

飽和地盤に埋設されたダクト構造物に作用する荷重について

河井 正¹・福本彦吉²

¹(財)電力中央研究所 地盤耐震部(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:t-kawai@criepi.denken.or.jp

²関西電力株式会社 土木建築室(〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22)

E-mail:K450247@kepc.co.jp

飽和地盤中に埋設された地中構造物の地震時挙動,特に頂版や側壁に作用する荷重の大きさやそれらと構造物変形との関係を把握するために,金属性の構造物を締った砂地盤に埋設した1G場の振動台実験を実施した。その結果,地中構造物の変形および作用する荷重は,負の過剰間隙水圧が最大となる時刻に最大となり,変形は主に頂版に作用する荷重によって生じていること,側壁に作用する荷重の合力は構造物の剛性によって変形を増大する方向または抑制する方向に作用することなどを把握した。また,負の過剰間隙水圧の影響によって,作用する荷重の大きさは初期の土被り圧と内部摩擦角から想定される荷重よりも大きくなっていった。

Key Words : Saturated sand, shaking table tests, box culvert, negative excess pore pressure, top slab

1. はじめに

地中構造物の性能照査型耐震設計を実施するためには,地震時の地盤・構造物の変形量を予測することが重要となる¹⁾。そのため,これまでに乾燥砂地盤に埋設されたほぼ実大のRCダクト構造物に関する振動台実験²⁾およびその結果を対象としたFEM解析などが実施され,構造物の変形量予測手法の精度や地盤から構造物に作用する荷重などについて明らかにされている。特に構造物に作用する荷重については,乾燥した砂地盤に埋設された構造物の場合,変形が大きくなると,地盤のダイレイタンスにより構造物両側の地盤が膨張し,変形方向に関係なく側壁には圧縮動土圧が作用すること,また側壁に作用する荷重は局所的な部材の変形には影響するが,構造系全体のせん断変形は主に頂版に作用する荷重によって生じていたことなどが確認されている²⁾。一方,飽和地盤に埋設された構造物の地震時挙動については,円筒型の構造物を用いた遠心力載荷模型実験³⁾や箱型の構造物を用いた振動台実験⁴⁾などが実施されており,振動台実験では地盤の挙動を詳細に分析した結果,比較的締まった地盤において変形が大きくなると,負の過剰間隙水圧の影響によって構造物の変形を抑制する動土圧が作用していることが確認された⁵⁾。しかしながら,これらはいずれも上載土の存在しない地中構造物に関する実験であり,上載土が存在する場合の飽和地盤中の構造物の

挙動については十分解明されていないものと思われる。そこで本研究では,飽和地盤に埋設され,高さと同程度の上載土が存在するダクト構造物を対象として,地盤変位と構造物変位の関係,構造物の変形に寄与する地盤からの荷重とその大きさ,最大荷重の発生時刻と負の過剰間隙水圧の関係などを把握することを目的とした,1G場小型振動台実験を実施した。

2. 実験条件

振動台実験は,加振方向長さ 120cm,高さ 100cm,奥行き 90cm のせん断土槽の底部に,高さ 48cm,幅 40cm の金属製構造物を固定し,土被り厚さ約 50cm の条件で実施した。図-1 には実験模型の概要および計測器の配置を示す。地盤は珪砂 5 号(G_s : 2.676, e_{max} : 1.076, e_{min} : 0.711, D_{50} : 0.3mm)を用い水中落下法で作製した地盤を,相対密度約 90%に締固めた。

地盤から構造物に作用する荷重を詳細に計測するため,コアとなるヒンジで結合した 4 枚(頂・底版,側壁)の金属板と,摩擦係数を調整するために金属の型枠とモルタルで作製した荷重受版との間に,法線方向と接線方向の荷重を計測できるロードセルを設置した。構造物内部に水が浸入しないようにモルタル部を除き構造物表面はすべてゴムで覆っている。

