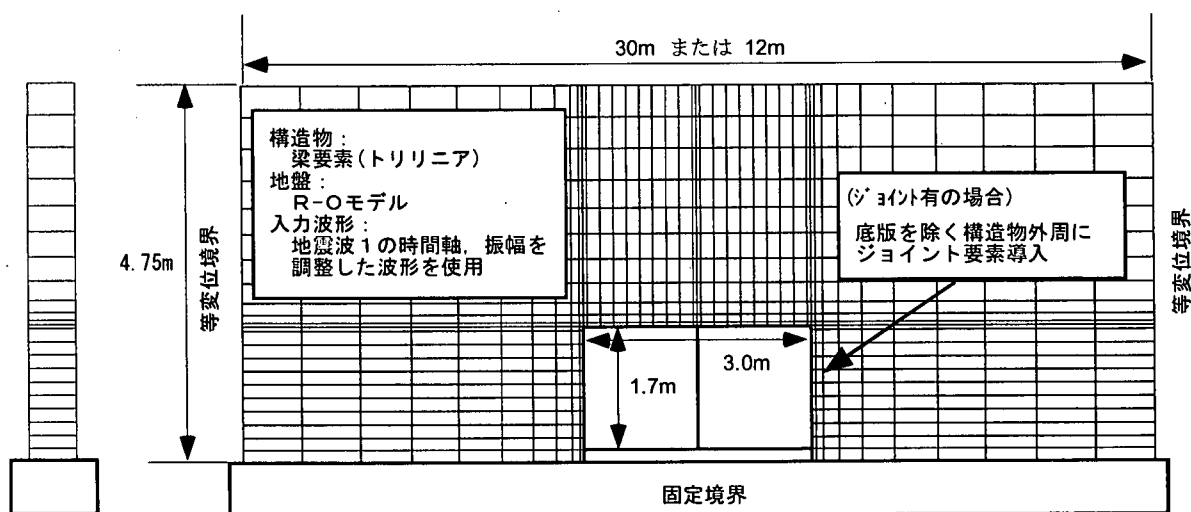


Ⅶ 地盤パラメータの設定が応答解析結果に及ぼす影響について

1. はじめに

ここでは、地盤のモデル化手法として履歴モデルを採用する場合について、地盤に関するパラメータの設定が地震応答解析結果に与える影響について検討する。解析対象モデルは、大型振動台実験の岩着モデル(技術資料Ⅱ参照)を基本とし、地盤領域を拡大した解析モデルも使用した。また、地盤変位に及ぼす影響を検討する場合は、地盤のみの一次元土柱モデルを用いて検討した(図1-1)。一次元解析、二次元解析ともに、地盤の履歴モデルとしてR-Oモデルを使用し、二次元の構造物の材料特性にはトリリニアモデルを使用した解析コード^{1),2)}を用いた。なお、地盤の構成則に関しては(文献3)を参考に、R-Oモデルを用いて所定のせん断剛性、履歴減衰のひずみ依存性を厳密に満足するよう、マニュアルに記載されている方法にしたがい、履歴曲線の反転直後のせん断剛性とMasing則の n を、反転時のひずみレベルに応じて調整するように改良した。また、数値積分にはNewmarkの β 法を用いた。



(a) 1次元土柱モデル

(b) 2次元モデル

図1-1 解析に使用した1次元および2次元モデル

2. 地盤物性設定における基本的な注意点

2.1 せん断剛性のひずみ依存性と破壊応力

地中構造物の変形性能評価を目的として、地盤-構造物連成の地震応答解析を実施する場合、対象とする構造物の種類や想定する限界状態にもよるが、一般に、数%程度の大ひずみ領域までの地盤応答の予測精度が必要となる。地中構造物の場合、その変形は地盤の変形に大きく影響され、一般に、地盤の変形量が大きくなるほど構造物の変位応答もより大きくなると考えられる。したがって、特に大きなひずみレベルでの再現性が重要であり、使用する地盤モデルのパラメータを設定する際に注意が必要である。例えば、図2.1-1に示す実験結果とそのフィッティング結果の場合、図2.1-1(a)に示される片対数軸上のせん断剛性(G)とせん断ひずみ(γ)の関係は、地盤のモデル化が

適切であり、十分な精度でパラメータが設定できているように見える。しかしながら、同じ結果を図 2.1-1 (b) のようにせん断応力(τ)とせん断ひずみ(γ)の関係として確認した場合、せん断ひずみが 0.1%程度以上になると、実験結果の応力-ひずみ関係とフィッティング結果は大きく異なり、せん断ひずみが 0.5%を超える場合は、フィッティング結果のせん断応力は実験における破壊応力を明らかに上回っている。そのため、このような物性を用いて地震応答解析を実施した場合、地盤の変形量を過小評価することになり、地盤変位と密接な関係にある地中構造物の変形量も過小評価する可能性が高い。したがって、大きなひずみを対象とした地震応答解析においては、図 2.1-1 (a) のようにせん断ひずみを対数で示した G と γ の関係に対してパラメータをフィッティングした場合、少なくとも発生応力が破壊応力を超えないことを確認する必要がある。

