

地震時におけるトンネル中壁の変形に関する研究

日本大学 田村 重四郎
日本大学 星 秀朋
○ 日本大学 菊地 数馬

1.はじめに

地中構造物は従来高い耐震性を持つものと考えられてきたが、本邦の都市部では軟弱地盤であることが多く、そこに建設される地中構造物の耐震性を課題として、土木学会耐震工学委員会では1992年より検討を加えてきた。兵庫県南部地震では、激震地域でトンネルを始め各種地中構造物に被害の発生が見られた。特に大開駅舎の圧壊は注目を集め、現在、地中構造物の耐震設計法に対しさまざまな検討が進められている。

トンネル断面の地震時の挙動については岡本等(1963)の研究を嚆矢とし、その後の実地震観測、実験等により、その基本的部分が明らかにされて、一部のトンネルの耐震設計に適用されているが、一般化するまでには至っていなかった。都市トンネルは、開削トンネルが一般的であり多用されてきたが、深度の増加、建設施工の地上交通等への影響等により、最近ではシールド工法によるトンネルの建設が主となっている。シールドトンネル技術が本邦に導入されて以来80年あまり経過するが、最近の発達は著しく、大型化、断面形状の多様化が進んでいる。従って、トンネルの耐震性を検討する場合、このことを考慮する必要がある。

本研究では兵庫県南部地震で生じたトンネルの構造的被害の様相を考慮して、箱型トンネル及びシールドトンネルの模型振動実験と数値解析を行って、トンネルの挙動、地盤との相互作用、特にトンネル中壁(柱)に注目して調査した。

2. 模型振動実験

トンネル軸に直交する面で切断したトンネル-地盤系の2次元模型を、トンネルにシリコンゴム、地盤にゼラチンゲルをそれぞれ材料として作成し、振動台上に固定して加振した。

1) 模型の種類

模型の種類は、次の3種類である。

- Type 1: 2線式箱型トンネル (神戸高速鉄道大開駅プラットホーム部トンネル断面)
Type 2: 2連型円形シールドトンネル (営団地下鉄半蔵門線清澄留置線トンネル断面を変形したもの)
Type 3: 3連型円形シールドトンネル (営団地下鉄半蔵門線清澄留置線トンネル断面)

振動実験では、模型の基本振動を対象として、正弦波形で加振した。これは、一般に基本振動が地震時に最も卓越するであろうことがわかっているからであり、又基本振動時では模型の振動状態が、最も模型端部の影響を受けにくいからである。又2次固有振動状態では、長手方向の端部のみならず、切断面端部の影響もあらわれるからである。これはゼラチンゲルが低い振動減衰性、広い弾性範囲、低い弾性係数を持つことによる。モデルの形状は、図-1に示すとおりである。地盤模型の形状は、いずれも高さ20cm、奥行き45cmとしている。模型の幅は、Type 1及び2では1.4mであり、Type 3についてはトンネル模型の幅が他のTypeの

KeyWords シールドトンネル 地震 模型振動実験 数値解析 基本振動

〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1 TEL/FAX 047-471-2449

ものにくらべて広いことを勘案して1.6mとしている。Type 1は大開駅の被災した部分の断面形状及びその周辺の地盤状態を考慮してモデルを設定したものであり、モデルスケールは1/100としている。Type 2及びType 3は、原トンネルの形状のモデルへの表現精度などよりモデルスケールは1/80としている。

2) モデルの材料及び相似則

トンネル材料は、シリコンゴム（バイエル(株)シロプレレン RTV-21C）で、シリコンゴムの機械的性質は、表-1に示すとおりであり、Type 1～3のいずれにも同一のものを使用している。

地盤材料は、ゼラチンゲル（ニッピゼラチン工業(株)S2100-3）を使用し、その力学的性質は表-1に示してある。なお材料が淡黄色で透明であるため、振動状態を観測、確認することが困難であることから、黒色の非常に低い弾性のゴム紐を地盤模型内に4cm～8cmの間隔で埋設している。

