

沈埋トンネルの模型振動実験

東京大学生産技術研究所 正員 田村 重四郎

大成建設技術研究所 正員・岡崎 孝夫

緒言 沈埋トンネルの耐震性を検討する場合、今まで広範囲に亘って地盤条件が一様であるとして地震波の伝播に基いた地盤の変形が考慮されているが、地盤の状況が変わるときはそれによってトンネルの動的挙動が大きな影響を受けるであろうことが推測される。

筆者等は軟弱地盤の振動特性とそれに埋設された管状構造物—沈埋トンネル—の動的特性を調査するため振動台上に模型を製作し、線形領域内で3次元振動実験を試みた。

その結果従来研究されている地下埋設管と同じように沈埋トンネルの運動は地盤の運動と密接な関係があることが判明した。又、実際の沈埋トンネルでの地震観測でも同様な事象が見出されているので、これ等の結果に基づいて振動模型を作成し、幾つかの地震応答計算を行った。ここに報告する。

1 模型 模型は1/500と1/250の2種があるが、ここでは1/250について主に説明する。

模型は長さ2.2 m 幅1.0 m 層厚が10.4 cm ~ 17.8 cmの軟弱地盤模型に縦2.8 cm 横8.4 cmの断面のトンネル模型を埋設したもので、軟弱地盤の材料はゼラチン、トンネル材料はシリコンゴムである。何れも極めて低い弾性係数

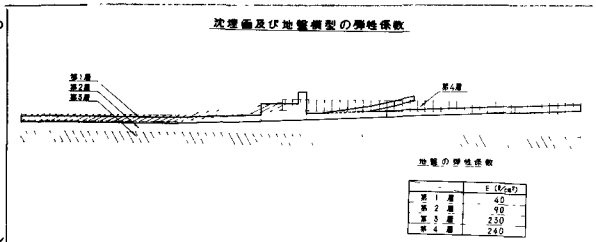


Fig. - 1

をもち、しかも弾性領域が広く、比重も大体1程度であり、この程度の寸法の模型で低振動数で共振状態を発生させるには良好な材料である。この振動実験は線形領域にあり、慣性力のみを考慮した。尚、当模型においては湛水を無視した。

地盤模型はFig-1に示す如く4種類の異なった弾性係数をもつ層から成っていて、最も軟かい地盤と最も硬い地盤との弾性係数の比は1:6で、模型下部において硬質地盤に接続しているものとした。

モデル化した地層は水底部で10.4 cm、斜面部では層厚は順次増加して陸上部では17.8 cmになっている。更にトンネル模型の弾性係数は最も軟かい地盤の弾性係数の凡そ500倍である。

使用した振動台は機械式加振方式で一定振幅(可変)で振動数を制御する様になっている。又、加振波形は正弦波形であって、模型の振動状態の変化によって振動台の動きが影響を受ける様なことは殆んどない。振動数範囲は0~20 Hzで最大積載時の重量は約500 kgである。

変位量の測定は写真、及び映画記録によって行った。写真-1, 2, 3は模型の振動状態をカメラを開放にして撮影したもので、黒い線はゴム紐で、沈埋函の上または下の地盤の変位量を知るために埋込まれてある。白丸は地盤表面の変位量を測るために置かれた紙の標的である。沈埋函の変位は沈埋函の表面の線の動きから測定された。測定時の振動数は、2.5~14 Hzであった。各部分の変位は引き伸し写真で読取り、映画と組合せて変位の分布状態を決定したが、 ± 0.1 mm程度の精度で測定可能であった。

Ⅱ 実験結果について 振幅を一定値に設定して振動数を

徐々に増加すると層の厚さの差異によって各部分毎に一定の振動数で地表面での振幅の明瞭な増幅が見られる。

Fig. - 1 に示されている模型の共振状態は試験振動数範囲で次の6種類に分けられる。

- 沈埋函軸方向に加振した場合
- ・陸上部共振
 - ・斜面部共振
 - ・水底部共振

- 沈埋函軸直交方向に加振した場合
- ・陸上部共振
 - ・斜面部共振
 - ・水底部共振

地表面のみの動きに着目した場合、共振現象の見られる部分は比較的局部的であって、陸上部共振の場合その周辺の部分たとえば斜面部は共振の影響を受けるが水底部では殆んど影響がない。

振動状態の特徴は夫々次の如くである。

1) 陸上部共振では軸方向・軸直交方向の基本振動数は各々 3.4 Hz, 3.0 Hz であり、基本振動数の差は模型の寸法と境界条件が主な原因と考えられる。

地盤の変位分布は陸上部で最大であり、水底部では殆んど振動せず、斜面部で急激に振幅が変化する。

沈埋函は陸上部から斜面部・水底部へ行くにつれて変位は小となるが、地盤程急激には変化しない。斜面部では沈埋函に伸縮あるいは曲げ変形が発生する。

2) 斜面部共振では、軸方向・軸直交方向の基本振動数は各々 5.5 Hz, 4.3 Hz であり、地盤は斜面部で最大変位を示すが他の場合に比して絶対値は小さく隣接した陸上部・水底部にもその効果は及んでいて、これが陸上部及び水底部の共振と異なる点である。沈埋函の変位量の絶対値は小さい。

