程度が最も実験結果と合うという結果が示されている。また  $\zeta$  は水平荷重の最大値を規定するパラメータであり、 $\zeta = 1$  のとき式(7)は放物線となり  $H$  は  $V = V_m/2$  のとき最大になる。Nova らは実験結果とよく合うことなどから  $\zeta = 0.95$  とすることを推奨しているが<sup>3)</sup>、文献 5) では  $\zeta = 1$  としても結果に大きな差はないとされている。

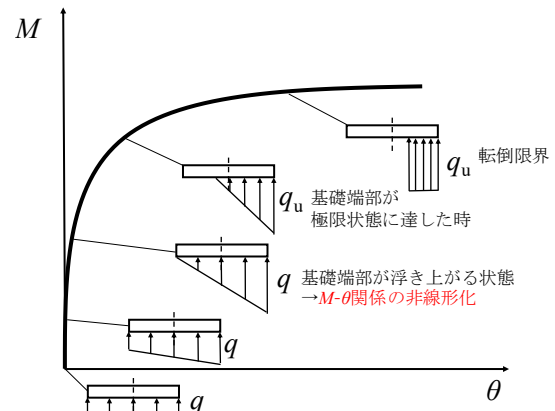


図-1 直接基礎底面のモーメント  $M$  と回転角  $\theta$  の関係

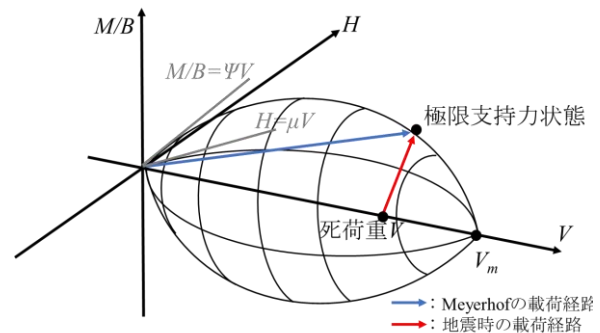


図-2 支持力曲面と載荷経路

この  $V$ 、 $H$ 、 $M/B$  の三次元空間上での載荷経路を考えると、Meyerhof の実験は、偏心量・傾斜角を一定に保ったまま、 $V$ 、 $H$ 、 $M$  を比例的に増加させる条件で極限支持力状態まで載荷を行っており、図-2中の青線で示すような、原点 ( $V = H = M = 0$ ) を始点とする載荷経路となる。一方、実際の地震時は図-2中の赤線で示すように、 $V$  一定のもと  $H$ 、 $M$  が増加して極限支持力状態に至る載荷経路となる。従って、Meyerhof の方法で直接基礎の地震時の極限鉛直支持力を評価した場合は、評価方法の想定と実際の載荷経路に違いが生じていることに留意する必要がある。

また、地震時には  $H$  および  $M$  が繰り返し作用することになるが、繰り返しが極限鉛直支持力に及ぼす影響については Meyerhof の方法では通常は考慮することが難しい。一方、繰り返し載荷を受けた時の支持力曲面の適用性については、例えば文献 4) では、直接基礎の水平載荷実験を繰り返し載荷のパターンと地盤の相対密度を主なパラメータとして行い、Nova らの提案した支持力曲面が妥当であるという結果を示している。しかしながら、支持力曲面を検討した既往の研究において模型死荷重を広い範囲で変化させた例は少なく、支持力曲面は  $V_m$  に対する  $V$  の割合 (すなわち安全率) の変化に対しても適切に評価できるのかどうかについては検討する余地がある。

従って本研究では、模型死荷重、水平荷重の作用高さ、

繰り返し荷重回数をパラメータとして地震時に近い荷重方法で極限支持力状態まで荷重し、このときの  $V$ ,  $H$ ,  $M$  をプロットすることで Meyerhof の方法と Nova らの支持力曲面の妥当性を検討する。

## (2) 地震時の鉛直変位（沈下）について

地震時における慣性力の作用によって基礎に偏心・傾斜荷重が作用して基礎底面地盤が塑性化した場合には、鉛直方向の荷重が増加していなくても鉛直方向に沈下量が増加していくことになる。桁等を支持する直接基礎に地震後に有害な沈下量が残留すると、地震後の鉄道や道路の供用性・復旧性に影響が出る。そのため、今後、これらの性能を評価していくためには、地震後に残留する沈下量を高精度に把握する手法の構築が求められている。

現状の直接基礎の地震時の照査では、 $H$  や  $M$  の作用と鉛直方向の変位の関係が紐づけられていないため、偏心量が増加して基礎端部が浮き上がると図-1 のようにモーメント  $M$  と回転角  $\theta$  の関係が非線形化することを踏まえ、基礎端部が浮き上がらないことを照査したり、地盤反力度の絶対値自体や基礎端部の塑性化の範囲に制限値を設けることによって基礎の過大な沈下量の発生を防ぐこととしていたりしている<sup>25)</sup>。しかしながら、いずれも地震後の沈下量を直接評価することにはなっておらず、これらの照査項目が沈下量の抑制にどの程度寄与しているかは明らかになっていない。また実際の地震時には慣性力による水平荷重の繰り返し荷重が鉛直方向に累積的な変形を生じさせることになるが<sup>9)</sup>、この影響についても十分に考慮されていないのが現状である。

このような残留沈下量を評価する試みとして、支持力曲面を進展させて  $V$ ,  $H$ ,  $M$  の作用と鉛直方向に残留する沈下量を非関連流動則で関連付けたマクロエレメントモデルが提案されている。マクロエレメントモデルは支持力曲面を基本として、極限支持力状態に達していなくても組み合わせ荷重の増加に伴い、支持力曲面の内側で支持力曲面と相似な曲面が発生するという塑性硬化の仮定に基づいて、荷重の組み合わせの発展と変位の増加を関連づけるものである<sup>9)</sup>。このほか、基礎底面に非線形特性と履歴特性を考慮した地盤ばねモデルを多数配置する分布ばねモデルを用い、時刻歴応答解析によって累積的な残留沈下・傾斜量を評価する手法も提案されており<sup>7)</sup>、パラメトリックな試算<sup>8)</sup>も行われている。ただし、これらのいずれも、荷重規模や水平力作用高さの違いが限定された実験事例での検証に留まっている。

以上のような背景から、本研究では水平方向の荷重が鉛直方向の支持力や変位(沈下)に与える影響を詳しく調べることを目的として、乾燥砂地盤上に設置した直接基礎橋脚模型に水平交番荷重実験を行った。実験は Meyerhof の実験と比べてより地震時に近い荷重を行うた

め、鉛直荷重  $V$  を一定にしたまま、荷重点に水平荷重  $H$  を正負交番に荷重する条件で行った。また  $V$ ,  $H$ ,  $M$  の連成効果を確認するために模型死荷重と荷重高さをパラメータとする他、地震時慣性力が繰り返し作用する影響を考慮するため  $H$  の荷重の繰り返し回数も変化させた実験を行った。その結果から、 $V$ ,  $H$ ,  $M$  の作用が沈下量に与える影響や、 $H$  の繰り返し回数が沈下に与える影響など、水平荷重によって鉛直変位が生じる際に支配的と考えられるパラメータを調べた。