地盤及びトンネル材料（鉄筋コンクリート）が弾性体であると想定し、模型材料もまた線型状態が保たれるものとして、原型と模型の関係を求める。シリコンゴムと鉄筋コンクリートの密度の比は、 $1.253:2.4 \approx 1:2$ となり、又ゼラチンゲルと原地盤の密度の比を $1.0:1.8$ とすれば両者の関係はほぼ一致し、更に地盤模型材料のポアソン比は0.5に近く、実地盤のそれに類似していると考えられることから、トンネル材料とトンネル模型材料のせん断波伝播速度 (V_s) の比約 1:50 より、模型地盤の (V_s) から対応する原地盤の (V_s) を求めると 184m/sec が得られる。一般の地盤より多少固めになっていると考えられる。

模型地盤では実地盤で軟質な表層部約 20m をモデル化するものとし、その下部の $N=50$ 以上の地盤を工学的基盤とし固定することにした。ゼラチンゲルのポアソン比は 0.495、濃度を 10% とした。

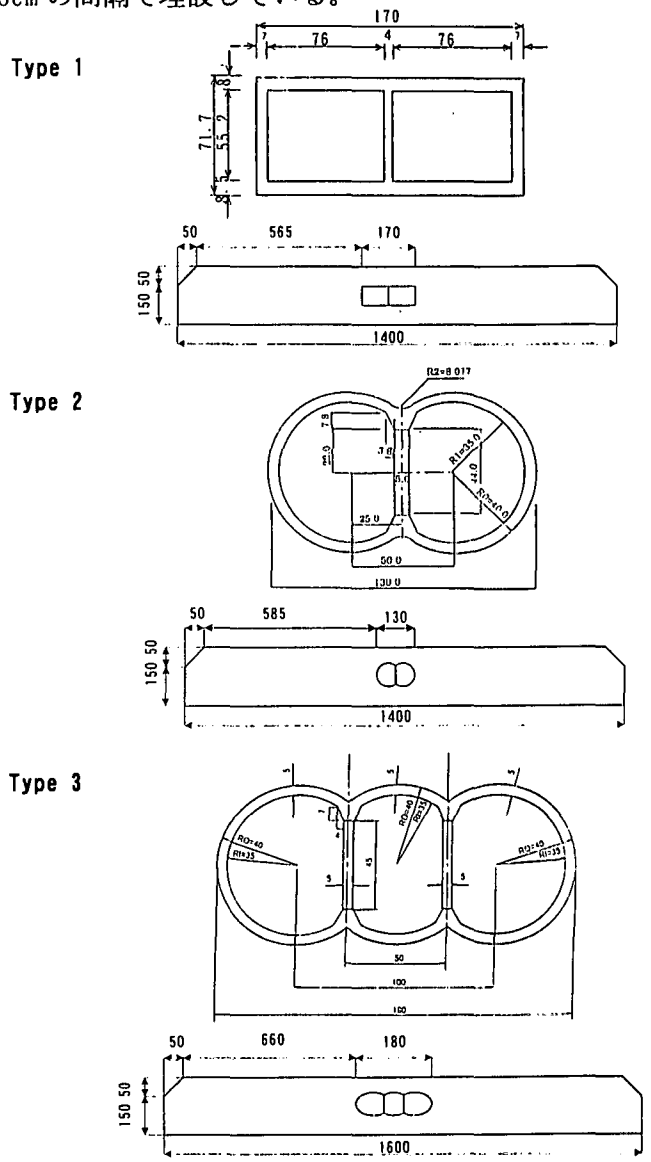


図-1 形状及び寸法 単位 mm

地盤(ゼラチンゲル)				トンネル(シリコンゴム)	
濃度	密度	弾性係数	伝播速度	密度	弾性係数
%	g/cm ³	g/cm ²	cm/sec	g/cm ³	g/cm ²
10	1.06	438	368	1.253	19950

表-1 材料の物性値

3. 実験方法の概要

モデルを振動台に固定し、正弦波で加振して共振実験を行った。モデルの共振振動数を求め、振動台及びモデルの表面に設置した加速度計を用いて加速度値を測定し、共振曲線より応答倍率を算定した。また、トンネル及び地盤内部の振動状態を写真・ビデオでとらえ、トンネルの変形及び変位量を間接的に測定した。なお実験は、弾性範囲で行っている。実験手順として、1. 加振方向はトンネル軸直角方向とし正弦波で加振した。

