

(169) 立坑に作用する動土圧について —遠心力場における振動実験結果—

鹿島技術研究所 本田満彦 大保直人
同 上 鄭 京哲 鈴木理恵

1. はじめに

近年大深度化の傾向にある地下構造物を合理的に設計するためには、構造物に作用する地震時土圧をいかに考慮するかが重要になる。地震時土圧を考える場合に必要不可欠となる構造物と地盤の動的相互作用の評価についてはまだ明らかにされていない部分が多く、現在多くの研究が行われている。そこで筆者らは地下構造物の一つである立坑の大地震時応答を実験的に解明するため、遠心力場において、立坑モデルを中詰めの一様乾燥砂地盤内に設置し、地盤の非線形性が現れる比較的大きな入力レベルで加振実験を行った。本論は、立坑深さの違いが振動形状や立坑と地盤の相対変位に及ぼす影響について考察し、さらにそれらと動土圧の分布形状の関係について述べるものである。

2. 実験の概要

(1)実験装置 実験に用いた加振装置の外観を写真-1に、主な仕様を表-1に示す。実験土槽は片面をアクリル板としたアルミニウム製で内り $\varphi 195 \times b 500 \times h 350$ （加振方向の寸法を b とする）の剛体土槽を用いた。

(2)立坑モデル 地中連続壁で構築された深さ15m、外径3m、壁厚0.3mの立坑を想定してモデルを作成した。材料・寸法の決定には相似則(1/50)を適用した。外形は幾何的に相似な1/50の寸法とし、断面寸法（壁厚）は曲げ剛性が相似となるように決定した。立坑モデルにはアルミニウム製の円筒を用い、モデルの寸法は深さ $H=30\text{cm}$ 、外径 $D=6\text{cm}$ 、壁厚 $t=0.2\text{cm}$ ($H/D=5$)とした。また立坑深さの違いが立坑の動挙動に及ぼす影響を見るため、図-1に示すように外径 D と壁厚 t が等しく深さ H を小さく ($H=9\text{cm}$, $H/D=1.5$) した立坑モデルも併せて実験に用いた。

(3)地盤モデル 地盤材料には乾燥した豊浦標準砂を用いた。地盤モデルは、立坑

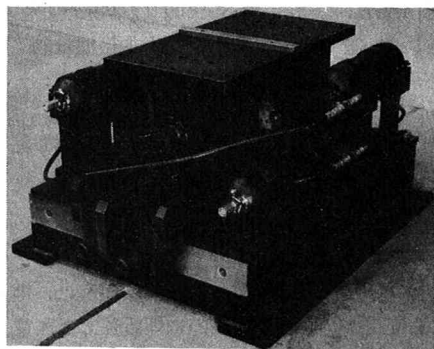


写真-1 加振装置
表-1 加振装置の仕様

加振台寸法	B70cm×W40cm
搭載重量	定格: 175kg 最大: 250kg
土槽寸法・重量	B50cm× W20cm× H35cm・100kg
最大加速度	25G
最大速度	20cm/sec
最大変位	±3mm
加振振動数範囲	25~350Hz
加振方法	電気・油圧サーボ方式
最大遠心加速度	50G