## 2. 実験概要

### (1) 実験装置

図-3 に実験装置の概要を示す。土槽寸法は幅 1000mm、高さ 400mm、奥行き 199mm である。模型地盤は乾燥豊浦砂を空中落下法にて作成し、その乾燥密度は平均  $1.58\text{g/cm}^3$ 、相対密度は平均 86% であった。直接基礎橋脚模型は、基礎幅 100mm、高さ 336mm、奥行き 195mm、質量 3.3kg の剛体模型である。奥行きは土層幅とほぼ同一であり、地盤は平面ひずみ条件を模擬している。この上に錘として鉄板を複数枚設置することで桁などの上部構造物の重量を模擬し、死荷重として鉛直荷重  $V$  を一定に荷重した。また、基礎模型底面には摩擦抵抗を確保するためサンドペーパーを貼り付けてある。

図-4 に実験装置の詳細を示す。電動シリンダ（オリエンタルモーター製 EAC4RW）と直接基礎橋脚模型を、上下方向の移動と回転が自由になるようにピンおよびリニアガイドで繋げてあり、水平方向の荷重によって地盤が塑性化した場合の回転や沈下を無理なく生じさせる構造となっている。

### (2) 計測項目・計測方法

計測は、レーザー変位計により模型上面の鉛直変位、および模型上面と荷重高さの水平変位を計測した。また電動シリンダに設置したロードセルにより水平荷重を計測した。さらに、模型底面には 2 組の 2 方向ロードセルを設置してそれらを一枚の剛な受圧板で連結して、鉛直方向と水平方向の底面反力を計測した。詳しくは図-4 を参照されたい。

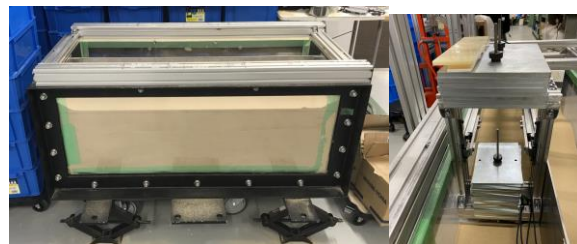


図-3 実験装置概要

### (3) 荷重方法

荷重方法については変位制御とし、正負に与える水平変位  $\delta_h$  を、別途実施した水平単調荷重実験<sup>10)</sup>において基礎底面の偏心量  $e$  が  $e=B/6$  に達した時点（すなわち浮き上がりが生じ始める時点）の変位を降伏変位  $\delta_{ly}$  とし、これを基準として2倍ずつ増加させていった ( $\delta_h = \delta_{ly}, 2\delta_{ly}, 4\delta_{ly}, 8\delta_{ly} \dots$ )。なお、荷重は模型が転倒するか、実験が不可能となるまで水平変位  $\delta_h$  を2倍で大きくしていった。また各荷重サイクルで水平変位  $\delta_h$  を与える回数を「繰り返し回数」とし、繰り返し回数1回と3回の2パターンの荷重を行っている。それぞれの繰り返し回数での水平変位の時刻歴を、図-5、図-6にそれぞれ示す。

### (4) 実験ケース

実験ケースは、模型死荷重による鉛直荷重  $V$  が  $V/V_m = 2 \sim 10\%$  程度となる範囲で4ケース設定した。なお、この比率  $V/V_m$  の逆数が常時の死荷重の安全率に相当し、本実験では安全率が9~44程度の範囲を模擬したことになるが、これは一般的な鉄道橋で耐震設計を満足するように設計された直接基礎の範囲に概ね対応する<sup>7)</sup>。また、道路橋では直接基礎の死荷重安全率は概ね10程度<sup>9)</sup>とされているが、この範囲も内包されていることになる。

本研究では、偏心・傾斜の無い条件での極限鉛直支持力  $V_m$  を推定するため、基礎幅を変化させた直接基礎模型の鉛直単調荷重実験を別途実施した。実験は基礎幅  $B=20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}, 50\text{mm}$  の剛な板（奥行きはいずれも195mmで土層奥行きとほぼ同一）を用意し、偏心・傾斜が生じないように注意しながらジャッキで鉛直に単調に荷重した。その結果得られた極限鉛直支持力  $q_u$  と基礎幅  $B$  の関係を図-7に示す。図に示すように、 $q_u$  と  $B$  の関係は線形と仮定すると  $q_u = 2858.2B$  となった。ここから  $B=0.1$  の時の  $q_u$  を計算し、極限鉛直支持力  $V_m = 5659\text{N}$  を推定している。なお、図-7には既往の研究で相対密度90%程度の豊浦砂での平面ひずみ条件での直接基礎の極限鉛直支持力を実験で調べた例<sup>11)12)</sup>も併せて図化している。これらの値と比較すると、本鉛直単調荷重実験から求めた  $V_m$  は概ね妥当であると考えられる。

なお、無偏心・無傾斜であるから  $i=1, e=0$  となるため、式(1)とこの線形関係から  $\beta \gamma N_f = 2858.2$  となる。平面ひずみ条件なので形状係数は連続基礎の  $\beta = 0.5$  であり、 $\gamma$  は実験毎に計測した値の平均値  $\gamma = 15.8(\text{kN/m}^2)$  とすると、支持力係数  $N_f$  は  $N_f = 362.3$  と逆算され、さらに式(11)に示す Meyerhof の支持力係数  $N_f$  の提案式<sup>13)</sup>を用いて内部摩擦角  $\phi$  を逆算すると、 $\phi = 46.4^\circ$  と求まる。

$$N_f = \left( \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \exp(\pi \tan \phi) - 1 \right) \tan(1.4\phi) \quad (11)$$

