

飽和地盤に埋設されたダクト構造物に関する 遠心模型実験

河井正1・堀江正人2

¹(財)電力中央研究所 地震工学領域(〒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)土木建築室原子力土木建築グループ (〒530-8270 大阪市北区中之島3-6-16) E-mail:horie.masato@d3.kepco.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,金属製の構造物を締まった砂地盤に埋設した遠心力載荷模型実験を実施した.その結果,側壁や頂版に作用する水平荷重(単位面積)は,当該深度での初期鉛直全土圧よりも大きくなること,構造物底版が土槽底版に固定されている場合,各部材に作用する荷重を底版に対するモーメントに換算することで,構造物に作用する各種荷重がその変形に寄与する割合を把握できることなどを確認した.さらに,過剰間隙水圧の蓄積に伴って構造物の変形に寄与する荷重の分担は変化するが,分担率の変化が構造物/地盤の変形比率に与える影響はあまり大きくないことが判明した.

Key Words : Centrifuge, Saturated sand, Under ground structure, Excess pore water pressure

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.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,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 用することなどが確認された5).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については,金属製の構造物 を用いた1G場振動台実験⁶⁾が実施されているもの の,実大構造物の挙動については十分解明されてい ない.そこで本研究では, 飽和地盤に埋設され,構 造物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 物各部に作用する荷重の大きさ、それらの荷重の構 造物の変形に寄与する割合を把握するために,遠心 場において模型振動台実験を実施した.

2. 実験条件

遠心力載荷模型実験では,加振方向長さ 2.0m× 高さ 0.6m×奥行き 0.8m のせん断土槽に図-1 に示す 模型を作製し,遠心加速度 30G 場において加振実験 を行った.地盤は,硅砂 5 号(比重:2.676,最大 間隙比:1.076,最小間隙比:0.711,平均粒径: 0.3mm)を用い空中落下法で相対密度約 90%の地盤 を作成した後,せん断土槽ごと脱気槽に設置した状 態で,間隙流体として水の 30 倍の粘性を有するシ リコンオイルを用いて飽和させた.表-1 には実施 した実験ケースを示す.CASE1 と CASE2 とでは地盤 の作製条件は同じであるが,構造物の剛性が異なる.

金属製の構造物模型は,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 結合した金属板と摩擦係数を調整した荷重受版との 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.また構造物内部に水が浸入しな いように構造物間や荷重受版間はゴムで覆った.構 造物の変形抵抗は中央の金属製の柱が負担し,柱の 厚さで構造物の見かけの剛性を変えた.CASE1 では 地盤の初期剛性よりも約1.3 倍剛な構造物を使用し, CASE2 では地盤の初期剛性よりも剛性は小さい(約 1/15)ものの,せん断ひずみが5×10⁻³程度になる と周囲の地盤よりも相対的に剛になる構造物を使用 している.構造物の概要を図-2 に示す.



図-1 実験模型の概要

表-1 実験ケース一覧

	構造物	地盤相対密度
CASE1	金属(剛)	90%
CASE2	金属(柔)	90%



図-2 構造物模型断面図

加振実験は,振幅を順に大きくした地震波による 段階加振(5 段階)を実施した後,振幅・加振周波 数を加振装置の限界に応じて調整した正弦波形によ る大加振を実施した.地震波加振では,実物換算で 最大水平加速度 20~800Galの加振を行い,正弦波 加振では,0.8~2.5Hzの加振周波数で,300~ 600Galの振幅の加振を行った.入力波形の一例を 図-3に示す.

なお,以下では特に断りの無い限り,物理量はす べて遠心場の相似則を適用した実物換算値で示して いる.

3.実験結果

(1) 変形量について

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 とが重要であるが,その場合の変形量として,構造 物の頂・底版間の層間変位が特に重要となる¹⁾.こ こでは,まず各加振実験で得られた構造物の最大層



間変位ならびに構造物の頂・底版間に相当する位置 での地盤の相対水平変位を,入力加速度の最大値に 対して整理した.

図-4 には,まず CASE1, CASE2 の地震波加振の結 果を示している.剛性の相異により構造物の変形は CASE1 と CASE2 とで大きく異なっているものの,地 盤変位については,同じ入力レベルであれば同程度 の変位となっており,この結果から変形量の評価に 関して構造物側方の地盤領域は十分であり,土槽位 置での変位を自由地盤の変位と考えて差し支えない ことが伺える.構造物の変形量は,CASE1 では,い ずれの加振によってもほとんど変形せず,計測誤差 程度の変形量であった.CASE2 では,600Gal 程度の 加振までは地盤変位とほぼ同程度の変形となってい るが,構造物設置位置での地盤の平均せん断ひずみ が 1%を超える最大加振では,地盤と構造物の相対 剛性が逆転することと対応して,構造物の層間変位 は地盤変位の約 3/5 となっている.

