

VI ダイレイタンスーを考慮した地盤のモデル化手法による

大型振動台実験のシミュレーション

1. はじめに

乾燥砂に繰返しせん断を加えると、せん断変形とともにダイレイタンスーによる体積変化が生じる。技術資料IVおよびVの大型振動台実験のシミュレーションにおいて用いられた地盤のモデル化手法は、この地盤のダイレイタンスー特性を無視して、せん断変形のみに着目してモデル化する手法である。ここで対象とした、比較的剛性が小さく地盤と同調して変形するような地中構造物では、主に頂版に作用する荷重が構造物の変形に寄与しており、地盤のダイレイタンスー特性を考慮しない解析手法によっても変形量の予測が可能であることは、実験的、解析的に確認されている。しかしながら、その一方で実験結果の詳細な検討によって、構造物の側壁に作用する動土圧や地盤の鉛直動に、地盤のダイレイタンスーによる影響が認められている。ここでは、地盤のダイレイタンスー特性を考慮できる解析手法を用いて、特に以下の点に着目して、技術資料IIでその結果を解析した模型実験の数値シミュレーションを行う。文章中に用いられている記号については、技術資料IIを参照されたい。

- ・ 地盤の加速度応答，特に鉛直加速度応答
- ・ 地盤の沈下も含めた変形挙動
- ・ 試験体に作用する動土圧

2. 解析概要

2.1 解析コード

解析には、地盤および構造物に対して以下の特徴を有するプログラム^{1), 2), 3)}を用いた。

地盤は、有効応力に基づく非線形解析領域となっており、繰返しせん断時のダイレイタンスーを含む変形挙動を弾・塑性構成式で表現する。今回の模型実験のように乾燥砂を対象とする場合には、ダイレイタンスー挙動は体積変化となって現れる。

構造物に対しては、部材の曲げモーメントと曲率関係(M- ϕ 復元力特性)が、トリリニア型の非線形特性を有するはり要素で表現する。ただし、軸力変動の影響は考慮しない。

2.2 解析モデルと入力波形

解析は、大型振動台実験の岩着モデルの最大入力加速度が1127Galのケースを対象に行う。解析モデルにおける有限要素分割図を図2.2-1に示す。境界条件としては、モデル底面を固定条件とし、モデル側方については、同一レベルでの節点における水平・鉛直変位が等しくなる等変位境界を適用した。また、構造物と地盤の接触面にジョイント要素は配置せず、接触面は完全固着条件としている。図2.2-2は、実験時に振動台上で計測された波形であり、解析では、底面固定端より上記加速度を直接入力した。

また、解析では、地盤の1次固有振動数に対して、地盤で1%、構造物で5%の剛性比例型レーリー減衰を考慮した。時間領域の直接積分には陰解法を適用し、時間刻みは1/2000秒とした。

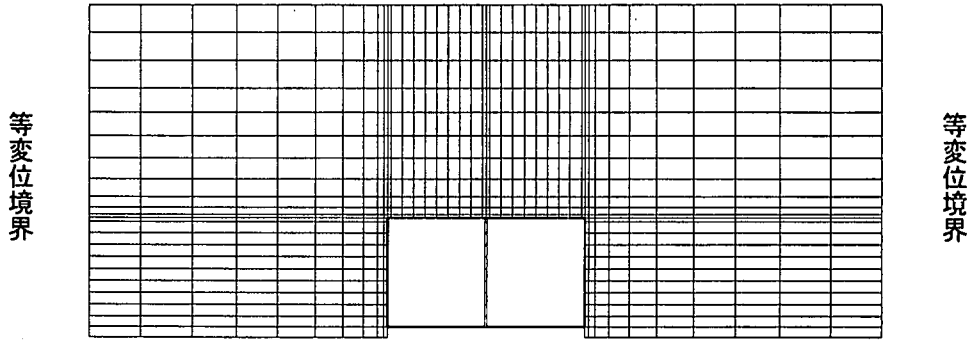


図 2.2-1 解析モデルの有限要素分割図

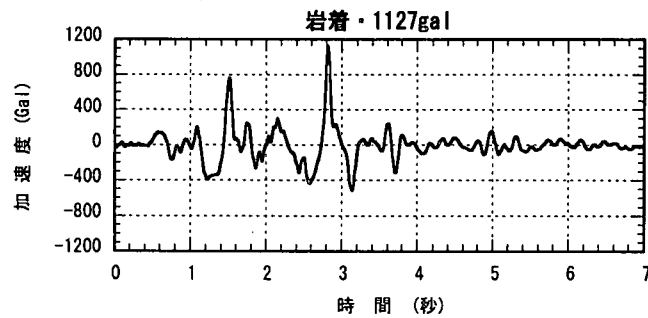


図 2.2-2 入力に用いた波形 (大型振動台実験 岩着・1127Gal)

表 2.3-1 地盤の解析用入力物性値 (岩着モデル)

