

(164) 1G場および遠心力場の模型振動実験の相似則の適用性について

運輸省港湾技術研究所 稲富隆昌
運輸省港湾技術研究所 風間基樹

1. 研究の目的

地盤や土構造物の地震時の挙動を調べるため、構造物と地盤の連成振動系の模型振動実験が行われる。しかしながら、一般に実際の土を模型材料として使用した場合、土材料の力学特性が拘束圧に強く依存するため厳密な相似関係は成立しないと考えられてきた。したがって、模型振動実験の結果から直接的に実物の挙動を推定することはほとんど行われていない。本研究の目的は、1G場および40Gの遠心力場のケーソン-地盤系の模型振動実験結果をそれぞれ1G場、遠心力場の相似則を介して同一規模の実物に換算し、数値計算結果と比較することにより相似則の適用性を検討することにある。

2. 検討対象とした模型振動実験の概要

図-1は、1G場および遠心力場のケーソン-地盤系の模型断面図、およびセンサーの配置を示したものである。ケーソンには3個の荷重計で土圧計測用の受圧板が取り付けられており、静的および動的土圧を合力として計測した。模型地盤は両実験とも秋田港で採取された砂を用いて気乾状態で製作した。また、両実験に用いた入力加速度波形は十勝沖地震の八戸港の強震記録（NS成分）である。また、模型の寸法を表-1に示す。表中の記号は図-1の記号に対応しているが、遠心力場の模型ケーソンの高さは20cm、1G場のそれは80cmであり模型の高さのスケール比は約1：4となっている。なお、実験装置および実験方法の詳細は文献1),2)を参照されたい。

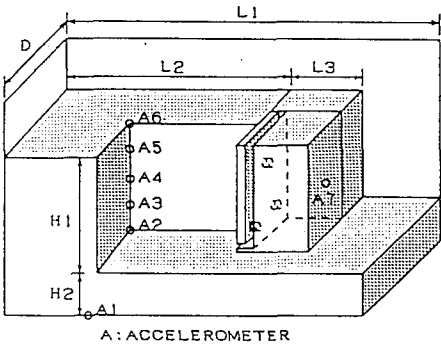


図-1 模型実験断面の鳥瞰図

3. 相似則による模型実験結果の実物への換算

1G場と遠心力場の模型実験結果を相似則に基づき両者を同一規模の実物に換算する。ここで使用する1G場の相似則は、1G場において砂質土を用いて行う振動実験に適用可能な相似則であり、香川³⁾、国生ら⁴⁾、井合⁵⁾によって提案されているものである。この1G場の相似則では、Rochaの仮定に基づき土の応力-ひずみ関係の相似を仮定しており、ひずみの相似比は長さの縮尺の0.5乗にとられている。縮尺1/Nの模型地盤の1G下での拘束圧は実地盤の1/Nとなるから、この仮定の妥当性は土材料の動的変形特性の拘束圧依存性を検討することにより議論できる。Kongら⁶⁾、龍岡ら⁷⁾の実験によれば、拘束圧の異なる砂質土のせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存曲線は、ひずみの0.5乗で基準化すればほぼ一致することが示されている。一方、遠心力場の実験の実物換算に用いる相似則は遠心力場の動的実験に関する相似則⁸⁾であり、表-2に示す通りである。まず、遠心力場の模型実験の相似則から遠心模型の長

表-1 模型の寸法(cm)

	1G模型	40G模型
H 1	80	20
H 2	20	6
L 1	300	60
L 2	200	37
L 3	48	12.5
D	150	18

表-2 使用した相似則（相似比は実物／模型で表わす）

項 目	1G場の相似則 ($N=10$ 、 $N\varepsilon=N^{1/2}$ とき)	遠心力場の相似則 ($N=40$ のとき)
長 さ	N (10)	N (40)
応 力	N (10)	1 (1)
ひずみ	$N\varepsilon$ (3.16)	1 (1)
時 間	$(NN\varepsilon)^{1/2}$ (5.62)	N (40)
周波数	$(NN\varepsilon)^{-1/2}$ (0.178)	N^{-1} (1/40)
剛 性	$N/N\varepsilon$ (3.16)	1 (1)
せん断波速度	$(N/N\varepsilon)^{1/2}$ (1.78)	1 (1)
加 速 度	1 (1)	N^{-1} (1/40)
質量密度	1 (1)	1 (1)
力/m	N^2 (100)	N (40)