2. 共振時におけるモデル全体及びトンネル断面、ならびにシャッターを開放にして振動状態を撮影した。また、トンネル周辺地盤に金剛砂をふりかけてこれに光をあて、その反射光からトンネル周辺地盤の振動状態も記録した。

3. デジタルビデオカメラで、現象を1/5倍速で編集して、見やすくした。

4. 実験結果

写真 1~3 は、共振実験で得られたそれぞれのモデルの基本振動状態のぶれ写真で、特にトンネル及びその周辺に注目して撮ったもので、振動モードを確認しやすいように絞りを開放して、数秒間露出している。3モデルで共通に認められたのは、図-1 に示す様にモデルの幅は 1.4m 又は、1.6m になっていることから、モデル全体にわたり、固定してある基盤から表面に向かって 1/4 波長の正弦波形状をした変位モードが現れていることである。トンネル近傍の地盤についてもほぼ同様である。即ちトンネルの高い剛性にもかかわらず隣接する地盤と同様に變形することが確認された。ただし、トンネル上半部での水平変位の性状を詳細にみると、トンネル周辺地盤とトンネルとの間には、わずかではあるが変位に差異が認められる。次に各モデルの變形の特性について記述する。

i) 2線式箱型トンネル

側壁及び中壁、上床版及び下床版の厚みは、おのおの 70cm、40cm、80cm、85cm とし、1/100 でモデル化している。上述の様に周辺地盤の 1 次せん断振動によりトンネル断面は大きなせん断變形を示しているが、この場合側壁の上、下端の変位の差により、側壁はわずかにたわむと共に大きく左右に傾斜している。この傾斜により上床版と側壁との剛結部は回転し、上床版は中壁頂部を軸に回転してその両側のスパン中央部では左右逆対称な上下方向の変位を示している。

全体として弾性体内に埋め込まれた剛構造のせん断變形の場合に類似している。このため上床版に剛結されている中壁は、水平変位を受けるとともに頂部では回転變形を受けることになり、写真-1 に示すような S 字形の變形が生じているものと考えられる。これらは地盤に接している側壁の変位・變形を原因として発生したものと推測される。下床版についても同様なことが推測されるが、變形がわずかであるためこれを確認することが困難である。

(写真-1 参照)

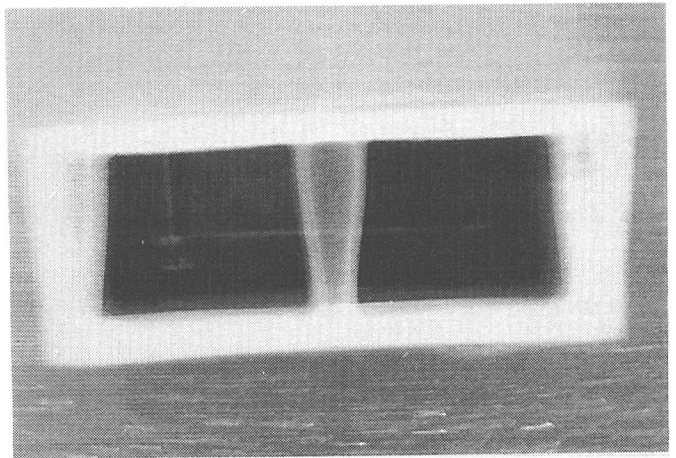


写真-1 2線式箱型トンネルモデル

ii) 2連型円形シールドトンネル

2 連型円形シールドトンネルのセグメントの厚みは 45cm であり、1/80 でモデル化してある。断面についている黒い点は断面の変位を視認し易くするための標的である。地盤が写真に向かって右側へ変位したとき、左側シールドトンネルの外壁の上部は、右下へ変位し、右側シールドトンネルの外壁の上部は逆に右上へ変位しているのが分かる。これは単円シールドトンネルについて別途行った同様な実験の場合の、両側壁の動きに似ている。このことから両シールドトンネルの接合部である中壁部分は、両シールドトンネル変位、變形を合計したものとなり、その結果水平な変位のみがあらわれ回転が生じないと考えられる。箱型 2 線式トンネルの中壁が上床版の回転変位により、頂部で大きな回転變形を受けているのとは比べ、大きな差異であることが分かる。(写真-2 参照)