No.	標高 (m)	層厚 (m)	乾燥密度 γ_t (tf/m ³)	初期せん断 剛性 G_0 (kg/cm ²)	内部 摩擦角 ϕ_f (°)	変相角 ϕ_m (°)	間隙比 e_0	膨潤時 勾配 κ	体積ひずみ 定数 m (cm ² /kgf)
	4.750								
1	4.350	0.400	1.55	105.1	53.0	30.0	0.76	0.00042	0.04
2	3.950	0.400	1.55	194.4	53.0	30.0	0.76	0.00074	0.04
3	3.550	0.400	1.55	258.7	53.0	30.0	0.76	0.00095	0.04
4	3.200	0.350	1.55	309.3	53.0	30.0	0.76	0.00111	0.04
5	2.870	0.330	1.55	350.0	53.0	30.0	0.76	0.00124	0.04
6	2.550	0.320	1.55	385.7	53.0	30.0	0.76	0.00134	0.04
7	2.250	0.300	1.55	417.5	53.0	30.0	0.76	0.00144	0.04
8	2.000	0.250	1.55	444.2	53.0	30.0	0.76	0.00151	0.04
9	1.850	0.150	1.55	462.9	53.0	30.0	0.76	0.00157	0.04
10	1.750	0.100	1.55	474.2	53.0	30.0	0.76	0.00160	0.04
11	1.700	0.050	1.55	480.9	53.0	30.0	0.76	0.00162	0.04
12	1.650	0.050	1.55	485.4	53.0	30.0	0.76	0.00163	0.04
13	1.481	0.169	1.55	495.0	53.0	30.0	0.76	0.00166	0.04
14	1.313	0.169	1.55	509.5	53.0	30.0	0.76	0.00170	0.04
15	1.144	0.169	1.55	523.7	53.0	30.0	0.76	0.00173	0.04
16	0.975	0.169	1.55	537.6	53.0	30.0	0.76	0.00177	0.04
17	0.806	0.169	1.55	551.2	53.0	30.0	0.76	0.00181	0.04
18	0.638	0.169	1.55	564.6	53.0	30.0	0.76	0.00185	0.04
19	0.469	0.169	1.55	577.7	53.0	30.0	0.76	0.00188	0.04
20	0.300	0.169	1.55	590.6	53.0	30.0	0.76	0.00192	0.04
21	0.150	0.150	1.55	602.6	53.0	30.0	0.76	0.00195	0.04
22	0.000	0.150	1.55	613.7	53.0	30.0	0.76	0.00198	0.04

2.3 解析用入力物性値

解析に用いる地盤の入力物性値については、実験で使用した珪砂5号を用いた室内力学試験および要素実験結果の数値シミュレーションによって、表2.3-1のように設定した。

室内力学試験では、中空ねじりせん断装置を用い、破壊時の内部摩擦角および変相角を求めるための排水単調載荷試験，ならびに体積ひずみの蓄積量を表す定数(m^*)やせん断剛性(G)，履歴減衰(h)のひずみ依存性を求めるための繰返し排水試験を行った。供試体作製にあたっては、実験時と作製方法をできるだけ同じ条件にするため、乾燥砂を突固める方法を採用し、密度条件についても、実験地盤モデルの相対密度と同様の $Dr=80\%$ 程度(間隙比 $e=0.67$)とした。

図2.3-1に、単調載荷試験によるせん断応力-せん断ひずみ-体積ひずみ関係を示している。これらの試験結果より、破壊に相当する内部摩擦角として $\phi_f=53$ 度、体積変化が収縮から膨張に転じる変相角として $\phi_m=30$ 度を得た。

図2.3-2には、繰返し排水試験結果の一例として、せん断応力-体積ひずみ関係を示している。ここで実施した排水ねじりせん断では、平均有効応力を一定に保っているため、繰返しの進行に伴って徐々に蓄積される体積ひずみは、すべてダイレイタンス成分である。解析コードに用いられている地盤の構成則では、このダイレイタンスによる体積変化傾向を、応力比-ひずみ増分比関係の変化によって表現している。具体的には、地震時のように不規則に変化する応力状態を考慮して、応力比が反転するごとに、その時点の応力比(η^*)，その応力比のもとで無限大の繰返し回数で載荷された場合に生じる体積ひずみの収束値(V_{df})，その時点までの蓄積体積ひずみ(V_d)を用いて、直線で近似した応力比-ひずみ増分比の傾き(α)を式(2.3-1)のように定める。さらに、その際に必要となる V_{df} については、式(2.3-2)によって定めるものとする。

$$\alpha = 1 - \frac{V_{df}}{V_d} \tag{2.3-1}$$

$$V_{df} = m^* \sigma_m^* (\eta^*)^{n^*} \tag{2.3-2}$$

ここで、砂の場合 n^* は実験的に5.0程度であることが分っており、 $n^*=5.0$ として m^* を要素実験結果から求めた結果が表2.3-1の m^* である。

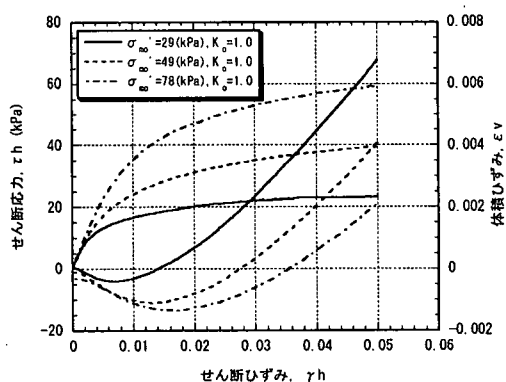


図 2.3-1 単調載荷試験のせん断ひずみ-せん断応力，体積ひずみ関係

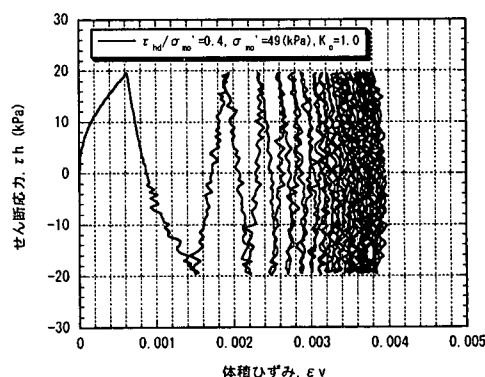


図 2.3-2 排水繰返し載荷試験における体積ひずみ-せん断応力関係

これらの実験に基づく情報と、モデル地盤で計測されたせん断波速度(V_s)から求めた初期せん断弾性係数(G_0)などの情報を用いて、弾・塑性構成式による動的変形試験の数値実験を行い、せん断剛性、履歴減衰のひずみ依存性を実験結果と比較することにより、試行錯誤的に解析に用いる入力物性値を推定した。