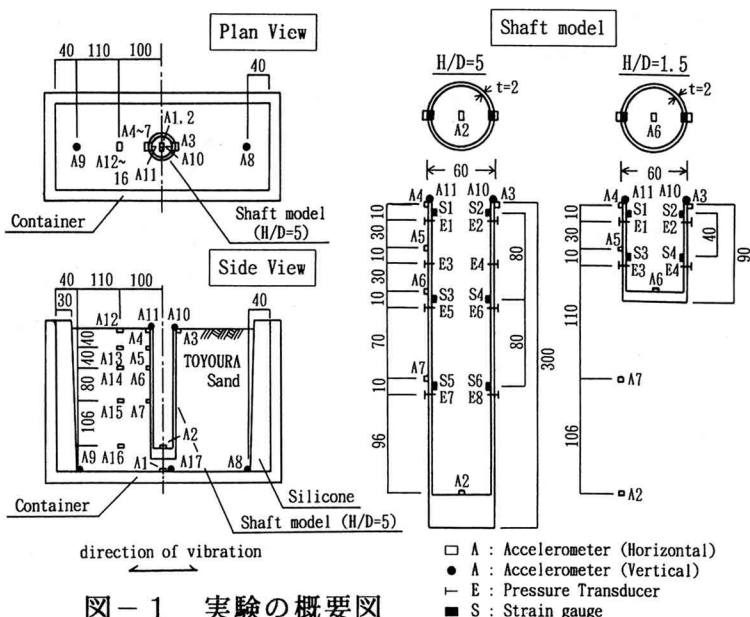


図-1 実験の概要図

を図-1に示す様に実験土槽の中央に設置した後、空中落下方によって豊浦標準砂を撒きだし、所定の層厚(33cm)になるように作成した。各実験ケースにおける地盤の相対密度を表-2に示す。なお土槽の内面には境界の影響を少なくするための対策を施している。¹⁾

(4)加振方法 実験はすべて50g(gは重力加速度)の遠心重力場で行った。入力加振波は動土圧等の分布形状が把握し易い正弦波を用い、一様地盤モデルの一次固有振動数付近の250Hzとそれより離れた100Hzで加振した。また、入力レベルは動土圧が大きく発生し、地盤の非線形性も現れる比較的大きな5g前後(1g場換算で約100gal)とした。各実験ケースの加振条件を表-2に示す。なお、地盤モデルの固有振動数はランダム波加振の結果より伝達関数を求めて決定した。²⁾

(5)計測項目 計測項目は、立坑に作用する水平土圧、立坑のひずみ及び地盤と立坑の応答加速度である。土圧は、立坑に設置した圧力センサで計測した。ひずみは、立坑内側に貼付けたひずみゲージにより立坑の上下方向のひずみを計測した。応答加速度は、地盤内に埋設または立坑に設置(一様地盤モデルの場合は立坑の設置位置と同位置の地盤内に埋設)した圧電型加速度計を用いて測定した(図-1参照)。

3. 実験結果とその考察

(1)立坑と地盤の相対変位 立坑深さと、立坑と地盤の相対変位(以下相対変位と記す)の関係を見るために、図-2に立坑を設置した実験(ケース3~6)の相対変位振幅(両振幅)の最大値分布を示す。なお相対変位は立坑の応答加速度から地盤の応答加速度を引いたものを積分して求めた。図-2の250Hz加振では相対変位は地表面で大きく、深い立坑(ケース6, H/D=5)と浅い立坑(ケース3, H/D=1.5)を比較すると、深い立坑の方が大きくなっている。これは地盤中に曲げ剛性の高い立坑があるため、立坑の拘束効果が地盤のせん断剛性が低く立坑との剛性差が大きい地表面付近に現れ、拘束効果は深い立坑の方が浅い立坑に比較して大きいと思われる。加振振動数の違いについて見ると、250Hz加振の方が100Hz加振に比較して、立坑の深さ(H/D)に関わらず地表面付近の相対変位振幅が大きくなっている。これは地盤の一次固有振動数より低い100Hz加振では立坑と地盤は一体となって振動するが、250Hz加振では固有振動数に近いために地盤の応答が高く、立坑と地盤の応答の差が生じるためと思われる。

(2)立坑の振動形状 立坑深さと振動形状の関係を見るために、図-3に立坑を設置した実験(ケース3~6)の曲げモーメント振幅(両振幅)の最大値の分布を示す。なお、立坑の曲げモーメントは中立軸が立坑中心にあると仮定し、図-1上で立坑左側のひずみ(S1, S3, S5)が引っ張りとなる場合を正とした。浅い立坑(H/D=1.5)の場合は加振振動数の違いに関わらずほとんど曲げモーメントが発生しておらず、立坑はほぼ剛体に近い動きを示していることがわかる。一方深い立坑(H/D=5)では、深くなるほど曲げモーメントが大きくなる傾向にあり、各測定位置における曲げモーメントのピークはほぼ同時刻に発生していることから、深い立坑は分布荷重を受ける片持ち梁の