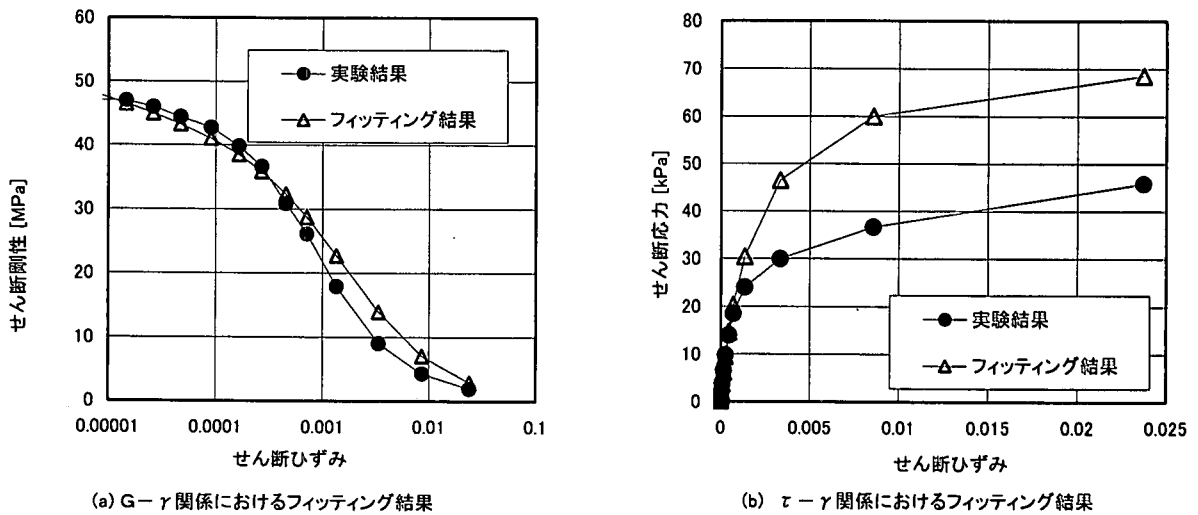


図 2.1-1 G - γ 関係でみた場合と τ - γ 関係でみた場合のフィッティング結果の比較

2.2 せん断剛性の拘束圧依存性

せん断剛性(G)の拘束圧依存性については、一般に

$$G = A \sigma_{m0}^B \tag{2.2-1}$$

の形で評価されることが多い (σ_{m0} は初期平均有効応力、 A, B は実験定数)。その場合、べき乗数 B は、小さなひずみ領域 ($\gamma < 1 \times 10^{-4}$ 程度)において $B = 0.4 \sim 0.5$ であるが、ひずみの増大とともに B の値も増大し、破壊付近では B の値は 1.0程度となる。すなわち、地中構造物の変形性能を照査するような大きな変形領域の地盤の応力-ひずみ関係は、比較的小さなひずみ領域のそれよりも、拘束圧の変化による影響が大きいことを意味する。したがって、解析対象地盤をモデル化する場合、拘束圧の変化を考慮して地盤物性の層区分を設定する必要があり、比較的厚い層に均一な物性を与える場合は、その影響を把握しておくことが必要である。

3. 一次元土柱モデルによる検討

3.1 解析の目的および概要

2.2で述べた基本的な注意点に留意し、せん断剛性の拘束圧依存性を考慮して地盤物性を設定する場合、自重などによる地盤の初期応力の評価が必要となる。しかし、地盤中の初期応力状態の評価は一般に困難であり、構造物

の側壁で実際に作用している土圧を測定するなどの特別な場合を除いて、地盤の初期応力状態はポアソン比(ν)または静止土圧係数(K_0)を仮定した上で、自重解析を行うことが考えられる。その場合、地盤のせん断剛性は式(2.2-1)の形で表されるため、 K_0 値が大きくなるほど地盤の初期応力が大きく、せん断剛性も大きくなる。地震応答解析においては、一般的な傾向として、地盤剛性が大きくなるほど同じ入力に対する変位応答は小さくなるといえるが、入力波形によっては必ずしもその関係が成立するものではなく、少なくとも構造物の応答が設計上安全側に評価されるように地盤の初期応力を評価するためには、地盤剛性と変位応答の関係の入力地震波形によるばらつきを把握しておく必要がある。