弾・塑性構成式ならびに材料定数などの詳細については、関連文献^{1), 2), 3)}を参照されたい。

3. 解析結果

3.1 加速度応答

図3. 1-1および図3. 1-2には、それぞれ代表的な位置における水平加速度ならびに鉛直加速度の時刻歴の比較を示した。水平加速度については、実験と解析でほとんど一致している。鉛直加速度については、地表面での波形は位相も含めて比較的良く一致している。試験体頂版両端での鉛直加速度については、解析による波形はほとんど変動が認められない。ただし、実験結果についても、加速度の絶対値をみると最大でも50Gal~100Gal程度で、他に比べると元々小さな値になっている。比較的大きな加速度を発生している部分、例えば、頂版左端の場合、1.6秒付近および2.8秒付近では、正側ピークから負側ピークへの変化時間が非常に短く、この時刻以前に鉄筋が降伏していることと考え合わせると、実験波形に所々認められるパルス状の波形は、試験体降伏に関連してローカルに生じた加速度であると思われる。すなわち、この部分の加速度応答を再現するためには、地盤特性のみならず、構造物の特性や両者の境界部の特性まで、忠実に再現する必要がある。

地表面の水平加速度(AHG41)と鉛直加速度(AVG41)のフーリエスペクトルを比較したものが図3. 1-3である。この図を見ると、鉛直加速度のフーリエスペクトルは水平加速度のフーリエスペクトルの倍の周波数におけるスペクトルが卓越しており、1サイクルのせん断により圧縮と膨張を2回繰り返す地盤のダイレイタンシー特性が加速度応答に現れていることが伺える。

3.2 変位応答

図3. 2-1には、遠方地盤(土槽枠)および試験体右側側壁線上の最大水平変位分布に関する実験と解析の比較を示している。試験体より上方(2.5mより上)の地盤変位については、解析値は実験値より小さくなっている。地表面付近では地盤は相当に低い拘束圧状態にあり、この領域での物性試験が困難であることから、本解析では、あえて実験値と解析値を合わせるための入力物性値の操作は行っていない。ただし、拘束状態を模擬した物性試験が行われ、それに基づいて推定した入力物性を適用した試験体埋設深度付近における最大水平変位は、実験と解析で良く一致していると言える。

図3. 2-2には、試験体頂版レベルでの遠方地盤の水平変位および地表面での鉛直変位の時刻歴に関する実験と解析の比較を示した。水平変位はモデルに対して右向きが正、鉛直変位は上向きが正を表している。遠方地盤の水平変位については、変位の最大値、残留値ならびに位相ともに実験結果と解析結果は概ね良好に一致していると言える。また、地表面鉛直変位についても同様の結果が得られており、特に入力が大きいつまみには、ダイレイタンシーによると思われる体積膨張によって一時的に地盤が盛り上がる傾向を示しながら、時間の経過と共に体積収縮に伴う沈下が進行していく現象が良好に模擬されている。