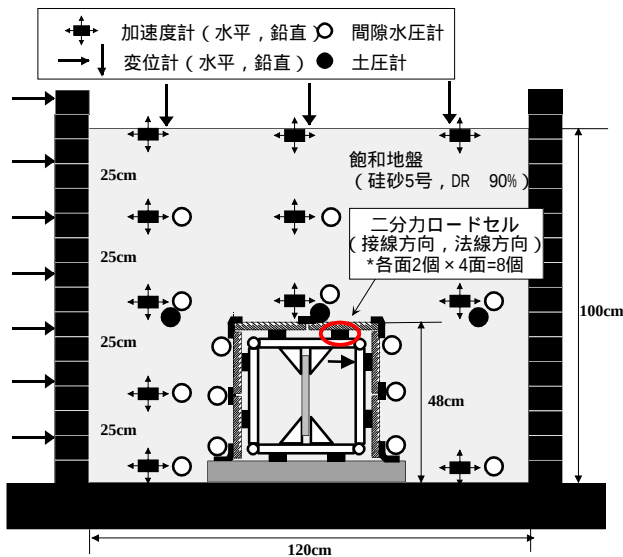


図-1 実験模型の概要と計測器配置

表-1 各ケースの実験条件

ケース名		case-A	case-B	case-C
壁厚さ	mm	2.3	4.5	12.0
地盤相対密度	%	84	89	90

構造物のせん断に対する変形抵抗は、金属製の中壁で支持するものとし、ここでは、奥行き100mm、スパン120mmは共通とし、厚さを2.3mm、4.5mm、12mmと変えた3種類の剛性の構造物を使用した。各ケースで用いた壁の厚さと地盤の相対密度の一覧を表-1に示す。また構造物の見かけの剛性と中空ねじり試験で求めた珪砂5号のせん断剛性との関係を図-2に示す。構造物の見かけの剛性は、構造物のみを用いた水平載荷試験によって求めており、水平荷重を頂版面積で除した見かけのせん断応力と頂版変位を構造物高さで除した見かけのせん断ひずみとの比を表す。一般に地盤のせん断剛性は拘束圧に依存するが、図-2に示す $\sigma_m' = 10\text{kPa}$ は、模型地盤の底部付

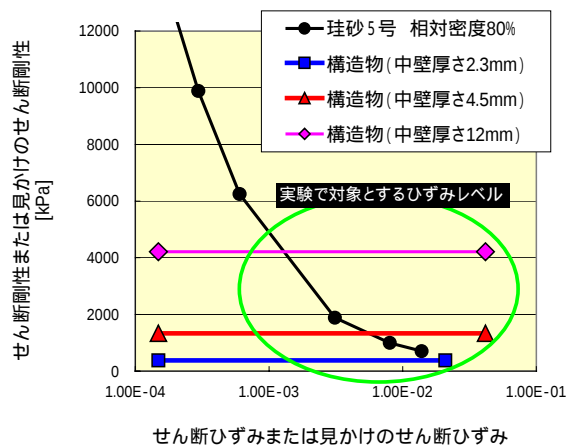


図-2 地盤と構造物の剛性関係

近の有効拘束圧に相当する。地盤と構造物の剛性関係は、今回の実験で対象としている比較的大きなひずみ領域では、壁厚さ2.3mmの場合に構造物剛性は地盤剛性よりも常に小さく、逆に壁厚さ12mmの場合は構造物の剛性は地盤のそれよりも常に大きくなっている。壁厚さ4.5mmの場合は、過剰間隙水圧の蓄積が顕著になる、せん断ひずみが $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ の間で、相対剛性が逆転する。

加振実験では、図-3に示す正弦波の振幅や周波数を変えて、一つの模型に対して複数の加振を実施した。いくつかの加振では、水平加速度のみならず鉛直加速度も入力したが、その場合は図-3の下図に示すように、鉛直入力の位相は水平入力に対して1/4波遅らせた。