図-5 に示す正弦波加振による結果では,地震波 加振の場合と同様に CASE1 の構造物はほとんど変形 せず, CASE2 については,加振9[0.8Hz]を除き, 当該深度の地盤より小さな構造物変形となっている. 加振9については,地盤と構造物の変形量は一致し ている.



地盤変位のみに着目すると,入力加速度振幅が小 さいにも拘わらず,加振8[1.2Hz]の変位は加振7 [1.6Hz]や加振9[0.8Hz]よりも大きくなっており, この変形レベルでの地盤応答の卓越周波数が1.2Hz 付近であることがわかる.なお別途実施した構造物 単体加振における CASE2 構造物の卓越周波数は 1.6Hz であり,地盤応答の卓越周波数より若干大き な周波数であった.

(2) 荷重の最大値について

構造物に作用する荷重は,側壁および頂版の各面 を3分割し,それぞれに作用する法線・接線方向荷 重を2分カロードセルで計測している.図-6では, それらの荷重(単位面積)を作用位置での初期鉛直 土被り圧(全土圧)で除した荷重比に換算し,地盤 変位量に対して整理した結果を示している.

地盤のせん断強度による限界が存在するためか,

頂版に作用するせん断力は概ね初期鉛直土被り圧よ りも小さな値となっているが,一部のケースで初期 鉛直土被り圧より大きな値となっている.

側壁に作用する土圧については,荷重比で整理した場合,側壁上部ほど地盤と構造物の相対変位の影響を受けて大きな荷重比となっており,一般に剛性の大きな CASE1 の方が,より相対変位が大きくなるため,荷重比も大きくなっている.なお,CASE1 においては,加振8の途中でメンプレンが破れて構造物の内部に水が流入したため,荷重を計測できた加振6,加振7の結果のみを示している.

16 場の実験においては,地盤のダイレイタンシーによる負の過剰間隙水圧によって有効応力が初期 鉛直全応力以上となるため,構造物の頂版や側壁に 作用する荷重が初期鉛直土被り圧より大きな値に達 していた⁶⁾.また,それと対応して,入力水平加速 度の2倍の周波数成分を持つ鉛直加速度が計測され ていた.本報告の遠心力載荷模型実験では,水平加 速度のみを入力しているが,図-7に示すように鉛 直加速度が記録された.しかしながら,この図を見 る限り,16 場で認められたような2倍の周波数成 分を有する波形ではなく,ほぼ入力の水平加速度と 同周波数・位相の鉛直加速度波形となっていた.

そのため、荷重の計測値に、土槽壁が地盤を介し て構造物を押すことによって生じる成分が生じてい ることが懸念され、図-8 に示すように構造物~地 盤の相対変位と頂版鉛直土圧の作用方向の関係を整 理した.図-8 は正弦波加振における1 サイクルの 時刻歴を示しているが、図中に示されているように、 頂版に作用する鉛直土圧は、土槽壁と構造物が離れ る際に増大し、土槽壁と構造物が近づく際に減少し ている.したがって、土槽壁が構造物を押すような 荷重ではなく、構造物側壁によって行き場を阻まれ た地盤が上方に移動するようなメカニズムで鉛直土 圧ならびに鉛直加速度が生じているものと推察され る.すなわち、土槽に囲まれた実験でのみ生じ得る ものではなく、実物構造物においても生じるものと 考えられる.

4.考察

(1) 構造物の変形に寄与する荷重の評価指標

構造物の各部に作用する荷重が構造物の変形に寄 与する割合を評価する場合,本実験のように構造物 底版と土槽底版が剛結されていれば,各部に作用す る荷重を底版に対する転倒モーメントに換算し,そ れらの大小関係を比較することが妥当であると考え られる.そこで,図-9 に示すように,各部に作用 する転倒モーメントを総和した合モーメントと構造 物の変形量との関係を確認したところ,両者は良い 相関関係にあることが判明した.したがって,合モ ーメントに対する各部のモーメントの比率を把握す ることで,構造物各部に作用する荷重の構造物の変 形に寄与する割合が把握できることになる.







図-7 構造物付近の鉛直加速度波形



図-8 地盤~構造物の相対変位と荷重の作用方向

(2) 構造物の変形と各種荷重の位相関係

図-10 には,構造物の変形と各種荷重の位相関係 を整理するために,正弦波加振(CASE2 加振 10)に おけるそれらの時刻歴において,構造物の層間変位 がピークとなる時刻に を印している.この図を見 ると,構造物の変形,合モーメント,頂版せん断力 によるモーメントのピーク発生時刻は概ね対応して いるが,慣性力によるモーメントは構造物の変形が



構造物層間変位 [mm]

図-9 構造物の層間変位と合モーメントの関係

最大となる時刻には,すでにピーク値から低下して いる.側壁に作用する全土圧によるモーメントは, 過剰間隙水圧波形と同様に,地盤のダイレイタンシ ーの影響により水平入力の2倍の周波数となってお



図-10 構造物層間変位と各種荷重の位相関係 (CASE2 加振10)

り,構造物の変形が最大となる時刻では,常に伸張 側のピークとなっている.したがって,個々の側壁 で見れば,変形の最大時刻と土圧の最大時刻は一致 しない.