履歴減衰についても、そのひずみ依存関係は拘束圧によって変化するものとされ、一般的な傾向としては、減衰が大きくなるほど変位応答は小さくなると考えられるが、入力波形によって履歴減衰と変位応答の関係はばらつくことが想定される。要素試験結果において履歴減衰(h)—せん断ひずみ(γ)関係の拘束圧依存性が、せん断剛性のそれと比較してあまり明瞭ではなかったことを考慮して、履歴減衰に関しては2種類のひずみ依存性を仮定し検討に用いた。その他、拘束圧に依存した物性を設定する場合の地盤物性の層分割の影響についても検討した。

3.2 解析条件

(1) 解析モデル

解析に用いた図1-1に示す一次元土柱モデルは、大型振動台実験の解析に用いた二次元モデルの地盤要素を取り出したものである。要素分割は均等でないため、地盤物性の層分割の影響について検討する場合は、同じ物性を有する層厚がほぼ等しくなるように、同じ物性区分に含まれる要素の数を調整している。物性区分の層分割は、全層4.75mを均一な物性とした場合、2, 4, 8分割した場合、要素ごとに設定した場合の5通りについて検討した。

(2) 地盤物性

大型振動台実験に使用した珪砂5号については、各ひずみレベルにおける拘束圧依存性が、図3.2-1に示すように得られており、この結果を用いて初期の K_0 値に対応した地盤剛性のひずみ依存性($G-\gamma$ 関係)を図3.2-2のように設定した。ここでは、 K_0 値=0.5を基本とし、上限の値として K_0 値=0.7、下限の値として K_0 値=0.3を設定した。なお、図3.2-2の $G-\gamma$ 関係は、地盤モデルの中央高さに対して設定されたものを示している。

履歴減衰のひずみ依存性については、実験で得られた履歴減衰—せん断ひずみ関係が拘束圧によってそれほど大きく変化していなかったため、実験で得られた平均的な結果である[減衰1](最大減衰定数0.34)と、全ひずみレベルにおいて一率の係数を乗じて最大減衰定数を0.2とした[減衰2]を用いた。

(3) 入力波形

入力波形は、図3.2-3に示す特性の異なる3種類の入力波形の振幅・位相を調整して用いた。正弦波は同じ大きさの規則的な波が継続する代表的な例として、地震波1はパルス的に大きな波が存在する例として、さらに地震波2は波の途中から地盤の軟化に伴う長周期化が生じる例として採用した。検討を行った入力波形と地盤物性の組み合わせを表3.2-1に示す。

3.3 解析結果

解析結果の整理は、主に後述する2次元解析の構造物高さ(モデル底面から1.7m)での最大変位について整理し、比較するパラメータ以外の条件を合わせた変位応答の関係として示している。すなわち、例えば K_0 値について、