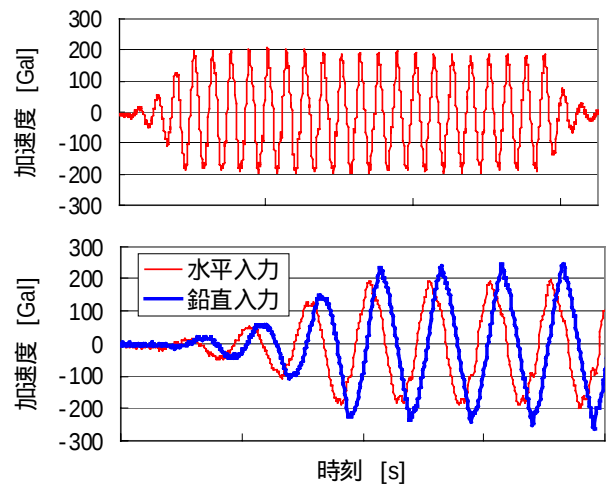


図-3 加振に用いた波形

3. 地盤と構造物の変位

図-4に地盤と構造物の最大水平変位の関係を示す。地盤の変位は土槽枠に設置した変位計によって計測し、図には構造物の頂版高さの結果を示している。構造物の変位は構造物内空で変位を計測し、側壁は変形しないため、線形的に外挿し頂版位置での変位を示している。また横軸は加振番号であり、加振番号が大きくなるほど加振履歴の影響を受けていることになる。加振実験は、大きな地盤変形を生じさせることを目的とし、実構造物との相似則は考慮せず、比較的小さな周波数を中心に実施している。その具体的な構成は、最大加速度20GalのWhiteNoise加振[加振1、図-4に含まず]、100Gal以下(1Hz)の小加振、履歴の影響がほとんど無い状態での約400Gal(1Hz)の大加振、周波数が相互作用に与える影響を確認するための振幅約200Gal周波数1~8Hzの水平加振、鉛直加速度の影響を確認するために鉛直入力を加えた加振、加速度振幅最大の加振(2Hz)である。各加振の加振周波数と加速度振幅を図中に示す。

各実験の結果を比較すると、構造物の影響により、構造物の剛性が大きくなるほど地盤変位そのものが

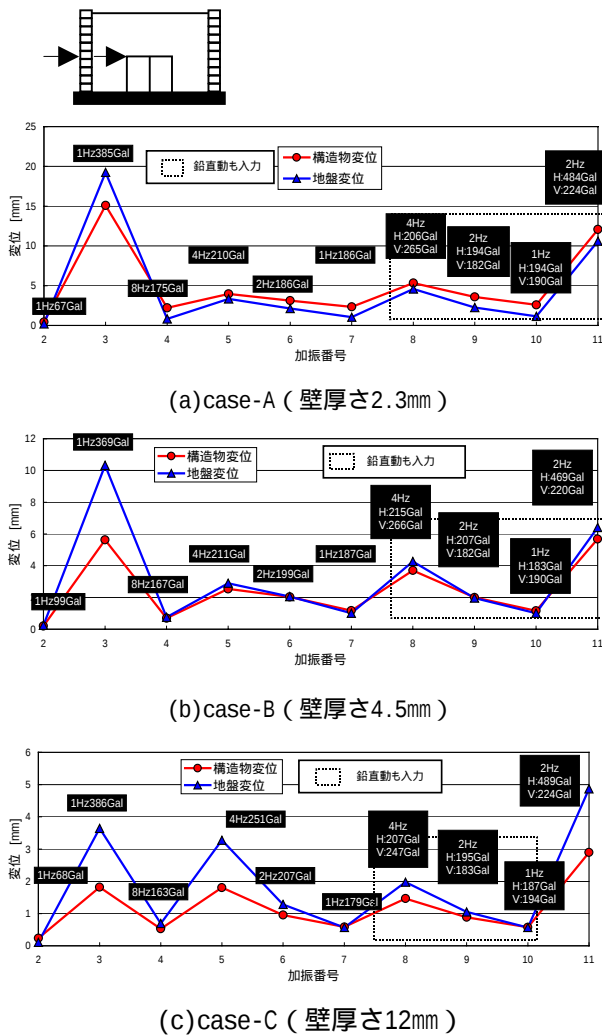


図-4 地盤と構造物の最大水平変位の関係

小さくなっている．すなわち，構造物が剛になるほど構造物応答の影響を受ける範囲が拡大する．したがって，本実験では変位の絶対値の議論はあまり意味が無いと思われるため，相対的な比較に留める．

