

(142) シールドトンネルの免震構造に関する模型振動実験

(株)熊谷組技術研究所 正員 鈴木 猛康

1. まえがき

地盤条件の急変する場所では、地震時に局部的に大きなひずみが生じる。このような地盤急変部にトンネルが埋設された場合に、大地震時にトンネル周辺地盤から伝達される地盤変位を吸収するゾーン（以後中間層と呼ぶ）をトンネルと周辺地盤の間に設けることにより、トンネル本体に発生するひずみ（断面力）を低減させ、かつトンネルの有する力学特性を明確に解析モデルに反映できる免震構造を考えた。ここでは、本免震構造をシールドトンネルに適用した場合を想定し、免震構造の効果を確認するための模型振動実験を実施したので報告する。

2. 模型概要

振動実験模型は、実地盤のせん断波速度 $V_s = 40\text{m/sec}$ 、実シールドトンネルの外径10mを想定し、相似率は長さ1/200、ヤング率1/140を目標にして製作した。図-1に実験に用いた模型型枠の構造とトンネル模型の配置を示す。図に示すように、左の斜面と右の水平部およびその間の突起部よりなる基盤の起伏を有する基盤構造急変部に、軟弱な沖積地盤が堆積した表層地盤模型とする。模型地盤材料はアクリルアミドゲルで、せん断波速度 $V_s = 400\text{cm/sec}$ とした。模型地盤の地表面近くにはゴム糸を格子状に張り、振動モードの目視（写真撮影）を可能にしている。また地表面上には、トンネル中心線上に加速度計を8個設置した。

トンネル模型は上記の相似率を考慮し、セグメントリングをポリエチレン製パイプ（外径50mm、内径42mm、長さ47mm、ヤング率 $E = 1500\text{kgf/cm}^2$ ）とし、継手部をネオプレンゴムパイプ（外径48mm、内径42mm、長さ3mm、ヤング率 $E = 40\text{kgf/cm}^2$ ）によってモデル化し、これらを交互に接着し製作した。このようなシールドトンネル模型とすると、継手の伸縮バネ定数に対するセグメントリングの伸縮バネ定数の比率は、継手をボルトと考えた場合の実シールドトンネルの比率にほぼ一致する。さらに免震構造とする場合は、この模型の外周に、柔らかな合成ゴムシート（厚さ2mm、ヤング率8、 16kgf/cm^2 ）を接着し、中間層とした。図-2はトンネル模型の縦断面と、トンネル内の計測状況を示したものである。図に示すようにセグメント本体部のひずみをひずみゲージで、継手部の相対変位を小型差動トランスで測定することにより、トンネルの変形を捉える。ひずみの測定は、トンネル1本につき5か所、10チャンネル（左右2点）で行い、継手の相対変位は8か所、16チャンネル（左右2点）で行った。

3. 実験方法

模型振動実験では、中間層で外周を覆わない従来構造のトンネル模型と、中間層で覆った免震構造トンネル模型を並列に地盤内に埋設して模型を製作し、これを模型の共振振動数で正弦波加振をした時のトンネル本体のひずみ、相対変位および地盤地表面の加速度を測定した。またその時の模型の振動モードをブレ写真によって記録した。なお、収録チャンネル数は、模型