さの縮尺比は1/40となる。一方1G場の実験は40G実験と同規模の実物を考えるため長さの縮尺は1/10となる。

図-2は、ここで対象とする両模型の実物への換算値、および数値計算に用いた要素分割図を示したものである。なお、メッシュの横寸法はそれぞれの模型寸法に対応するよう修正し計算に使用している。表中の時間間隔 Δt は実験に用いた地震波データの時間間隔を時間縮尺を考慮して求めたものである。また、最大動的土圧合力は実験データを入力最大加速度100Gal相当に規準化し、かつ単位奥行きm当りに換算した値である。また、ケーソンの見かけの密度はケーソンの中詰め砂を含む全体質量を全体積で除したものである。以後、この二つの実物は"1G実物"、"40G実物"と称することにする。

実物に換算した二つの実験条件を比較すると、1G場の模型地盤の方が相対密度が小さく軟らかい地盤となっていること、加振前の静的土圧係数が1G実物の場合が0.359、40G実物の場合は0.166となっていること以外は、入力地震動の最高振動数やケーソン重量には大きな違いはない。これに対して、入力加速度を100Galとした時の実物換算の最大動的土圧合力は、1G実物の方が40G実物より2倍ほど大きくなっており、地盤の軟らかさを反映した形になっている。この結果は、定性的に実験条件と実験結果の対応がうまくとれているように見える。

項 目	1 G 模型	1 G 実物	40 G 模型	40 G 実物
加振前静的土圧係数	0.359		0.166	
裏埋め地盤の密度 (相対密度)	1.56t/m ³ (53%)		1.66t/m ³ (81%)	
ケーソンの見かけの密度	1.574t/m ³		1.524t/m ³	
せん断波速度	122m/s	217m/s	260m/s	
最大入力加速度	20~100Gal		3.2~15.9G	80~390Gal
Δt :入力動の時間間隔	1.67ms	9.4ms	0.25ms	10ms
最高周波数成分	50Hz	8.9Hz	300Hz	7.5Hz
最大動的土圧合力 100Gal入力換算値	70kgf/m	7.0tf/m	86kgf/m	3.4tf/m

1 G 場の相似則による
(Scaling Factor=10)

遠心力場の相似則による
(Scaling Factor=40)

実物に対応するFEMメッシュ

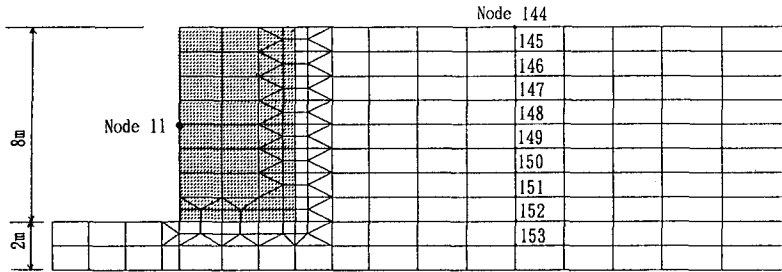


図-2 模型の実物への換算および計算に使用したFEMメッシュ

4. 二次元有限要素法による模型実験の数値計算

次に、この二つの実物の加速度応答や最大動的土圧合力の結果が定量的に妥当であるかどうかを二次元有限要素法振動解析プログラムFLUSHを用いて検討した。計算は平面ひずみを仮定し、用いた有限要素メッシュは図-2に示したとおりである。また計算に用いた地盤要素のポアソン比は特に断らないかぎり0.33とした。

(1) 背後地盤の物性 (G_0 、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線)

遠心力場の実験の意義は、地盤の応力状態を実物と同一にするとところにある。ここでは、地盤物性の拘束圧依存性が結果に与える影響を調べるため、背後地盤の物性の拘束圧依存性を一様と見なした場合と5層および10層に分割した場合の計算を実施した。物性の決め方は以下のとおりである。

a) 背後地盤を一様とみなす場合 背後地盤は一様なせん断波速度を有する均質な地盤と考える。この時、

地盤の初期せん断剛性 G_0 は、図-2に示したせん断波速度から求めた。また、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線は、既往の砂質土の要素試験から求めた平均的な曲線を用いた。

b) 背後地盤の拘束圧依存性を考慮する場合 背後地盤を5層および10層の水平層に分割する。それぞれの層の初期せん断剛性は、各層の中間深さの拘束圧の0.5乗に比例し、かつ背後地盤の卓越1次振動数がa)の場合と一致するように、あらかじめ重複反射理論で計算して決定したせん断波の速度構造から求めた。また、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線も、拘束圧に依存すると考えた。すなわち、a)の条件でもちいたこれら曲線を拘束圧1 kgf/cm²に対応する曲線と考えると、各層で使用する物性曲線は歪軸を求められた拘束圧の比の0.5乗で縮尺し、図-3のように決定できる。