(3)構造物の変形に寄与する荷重と変位比率
図-11 では、加振中の構造物の変形に寄与する荷重の変化を把握するため、構造物変形のピークの繰返し回数に対して、合モーメントで正規化した各部に作用する荷重のモーメントを示している.また、
図-12 には、構造物周りの過剰間隙水圧を同様に整理した結果を示している。



3-12 構造物層間役位かヒークとなる時刻の過剰 間隙水圧比(CASE2 加振10)

これらの図を見比べると,構造物の変形に寄与す る荷重の比率は常に一定ではなく,過剰間隙水圧の 蓄積に伴い,頂版のせん断力が構造物変形に寄与す る比率が低下することがわかる.また,側壁に作用 する荷重は,初期は負の値であり,構造物の変形を 抑制する方向に作用しているが,頂版せん断力の割 合が低下するにつれて,構造物の変形を増大する方 向に作用方向が変化している.

慣性力については,多少の変動はあるものの,過 剰間隙水圧の蓄積との間に一定の関係は存在しない.

このように,構造物の変形に寄与する荷重は,加 振中に変化しているが,それが構造物/地盤の変位 比率に与える影響を確認するため,図-13 に頂版モ ーメントを合モーメントで正規化したモーメント比 と構造物/地盤の変位比率の関係を整理した.



図-13 モーメント比と変位比率の関係(CASE2)

この図では、構造物に有意な変形が生じた CASE2 の結果について、正弦波加振の結果すべてを示して いる.いずれの加振においても、加振に伴って徐々 に過剰間隙水圧が蓄積し、頂版せん断力によるモー メントの比率が低下する傾向は共通である.図-11 に繰返し回数とモーメント比の関係を示した加振 10の結果をみると、頂版モーメント比の低下とと もに構造物 / 地盤の変位比率も低下しているが、そ の差は高々0.2 程度であり、他の加振、例えば加振 6 や加振9との差と比較して小さなものとなってい る.また加振8と加振10とでは、入力波形の周波 数が同じで、振幅が異なっているが、変位比率は概 ね同程度になっている.したがって、今回の実験に おいては、変位比率に影響を及ぼす最も大きな要因 は加振周波数であったと言える.

5.まとめ

構造物の各部に作用する荷重が構造物の変形に寄 与する割合に着目し,飽和地盤に埋設された地中構 造物に関する遠心力載荷模型実験を実施して,下記 の知見を得た.

- ・ 地盤の拘束圧レベルを実地盤のそれに近づけた 遠心力載荷模型実験では,頂版に作用する荷重 は最も大きな地盤変位を生じた加振ケースでも 初期鉛直土被り圧と同程度であり,側壁に作用 する土圧は1.5倍以下であった.
- 実験における頂版せん断力,側壁水平土圧,構造物慣性力によるモーメントの総和と構造物の変形量との間に非常に良い相関性があり,構造物の変形への各部の荷重の寄与を比較するためには,モーメントに換算した上で比較すれば良いことが確認できた.
- 構造物の変形がピークとなる時刻において,頂 版に作用するせん断力のモーメントは変形方向 に作用するピークとなるが,慣性力によるモー メントは必ずしもピークは対応せず,側壁に作 用する全土圧によるモーメントは,逆に減少側 のピークとなっていた.

- ・ 飽和地盤中の構造物では,過剰間隙水圧の蓄積 に伴い,頂版せん断力が構造物の変形に寄与す る割合が低下し,それと同時に構造物と地盤の 相対剛性の変化によって,側壁の土圧は抵抗力 から荷重に徐々に変化することが判明した.
- 加振中の構造物の変形に寄与する荷重の割合の 変化は,構造物/地盤の変位比率にある程度影響を与えるものの,加振周波数の相異による変 位比率の変化ほどではない.

謝辞:本研究は電力9社と日本原子力発電株式会社, 電源開発株式会社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ます.また,遠 心力載荷模型実験に際しては株式会社大林組の樋口 氏をはじめ関係者に多大なるご協力を頂きました. ここに記して感謝の意を表します.

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.
- 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.724/1-62, pp.157-175,2003.
- 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.
- 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.
- 6)河井正,福本彦吉: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,第27回地震工学研究発表会,2003.

(2005. 3. 15 受付)

A STUDY OF CENTRIFUGE TESTS OF BOX CULVERT STRUCTURES BURIED IN THE SATURATED SAND

Tadashi KAWAI and Masato Horie

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 centrifuge 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 because of the negative excess pore pressure generation, the shear force per unit area and the total horizontal earth pressure could become higher than the initial vertical total stress and the moment ratios of the moment acting on the each member of the structure to the summation of those moments gradually changed during a shaking event.