各実験の加振3については，履歴の無い状態での加振であり，しかも地盤変形が大きく剛性が著しく低下していることから，最も剛性の小さな構造物を用いたcase-Aにおいても，構造物変位は地盤変位より小さくなっている．それに対して，履歴の影響をより多く受けており，地盤変位が比較的小さな加振4以降では，構造物の剛性によって構造物変位と地盤変位の関係がことなっている．すなわち，構造物の剛性が最も小さいcase-Aでは，構造物変位は地盤変位よりも若干大きくなり，構造物の剛性が最も大きいcase-Cでは地盤変位よりも小さくなっている．中間の剛性のcase-Bでは，構造物と地盤の最大水平変位はほぼ同程度である．case-Cでは，加振4,6,7,9,10で生じた地盤変位は約1mmと小さく，これはせん断ひずみ 2×10^{-3} 程度に相当するため，構造物と地盤の剛性がほぼ等しく，加振周波数によらず構造物と地盤の変位はほぼ等しい．したがって，発

生したせん断ひずみレベルを考慮した相対剛性によって，地盤と構造物の相互作用が整理可能になるものと思われる．

水平動に加えて鉛直動も入力した加振（加振8～10）とほぼ同程度の水平動のみを入力した加振（加振5～7）の結果を比較すると，case-A，case-Bの4Hzの結果において，鉛直動を入力した場合の地盤変位は，水平動のみを入力した場合のそれと比較して若干大きくなっている．その一方で，他の周波数で加振した場合は，鉛直動の有無に係らずほぼ同程度の最大変位を示している．しかも，各ケースの水平動のみを入力した1～8Hzの加振結果の大小関係から，約200Galの入力によって地盤剛性が低下した場合のモデルの固有周波数は4Hz程度であることが伺われる．したがって，4Hzの加振で鉛直動を入力した方が大きな変位となった理由は，鉛直動の影響というよりも，加振周波数4Hzがこの入力レベルでのモデルの固有周波数に近く，他の加振周波数よりも加振履歴による地盤剛性の変化の影響を受けやすかったためと考えられる．

4．構造物の各部材に作用する荷重について

本実験では，構造物の底部を土槽底部に固定しているため，頂版や側壁に作用する荷重が構造物の変形に与える影響を検討する際は，水平荷重（頂版：接線方向，側壁：法線方向）に計測高さを乗じて得られた転倒モーメントで整理した．図-5には構造物頂版の変位と各部材に作用するモーメントの総和との関係を示している．構造物の応答が弾性範囲であり，両者がほぼ線形関係にあることから，転倒モーメントが構造物の変形と各部材に作用する荷重を関係付ける適切な指標であることが伺われる．

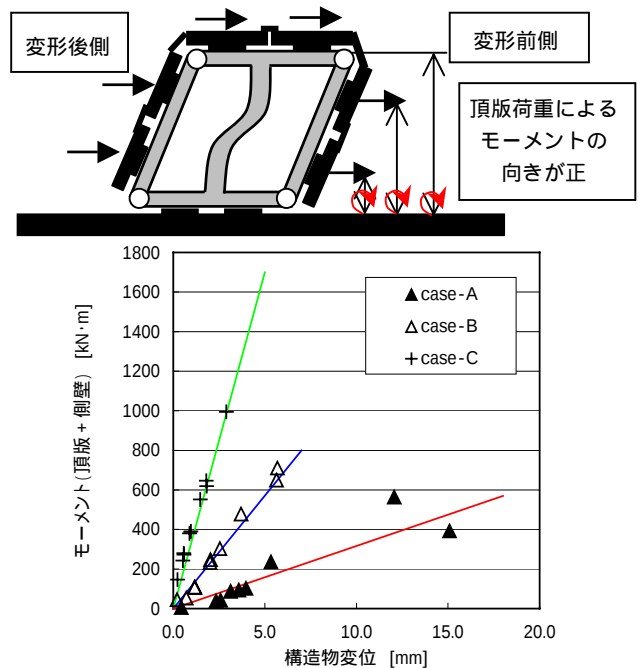


図-5 構造物変位とモーメントの関係

図-6には構造物の変形が最大となる時刻について、各部材に作用する水平荷重によるモーメントを比較している。側壁に関してはアーム長が異なるため、上下の受圧板ごとに結果を示している。またこれらには、初期応力も含まれている。図中の“合モーメント”は頂版と側壁各部のモーメントの総和であり、図-5の縦軸と等しい。合モーメントと頂版のモーメントとの差は、側壁に作用するものの合力(モーメント)となる。