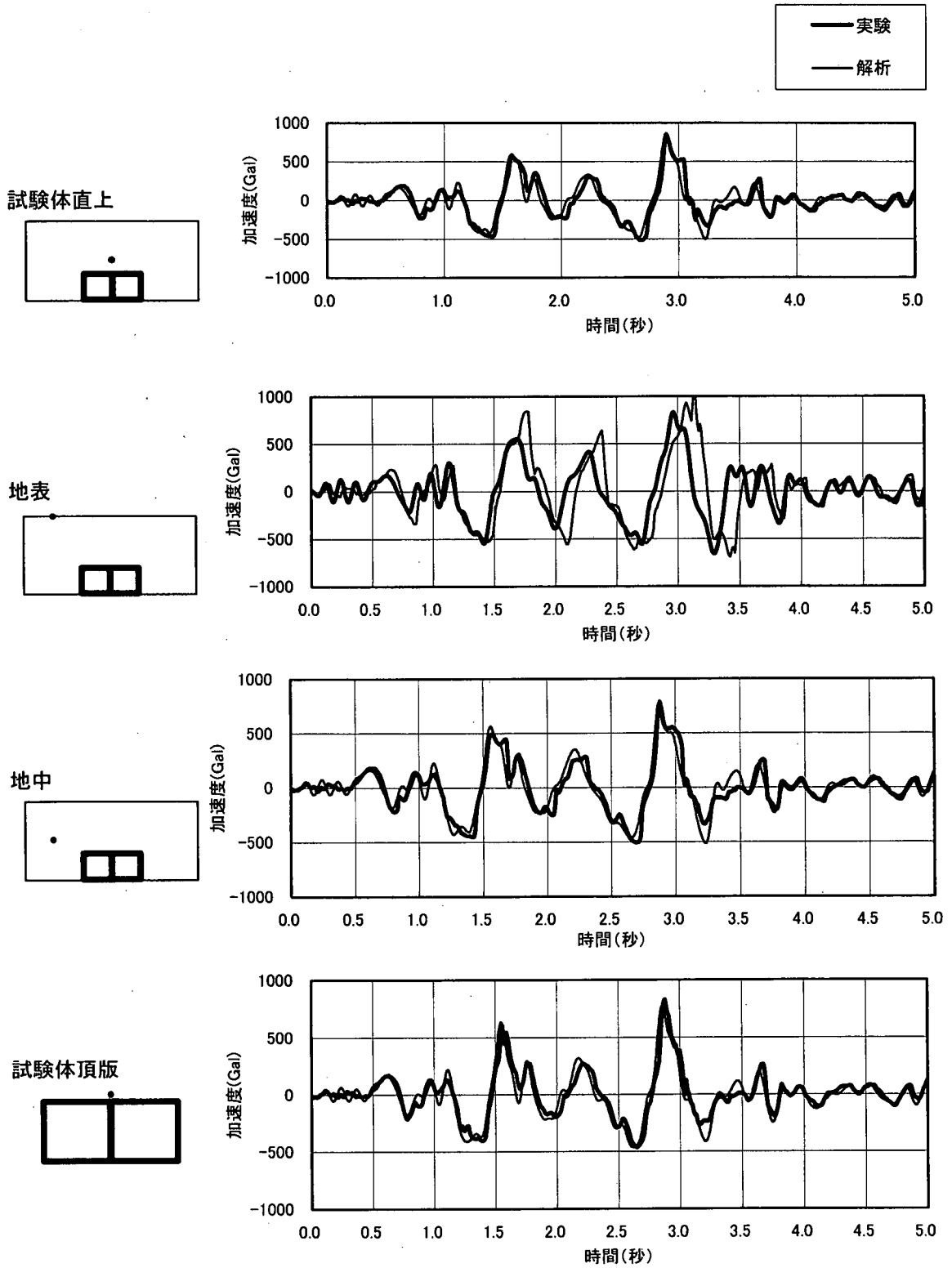


図 3.1-1 水平方向加速度時刻歴の比較 (岩着・1127Gal)