また、 $V, H, M$  の連成効果を調べるため、各模型死荷重で荷重高さ100mm, 200mm(それぞれ基礎幅の1倍、

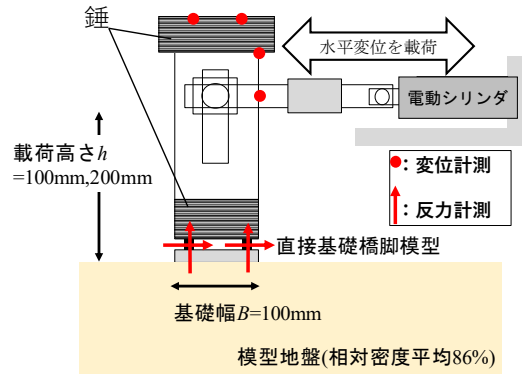


図-4 実験装置詳細

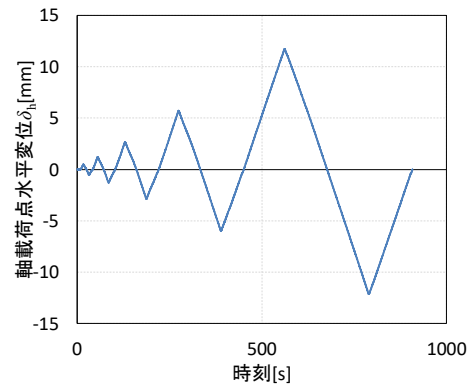


図-5 水平変位時刻歴（繰り返し回数1回）

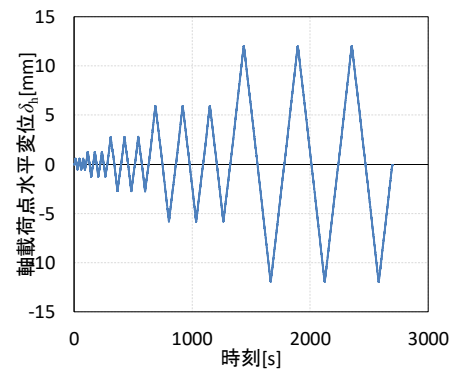


図-6 水平変位時刻歴（繰り返し回数3回）

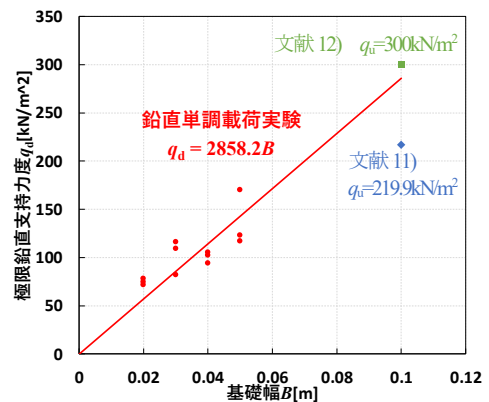


図-7 鉛直単調荷重実験による  $q_u$ - $B$  の関係

2倍)を設定した。さらに、既述のように実際の地震時に見られる水平荷重の繰り返し荷重の影響を調べるため、

水平変位の繰り返し回数が1回と3回の2パターンを実施した。これらの16の実験ケースを表-1にまとめる。なお、主に模型地盤作成に起因する実験結果のばらつきを考慮して、各ケースで3回実験を行った。

表-1 実験ケース

ケース名	載荷高さ(mm)	繰り返し回数(回)	模型死荷重 $V(N)$	$V/V_m(\%)$
128_100_1	100	1	128	2.3
260_100_1			260	4.6
425_100_1			425	7.5
603_100_1			603	11.0
128_100_3	100	3	128	2.3
260_100_3			260	4.6
425_100_3			425	7.5
603_100_3			603	11.0
128_200_1	200	1	128	2.3
260_200_1			260	4.6
425_200_1			425	7.5
603_200_1			603	11.0
128_200_3	200	3	128	2.3
260_200_3			260	4.6
425_200_3			425	7.5
603_200_3			603	11.0

$V_m=5659N$ (図-7より推定)

### 3. 実験結果

#### (1) 載荷点における水平荷重 $H$ と水平変位の関係

載荷点における水平荷重と水平変位の関係の一例を図-8に示す。正負交番で載荷しているため図-8のような履歴を示すが、比較のため図-8に赤線で示すように各載

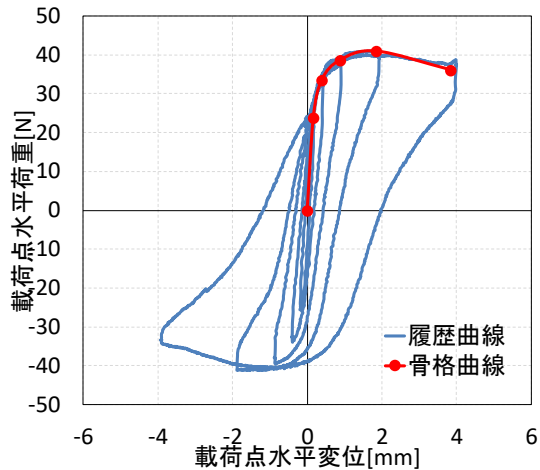


図-8 載荷点水平荷重と載荷点水平変位の関係(128\_100\_1)

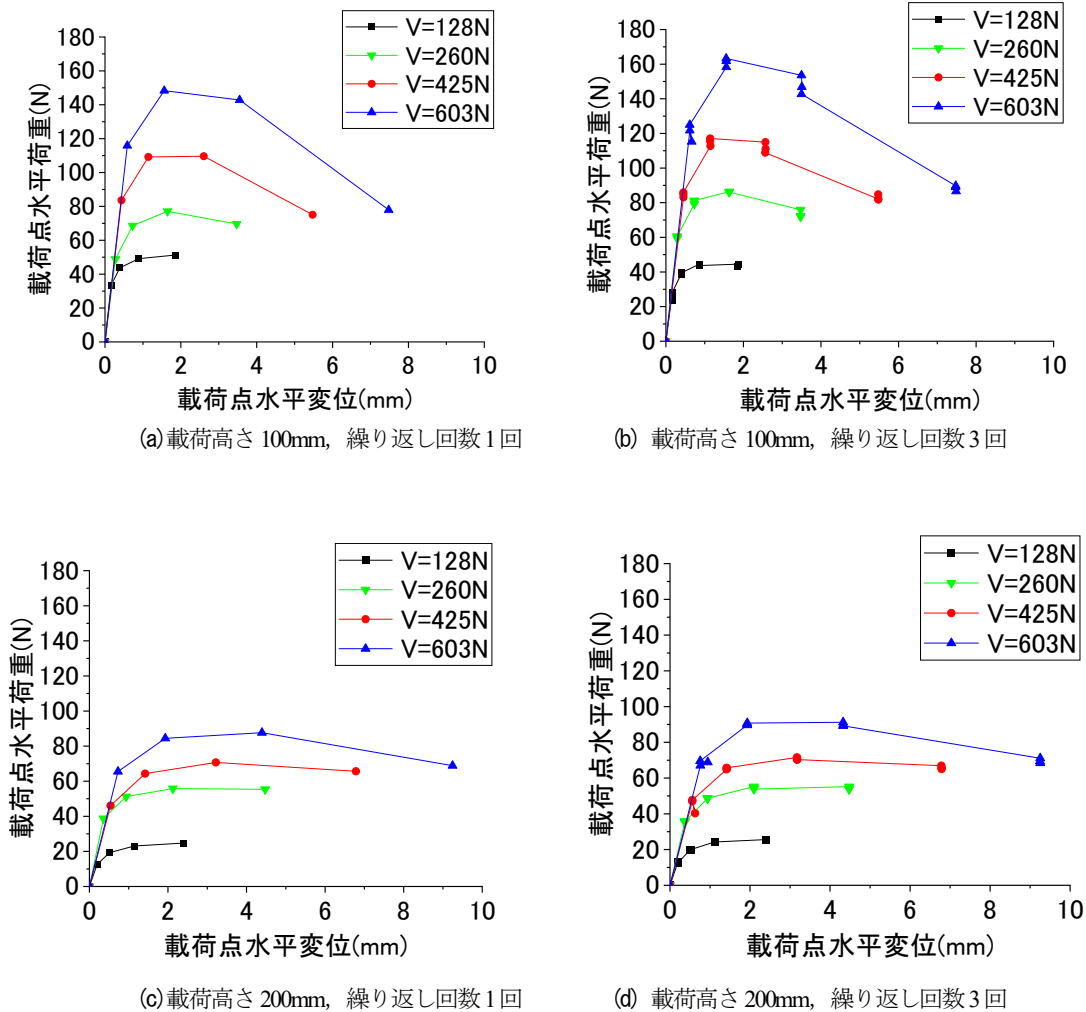


図-9 載荷点水平荷重と載荷点水平変位の骨格曲線

荷サイクルの折り返し点を抽出し、正負で平均して骨格曲線にして、載荷点における水平荷重と水平変位の関係を図-9で比較する。

水平荷重 $H$ はどの載荷高さ、繰り返し回数でも模型死荷重による鉛直荷重 $V$ が大きいほど大きな値を要している。また繰り返し回数で比較すると、いずれの載荷高さでも、水平荷重 $H$ の最大値は繰り返し回数によって大きく変わらなかった。