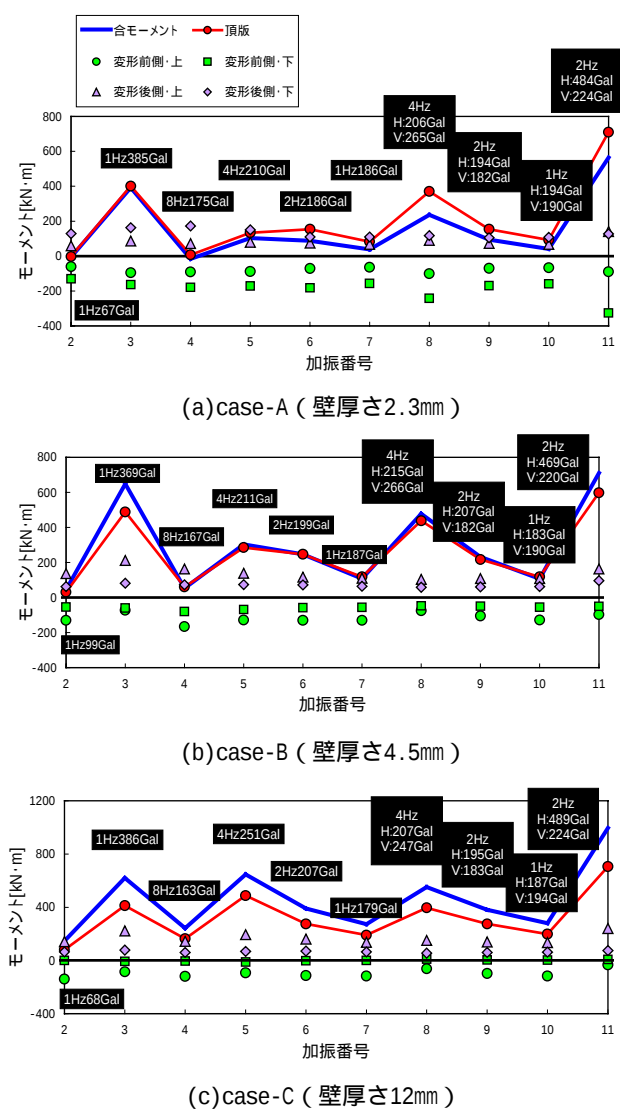


図-6 各部材に作用するモーメントの比較

図-6を見ると、構造物の剛性が相対的に小さなcase-Aでは、頂版のモーメントは合モーメントより大きく、構造物の変形が最大となる時刻では、側壁には変形を抑制する方向に荷重が作用していることになる。その逆に、構造物の剛性が相対的に大きなcase-Cでは、頂版のモーメントは合モーメントよりも小さく、側壁には変形を増大する方向に荷重が作用している。ただし、中間の剛性のcase-Bも含め、

頂版のモーメントは側壁に作用するモーメントの総和よりも大きく、構造物の変形に対しては、頂版に作用する荷重の影響が最も大きいことになる。

図-7には、頂版のモーメントと側壁に作用するモーメントの総和との比を示しているが、構造物の変形を抑制する場合(負側)または増大する場合(正側)のいずれにおいても、今回の実験の範囲ではその比は最大で0.5程度に留まっている。なお、case-Aおよびcase-Bの結果については、変形が大きくなり地盤剛性が低下するほど構造物は相対的に剛となるため、構造物変位とモーメント比の関係は右上がりの傾向になっている。