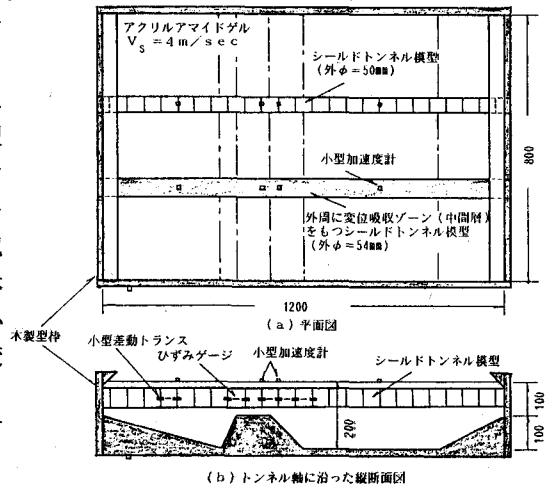


図-1 模型の構造とトンネルの配置

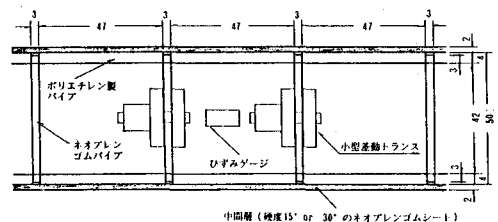


図-2 トンネル模型の縦断面図

型枠底部の加速度と振動台の加速度を加え、合計62チャンネルである。実験ケースはトンネルを含まない地盤のみの加振を行うケース（CASE-1）と、2本のトンネルを埋設したケース（CASE-2, 3）である。CASE-2と3は、中間層として採用した合成ゴムの種類が異なっている。なお、従来構造のトンネル模型と免震構造のトンネル模型の軸剛性（あるいは伸縮バネ定数）の相違はわずか約1%であるが、模型地盤材料として用いたアクリルアミドゲルのヤング率は約 0.6 kg/cm^2 でCASE-3の中間層の合成ゴムと比較しても1オーダー低いため、中間層を設けることにより、当初と逆の効果が現れることになる。

4. 数値解析による検討

実験に先立ち、地盤模型の形状を決定し、共振時に得られる地盤の振動モードとその時に発生すると思われるトンネルひずみを推定し、適正なトンネルひずみおよび継手部の相対変位の測定位置を選定するために擬似3次元地盤モデル¹⁾により、地盤模型を5cm間隔のメッシュでモデル化し、モード解析を行った。その結果得られたモードのうち、トンネル軸方向に振動軸が現れる主要なモードは図-3に示す2次モード（関与係数0.38）で、地盤材料のせん断波速度を 400 cm/sec とした場合、振動数は約 5.9 Hz である。振動実験では、このモードで地盤模型が共振する時の、地表面およびトンネルの挙動について測定を行うことにした。なおメッシュは、模型地盤の地表面付近に張ったゴム糸の格子と一致させている。