次に載荷高さで比較すると、いずれの繰り返し回数でも水平荷重 $H$ の最大値は載荷高さ 100mmの方が載荷高さ 200mmと比べて40~60%程度大きかった。

## (2) モーメント $M$ -回転角 $\theta$ 関係

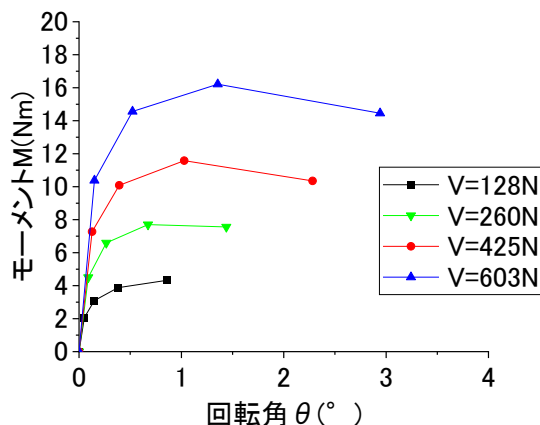
モーメント $M$ は、底面ロードセルから計測した鉛直反力に、基礎中心からそれぞれのロードセルまでの距離をかけて計算した。また回転角 $\theta$ はレーザー変位計で計測した2点の水平変位の差分から算出した。これらの関係を、図-8に赤線で示したのと同様に骨格曲線にして、図-10にまとめる。どの載荷高さ・繰り返し回数でも、

水平荷重 $H$ と同様に $M$ - $\theta$ 関係は模型死荷重による鉛直荷重 $V$ が大きいほど $M$ の最大値が大きくなっている。 $M$ - $\theta$ 関係を繰り返し回数で比較すると、いずれの載荷高さでも水平荷重 $H$ と同様に繰り返し回数によって大きく変わらなかった。

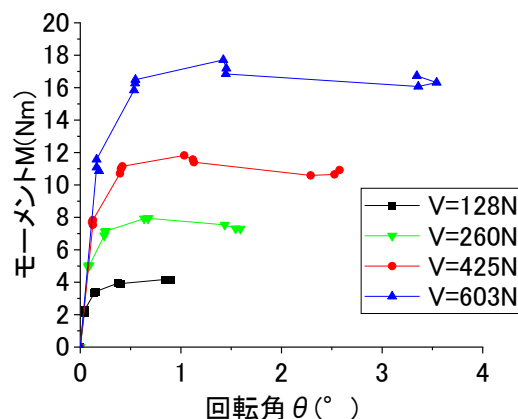
次に、 $M$ - $\theta$ 関係を載荷高さで比較すると、いずれの繰り返し回数でも $M$ - $\theta$ 関係は載荷高さ 200mmのほうが10%程度大きくなったものの、水平荷重 $H$ と比べると差は小さかった。すなわち、(1)載荷点における水平荷重 $H$ と水平変位の関係の結果と合わせると、載荷高さの違いによって $V$ 、 $H$ 、 $M$ のうち、 $H$ が大きく変わっていることになる。

## (3) 模型上面の鉛直変位と水平変位の履歴

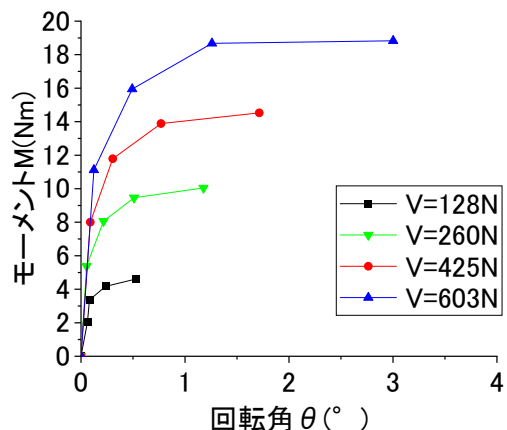
載荷高さ 100mmの模型上面における鉛直変位と水平変位の関係の履歴を示す。なお、鉛直変位は模型上面で計測した2点の鉛直変位の平均値とし、鉛直上向きを正としている。また水平変位は模型上面で計測した水平変位とした。載荷点に水平変位を与えることによって模型



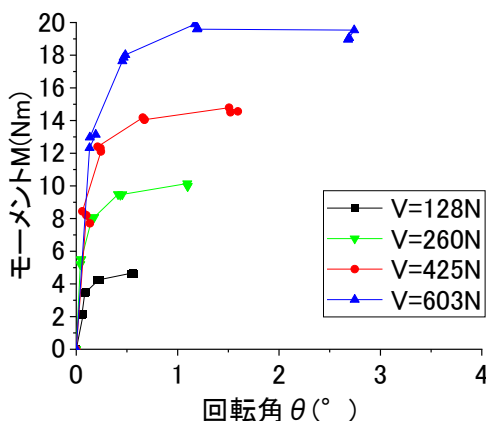
(a) 載荷高さ 100mm, 繰り返し回数 1 回



(b) 載荷高さ 100mm, 繰り返し回数 3 回



(c) 載荷高さ 200mm, 繰り返し回数 1 回



(d) 載荷高さ 200mm, 繰り返し回数 3 回

図-10  $M$ - $\theta$ 関係骨格曲線

上面に水平変位が生じ、これに伴って鉛直方向にも変位が生じている様子が確認できる。

図-11に  $V=260\text{N}$ 、図-12に  $V=603\text{N}$  の履歴を示す。図-11(a)の  $260\text{N}$ ・繰り返し回数1回のケースは水平変位が大きくなると鉛直上向きの変位が生じており、浮き上がりが生じているのが分かる。一方、図-11(b)のように繰り返し回数が多くなったり、図-12(a)のように模型死荷重が大きくなったりすると浮き上がりは生じず、鉛直下向きの変位が大きくなっているのが分かる。この鉛直下向きの変位のことを、以後「沈下量」と呼称する。

次に、 $M=0$ の時の水平変位および沈下量は、地震後に残留する残留水平変位、および残留沈下量と考えられるため、 $M=0$ のときの水平変位、沈下量を負側のみ抽出し(正負で1サイクルのため)、図-11、図-12に赤点で示す。水平変位の載荷に伴って残留水平変位は徐々に水平載荷方向に累積しており、残留沈下量も鉛直下向きに累積し

ている。

#### 4. 最大抵抗モーメントと支持力曲面の比較

本章では、 $V$ 、 $H$ 、 $M$ の三次元空間に実験から得られた極限支持力状態をプロットし、併せて Nova らの支持力曲面の式による極限支持力状態と  $M_m$  計算による極限支持力状態をそれぞれプロットすることで、これらの極限支持力評価方法を検討する。

実験値は、実験から得られた各実験ケースでの模型死荷重による鉛直荷重  $V$  と、 $H$  の最大値、 $M$  の最大値をプロットしている。 $V$  は  $V_m$  で除して正規化して示している。なお、3.実験結果より、繰り返し回数が  $H$  の最大値および  $M$  の最大値に及ぼす影響がほとんどなかったことから、繰り返し回数1回と3回は区別なくプロットし