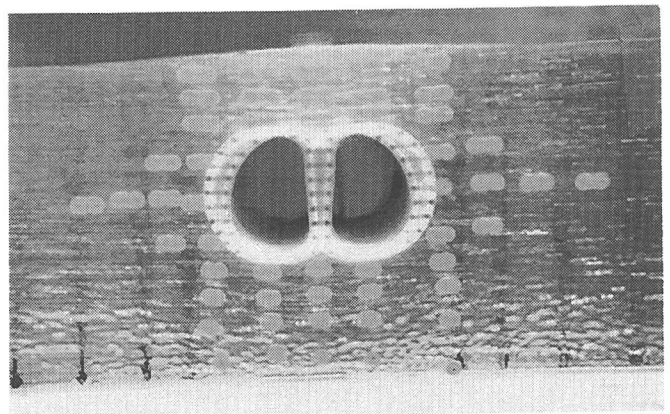


写真-2 2連型円形シールドトンネルモデル

iii) 3連型円形シールドトンネル

3連型円形シールドトンネル断面の挙動については、2連型円形シールドトンネルの挙動と似ている。3つの円形断面のうち、両外側のトンネルの斜め上方部分は、トンネルが右に最大変位した際、左側ではわずかに下方に変位し、右側では逆に上方に変位し一種の揺動運動を示している。またこれは外側シールドトンネル部分にのみ顕著に現れており、左右トンネル上部の内側部と中央トンネルとの接合部ではわずかで、中央トンネル上壁では水平変位が主になりほとんど鉛直変位を生じておらず、また回転もほとんど認められない。これによりトンネル中壁上部では端部が相対的に水平に変位し、かつ回転したときに似た形で変形をすることになる。(写真-3 参照)

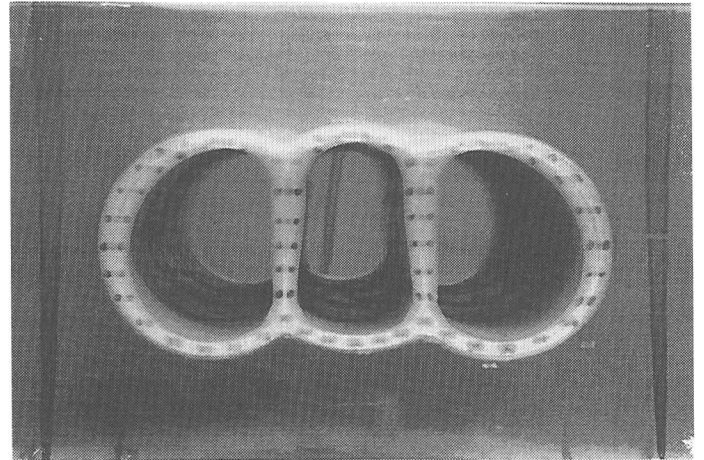


写真-3 3連型円形トンネルモデル

5. 数値解析の方法と結果

解析にあたっては三角形要素を用いた有限要素法を使用し、3種類の実験モデルを取り扱っている。対象は基本振動モードで、振動時の地盤とトンネルの挙動の関係及びトンネルの変形を検討する。数値解析のモデル地盤は平面ひずみ状態を想定し、基盤は剛体、地盤の両端は自由端とした。トンネルは梁要素として解析した。

得られた各モデルの基本振動の変位モードを図-2~4に示す。

図中●印は節点の中立(静止)位置を、隣接する○印は変位後の節点の位置である。この2つを結んだのが振幅にあたる。実験で得られた変位分布は、写真からは、高い精度では計測することはできないが、計算結果と物理的によく対応していることが推定される。

図-2の箱型トンネルに認められる側壁の傾斜、中壁頂部を軸にした上床版の回転変形、中壁の変形の状態等はこのことを示している。図-3、図-4のシールドトンネルの場合についても同様で、シールドトンネル構造の変形、周辺地盤の変形等についても、実験との類似は明瞭である。実験が線形範囲にあり、かつ、基本振動を対象としていることから予想されるところであるが、両者の一致は基本振動モードに対する数値解析の信頼性を示すものと考えられる。故に、トンネルの断面形状により、トンネル構造の地震時における変形の分布が大きく異なることが認められたと考えてよいであろう。