5. 実験結果

CASE-1の地盤模型の加振実験では、図-3のモード解析結果とほぼ一致した振動モードが得られて、振動数についても約 5.7 Hz で、目標に近

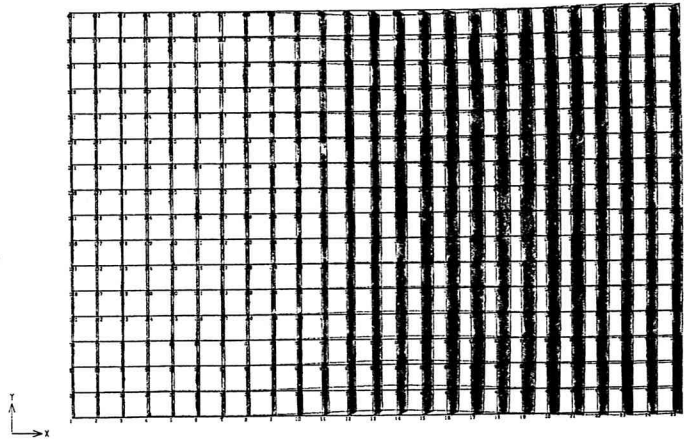


図-3 擬似3次元地盤モデルによる振動モード

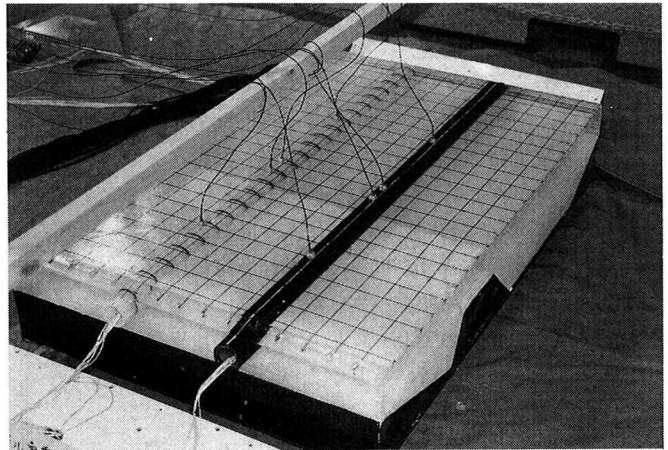


写真-1 模型振動実験状況

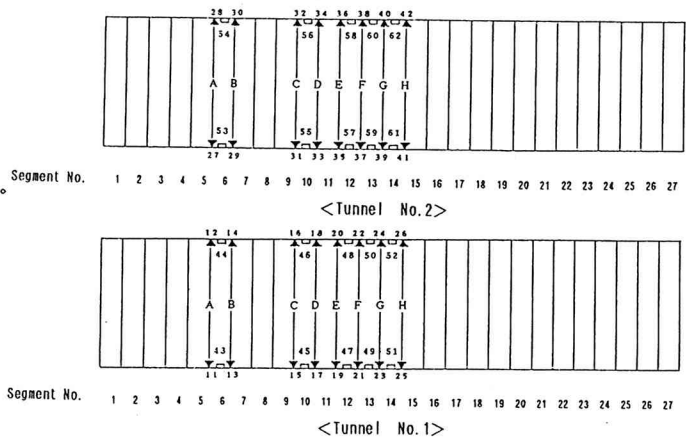


図-4 セグメント番号と測定断面

い精度で地盤模型が製作できた。CASE-2の振動実験では、若干振動モードに乱れが見られたため、以下ではCASE-3の振動実験の結果について述べる。写真-1に実験状況を示した。また写真-2にCASE-3における共振時のプレ写真を示す。地盤と比較して剛性の高いトンネルが並列に埋設されているため、トンネルの影響が地盤全体に及び、トンネルの周囲では極端に振幅が小さくなっていることがわかる。また共振振動数は5.8HZで、地盤のみのCASE-1よりもやや高くなっている。CASE-2における共振実験でも、やはり共振振動数は5.8HZであった。図-4にトンネル内のひずみおよびトンネル継手部の相対変位測定位置を示す。図中トンネルNo. 1が中間層で覆ったトンネルで、No. 2が中間層で覆わないトンネルである。まず2本のトンネルのひずみ発生状況の相違について説明する。なお、地盤模型のトンネル軸に沿った自由境界部の成形の違いから、トンネル位置における地盤の振幅が、トンネルNo. 1とNo. 2で若干異なるので、トンネルNo. 1の軸ひずみ、継手部