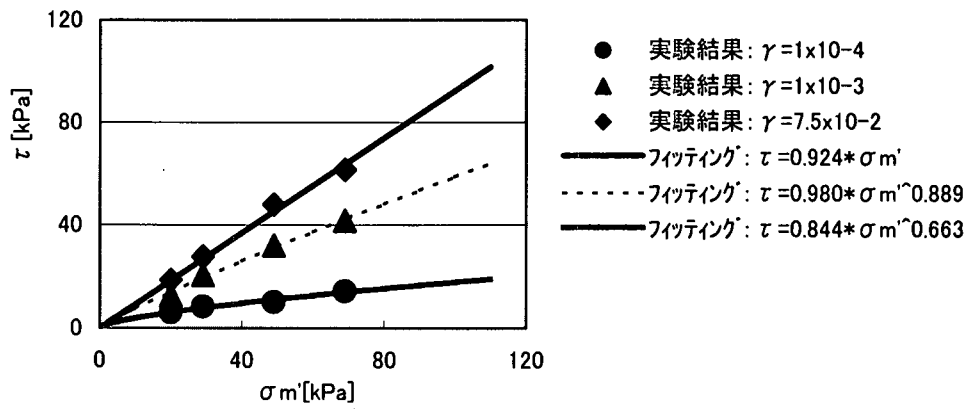


図 3.2-1 大型振動台実験で用いた珪砂 5 号の応力-ひずみ関係の拘束圧依存性

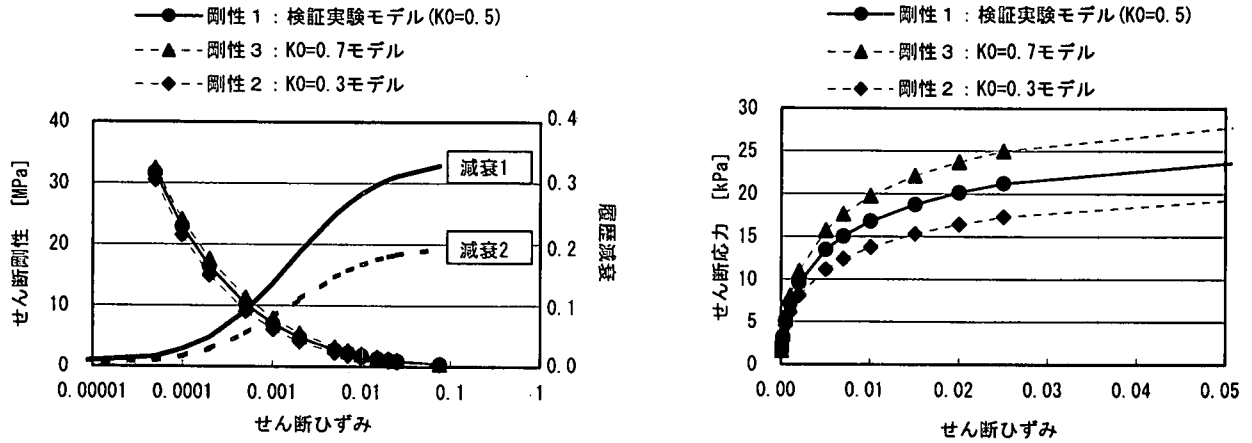


図 3.2-2 解析に使用した地盤モデルの $G-\gamma$ 関係および $\tau-\gamma$ 関係

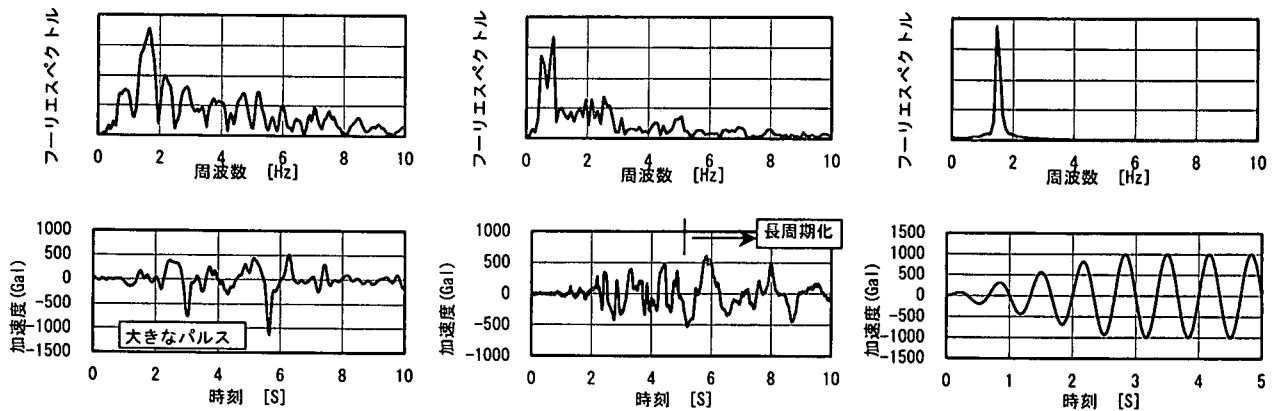


図 3.2-3 解析に使用した入力波形

表 3.2-1 1次元解析ケース

	剛性	減衰	拘束圧依存性考慮方法	入力波形
正弦波 検討ケース	剛性 1	減衰 1	要素	周波数：1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0Hz 加速度振幅：300, 400, 600, 800, 1000Gal を全組み合わせについて実施
			均一	
			層分割8.4.2	
		減衰 2	要素	
			均一	
			層分割8.4.2	
地震波 1 検討ケース	剛性 1	減衰 1	要素	時間軸：×1.0, ×0.5 振幅：400, 600, 800, 1000 のうち [×1.0, 400], [×1.0, 600] [×0.5, 600], [×0.5, 800], [×1.0, 1000] についてのみ実施
			均一	
			層分割8.4.2	
	剛性 2, 3	減衰 1	要素	
			均一	
			減衰 2	
		減衰 2	要素	
			均一	
			均一	
地震波 2 検討ケース	剛性 1~3	減衰 1	要素	時間軸：×1.0, ×0.5, ×0.25 振幅：300, 400, 600, 800, 1000 の全組み合わせを実施
			均一	
			層分割8.4.2	
		減衰 2	要素	
			均一	
			均一	

$K_0=0.5$ と 0.7 の場合を比較するためには、要素分割、履歴減衰、入力波形を同じにした場合の変位応答値を、 $K_0=0.5$ の時の値を横軸に、 $K_0=0.7$ の時の値を縦軸にしてプロットして、同じ図の中に要素分割、履歴減衰、入力波形の組み合わせを変えた結果を示している。

