

東京大学生産技術研究所 正員 田村 重四郎
 国鉄 東京第一工事局 正員 山口 良雄
 国鉄 構造物設計事務所 正員 河田 博之

1. はじめに

最近、軟弱層中にシールドトンネルが建設されることが多くなってきたが、一般に周期が長く振幅が大きいという地震動の特徴から、トンネル軸方向の耐震性の検討も必要と思われる。その場合、従来のパイプラインや沈埋函の研究によれば、(1)トンネルとたて坑の継手部 (2)地盤条件が急変する場合 (3)セグメントリング間の継手部 (4)トンネル断面剛性変化部 (5)地震時の土圧変化 (6)トンネル周辺の上の液状化 等が問題として挙げられている。そこで、本研究では、(1)、(2)を主な対象として、トンネル、たて坑、地盤の挙動とそれらの相互作用を把握するために、振動台に3次元の弾性模型を設置して振動実験を行なった。その結果、沈埋函や埋設管の場合と同じ様に、シールドトンネル及びたて坑の動きは地盤の振動と密接な関係があることが判明し、また幾つかの注目すべき現象も観察できたので以下に報告する。

2. 実験概要

図-1に示す6個の模型と実験した。No1とNo3の模型は硬軟地盤の境界部分とトンネルが横断する場合、No2とNo4の模型は、沖積層の層厚が変化する場合、No5とNo6の模型は、たて坑が構築された場合である。たて坑は地下連続型による基盤支持とし、No5はトンネルとたて坑の継手を剛結とし、No6は可動とした場合である。地盤の弾性係数及び単位体積重量は、沖積層で 600 kg/cm^3 、 1.6 t/m^3 とし、洪積層で 3000 kg/cm^3 、 1.8 t/m^3 とした。また、シールドトンネルはセグメント外径 9400 mm 、セグメント厚 400 mm 、2次覆工厚 350 mm とした。

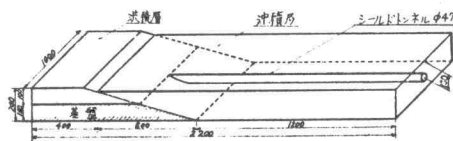
相似則は慣性力のみを考慮して定め、模型の縮尺は $1/200$ 時間比は 0.217 である。また、トンネルの剛性は、セグメントの剛性低下を 60% とみて計算し、トンネル模型はセグメント及び継手構造まで模型化することが不可能なため、一様な断面をもつ管とした。

地盤材料としてはゼラチンを使用し、シールドトンネル及びたて坑材料としてはネオプレンゴムを使用した。

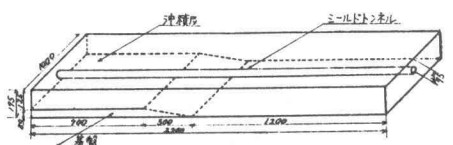
実験は、上述の各模型を振動台上にセットし、水平方向でトンネル軸方向及びトンネル軸直交方向に正弦波振動を与えて、各地盤の共振状態におけるトンネル、たて坑、地盤の挙動を検討した。振動台は、機械式加振方式で、振幅一定で振動数を制御する様になっており、振動数範囲は $0 \sim 20 \text{ Hz}$ 、上載可能重量は 500 kg である。

図-1 模型種類

No1, No3模型 (No1…トンネル無 No3…トンネル有)



No2, No4模型 (No2…トンネル無 No3…トンネル有)



No5, No6模型 (No5…継手剛結 No6…継手可動)

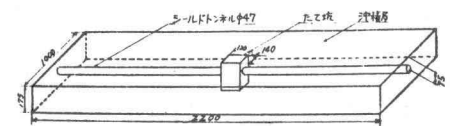
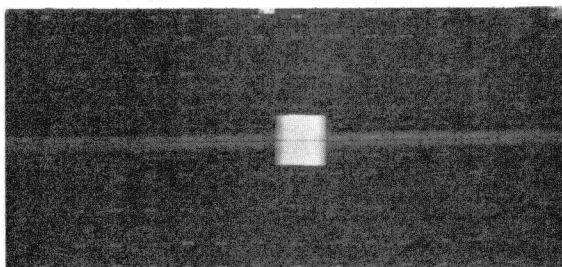