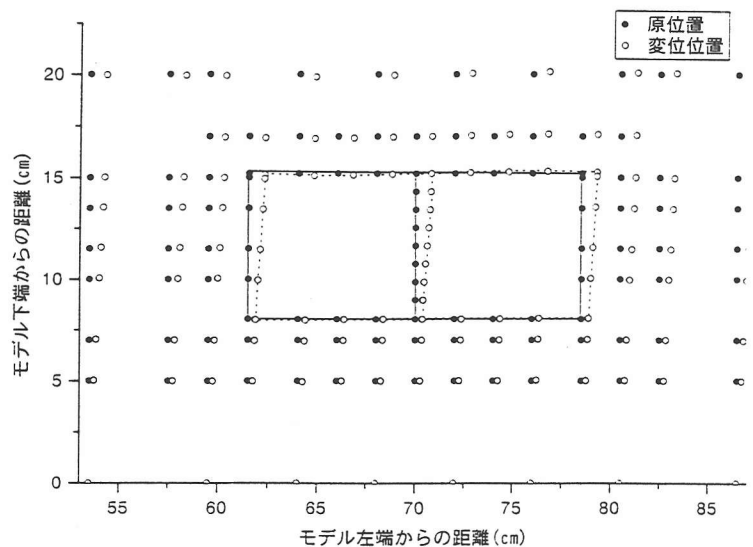


図-2 2線式箱型トンネル周辺部の振幅分布

特に大きな相違を生じたのが中壁の挙動である。トンネル中壁（柱）の耐震強度はトンネルの耐震性の基本をなすものであり、極めて重要である。そこで前述の3種類のモデルケースについて変位と端部の回転について詳しく考察する。ここで基準化であるが、トンネルの影響が小さく、かつ端部の影響が小さいことがみとめられる部分での地表部の振幅を基準とすることにした（基準値は2.5cm）。中壁頂部の回転は、頂部近傍の床版の回転が、中壁上端にそのまま伝えられるものとし、中壁の下部において回転による変形を算出し、これを中壁の上、下端の相対水平変位で除して求めた。これより変位の大きさに無関係にその大きさを比較することができる。

1. 2線式箱型トンネル

中壁上端部の回転角は、端部から左右両側へ2cm離れた2個の節点の変位から算定した。但し鉛直変位は水平変位にくらべて1/10~1/20程度の大きさである。この場合、中壁（柱）の上、下端部の水平変位の差は、1.383cmであった。また、回転による変位差は0.120cmで、水平変位差の9%にあたる。次項の2連型円形シールドトンネルの場合と比して2倍となっている。これを図に示したのが図-5である。図では分かり易くするため、鉛直方向の変位を水平のその2.4倍に拡大してある。図中縦軸に並行な点線は、中壁下端の変位位置から縦軸に平行な線を引いたものあり、破線は同じく変位した上端から引いた垂線である。また、実線は上端の回転による方向の変化を示しているが、縦軸と横軸の尺度が異なっているため正確な方向ではない。（図-5参照）