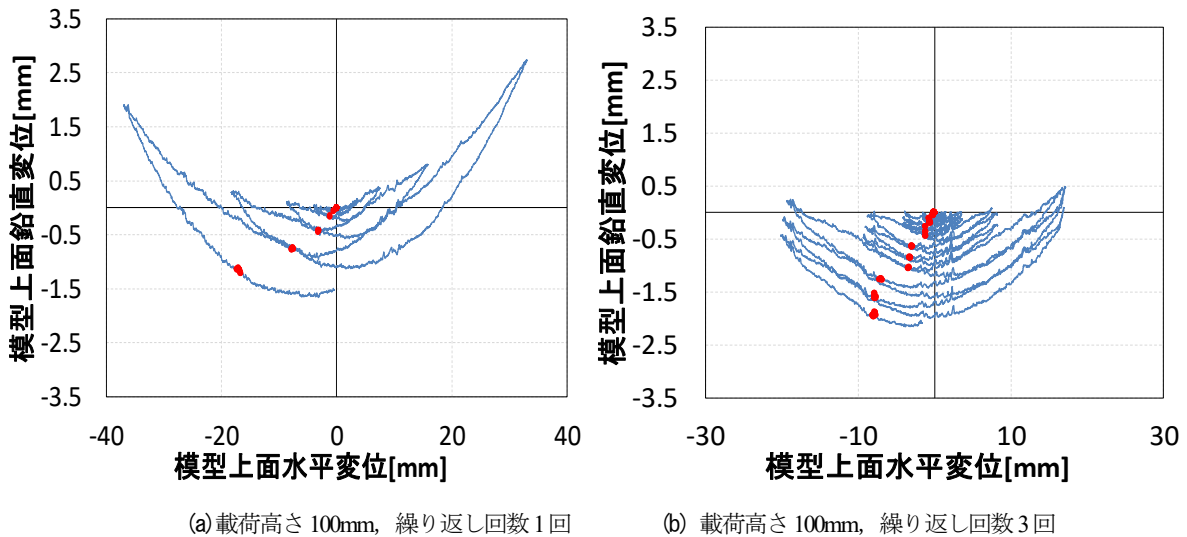


図-11 鉛直変位-水平変位関係(260N)

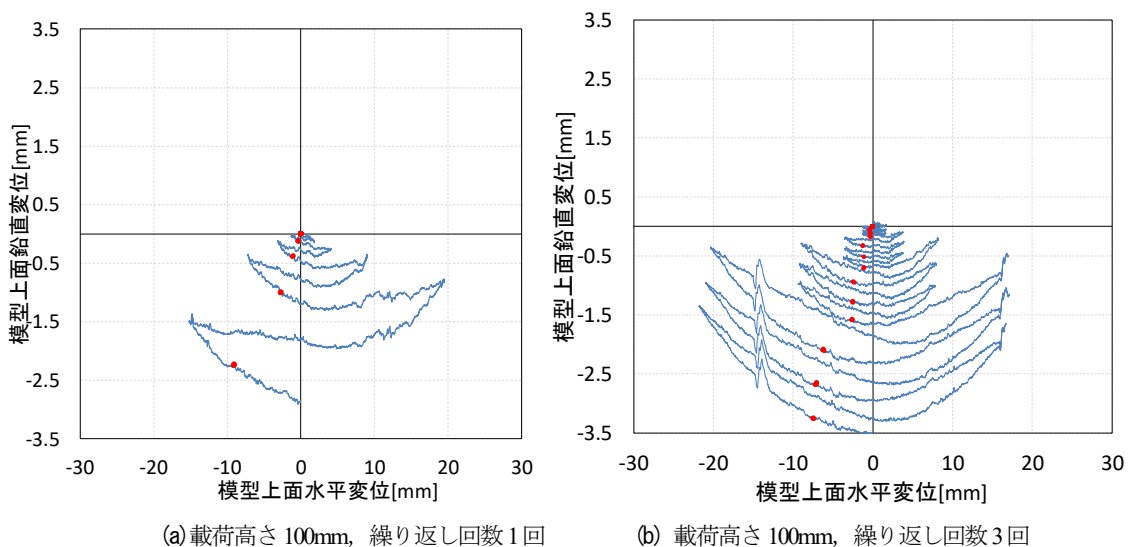


図-12 鉛直変位-水平変位関係(603N)

ている。

Nova らの支持力曲面については、式(7)に従って計算している。式(7)に用いたパラメータについて、 $\mu$ は2.実験概要(4)実験ケースに示すように $\phi=46.4^\circ$ としたため $\mu=\tan\phi=1.05$ とした。また $\zeta$ は1とした。 $\Psi$ は $\Psi=0.33, 0.4, 0.48, 0.5$ の4ケースで計算を行った。

次に最大抵抗モーメント  $M_m$  の計算方法を詳しく説明する。式(1)(2)(3)より、水平震度が上がると  $H$  が大きくなり、 $i_f$  が小さくなることで  $q_u$  の低減率は大きくなる。水平震度が大きくなって  $q_u$  が小さくなると  $M_m$  は小さくなる一方で作用モーメント  $M$  は大きくなるから、水平震度を増加させ、 $M_m$  と  $M$  が一致するまで計算を繰り返す。計算が収束したとき、直接基礎は極限支持力状態にあることになり、このときの  $V, H, M$  を調べることができる。なお、最大抵抗モーメント  $M_m$  の計算結果は Meyerhof の補正係数  $i_f$  によって  $q_u$  を低減して評価する場合(鉄道分野<sup>2)</sup>での取り扱い)と、地震時は補正係数  $i_f$  による低減を無視する場合(建築分野<sup>14)</sup>での取り扱い)の両方についてを図化した。

以上のようにして実験、支持力曲面、 $M_m$  計算からそれぞれ得た極限支持力状態における  $V, H, M$  の組み合わせを図化していく。

#### (1) $M-H$ 平面での比較

まず、支持力曲面のうち  $M-H$  平面の様子を各  $V$  で図-13にまとめる。 $V_m$  に対する死荷重  $V$  の安全率が2以上の場合には、死荷重  $V$  が大きいほど  $M-H$  平面における支持力曲面が大きくなっていることがわかる。

まず最大抵抗モーメント  $M_m$  の計算結果を実験結果と比較する。1.研究背景で示す通り Meyerhof の方法は厳密に地震時を想定したものではないため、地震時の  $q_u$  の評価に Meyerhof の方法が適用できるのかどうかは様々な研究がおこなわれてきており、2019年の建築基礎構造設計指針では、「地震時の直接基礎の水平抵抗の検討においては荷重傾斜による支持力の低減を行わない」と改訂された<sup>14)</sup>。しかし、今回の実験結果からは  $H$  の増加に伴う  $M$  の明らかな低下傾向が確認できる。 $H$  が小さい範囲において  $M$  の低下率が小さい可能性はあるが、少なくとも、地震時の荷重経路でも荷重の傾斜による支持力の低下は生じているといえる。

次に Nova らの式による支持力曲面に着目する。Nova らの式は  $H=0$  の時を極値として  $M$  が低下していくため、 $H$  が小さい範囲において  $M$  の低下率は小さい。一方実験結果の  $M$  の  $H$  に対する低下率は Nova らの式より大きく、この荷重高さ(すなわち  $MH$ ) の範囲における  $M$  の低下率は、最大抵抗モーメント  $M_m$  計算の方が荷重高さに対する感度を適切に評価できている。また、本実験結果から適当な  $\Psi$  を断定することは難しいが、荷重高さ