写真 (No5模型の軸方向加振時の共振状態)



変位量の測定は写真及び映画記録によって行つた。写真はNo5模型の振動状態をカメラを開放にして撮影したもので、図中黒い線はゴム紐でシールドトンネルの上または下の地盤の変位量を知るために埋込されてある。白丸は地盤表面の変位量を測るための紙の標的である。各部分の変位量は引き伸ばし写真から 0.1% 程度の精度で読取り、映画と組合せて変位の分布状態を決定した。

3. 実験結果

図-1に示す各模型について、振動数と徐々に変化させて振動状態を検討した結果、以下の事が認められた。

1) 地盤の振動---地盤は地盤条件(層厚、弾性係数等)に応じて固有振動が卓越する。異なる固有振動数と有する地盤が接続する場合(No1~No4模型)、相互に影響を及ぼす範囲は天才境界近傍付近であり、地盤条件の変化する部分(No1とNo3では硬軟地盤の境界部分の斜面、No2とNo4では軟弱層厚変化部分の斜面)では複雑なモードの卓越振動が発生し、共振状態は発生しにくい。図-2はNo1とNo2模型の地表面の変位分布を示す。

2) シールドトンネルの振動---シールドトンネルは地盤の動きに対応して振動し、固有振動状態は認められない。シールドトンネルは地盤の弾性係数との差が著しいにも拘らず、曲げ変形及び伸縮変形とし、トンネル軸方向及び軸直交方向加振をした場合の変形を比較すると、軸直交方向の場合、その可撓性により比較的よく地盤の変位に追従して変形するが、軸方向の場合、その剛性により地盤の変位に追従しにくい(図-3参照)。また、地盤の深さ方向の変位の分布はシールドトンネルの挙動に影響を与え、軸直交方向加振の場合、ねじり変形が発生した。

3) たて坑の振動---たて坑はトンネルと同様に地盤の動きに応じて振動するが、トンネルと比較した場合、たて坑の剛性はかなり高い。地盤が基本振動をしている時、たて坑はロッキング振動を行い、トンネル軸方向加振の時、これに接続するトンネル部分には上下振動が発生する。また、その場合トンネル及びトンネル周辺の地盤の影響を受けてたて坑は地盤とはほぼ等しい変位を示すが、軸直交方向に加振した場合、地盤の変位に比べて僅かな変位しか示さなかった。この相違は地盤の厚さとたて坑の寸法がほぼ対応し、たて坑の剛性が高いこと、及びトンネルのたて坑に与える影響が大きいことによると推測される。トンネルとたて坑の結合条件(剛結、可動)の顕著な相違はトンネル軸直交方向加振の時に見受けられ、継手を剛結にした場合、シールドトンネルはたて坑の動きに拘束され、大きな曲げ変形をうけた(図-4参照)。また、たて坑の地下連結壁は、たて坑と一体となって挙動し、根入部の地盤に著しい乱れを生じさせた。

以上、本実験で判明した事項を記述したが、更にこの実験では考慮できなかったセグメントの継手部の問題等を含めて今後検討を加えて行く予定である。

図-2 No2模型の軸方向の基本振動時の変位分布
(変位は地表面の変位である)

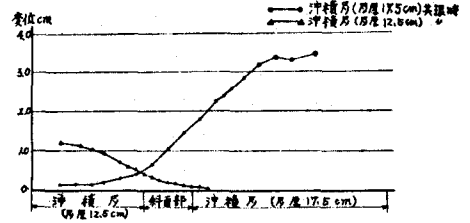


図-3 No3模型の沖積層の共振時の変位分布

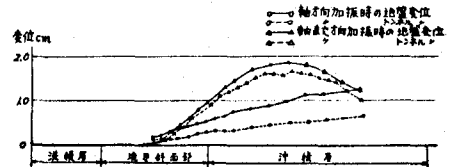


図-4 No5, No6模型の軸直交方向の基本振動時のトンネルの変位分布