3) 水底部共振では、軸方向・軸直交方向の基本振動数は各々 5.8 Hz, 5.1 Hz であり、地盤は水底部で最大変位を示し、これと隣接した斜面部分にも絶対値は小さいがその影響が及んでいる。沈埋函の変位は水平部で大で斜面部で急激に減少するが陸上部も僅かながら変位している。

之等の実験から次のことが認められる。

1) 異った自己振動数をもつ地盤が接続する場合、相互に影響を及ぼす範囲は比較的小さくその境界近傍に限られる。

2) 沈埋函は地盤のもつ振動数で振動し、地盤の変形に応じて変形する。

3) 沈埋函と地盤の弾性係数の差が著しいにもかかわらず沈埋函は変形する。

4) 沈埋函は曲げ変形及び伸縮変形をする。

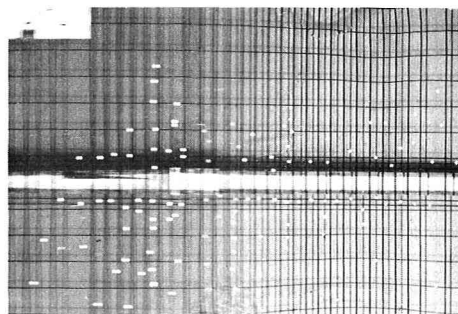


写真-1 陸上部共振（沈埋函軸方向）

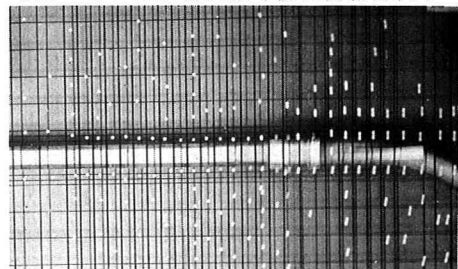


写真-2 陸上部共振（沈埋函軸直交方向）

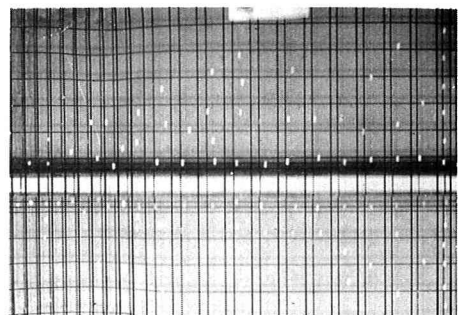


写真-3 水底部共振（沈埋函軸直交方向）

5) 地盤の深さ方向の変位の分布は沈埋函の挙動に影響を与える。

6) 特定の振動数で地盤内部で大きい変位を生ずる場合もある。

尚本実験では沈埋函材料のシリコンゴムとゼラチンの付着は良好ではないが、相対的なずれは見られなかった。

Ⅲ 振動モデルについて 以上の模型実験及び今まで行われてきた埋設管の地震観測を参考にして、実際のな面から次の様な条件の下に振動模型を作成してみた。

1. 地盤の変位については基本振動が主である。
2. 地盤は集中 Mass system で表現する。
3. 沈埋函の存在により地盤の固有振動数は変化しない。
4. 沈埋トンネルと地盤とはバネによって連絡されている。
5. 沈埋トンネルの長さ方向の地盤の Mass は相互にバネで結ばれる。
6. 沈埋函は曲げ変形・伸縮変形をする。

Fig. - 2 は振動模型を図示したものである。

Fig. - 3 ~ 5 に示したのはこの様なモデルを用いて、計算した振動モードと実験値である。

図で一点鎖線は沈埋函のない場合の地表面の計算変位であり、・印はこれに対応して実験で測定された沈埋函の影響が小さいとみられる地盤表面

の変位である。実線は沈埋函の計算変位で、×印は実験で得られた変位を示す。又点線は沈埋函がない場合の沈埋函位置における地盤の計算変位である。

既述の様に、深さにくらべて充分広い面積をもつ軟弱地盤に於いては、一様な地盤状態でなければ下方からの一様な入力があっても、全域が共振状態には仲々ならず部分的に共振する。そのため共振状態の周辺からはなれた部分ではその振幅は明瞭でなく実験値の一部を記入しなかった。

これ等の図では実験と計算値とがよく一致していることを示している。

計算に使用した沈埋トンネルと地盤を結ぶ軸

直角方向のバネは、トンネル軸方向の単位厚さの断面を取り出し、二次元弾性体とし平面変形を想定して、有限要素法を用いて計算し、又軸方向のバネはこの断面の法線方向に地盤が剪断変形するものとして算出している。