表-2 実験ケース

	立坑の長さと同径の比 H / D	加振加速度 (g)	加振振動数 (Hz)	地盤の相対密度 (%)
ケース1	立坑なし	4.24	100	84
ケース2	(一様地盤モデル)	6.00	250	84
ケース3	1.5	4.75	100	88
ケース4		6.78	250	89
ケース5	5	4.53	100	86
ケース6		7.29	250	87

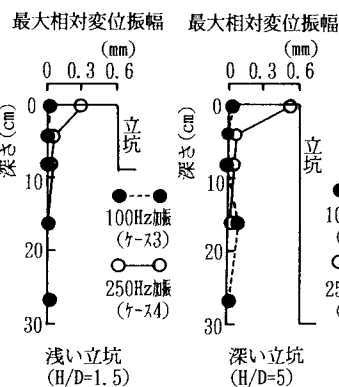


図-2 相対変位振幅の最大値分布

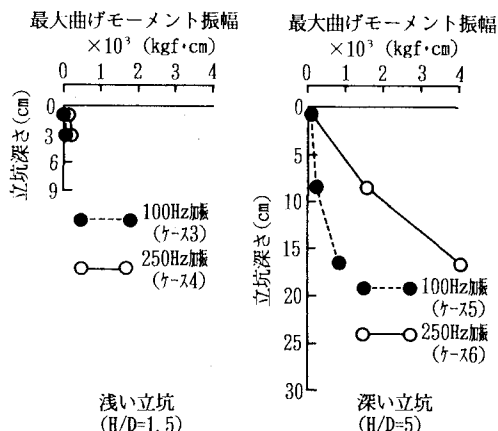


図-3 曲げモーメント振幅の最大値分布

変形形状に近い振動形状を示していると思われる。また、250Hz加振(ケース6)では地盤モデルの応答が高いため立坑が大きく変形し、大きな曲げモーメントが発生していると考えられる。

(3)動土圧の最大振幅 (1),(2)で考察した相対変位や振動形状と、動土圧の分布形状との関係を見るため、図-4に立坑を設置した実験(ケース3~6)の動土圧振幅(両振幅)の最大値分布を示す。深い立坑($H/D=5$)の場合、250Hz加振(ケース6)では100Hz加振(ケース5)と比較して動土圧が大きく発生しており、その分布形状は地表面付近と立坑中央部で大きくなる傾向を示している。これは、地表面付近では相対変位が大きいため(図-2参照)動土圧が大きくなったと考えられる。一方立坑中央部で動土圧が大きく発生したのは、地盤モデルの応答が高いためと考えられる。また、浅い立坑($H/D=1.5$)の場合は、地盤モデルの応答が高い250Hz加振(ケース4)の方が大きな動土圧を示し、深い立坑($H/D=5$)と傾向を同じくしているが、動土圧振幅の分布形状は異なっている。これは動土圧振幅やその分布形状が、(1)や(2)で示した立坑深さが変わることによって異なる振動形状や地表面付近の相対変位量と関係しているためと思われる。