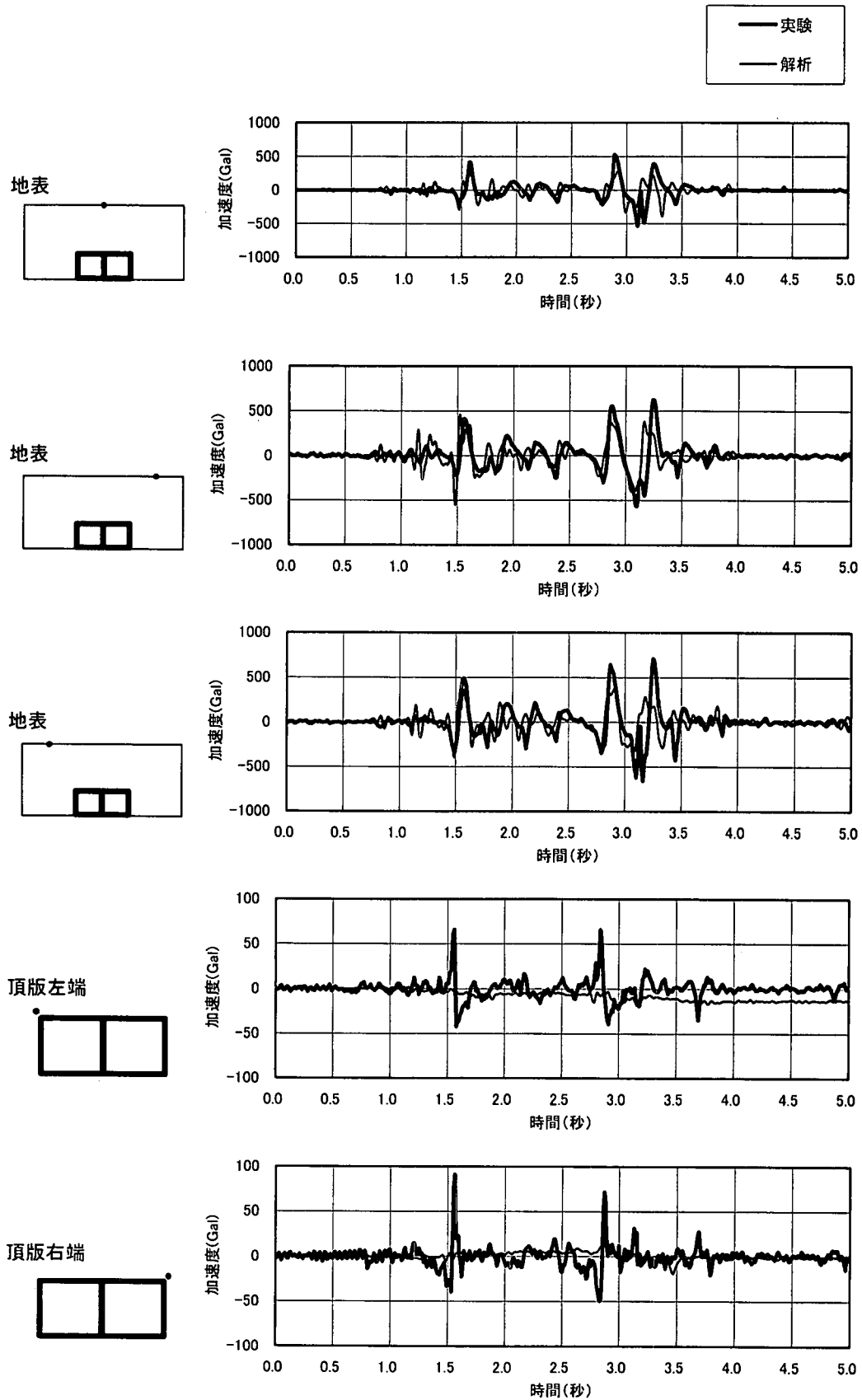


図 3.1-2 地表面、試験体頂版の鉛直方向加速度時刻歴の比較

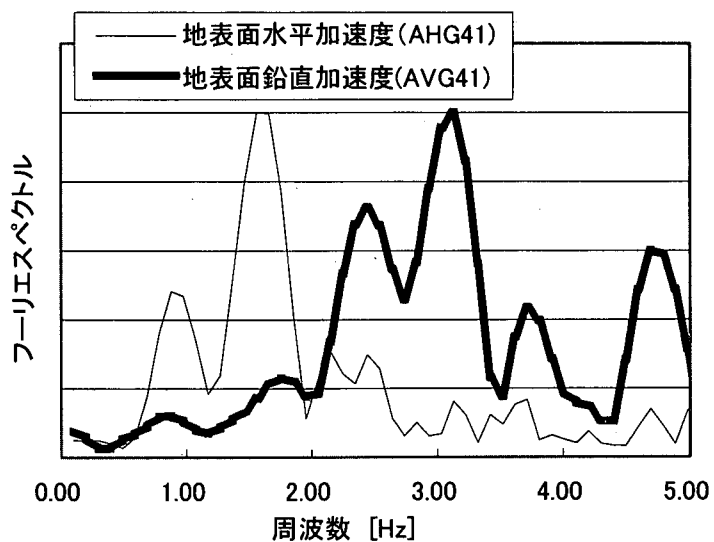


図 3.1-3 水平・鉛直加速度のフーリエスペクトル比較

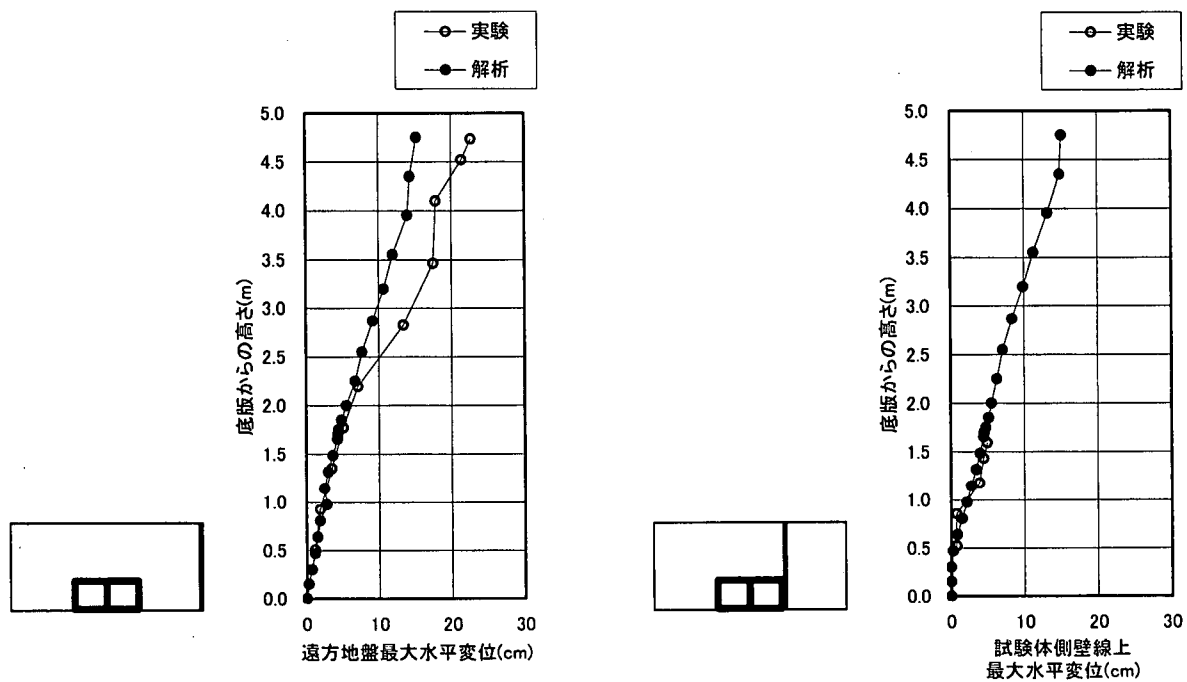


図 3.2-1 最大水平変位の深度分布の比較 (岩着・1127Gal)