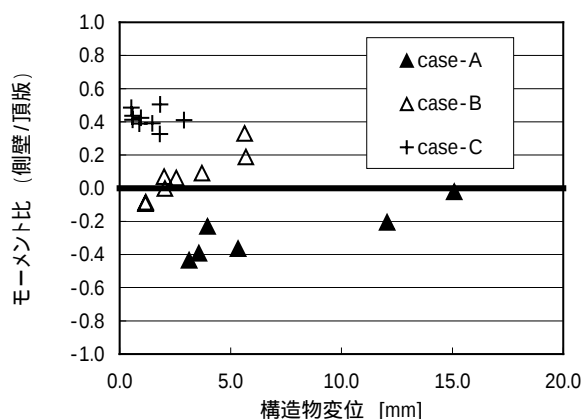


図-7 頂版と側壁に作用するモーメントの比

5. 負の過剰間隙水圧と構造物に作用する荷重の最大値について

土被りの無い矩形構造物に関する既往の実験⁴⁾では、側壁に作用する土圧合力の最大値の発生時刻は、負の過剰間隙水圧の最大値のそれと一致していた。ここでは、土被りがある場合の構造物に作用する各種荷重と過剰間隙水圧との位相関係について検討する。図-8は、各ケースの加振11(加速度振幅最大)について、地盤および構造物の変位、頂版や側壁に作用する荷重、過剰間隙水圧、鉛直加速度などの時刻歴を示している。加振11では、加振の後半になるほど地盤および構造物の変位が大きくなっており、位相関係だけでなく荷重の大きさを確認するため、加振終了直前の10~12秒について表示した。

図よりまず、いずれのケースについても地盤と構造物の変位はほとんど同位相で生じていることが確認できる。負の過剰間隙水圧は地盤のダイレイタンスによって生じるため、地盤変位が最大となる時刻と負の過剰間隙水圧が最大となる時刻は一致し、したがって、負の過剰間隙水圧が最大となる時刻と構造物の変形が最大となる時刻もほぼ一致している。さらに、4における検討の結果、飽和地盤に埋設された構造物についても、その変形は主に頂版に作用する荷重によって生じていることが判明したが、ここで頂版に作用する水平荷重の位相について確認す

ると、やはり構造物の変形が最大となる時刻に頂版に作用する荷重も最大となっており、これも負の過剰間隙水圧が最大となる時刻に一致する。

頂版に作用する水平荷重の時刻歴には、併せて初期の全土被り圧に対して、応力比（水平/鉛直）が1.0となるまで（内部摩擦角45度、中空ねじり試験で得られた珪砂5号の内部摩擦角も同程度）載荷可能であると考えた場合の水平荷重も示している。この図を見ると、構造物の剛性が大きいcase-B、case-Cのケースでは、初期全土被り圧から想定される水平荷重よりも大きな値に達している。これは図-9に示すように、鉛直土被り圧そのものが初期の値よりも増大しており、しかも負の過剰間隙水圧の発生に伴って、鉛直有効応力が初期の全土被り圧以上になるためである。

ここで、全土被り圧が増大するのは上載土に鉛直加速度が作用するためであるが、構造物上方地盤中の鉛直加速度記録と土槽底部でのそれとは波形が異なる。構造物上方地盤中の鉛直加速度記録には、負の過剰間隙水圧の発生と対応して、入力よりも高周波数の成分が生じている。

図-10には、case-Bの加振5(水平動のみ入力)と加振8(水平動+鉛直動入力)の土槽底部と構造物上方地盤中の鉛直加速度応答を示している。鉛直動を入力していない(a)においても、構造物上方地盤中では最大400Gal程度のパルス的な鉛直加速度を生じており、別途確認したところ、パルス的な鉛直加速度の発生と負の過剰間隙水圧が最大となるタイミングは一致していた。したがって、全応力的な構造物の上載荷重は、鉛直入力の有無によらず、負の過剰間隙水圧の発生により増大し得る可能性を示している。

なお、図-8において、両側壁に作用する荷重は、構造物と地盤の相対的な剛性によって異なる挙動を示し、構造物が相対的に剛になるほど両側壁に作用する荷重に位相差が生じ、側壁に作用する荷重の合力としては大きな振幅となる。ただし、いずれの場合も側壁に作用する土圧合力がピークとなる時刻と負の過剰間隙水圧が最大となる時刻は対応している。