(4)各計測項目の分布形状 立坑条件(立坑の有無、立坑深さ)が動土圧、曲げモーメント、応答加速度及び相対変位の分布形状に及ぼす影響を見るため、図-5に各実験ケースにおける立坑天端部(図-1中のA4)の応答加速度が最大となる時刻におけるそれぞれの分布形状を示す。立坑の有無による違いを見ると、応答加速度の分布形状は100Hz加振では全ての実験ケースの立坑部、地盤部ともほぼ等しいが、250Hz加振では立坑がある場合は地表面付近の立坑部と地盤部の応答加速度が異なっている。また相対変位の分布形状も立坑がある場合は、地表面付近の相対変位が大きい。立坑深さと相対変位の関係を見ると、深い立坑($H/D=5$)の方が浅い立坑($H/D=1.5$)に比較して相対変位量が多い。これらの傾向は、100Hz加振の場合は地盤と立坑は一体となって振動するが、250Hz加振の場合は双方の応答に差が生じて立坑の拘束効果が地表面付近に現れ、深い立坑の方が拘束効果が大きいことを示している。また、相対変位が負の値を示していることより、立坑が設置されることで地表面付近の地盤(図上立坑の左側)は圧縮されていると思われる。立坑深さと振動形状について見ると、浅い立坑($H/D=1.5$)では加振振動数に関係なく曲げモーメントはほぼゼロであり、立坑はたわんでいないと考えられる。深い立坑($H/D=5$)では、深くなるほど曲げモーメントが増加しており、図上右側にたわんでいると考えられ、250Hz加振の場合(ケース6)はその傾向が特に強い。立坑深さと土圧の分布形状について見ると、浅い立坑($H/D=1.5$)は左右対称形であるが、深い立坑($H/D=5$)は左右異なった形状になっている。これは先に述べた立坑の深さによって異なる立坑の振動形状や、立坑の拘束効果に伴う地表面付近の相対変位量などと動土圧が深く関係しているためと思われる。

4. まとめ 中詰めのごみ乾燥砂地盤内に立坑モデルを設置し、比較的大きな入力レベルで加振実験を行った。今回の実験より得られた結果をまとめると以下ようになる。

- a) 地盤の一次固有振動数よりも低い振動数で加振した場合は立坑深さに関わらず、立坑と地盤は一体となって振動する。
- b) 地盤の一次固有振動数付近で加振を行った場合は立坑と地盤の応答に差が生じ、立坑の拘束効果により地表面付近の立坑と地盤の相対変位は大きくなり、深い立坑ほどその傾向は強い。
- c) 深い立坑は分布荷重を受ける片持ち梁の変形形状に近い振動形状を示すが、浅い立坑は剛体に近い振動形状を示す。
- d) 地表面付近では立坑と地盤の相対変位量が多い場合、立坑に作用する水平土圧も大きくなる。
- e) 立坑に作用する水平土圧の分布形状は立坑深さによって異なり、振動形状と密接な関係にある。

なお今後は、地盤条件や加振条件を変化させた実験及び解析的な検討も併せて行う予定である。本研究はCUREeとの共同研究の一環として行った。本研究の計画・実施にあたってはカリフォルニア工科大学Scott教授から貴重な御助言を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

【参考文献】

- (1) 鈴木, 本田他: 動的遠心模型実験における土槽境界の処理方法について, 第28回土質工学研究発表会, 1993.6
- (2) 鈴木, 本田他: 立坑の地震時挙動に関する動的遠心模型実験(その1), 土木学会第48回年次学術講演会, 1993.9(投稿中)