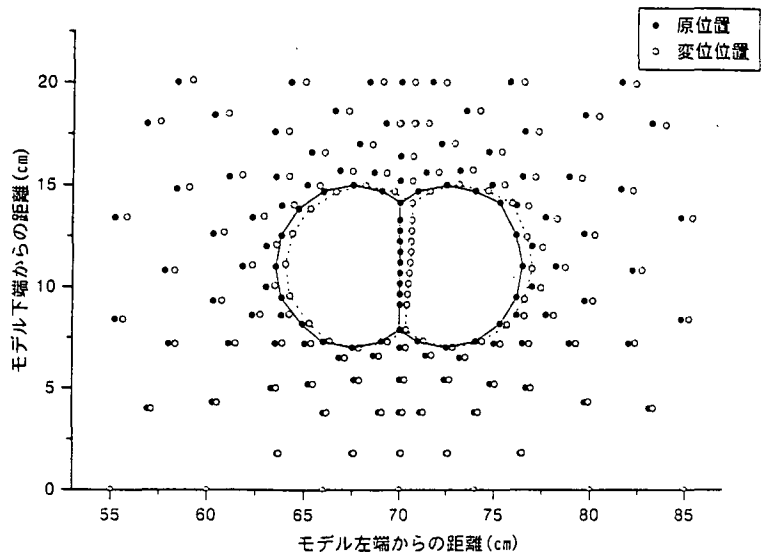


図-3 2連型円形シールドトンネル周辺部の振幅分布

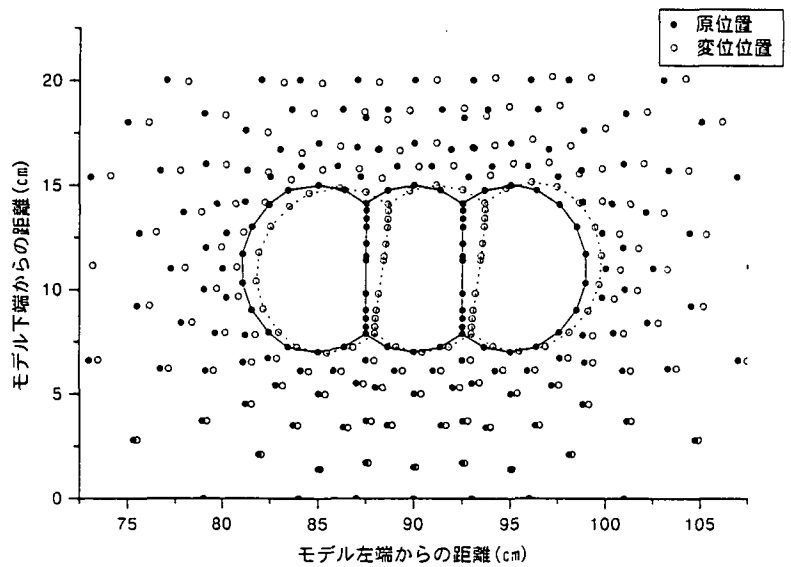


図-4 3連型円形シールドトンネル周辺部の振幅分布

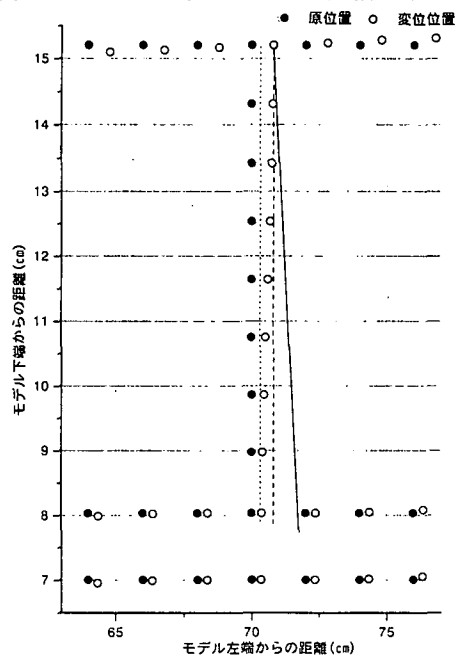


図-5 箱型トンネル中壁の振幅分布

2. 2連型円形シールドトンネル

2連型円形シールドトンネルの場合、中壁（柱）の上端より6mm上床版に入り両側へ1cmはなれた2つの節点の変位から回転角を求めている。このため、わずかながら過大評価する可能性がある。中壁（柱）の上、下端の相対変位は1.094cmであり、中壁（柱）上端の回転による変位は0.049cmであり、水平変位のわずか4.5%である。これは実験の項で述べたように、左右トンネルの接合部で変形が互いに逆となり、相殺された結果と考えられる。（図-6参照）

3. 3連型円形シールドトンネル

2連型円形シールドトンネルの場合と同様に、中壁（柱）上端より上床版へ約7mm、両側へおのおの1.1cmはなれた節点の変位より、中壁上端部の回転を推算した。その結果、中壁の上、下端の相対水平変位は左側中壁で1.348cm、同右側で1.336cmであった。また、中壁（柱）上端での回転による水平変位は左右いずれも中壁（柱）も同じで0.135cmであり、相対水平変位の10%に当たっている。これを図に示したのが図-7である。