200mm では  $\Psi=0.4$ 、荷重高さ 100mm では  $\Psi=0.33$  と合うように見られ、Nova らの式には荷重の傾斜による支持力の低下が考慮できていない可能性が考えられる。

参考として、実験は未実施であるが、 $V=1866\text{N}$ (安全率  $F_s=3$ )、 $V=2829.5\text{N}$ (安全率  $F_s=2$ )のケースでも Nova らの支持力曲面による作図と  $M_m$  計算を行った。今回  $\zeta=1$  で計算を行っているため、Nova らの支持力曲面は  $F_s=2$  で極値を取る。 $M_m$  の低下率は  $F_s$  が小さくなるほど大きくなっている一方で Nova らの式は  $H$  が小さい範囲において低下率は変わらず小さく、 $M_m$  計算と支持力曲面は支持力曲面の極値において最も結果の乖離が大きくなる。

#### (2) $M-V$ 平面での比較

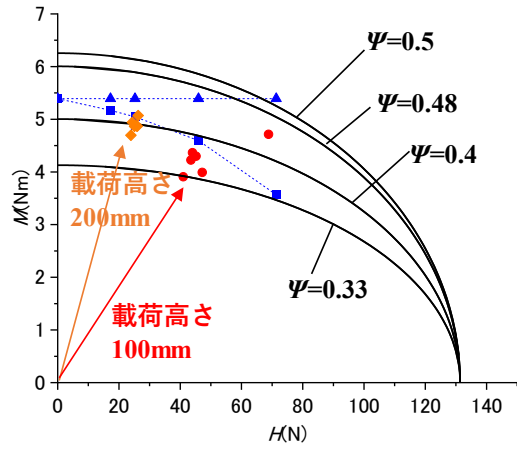
支持力曲面のうち  $M-V$  平面の様子を図-14に示す。支持力曲面について詳しく実験・考察が行われている文献4)は  $V_m$  に対する安全率が 27~14 程度の範囲となっており、本研究の 260N( $F_s=21$ )、425N( $F_s=13$ )の2ケースが概ねこの範囲に相当する。128N( $F_s=44$ )は文献4)の最大の死荷重安全率 27 より模型死荷重が小さく、603N( $F_s=9$ )の実験ケースは文献4)の最小の死荷重安全率 14 より模型死荷重が大きくなっており、死荷重安全率に対してさらに広範な検討を行うことができた。

文献4)、文献5)では  $\Psi=0.48$  で支持力曲面と実験値との比率がほぼ1となると結論付けられている。本実験では、模型死荷重が小さいところでは  $\Psi=0.48$  で概ね実験結果と一致するものの、安全率がさらに小さくなると実験結果の方が  $M$  の最大値の低下が大きかった。模型死荷重が大きいほど  $H$  が大きくなることから、 $M-V$  平面での考察からも支持力曲面では荷重の傾斜による支持力の低下を表現できていない可能性が考えられる。

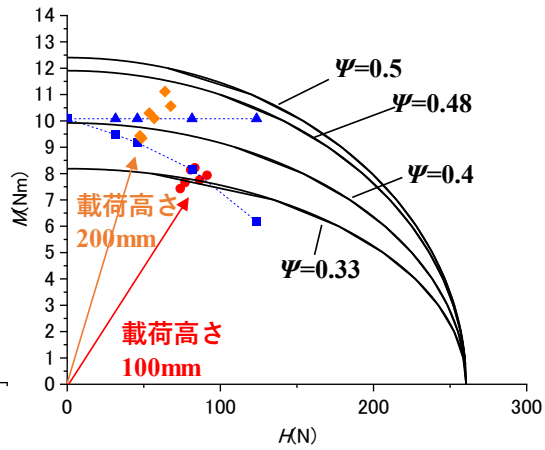
次に実験結果と  $M_m$  計算を比較する。 $i_f$  による補正を行わなかった場合、荷重高さ(すなわち  $MH$ )によって返す値は変わらないので、特に荷重高さが低い場合に  $M_m$  を過大に評価してしまう傾向にあることが分かる。このことから、地震時の照査においても  $i_f$  による補正を行う必要があると考えられる。 $i_f$  によって補正した場合、荷重高さが低くなることに伴う  $M_m$  の低下を表現することができおり、特に  $V$  が小さい範囲において実験結果と概ね一致する結果が得られた。

ただし、支持力曲面が  $V$  の増加に伴う荷重の傾斜角の増加による  $M$  の最大値の低下を十分評価できていない可能性が考えられる一方で、 $M_m$  計算は  $V$  が大きくなった時の低減率が実験よりさらに大きいように見られ、さらに安全率が小さい範囲においても実験を行い精査する必要があると考えている。

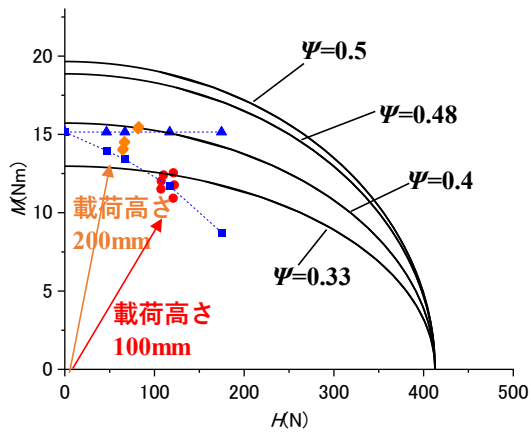
- : 載荷高さ100mm (最大値)
- ◆ : 載荷高さ200mm (最大値)
- ▲ :  $M_m$ 計算 ( $i_\gamma$ 低減なし)
- :  $M_m$ 計算 ( $i_\gamma$ 低減あり)
- : Novaらの式 (支持力曲面)



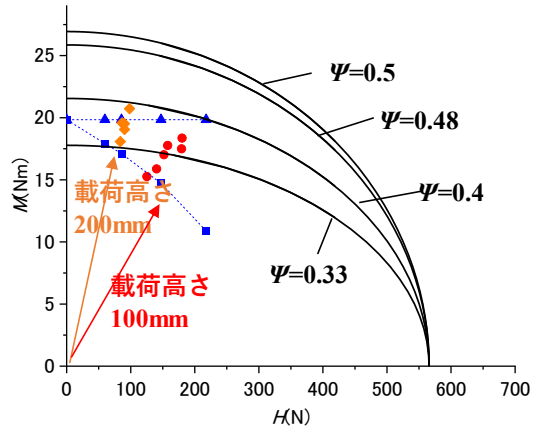
(a)128N( $V/V_m=2.3\%$ )



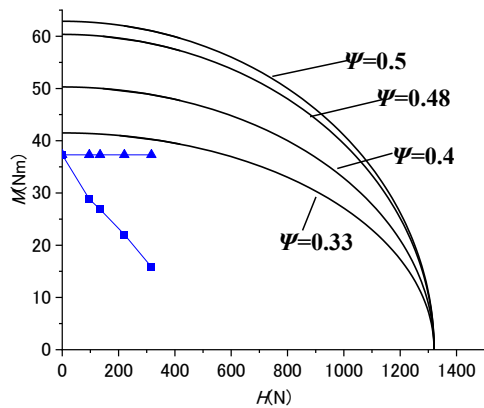
(b)260N( $V/V_m=4.6\%$ )