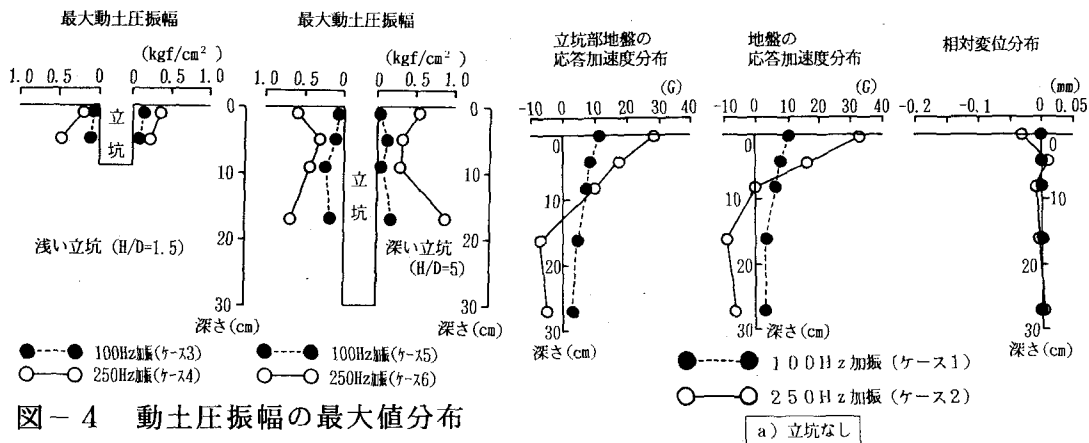
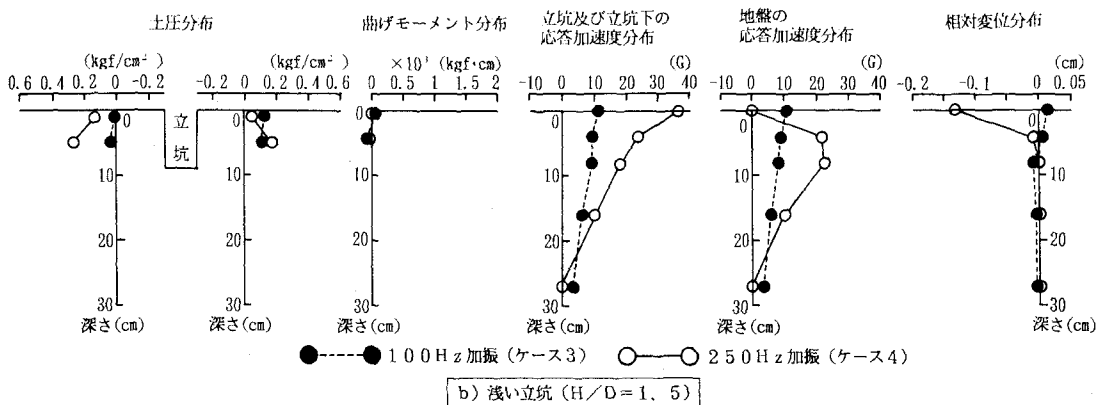
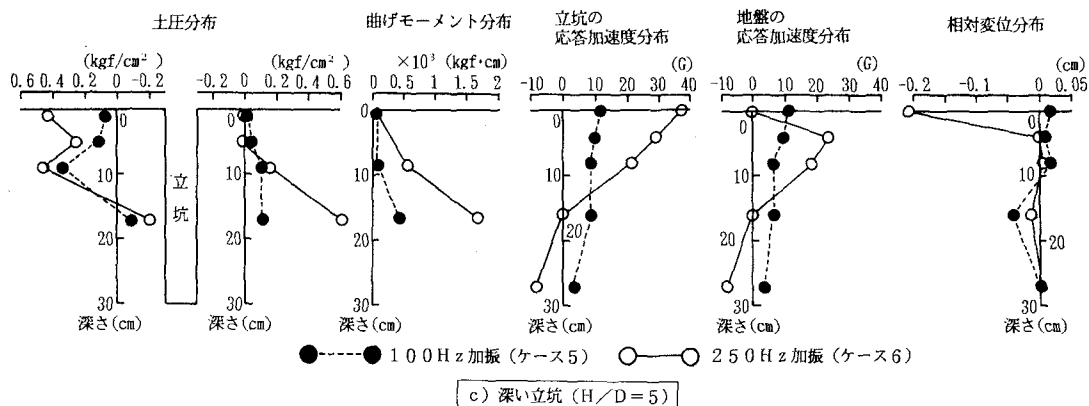


図-4 動土圧振幅の最大値分布



b) 浅い立坑 (H/D=1.5)



c) 深い立坑 (H/D=5)

図-5 各計測値の分布