6. まとめ

トンネルの耐震性の基本である中壁（柱）の地震時の挙動を、トンネル断面方向の2次元模型の振動実験及びその数値解析で検討した。対象としたのは、箱型トンネル、2連型円形シールドトンネル、3連型円形シールドトンネルの3種類である。また弾性域内の検討である。更に研究の必要があるが、次の結果が得られた。

1. 模型振動実験結果と数値解析結果とはよい対応を示す。
2. トンネル断面の形状と構造は中壁（柱）の挙動に大きな影響を与える。
3. 3種類のトンネルの中壁（柱）の両端の相対水平変位と回転による変位を比較したとき、2連型円形シールドトンネルが最も小さい相対水平変位と回転による変位を示している。

更に非線形領域を含めた検討を行う必要がある。

最後に本研究の実施にあたり、東京大学生産技術研究所小長井一男教授、三神 厚助手、片桐俊彦技術官に協力を受けたことを記して謝意を表します。

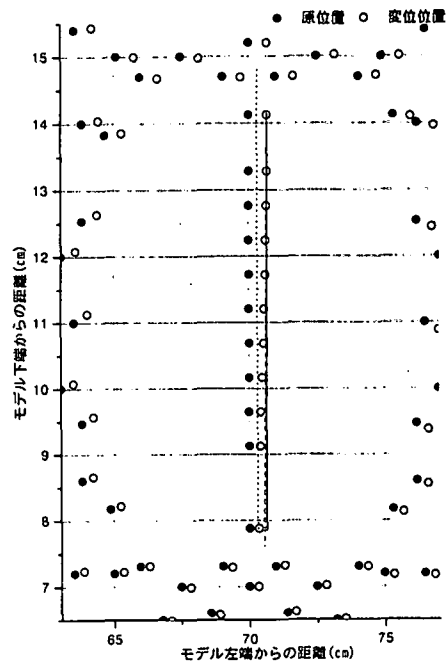


図-6 2連型円形シールドトンネルの振幅分布

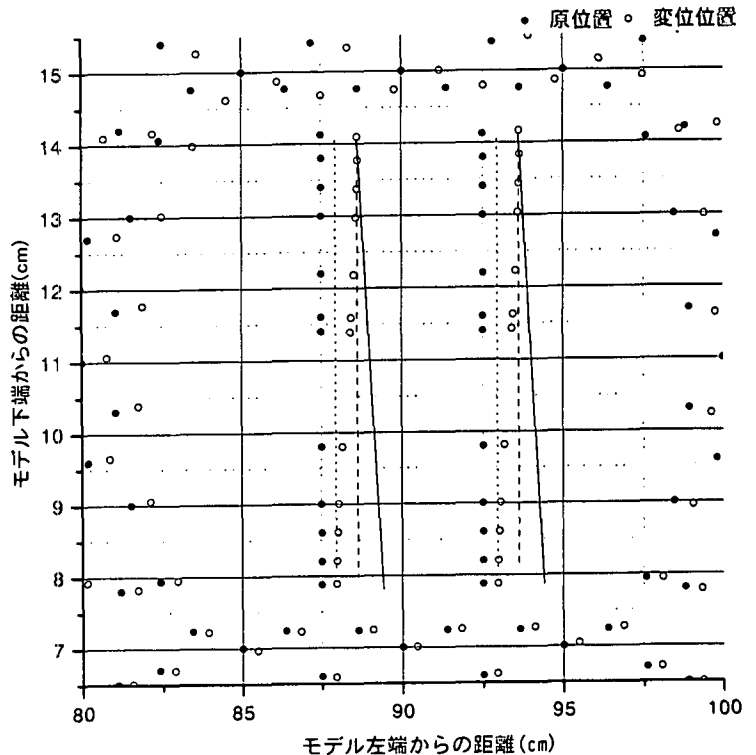


図-7 3連型円形シールドトンネル中壁の振幅分布