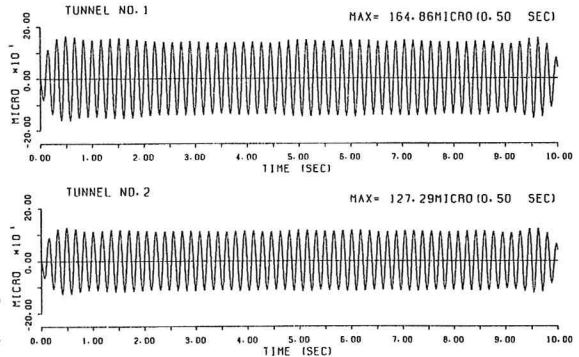


図-5 セグメント本体部ひずみ波形の比較

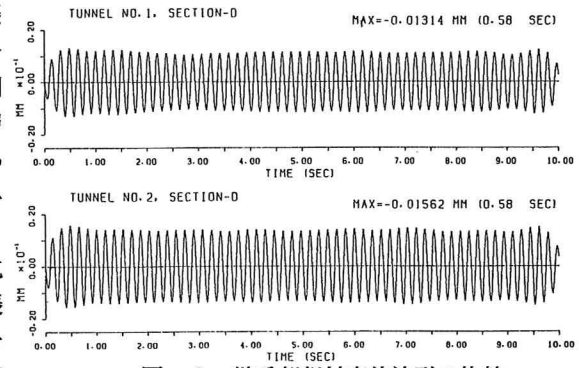


図-6 継手部相対変位波形の比較

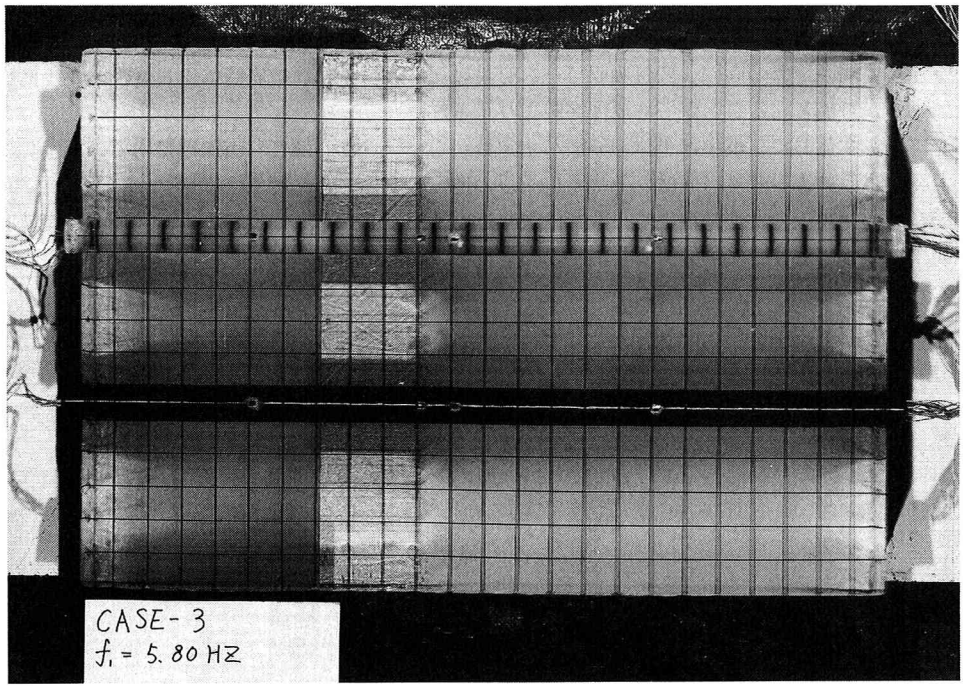


写真-1 CASE-3における模型共振時のプレ写真

相対変位を基準にして、トンネルNo. 1、No. 2の直上の加速度の比率から、トンネルNo. 2のひずみ、相対変位は補正した。図-5はSegment No. 10における、セグメント本体部のひずみ波形についてトンネルNo. 1、2で比較したものである。波形は共振振動数を中心とする2Hzの幅のバンドパスフィルターで処理されている。図に示すように、剛性が高いはずのNo. 1トンネルでNo. 2トンネルよりも約2割大きなひずみが発生している。これは、No. 2トンネルの周囲は柔らかなゲルで覆われているのに対し、No. 1トンネルの周囲はゲルよりも1オーダー硬いゴムで覆われているために、このわずか2mmの層のせん断変形による地盤ひずみの吸収量の違いによって、各トンネルに伝達されるひずみに相違が生じたと理解される。したがって、周辺地盤よりもせん断定数の小さな材料で、トンネル周囲を覆ってやれば、セグメント本体部の地震時断面力を減少させることが可能となる。トンネルひずみが小さいSegment No. 6を除きひずみの測定を行った4断面では、Segment No. 10の場合と同様、8~9割No. 2トンネルでひずみの発生量が少ないことが確認できた。次に2本のトンネル構造の違いによる、トンネル継手部の変位吸収の違いについて、図-6を用いて説明する。図-6は、D断面におけるトンネル継手部の相対変位波形について、トンネルNo. 1とNo. 2の比較を行ったものである。図に示すように、No. 2トンネルの継手部相対変位はNo. 1トンネルよりも2割程度大きい。継手部の相対変位は、地盤の振幅が小さいA断面を除くB~Hのすべての断面で、約2割トンネルNo. 2の方が大きいという結果が得られた。これは、トンネルの周囲が柔らかいほど、あるいはトンネルと地盤との間が動き易くなっていけばいるほど、トンネルがその構造に基づく力学特性に応じた変形をすることが容易になる、すなわち継手による変位吸収が十分行われることを示している。セグメント本体部と継手部のそれぞれ単体の伸縮バネ定数 K_s 、 K_j の比率 K_s/K_j は約3.2であるが、測定によって得られたトンネルNo. 1およびNo. 2のセグメント本体部の変位 D_s 継手部の変位 D_j の比率 D_j/D_s は、それぞれ1.7、2.3で、上記の K_s/K_j から想定される D_j/D_s の50~70%でしかない。また周囲が柔らかなゲルで覆われているトンネルNo. 2では、よりセグメントと継手部のそれぞれ単体の伸縮バネ定数から想定される軸変形に近いことがわかる。

6. まとめ

以下に、模型振動実験から得られた結論をまとめた。

- 1) トンネルと周辺地盤の間に、変位吸収ゾーンを設けることにより、地震時に生じるトンネル断面力を軽減させることが可能となる。これが、本原理実験より示された。
- 2) セグメント本体および継手部単体の伸縮バネ定数から想定されるほど、実際地盤内では継手の変位吸収は行われず、継手による変位吸収は、トンネル周辺の地盤の剛性と密に関係する。
- 3) シールドトンネルのように継手による変位吸収を期待するトンネル構造の場合は、適切な変位吸収ゾーンを選定することにより、セグメントと継手部のそれぞれ単体の剛性から、さらに正確な耐震設計が行なえると思われる。

今後、本実験の結果を参考にし、さらに実験、解析を進め、実用化のための検討を行う予定である。

なお、本振動実験を実施するに当たっては、東京大学生産技術研究所・田村教授に御指導頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures, 生産研究, Vol.39, No.1, 1987, pp.37-40.