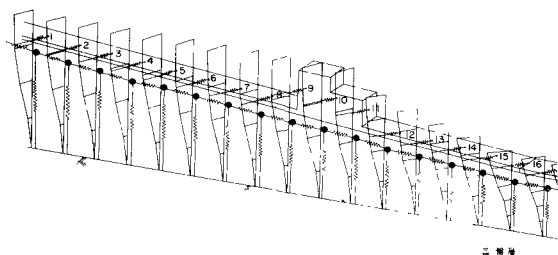


Fig. - 2

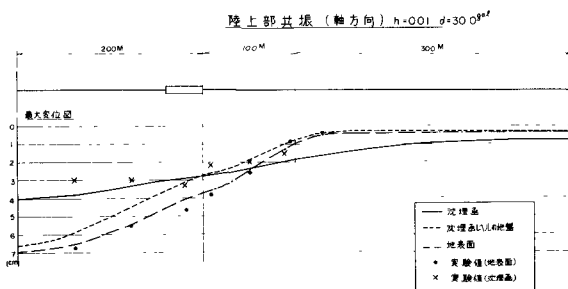


Fig. - 3

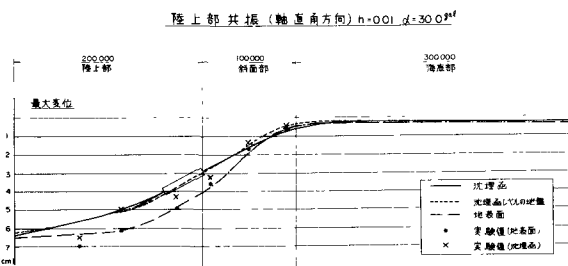


Fig. - 4

計算モデルの諸寸法は実物の寸法を用い、減衰定数は1%とした。これは模型実験の結果と対応させるためで、実験に使用したゼラチンの減衰定数は0.8～1.0%である。因に模型と実物の時間の比は1:2.9である。

Fig. - 3 と Fig. - 4 は陸上部分の共振時の変位を示し、夫々トンネル軸方向及びこれと直交方向の振動の場合であるが、沈埋函の曲げ変形の剛さによって図の様な差異が生じたものと見られる。

又実線と点線との間が沈埋函の拘束を示すことになるが、Fig. - 3～4 では何れでも斜面部分で沈埋函に相対的に大きい歪の発生することが推測される。

Ⅳ 応答計算の例 前記の振動モデルを用いて減衰定数を10%とし入力地震の最大加速度を100 gal として地震に対する応答を計算したのがFig. - 6, 7 である。地震名の中 Aomori とあるのは、1968年十勝沖地震での青森港で得られた地震記録であり、Osaka は1963年に発生した越前岬地震の大阪港における記録である。図によると地震動の性質によって地盤の応答が著しく異なることが分る。El Centro 地震では水底部で大きな加速度と相対的に大きい変位を生ずるが、青森・大阪の地震記録ではむしろ陸上部で変位曲げ等大きな応答値が得られている。

これは計算対象とする波形の振動特性の重要性を示すものであり、沈埋トンネル建設地点の地盤状況、振動特性が沈埋函に大きな影響を与えることを示すものである。

まとめ 以上沈埋トンネルの模型振動実験と地震応答解析についてのべたが、線型領域でしかも下方から一様な地震波がくる場合のものである。大地震の場合、軟弱地盤の動きも性質も複雑であるし、又地震波の伝播も考慮せねばならない。之等について更に検討を続けて行く所存である。

おわりに実験に当り協力戴いた東大生産技術研究所、加藤勝行、森地重暉の両氏並びに計算関係に助力された大成建設 K K 浜田政則氏に深謝の意を表します。

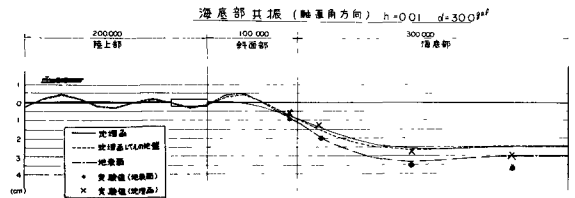


Fig. - 5

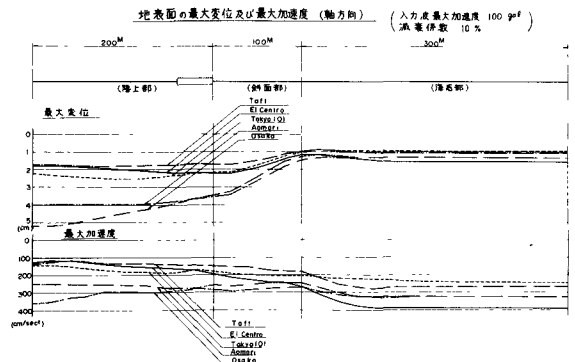


Fig. - 6

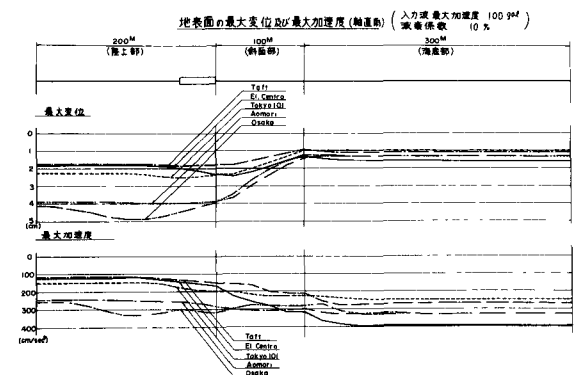


Fig. - 7