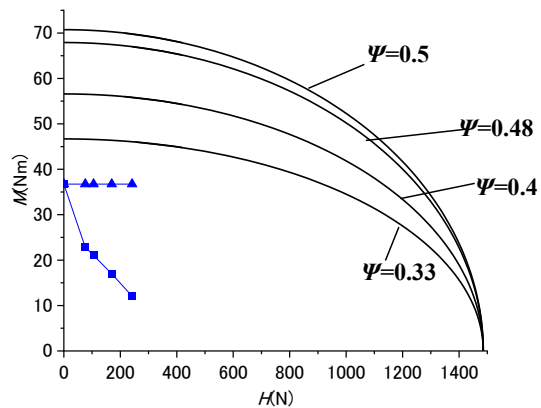
(c)425N( $V/V_m=7.5\%$ )



(d)603N( $V/V_m=11.0\%$ )



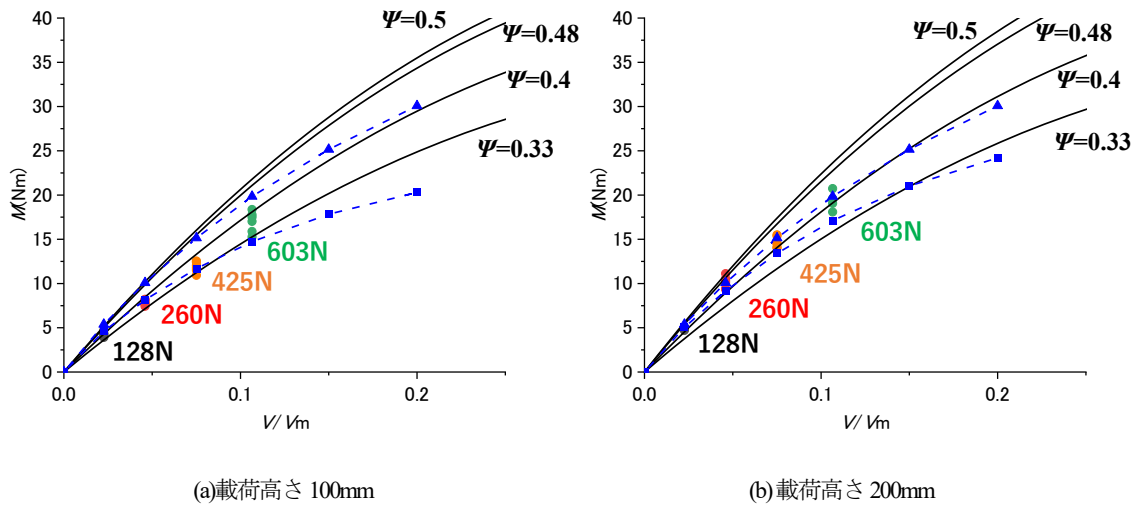
(e)1886N( $V/V_m=33.0\%$ )



(f)2829.5N( $V/V_m=50.0\%$ )

図-13  $M-H$  平面での支持力曲面及び最大抵抗モーメント  $M_m$  と実験値の比較

- : 128N (最大値)
- : 260N (最大値)
- : 425N (最大値)
- : 603N (最大値)
- ▲ :  $M_m$ 計算 ( $i_y$ 低減なし)
- :  $M_m$ 計算 ( $i_y$ 低減あり)
- : Novaらの式 (支持力曲面)



(a) 荷高 100mm (b) 荷高 200mm  
 図-14  $M$ - $V$ 平面での支持力曲面及び最大抵抗モーメント  $M_m$  と実験値の比較

### 5. 残留沈下量に関する考察

図-11, 図-12 に赤点でプロットした残留沈下量を  $S_r$  とし, それぞれの荷高, 繰り返し回数における全模型死荷重での残留沈下量  $S_r$  を, 図-15 にまとめる.  $S_r$  を比較する際の荷重レベルを降伏変位に対して相対的に一致させるため, 降伏変位  $\delta_{fy}$  に対する水平変位  $\delta_h$  の割合  $\delta_h/\delta_{fy}$  を「塑性率」とし, 横軸にとった. 比較のため, 全ケースで塑性率は 8 までで図化している. また, 繰り返し回数 3 回については簡単のため, 各塑性率の 3 回目の荷重における  $S_r$  をプロットした.

まず, 残留沈下量  $S_r$  を荷高で比較すると, 繰り返し回数 1 回, 3 回のいずれも荷高 100mm の方が  $S_r$  は大きくなった. 3.実験結果より,  $M$ - $\theta$  関係は荷高によって大きく変わらなかったが,  $H$  は荷高 100mm の方が 200mm より大きな値を示したことから,  $V$ ,  $H$ ,  $M$  のうち  $H$  の違いが鉛直方向の変位である  $S_r$  に大きな影響を及ぼしたことが分かる. また, この  $H$  の違いが  $S_r$  に及ぼす影響は, 模型死荷重による鉛直荷重  $V$  が大きいほど顕著になった. 文献 4) でも荷高が低いほど残留沈下量が大きいという結果が示されており, 本実験でも同様の傾向が得られた.

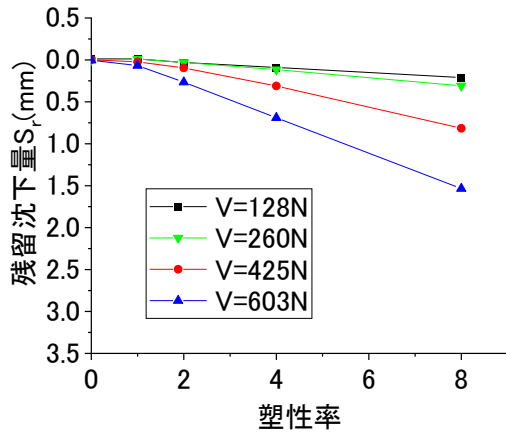
次に, 残留沈下量  $S_r$  を繰り返し回数で比較すると, 荷高 100mm, 200mm のいずれも繰り返し回数 3 回の方が  $S_r$  は大きくなった. このことから, 同じ塑性率の水平荷重でも正負交番繰り返し荷重によって沈下量が徐々に累積していくことが確認できる. なお, 正負交番繰り返し

し荷重によって基礎底面地盤の塑性化が進行して累積沈下量は増加するが, 3.実験結果より  $M$ - $\theta$  関係の骨格曲線は繰り返し回数が増加してもさほど低下していない. この違いは, 基礎底面地盤が端部のみならず基礎中心直下部分も含めて全体的に沈下するために, 基礎底面の回転抵抗自体はさほど低下しなかったために生じたものと想定される.

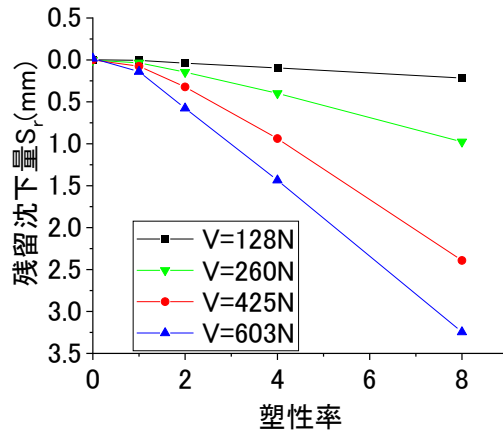
### 6. まとめ

本研究では, 地震時に橋脚の重心位置に水平方向慣性力が繰り返し作用する場合の鉛直方向の沈下や極限支持力を詳しく調べるため, 乾燥砂地盤上の直接基礎橋脚模型に水平交番荷重実験を実施した. その結果から, 極限支持力の評価方法の検討と, 水平荷重の繰り返し荷重後に残留する沈下量の関係に関する考察を行った.