(1) K_0 値の影響

図 3.2-4 には、拘束圧依存性を設定する際に用いる K_0 値を変えた場合の地盤変位の関係を示している。図中には 1:1 の関係を実線で示しており、この上にプロットが位置する場合、 K_0 値の設定によらず同じ変位が生じることを意味する。また点線は、ばらつきの程度の目安として 1:1.2 または 1:0.8 の関係を示している。図 3.2-4(a) の $K_0=0.5$ と $K_0=0.7$ との比較では、多くの点が 1:1 の関係より下側にあり、 $K_0=0.7$ として初期応力を相対的に大きく見積もり、せん断剛性が大きく設定されている方が変位の応答値は小さいものの、いくつかの点は 1:1 の関係よりも上側に存在している。また図 3.2-4(b) については、一般的な傾向として剛性の大きな $K_0=0.5$ の場合の変位が小さいと言えるが、比較的多くの点はその傾向に反する側、すなわち 1:1 の関係よりも下側にプロットされている。しかしながら、±20%のばらつきを示す点線で挟まれる範囲を超える点については、剛性の大小関係と変位応答値の大小関係は一致しており、剛性を小さく、すなわち K_0 値を小さく設定した方が地盤の応答変位は大きく算出され、構造物の安全性評価上は安全側であるといえる。なお、この傾向は、地盤物性の拘束圧依存性を考慮した場合も、全層均一な物性を設定した場合も相違はない。

(2) 履歴減衰の影響

図 3.2-5 は、履歴減衰による影響を K_0 値の場合と同様に整理した結果である。 K_0 値の場合と同様に 1:1 の関係及び 1:1.2, 1:0.8 の関係をそれぞれ実線と点線で示している。±20%のばらつきを示す点線で挟まれる範囲を超える点については、全ひずみ領域で減衰定数の小さな[減衰 2]を用いた場合の変位応答値の方が小さい。

(3) 層分割の影響

図 3.2-6 は要素ごとに拘束圧依存性を考慮した物性を設定した場合と、全層同じ物性をを用いた場合の変位応答値を比較している。全層同じ物性をを用いた場合の変位応答値が常に大きくなっている。これは、図 3.2-7 の最大変位発生時刻の深さ方向の変位分布図に示すように、両者の変形モードが大きく異なるためである。すなわち、地表面

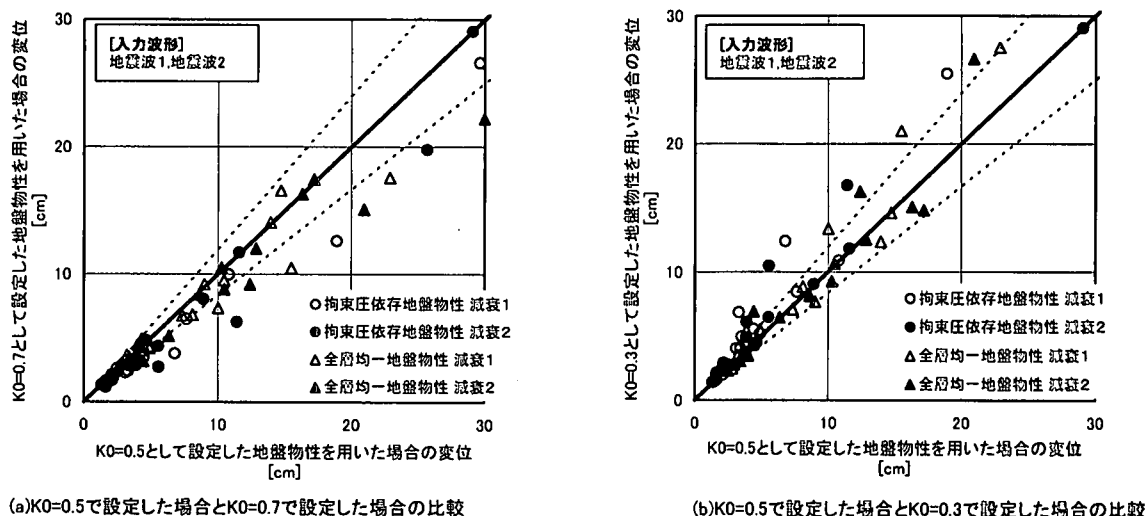


図 3.2-4 拘束圧依存性を設定する際に用いる K0 値と地盤変位の関係

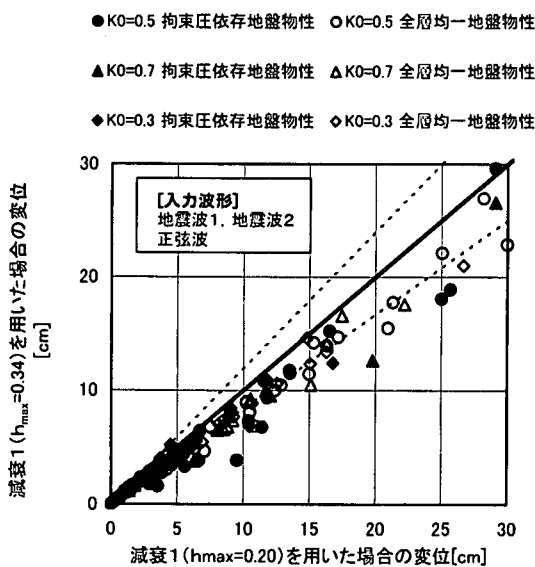


図 3.2-5 減衰係数の設定と地盤変位の関係

における変位応答値がそれほど変わらない場合でも、全層均一な地盤物性を設定した場合は変形が下層に集中する傾向にあり、図 3.2-6 の変位を抽出した位置では 2 倍程度の差を生じている。全層均一な物性を設定した場合の方がより深い部分で大きな変位（ひずみ）を生じる理由は、一般的に地中のせん断応力は深くなるほど大きくなる傾向にあるため、地盤剛性が深度によらず一定であれば、応力-ひずみ関係の形状から考えて、より深い部分の変形が大きくなるためである。