(2) 計算結果と実験結果の比較

a) 背後地盤の最大加速度応答 図-4は、背後地盤の最大加速度分布を示したものである。なお、図中の実験値は入力加速度レベルが100Galに最も近い実験結果を補正したものである。最大加速度の計算結果は、1G実物の方が40G実物より大きく、実物換算した実験結果と定性的に一致する。また、最大加速度はせん断剛性の拘束圧依存性を考慮して層分割を細かくしたもののほど大きくなる傾向があり実験値に近づく。一樣地盤と10層分割した地盤の地表最大加速度の差は約5割であった。また、10層分割した計算結果と実験値を比較すると、40G実験の場合地表最大加速度は約140Galで計算結果約130Gal(△印)とほぼ一致し妥当な結果を与えていると言える。一方、1G実物の場合は計算値約190Galに対し、実験値は300Gal(○印)以上になっておりかなり異なっている。

b) 動的土圧合力 図-5は、地盤物性の拘束圧依存性が最大動的土圧合力に及ぼす影響を示したものである。計算の動的土圧合力は、ケーソン直近地盤要素の水平応力を力に換算し、その時刻歴を重ね合わせ最大値を求めたものである。動的土圧合力は層分割を細かくするほど、すなわち地盤物性の拘束圧依存性を精緻に考慮するほど大きくなり実験値(実線および点線)に近づく。また、1G実物と40G実物の計算値を比較すると1G実物の動的土圧合力(○印)の方が40G実物(△印)より約6割ほど大きく定性的な傾向は一致する。しかしながら、その値は実験値の半分以下の値となっている。

1G実物と40G実物の静的土圧の違いが動的土圧合力に及ぼす影響を検討するため、ポアソン比を変化させた計算を実施した。弾性論によれば鉛直応力 σ_y が作用したときの水平応力 σ_x はポアソン比 ν の関数となり、 $\nu = 0.5$ のとき $\sigma_x = \sigma_y$ (すなわち静止土圧係数 $K_0 = 1.0$)であり、 ν が小さくなると K_0 も小さくなる。ここで、簡単のため2次元平面ひずみ状態でかつ水平方向のひずみ ε_x がない場合を想定するとポアソン比と応力の関係は、 $\nu = (\sigma_x / \sigma_y) / \{1 + (\sigma_x / \sigma_y)\}$ と表される。同式に実験前の初期静的土圧係数、すなわち $(\sigma_x$

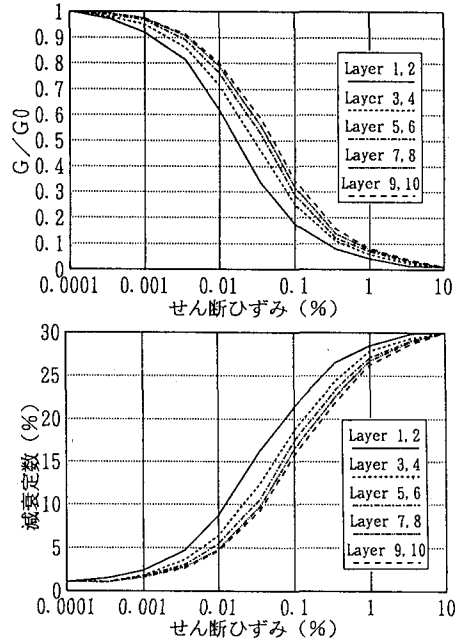


図-3 計算に用いた G/G_0 、 h のひずみ依存曲線

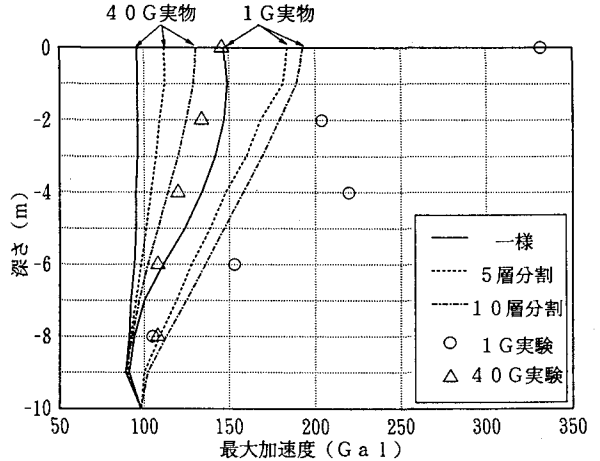


図-4 地盤物性の拘束圧依存性が裏埋め地盤の加速度応答に及ぼす影響(数値計算と実物換算した実験結果の比較)