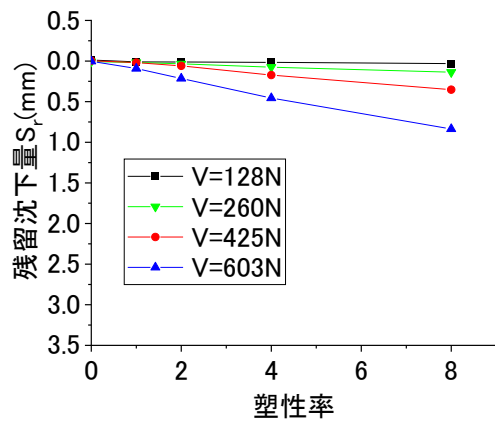
極限支持力については, 地震時を模擬した水平交番荷重実験での極限支持力状態における鉛直力  $V$ , 水平力  $H$ , モーメント  $M$  の組み合わせを  $M$ - $H$  平面,  $M$ - $V$  平面にプロットし, Meyerhof の低減方法に従って算出した最大抵抗モーメント  $M_m$  と支持力曲面も併せて図化することで, これらの極限支持力評価方法の妥当性を検討した. まず, 地震時の荷重経路において  $H$  の増加 (すなわち荷重の傾斜角の増加) に伴って明らかな極限支持力の低下傾向が見られたことから, 地震時の極限支持力の傾斜荷重による低減は何かしら考慮する必要があるといえる.  $M_m$  計算, 支持力局面のどちらもこのような低下傾向を評価す



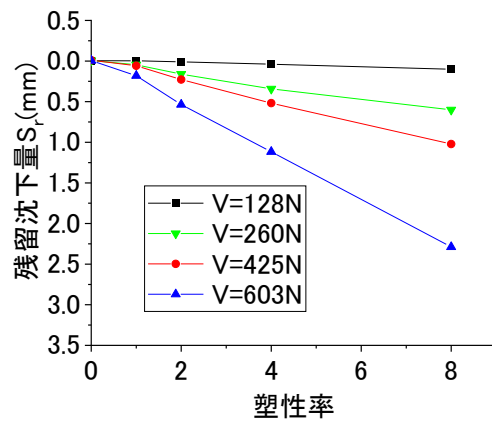
(a) 荷高 100mm, 繰り返し回数 1 回



(b) 荷高 100mm, 繰り返し回数 3 回



(c) 荷高 200mm, 繰り返し回数 1 回



(d) 荷高 200mm, 繰り返し回数 3 回

図-15 各塑性率で残留した残留沈下量  $S_r$

ることができるが、実験した範囲では支持力曲面より実験結果の方が明確な低下傾向を示すことがわかった。今回の実験結果からは、実際の直接基礎で設計される死荷重・重心高さの範囲（今回の実験で模擬した範囲）であれば、支持力曲面を用いるよりも従来の Meyerhof の低減方法に従って算出した  $M_m$  計算による極限支持力評価方法の方が荷重の傾斜角の増加に伴う  $M$  の低下を安全側に評価できることが確認できた。

一方、水平荷重に伴って生じる残留沈下量に関しては、荷高が低いほど、模型死荷重が大きいほど、そして繰り返し回数が多いほど、残留沈下量は大きくなる傾向が確認できた。今後は、実際の地震波のような不規則波が作用した場合の残留沈下挙動にも着目した実験を実施していく予定である。その結果を踏まえて、設計上の重要なファクターである荷高と死荷重の違いが直接基礎の極限支持力および地震時残留変位量に及ぼす影響も適切に考慮できる高精度な予測手法について検討していきたいと考えている。具体的には、本実験では Meyerhof の偏心・傾斜荷重の影響を最大抵抗モーメント  $M_m$  が概ね安全側に評価できていることが確認できたこ

とを踏まえ、最大抵抗モーメント  $M_m$  を直接的に評価可能な非線形分布地盤ばねモデルを用いた非線形動的骨組み解析によって、実験結果の再現解析を行っていきたい。

## REFERENCES

- 1) Meyerhof, G.T. : The Bearing Capacity of Foundation Under eccentric and Inclined Loads, Proceedings, 34<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.440-445, 1953.
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 丸善, p.166, 2012.
- 3) R Nova, L Montrasio : Settlements of shallow foundations on sand, Geotechnique 41 : 243-256, 1991.
- 4) 土木研究所: 直接基礎の地震時残留沈下量に関する繰り返し荷重実験, 土木研究所資料第 4027 号, 2007.
- 5) 土木研究所: 性能規定体型における直接基礎の安定照査法に関する研究, 土木研究所資料第 4255 号, 2014.
- 6) 川田草貴, 西岡英俊: 地震時残留沈下量に着目した直接基礎の水平交番荷重実験, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, 2021.

- 7) 西村隆義, 西岡英俊, 神田政幸, 舘山勝: 分布地盤ばねモデルによる地震後の直接基礎の沈下量評価法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.7, pp.23-28, 2010.
- 8) 笠原康平, 佐名川太亮, 中島卓哉: 地震を受けた直接基礎の残留変形量の推定に関する研究, 日本地震工学シンポジウム論文集, 2018.
- 9) 石田彩, 西岡英俊, 佐名川太亮, 尾崎匠: レベル 2 地震動による直接基礎の支持地盤塑性化後の残留沈下に関する数値解析, 第 47 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2020.
- 10) 川田草貴, 西岡英俊: 地震時慣性力を想定した乾燥砂地盤上直接基礎橋脚の水平載荷実験(載荷高さが基礎幅の 2 倍の場合), 日本地震工学会第 16 回年次大会梗概集, 2021.
- 11) 西岡英俊, 神田政幸, 舘山勝, 村田修, 平尾淳一, 樋口俊一: 静的模型実験による鋼矢板併用直接基礎の鉛直支持力特性に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.772-782, 2007.
- 12) 平川大貴, 荒木裕行: 偏心荷重を受ける帯基礎の支持力特性に対するジオグリッド補強の効果, ジオンセティックス論文集第 33 巻, 2018.
- 13) Meyerhof, G.G.: Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 1963.
- 14) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2019.

## A STUDY OF FAILURE ENVELOPE AND RESIDUAL SETTLEMENT BASED ON HORIZONTAL RECIPROCAL LOADING OF PIER MODEL OF SHALLOW FOUNDATION ON SAND CHANGED HEIGHT OF LOADING AND DEAD LOAD

Soki KAWADA, Hidetoshi NISHIOKA

Eccentric and inclined load arise to shallow foundation by combination of horizontal inertial force and vertical dead load at an earthquake in addition to normal situation working vertical dead load. Decline of ultimate bearing capacity under eccentric and inclined load has already revealed, but we should examine whether existing evaluation method is applicable or not at the way of earthquake loading. Moreover, the relationship between horizontal loading and vertical displacement has not been unveiled, so we need to develop and inspect quantitative evaluation method of this phenomenon. Thus, we conducted horizontal reciprocal loading of pier model of shallow foundation simulated the way of earthquake loading. As a result, we considered some evaluation method of ultimate bearing capacity and found that number of times of loading and size of horizontal loading influence on settlement.