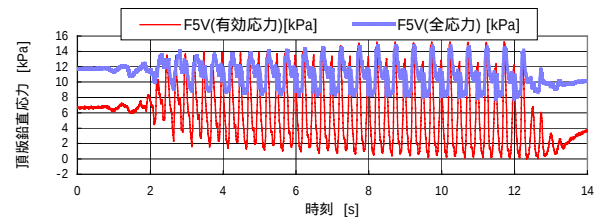
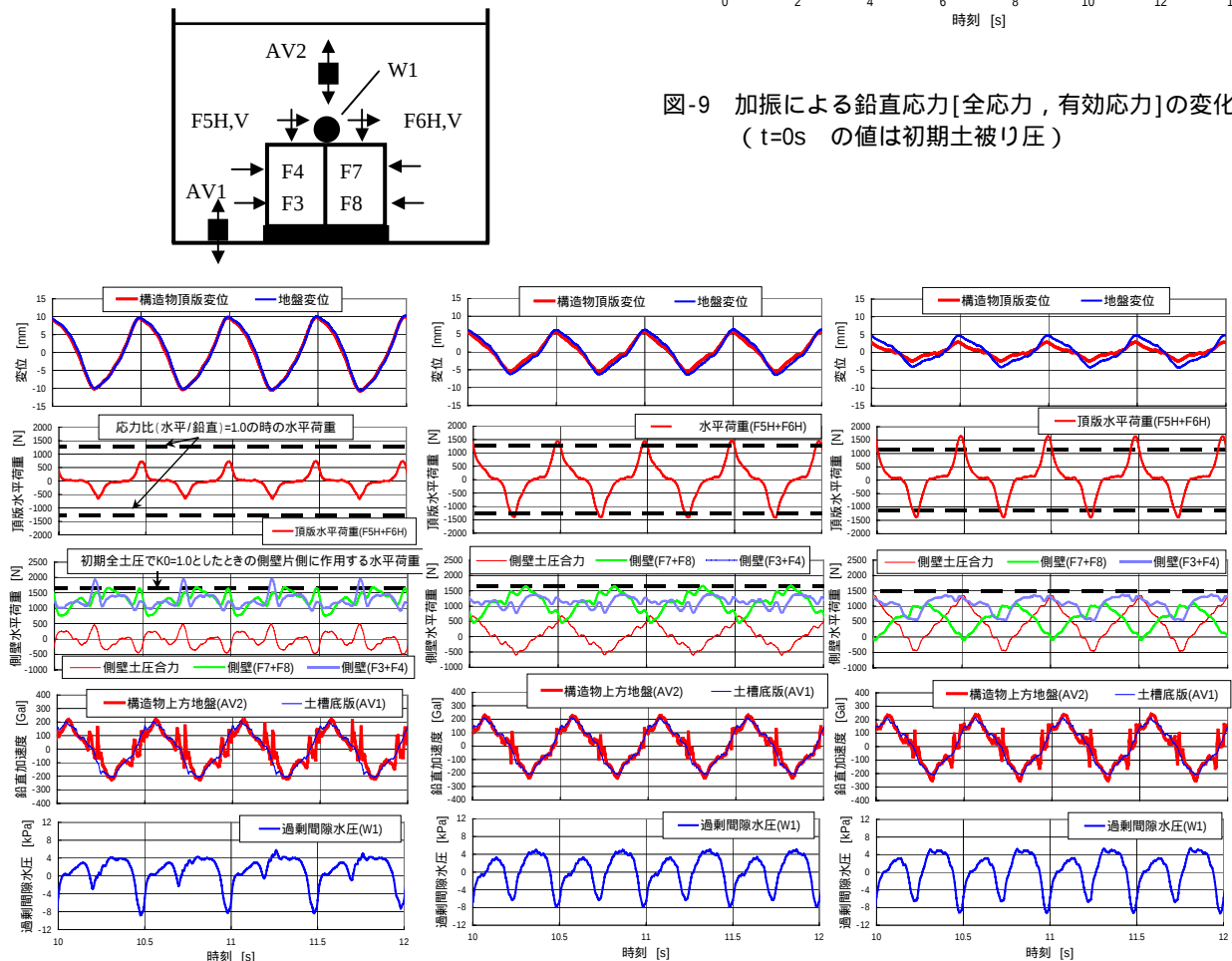


図-9 加振による鉛直応力[全応力, 有効応力]の変化 (t=0s の値は初期土被り圧)