図 3.2-8 は、物性区分の層分割数をパラメータとして、最大変位発生時刻の深さ方向の変位分布を示している。この図によると、今回対象とした 4.75m の層厚では物性区分を 2 分割し、それぞれの中央高さでの拘束圧を用いて物性を設定すれば、概ね各要素ごとに物性を設定した場合と同程度の結果が得られることが判る。

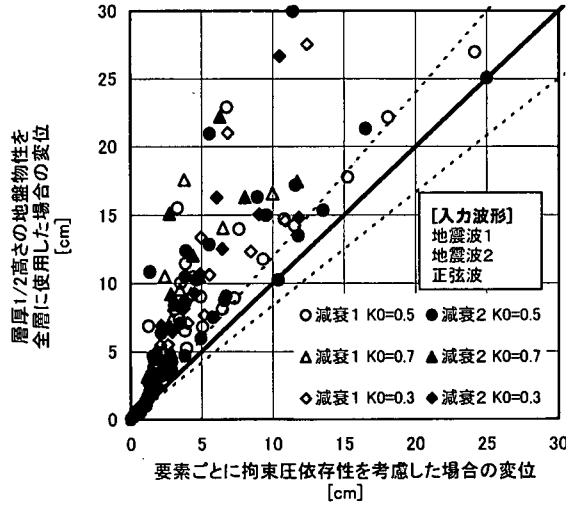


図 3.2-6 要素ごとに地盤物性の拘束圧依存性を考慮した場合と全層均一(層厚1/2高さ)な地盤物性を使用した場合の構造物高さに相当する位置での自由地盤変位の比較

- K0=0.7, 要素ごとに実験結果を適用
- K0=0.7, 全層均一な物性を使用(層厚1/2高さ)
- ▲ K0=0.3, 要素ごとに実験結果を適用
- △ K0=0.3, 全層均一な物性を使用(層厚1/2高さ)
- ◆ K0=0.5, 要素ごとに実験結果を適用
- ◇ K0=0.5, 全層均一な物性を使用(層厚1/2高さ)

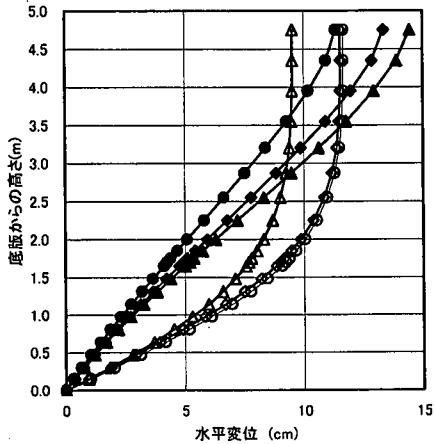


図 3.2-7 平均物性を用いた場合と拘束圧依存物性を用いた場合の深さ方向の最大変位分布の比較

- 各要素ごとに拘束圧依存性を考慮
- ▲ 層厚の8分割(60cm)で拘束圧依存性を考慮
- 層厚の4分割(120cm)で拘束圧依存性を考慮
- ◆ 層厚の2分割(240cm)で拘束圧依存性を考慮
- ◇ 層厚の1/2高さでの地盤物性を全層に適用

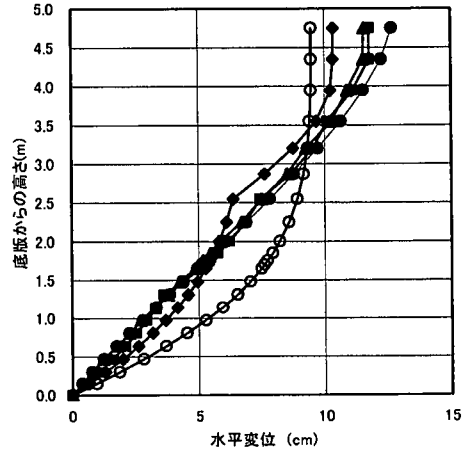


図 3.2-8 拘束圧依存性の層区分を変えた場合の深さ方向の最大変位分布の比較

4. 二次元地盤-構造物連成解析による検討

4.1 解析の目的および概要

二次元地盤-構造物連成解析は、自由地盤変位と構造物の変形量との関係に及ぼす、入力波形、地盤物性区分の要素分割、地盤-構造物の相対的な剛性および境界面の特性の影響について検討する。これらのパラメータの設定によらず、自由地盤変位と構造物の変形量との間に一意の関係が見いだされる場合、自由地盤の変位応答値の予測精度が保証されれば、構造物の変形量の予測精度も確保されるものと考えられる。