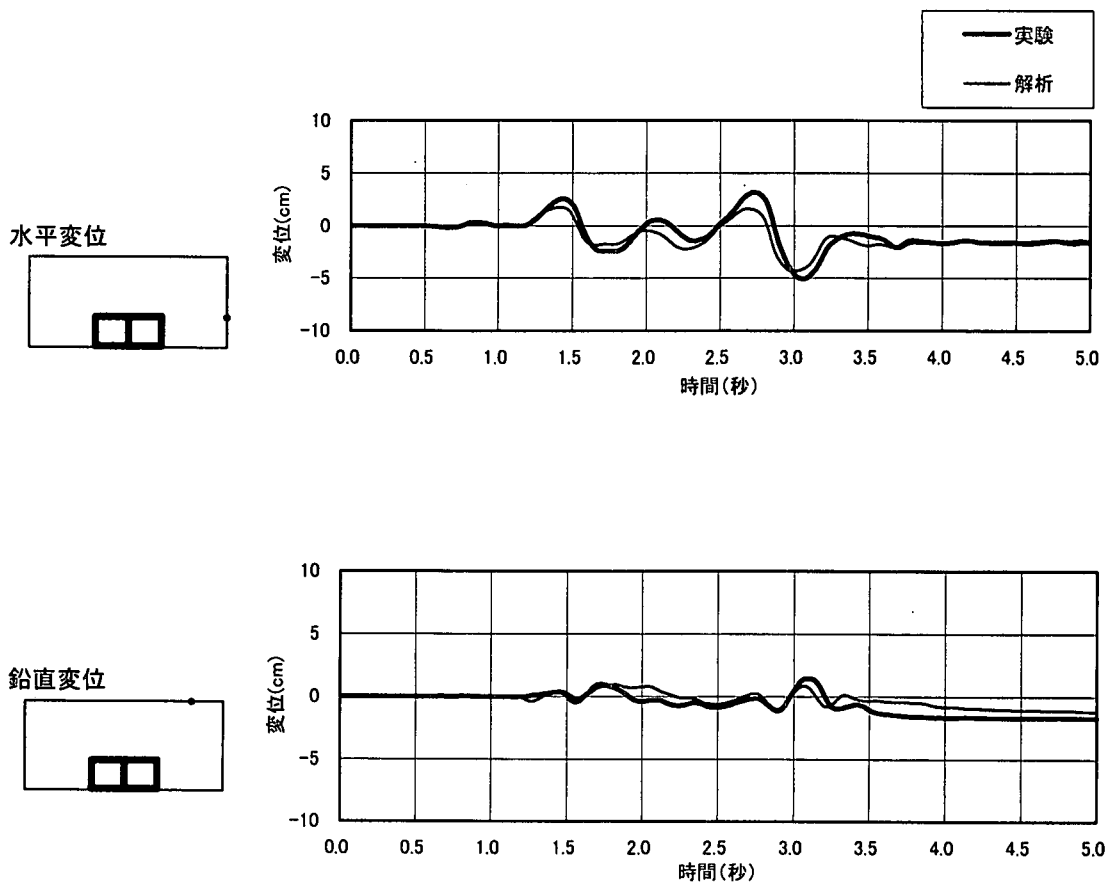


図 3.2-2 地盤の変位の時刻歴に関する比較 (岩着・1127Gal)

図3.2-3には、試験体頂部付近(DH11)における水平変位の時刻歴に関する実験と解析の比較を示している。変位計DH11は、試験体底版に固定点を持っているため、ここでの水平変位は層間変位とみなすことができる。正側すなわち右向きの変位については、解析値が実験値に比べてやや小さめの値となっているが、最も水平変位が大きく発生する時刻付近での値や残留変位量についてはほぼ一致している。図3.2-4には、試験体の最大および残留水平変位に関する実験と解析の比較を示している。最大値、残留値ともに、実験結果と解析結果はほぼ一致している。

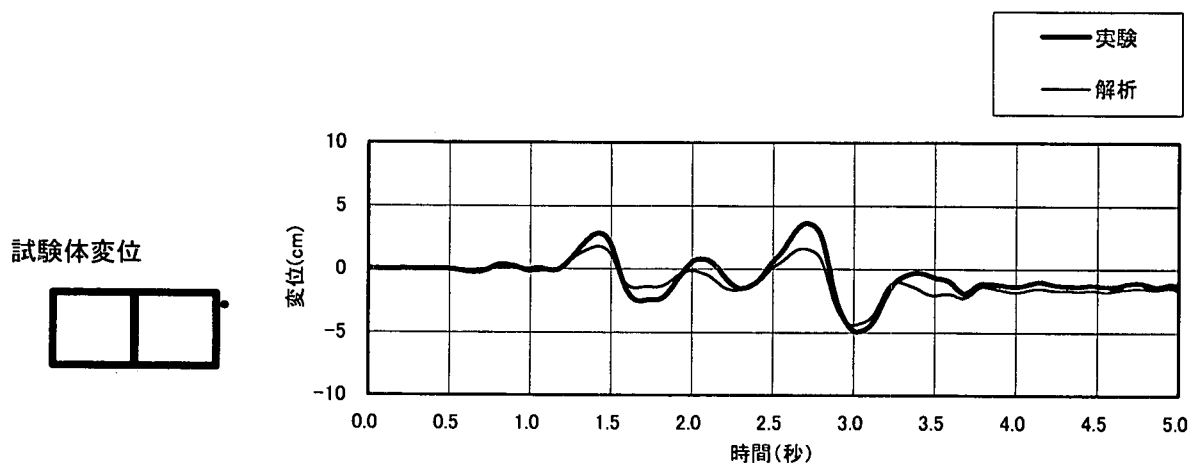


図 3.2-3 試験体側壁の水平変位の時刻歴に関する比較 (岩着・1127Gal)