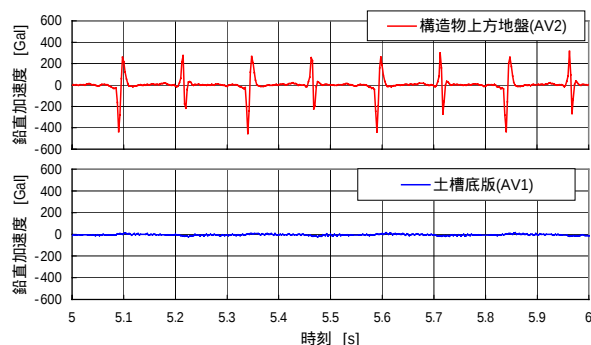


(a)case-A (壁厚さ 2.3mm)

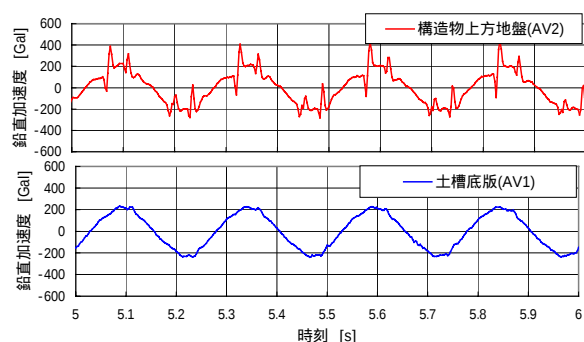
(b)case-B (壁厚さ 4.5mm)

(c)case-C (壁厚さ 12mm)

図-8 各ケースにおける構造物に作用する荷重と過剰間隙水圧との関係



(a)鉛直加速度を入力しないケース：加振5



(b)鉛直加速度を入力するケース：加振8

図-10 鉛直加速入力の有無による構造物上方地盤の鉛直加速度応答の比較

6. まとめ

飽和地盤中に埋設された地中構造物の地震時挙動、特に頂版や側壁に作用する荷重の大きさやそれらと構造物変形との関係を把握するために、金属性の構造物を締った砂地盤に埋設した1G場の振動台実験を実施し、下記の知見を得た。

- ・飽和地盤中に埋設された構造物についても、その地震時変形は主に頂版に作用する荷重によって生じる
- ・側壁に作用する荷重の合力は構造物の剛性によって変形を増大する方向または抑制する方向

に作用する

- ・地中構造物の変形および作用する荷重は、負の過剰間隙水圧が最大となる時刻に最大となる
- ・負の過剰間隙水圧の影響によって、作用する荷重の大きさは初期の土被り圧と内部摩擦角から想定される荷重よりも大きくなるが、これは構造物上方地盤の鉛直加速度応答により全応力的な構造物の上載荷重が増大するためである
- ・鉛直動入力の有無によらず、負の過剰間隙水圧の発生に関係して構造物上方地盤中に鉛直加速度が生じ、波形は著しく異なるものの、今回の実験条件では振幅は同程度であった。

謝辞：本研究は電力9社と日本原子力発電（株）による電力共通研究の一部として実施した。研究の実施にあたって、指導・助言いただいた関係各位に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針，2002.
- 2) 大友敬三，末広俊夫，河井正，金谷賢生：強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究，土木学会論文集，No.724/I-62，pp.157-175,2003.
- 3) T.Matsuda, K.Sato & Y.Goto:Behavior of a cylindrical earth retaining wall in liquefiable sand layer, *Centrifuge 98*, Balkema, pp. 295-300, 1998.
- 4) 溜幸生，東畑郁生，高橋誠：液状化地盤と地下構造物の動的相互作用に関する一考察，土木学会第56回年次学術講演会，III-A102，pp.204-205，2001.
- 5) Y.Tamari & I.Towhata: Seismic soil-structure interaction of cross sections of flexible underground structures subjected to soil liquefaction, *Soils & Foundations*, Vol.43, No.2,pp.69-87, 2003.

(2003.7.2 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE FORCE ACTING AROUND BOX CULVERT STRUCTURES BURIED IN THE SATURATED SAND

T.Kawai, H.Fukumoto

In order to obtain the basic knowledge about the deformation mechanisms of box culvert structures buried in the saturated sand during an earthquake, a series of 1G shaking table tests were conducted using metal structures, on which two-way load cells were fixed on the each side walls and the upper slab to measure the acting force separately. It was observed that the shear force on the upper slab plays the predominant role on structural deformation. Moreover, because of the negative excess pore pressure generation, the shear force could become higher than the force estimated by the initial vertical total stress and the friction angle of the sand.