／ σ_y)の値を代入すると、1 G実物で $\nu = 0.264$ 、40G実物で $\nu = 0.142$ となる。図-5の黒塗りのマークはこの値を用いた10層分割の計算結果である。ポアソン比をこのように設定すると、40G実物の計算結果は実験値とほぼ一致するが、1 G実物の結果は依然として実験値よりかなり小さめの値を与える。なお、図-6に1 G実物の5層分割の場合のポアソン比と動的土圧合力の関係を示すが、この図のカーブから1 G実物のポアソン比を0.264から0.15にしても、動的土圧合力は約1割程度しか増加しない。1 G実物の計算結果が実験値と定量的によい一致を見ない理由は、

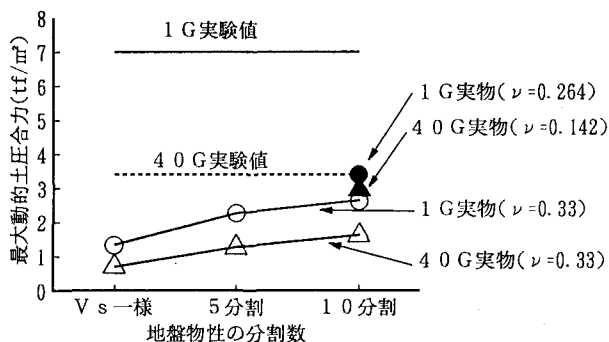


図-5 地盤物性の拘束圧依存性が動的土圧合力に及ぼす影響 (数値計算と実物換算した実験結果の比較)

は、実験の非線形性の程度の違いあるいは実験の初期応力状態の違いや計算に用いたせん断剛性のひずみ依存曲線の妥当性に求めることもできるが、実験方法を含め1 G場の相似則の限界によると考えることもできる。このうち、非線形性の程度の差については、今回の計算では、有効せん断ひずみで0.01から0.1以下の範囲にあり、等価線形計算が不適当な領域と言えない。また、初期応力状態については、遠心力場の実験は1 Gから所定の遠心力場に移行する段階で初期応力状態もこれに応じて実物の応力状態に近くなると考えられるため、初期応力状態の再現に有利に働くと考えられる。逆に1 G場の縮小模型実験では、拘束圧が小さいため自重に起因する平衡状態が再現しにくいことが指摘できる。

5. 結論

1 G場と40G場の実験結果を相似則によりほぼ同じ大きさの実物に換算し、数値計算により両者を比較した。その結果、以下のことが明かとなった。1) 数値計算により最大加速度や最大動的土圧合力等を検討する場合、深さ方向の地盤物性の拘束圧依存性を考慮する必要がある。例えば、地盤を一樣とみなした場合と地盤物性を10層に分割し拘束的に応じた物性を与えた場合を比較すると地表最大加速度で約5割、最大動的土圧合力で約10割の違いが生じた。2) 相似則で換算した実物の数値計算と実験結果の比較では、40Gの遠心力場の実験結果の方が1 G場の実験結果よりも定量的に数値計算結果と一致した。1 G場の実験では、対象とする実物地盤に対応する応力状態を模型中に再現しにくいことが指摘できる。

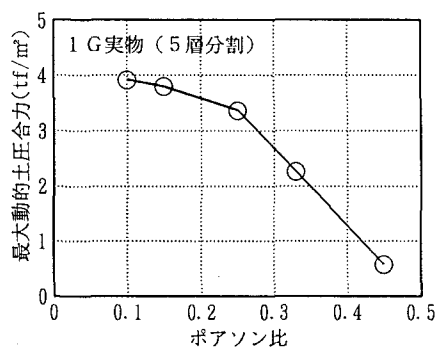


図-6 ポアソン比と最大動的土圧合力の関係 (1 G実物、5層分割の計算結果)

参考文献 1) 風間基樹、稲富隆昌、大塚幸治：ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析、港湾技術研究所報告、Vol.29、No.2、pp.177-217、1990。 2) 稲富隆昌、風間基樹：遠心力場におけるケーソン式護岸の模型振動実験、第21回地震工学研究発表会、pp.393-396、1991。 3) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則、土木学会論文報告集、第275号、pp.69-77、1978。 4) 国生剛治、岩橋尚広：軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析、土木学会論文報告集、第285号、pp.57-67、1979。 5) Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.105-108。 6) Kong, X., J., Tatsuoaka and Pradhan, T.B.S.: Dynamic deformation properties of sand at extremely low pressures, Proc of 7th Japan earthquake Eng. Symposium, pp.631-636, 1986。 7) Tatsuoaka, F., Iwasaki, T. and Takagi, Y.: Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus, Soil and Foundations, Vol.18, No.2, pp.25-40, 1978。 8) 例えば、風間基樹、稲富隆昌：遠心力载荷実験手法の振動実験への適用について、土木学会論文集、第1部門、投稿中。