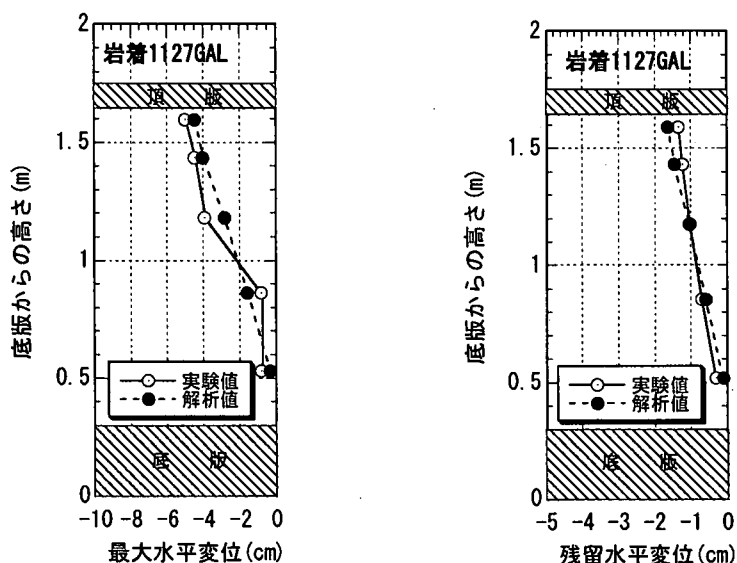


図 3.2-4 構造物の最大変位と残留変位の比較

3.3 動土圧

ここで検討したような地中構造物では、変形が小さい場合は、図3.3-1のように構造物と地盤の変形モードの相異から、動土圧は側壁の上部と下部とで圧縮と引張が逆になり、しかも、左右の側壁の圧縮と引張が反対となる。一方、変形が大きくなると、地盤のダイレイタンスーのために、図3.3-2のように左右の側壁とも圧縮側の動土圧が卓越する。図3.3-3には、変形の大小によって圧縮側・伸張側動土圧の位相特性の変化が最も顕著となる側壁上部の動土圧時刻歴を示している。図中の点線で囲った範囲は、構造系全体の变形方向から判断して、変形が小さい場合は伸張側の動土圧が発生すべき区間であるが、地盤のダイレイタンスーのため、実験において圧縮側の動土圧が計測された区間である。動土圧については、地盤と構造物の相互作用により作用する方向が変化するため、図3.3-3の時刻歴において必ずしも十分に再現されているとは言いが、点線で囲まれた区間については、概ね圧縮側の動土圧が再現されており、圧縮側とはなっていない右側側壁の3.0秒付近についても、少なくとも伸張側土圧が軽減する方向に変化している。したがって、解析によって概ね地盤のダイレイタンスーによる影響が再現されていると考えられる。また、図3.3-4は構造物の水平変位および右側側壁上部の動土圧のフーリエスペクトルを比較したものである。動土圧のスペクトルにおいて3.0Hz付近にピークが認められ、これによっても地盤のダイレイタンスーによる動土圧が確認された。

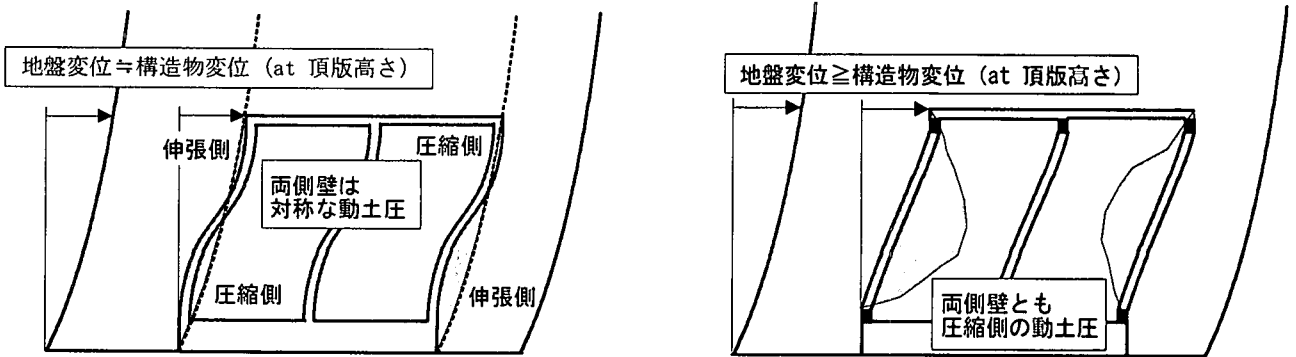


図 3.3-1 変形が小さい場合の側壁に作用する動土圧 図 3.3-2 変形が大きい場合の側壁に作用する動土圧

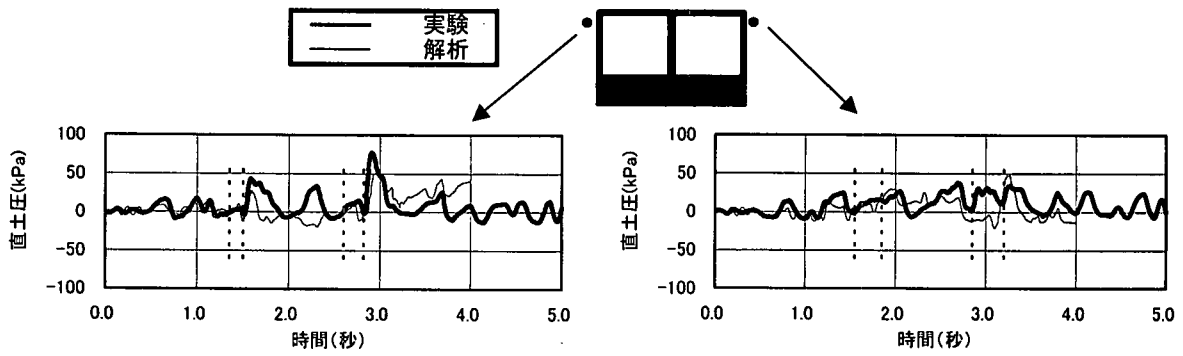


図 3.3-3 左右側壁に作用する動土圧

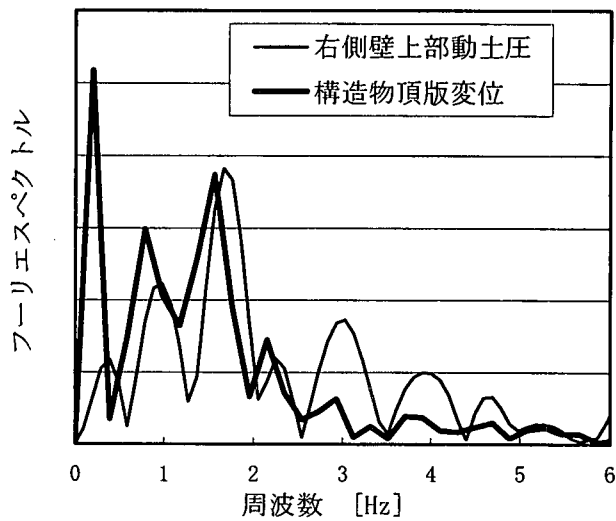


図 3.3-4 変位, 動土圧のフーリエスペクトル比較

3.4 構造物に作用する荷重

図3.4-1は、構造物に作用する荷重を、側壁、頂版などの各部材ごとに、底版に対するモーメントで解析結果を整理したものである。側壁に作用する土圧に関しては、初期の動土圧だけでなく初期の土圧も加算している。この図によると、頂版に作用する荷重が最も大きいこと、側壁に作用する土圧の動的な変動分は初期土圧と同程度であること、また、左右側壁に作用する土圧は、概ね互いにキャンセルする方向に作用することなどがわかる。その結果、図3.4-2に示すように、これらの荷重を総和した合モーメントと頂版に作用するモーメントとがほとんど等しく、構造系全体の变形は頂版に作用する荷重に支配されていることが、地盤のダイレイタンス特性を考慮した解析手法によっても確認された。