4.2 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは、図 1-1 に示す大型振動台実験の岩着ケースと同じ形状である。ただし、構造物については、地盤との相対的な剛性を変化させるため、表 4.2-1 に示すように、実際の実験ケースより断面厚さを厚くした複数の設定を用いた。相対的な剛性を変化させるためには、一次元的な検討において K_0 値の設定により地盤剛性を変化させたように、地盤の剛性の方を操作する方法も考えられる。しかし、大型振動台実験の趣旨が構造物を破壊させることにあり、実際の構造物と比較して構造物の見かけ剛性が非常に小さく、 K_0 値の操作によって得られる地盤剛性の範囲では、いずれの場合もほぼ構造物と地盤は同調して変形することが予想され、両者の相互作用に有意な変化が認められない可能性が高く、構造物の見かけ剛性を操作するものとした。地盤物性は、一次元解析において $K_0=0.5$ として設定した[地盤剛性 1]の設定を用いた。

地盤物性区分の分割数に関しては、それによる変位応答値の差が顕著であった全層均一に設定した場合と、各要素ごとに拘束圧依存性を考慮した場合の両方について検討した。

地盤に対して構造物が相対的に剛になると、地盤と構造物の変形量に大きな差が生じ、場合によっては両者の境界面で相対変位が生じる。そこで地盤と構造物の境界面にジョイント要素を導入し相対変位を考慮する場合と、節点を共有し一切の相対変位を生じない場合とで、地盤変位と構造物変形の関係に及ぼす影響を検討した。ジョイント要素の強度は、大型振動台実験の結果のシミュレーションにおいて、実験結果との整合性が認められた摩擦角 24° で設定した。

(2) 入力波形

入力波形は、表 4.2-1 に示すように、一次元解析において使用した[地震波 1]の時間軸を $1/2$ に固定し、振幅を 600, 800, 1000Gal に調整したものを使用した。二次元解析では、その解析に必要な時間からケース数を限定する必要があり、波形の不規則性や位相などの特性よりも、結果として生じる地盤変位の大きさが広範囲になることを重視したためである。

4.3 解析結果

図 4.3-1 は、構造物の断面厚さごとに、地盤変位(構造物高さ)と構造物の変形との関係を示している。ここで用いた横軸の地盤変位は、検討の目的が自由地盤の変位予測精度が保証されている場合の地盤変位と構造物変形量との関係を把握することであり、また一部で解析領域の影響も検討しているため、別途同じ地盤物性および入力波形を用いて実施した一次元解析の結果を使用している。

図 4.3-1 の図中の実線は、それぞれの図中にある全ケースの地盤変位—構造物層間変位の平均的な関係を示しており、破線はその平均的な関係から $\pm 20\%$ の変動の範囲となる領域を示す。図 4.3-1 によれば、ジョイント要素の有無や、地盤の拘束圧依存性の考慮方法に起因する変位モードの差などが存在する場合も含めて、自由地盤変位と構造物変位との関係が一意に求まり、そのばらつきが概ね 20% 程度であることを示している。一方で、相対的な剛性(構造物の断面厚さ)ごとの平均的な関係を比較すると、構造物が剛になるほど地盤変位に対する構造物の変形量が小さくなる結果となった。

表 4.2-1 2次元解析ケース

構造物断面厚さ	剛性	減衰	拘束圧依存性考慮方法	ジョイント要素	入力波形
10cm	剛性1	減衰1	要素	有	タイプ：地震波1 時間軸：1/2に短縮 振幅：600, 800, 1000Gal
			均一	無	
12cm	剛性1	減衰1	要素	有	タイプ：地震波1 時間軸：1/2に短縮 振幅：600, 800, 1000Gal
			均一	無	
14cm	剛性1	減衰1	要素	有	タイプ：地震波1 時間軸：1/2に短縮 振幅：600, 800, 1000Gal
			均一	無	
15cm	剛性1	減衰1	要素	有	タイプ：地震波1 時間軸：1/2に短縮 振幅：600, 800, 1000Gal
			均一	無	