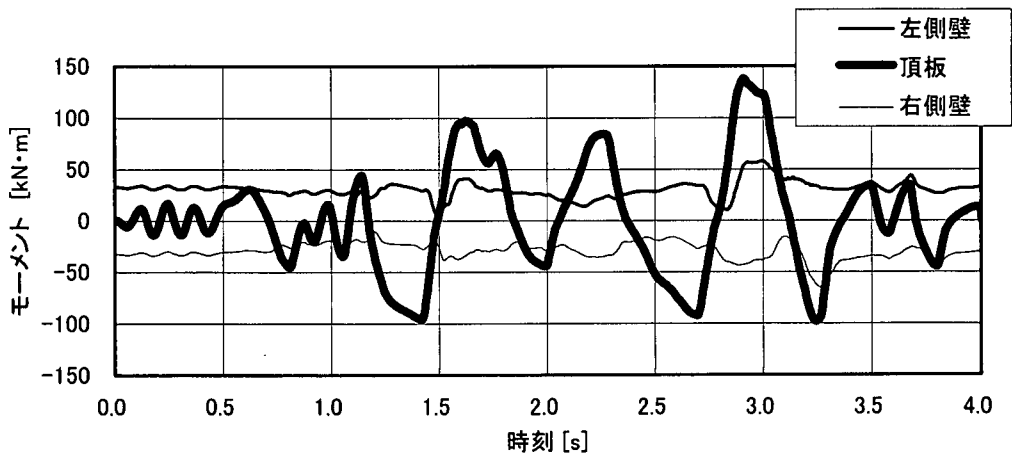


図 3.4-1 各部材に作用する荷重の底版に対するモーメント時刻歴

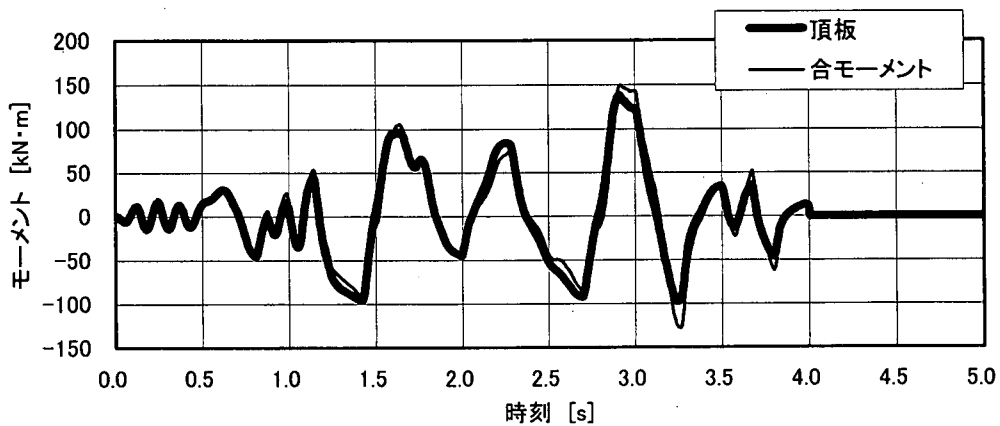


図 3.4-2 各部材に作用するモーメントの合力と頂版荷重によるモーメント

4. まとめ

地盤有効応力・構造物部材非線形モデルを用いた解析手法を適用し、地盤の鉛直加速度を含む応答加速度、地盤の沈下も含めた変形挙動、試験体に作用する動土圧の比較を中心に、大型振動台実験岩着モデルの数値シミュレーションを行った。結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 地盤の加速度応答については、概ね実験結果を再現していた。特に、鉛直加速度については、本解析のように地盤のダイレイタンシー特性を考慮することにより、良好に模擬できる可能性が高いことが示された。ただし、今回のように乾燥砂地盤で、上下動の入力を伴わない条件の場合には、地盤のダイレイタンシー特性を考慮しない場合の解析結果からも判るとおり、試験体の変形に及ぼす鉛直動の影響は小さいと判断される。
- 2) 地盤の変位については、地盤物性の評価が困難な低拘束圧領域である地表面付近において、実験による水平変位と解析による水平変位に差異が生じる結果となった。一方、地表面の沈下については、本解析手法により概ね良好に予測できることが示された。また、試験体の層間変位の最大値も実験と解析とではほぼ一致していた。
- 3) 試験体に作用する動土圧については、必ずしも十分な精度で再現されていたとはいえないが、少なくとも地盤のダイレイタンシーによる影響については評価が可能であった。また、そのような解析手法を用いた場合でも、構造系の変形を支配する荷重は頂版に作用する荷重であることが確認された。

〔(財)電力中央研究所 河井 正〕

【参考文献】

- 1) 金谷 守, 西 好一, 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, 1994.
- 2) 西 好一, 金谷 守: 地震時における基礎地盤の安定性評価(その5)-繰返し載荷時における非弾性構成式の提案と地震応答解析への適用-, 電中研研究報告 U87033, 1987.
- 3) Nishi, K. and Kanatani, M: Constitutive relations for sand under cyclic loading based on elasto-plasticity theory, Soils and Foundations, Vol. 30, No. 2, pp. 43-59, 1990.