×ジョイント無・地盤物性拘束圧依存・解析領域小

◇ジョイント有・地盤物性拘束圧依存・解析領域小

●ジョイント無・地盤物性拘束圧依存

○ジョイント有・地盤物性拘束圧依存

▲ジョイント無・地盤物性拘束圧非依存

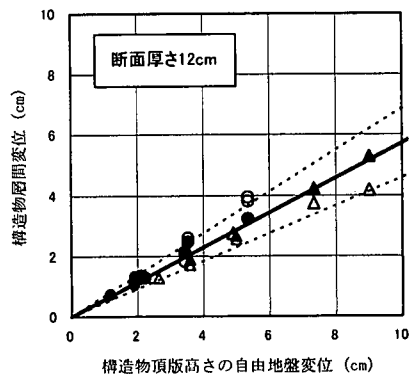
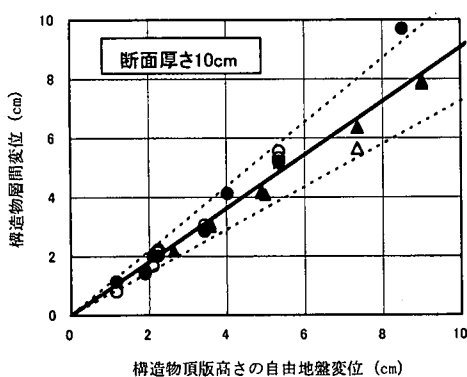
△ジョイント有・地盤物性拘束圧非依存

●ジョイント無・地盤物性拘束圧依存

○ジョイント有・地盤物性拘束圧依存

▲ジョイント無・地盤物性拘束圧非依存

△ジョイント有・地盤物性拘束圧非依存



●ジョイント無・地盤物性拘束圧依存

○ジョイント有・地盤物性拘束圧依存

▲ジョイント無・地盤物性拘束圧非依存

△ジョイント有・地盤物性拘束圧非依存

●ジョイント無・地盤物性拘束圧依存

○ジョイント有・地盤物性拘束圧依存

▲ジョイント無・地盤物性拘束圧非依存

△ジョイント有・地盤物性拘束圧非依存

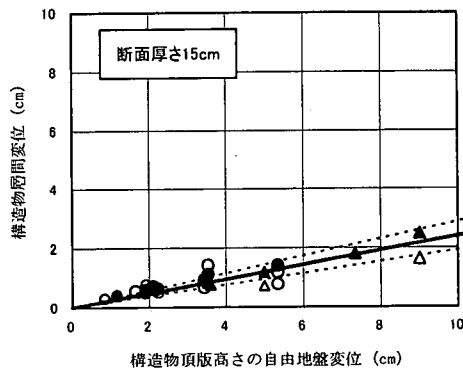
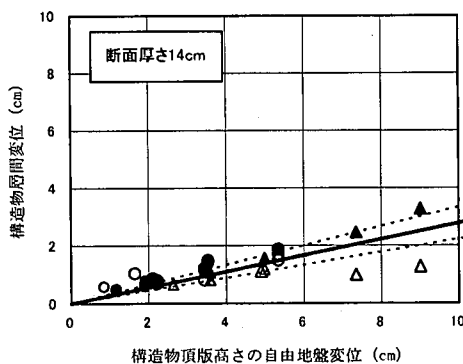


図 4.3-1 構造物の層間変位と同高さの自由地盤相対変位の関係

5. まとめ

以上、解析に用いる地盤物性が、地盤の応答に与える影響について、パラメータ解析を行った結果をとりまとめると以下の通りである。

- 1) 大型振動台実験における地盤を一次元土柱モデルにモデル化した一次元応答解析の結果、 K_0 値や履歴減衰が自由地盤の応答に与える影響は、地盤物性の拘束圧依存性の考慮方法が与える影響と比較して小さい。また、その影響も、平均値に対して±20%の変動を超えるものに関しては、 K_0 値が大きく剛性も大きな場合、または履歴減衰が大きな場合は変位応答が小さくなり、逆に K_0 値が小さく剛性が小さな場合、または履歴減衰が小さな場合は変位応答が大きくなるなど、応答解析を実施しなくとも直接推測可能な結果となっていた。
- 2) 地盤物性の拘束圧依存性の考慮方法の相異は、地盤変位の値のみならず、深さ方向の変位分布にも影響を与えるため、地盤物性を設定するには十分に検討する必要があることが判明した。しかし、今回検討した範囲では、拘束圧依存性の設定方法によって地中の変位モードが異なる場合も含め、自由地盤変位と構造物変位との間には一意な関係が存在し、予測された自由地盤変位の精度が保証されている場合、±20%程度の精度で構造物の変形を予測できることが解析的に把握された。

[(財) 電力中央研究所 河井 正]

【参考文献】

- 1) K. Ishihara, N. Yoshida and S. Tsujino: Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp. 373-380, Apr. 1985
- 2) 西 好一, 金谷 守, 当麻純一, 大波正行: 有効応力に基づく地盤の非線形解析手法の開発とその検証, 土木学会論文集, No. 505, III-29, pp. 49-58, Dec. 1994
- 3) 吉田 望, 辻野修一, 石原研而: 地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演概要集, B 構造 I, pp. 1639-1640, Oct. 1990