

単円・複円形シールドトンネルの模型振動実験概要 および実験結果

THE SHAKING TABLE TESTS ON SINGLE AND MULTI-CIRCULAR FACE SHIELD TUNNEL

室谷 耕輔¹⁾・羽矢 洋²⁾・西村昭彦³⁾・横溝文行⁴⁾・大保直人⁵⁾

Kosuke MUROYA, Hiroshi HAYA, Akihiko NISHIMURA, Fumiyuki YOKOMIZO and Naoto OHBO

In order to get a fundamental data for aseismic design of multi-circular face shield tunnel, shaking table tests have been carried out. The experiment ground was made of silicon, in which the aluminum model shield tunnel was installed. Sine wave and earthquake wave were used for shaking. As a result, the subgrade reaction is very small on the sea gull type segment of multi-circular face shield tunnel. Finally, the subgrade reaction in normal direction reach the maximum when the relative acceleration between the top and bottom of the tunnel is biggest.

Key Words : multi-circular face shield tunnel, shaking table tests, model tests, subgrade reaction

1. はじめに

近年、シールドトンネルは、その使用目的に合わせて合理的かつ経済的な断面が求められるようになり、複数の円形断面を組み合わせて構成する複円形シールドトンネルの施工が増えてきた。この複円形シールドトンネルは従来の単円形シールドトンネルにはない「カモメ」と呼ばれる異形セグメントや、兵庫県南部地震で被害が集中した「中柱」を有しているのが特徴であるが、現状では、耐震設計法は確立されていない。そこで、筆者らは単円形および複円形シールドトンネルを対象とし、その耐震設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的に模型を用いた振動実験を行ったので、その実験結果について報告する。

2. 実験概要

シリコンで作製した地盤中に複円および単円形シールドトンネルの模型（以下、複円模型、単円模型と呼称）を設置し、振動台による正弦波および地震波の加振実験を行った。

実験の流れを図-1 のフローに示す。実験地盤およびシールドトンネル模型作製後、本加振実験に先立って、実験地盤およびシールドトンネル模型の特性を把握するための予備実験を行った。予備実験では実験地盤の1次固有振動数を把握するための共振試験、自由減衰振動波形から実験地盤の減衰定数の推定、およびシールドトンネル模型の等価せん断弾性剛性を算出するための模型の載荷試験を実施した。本加振実験では

-
- | | | |
|--------|------|----------------------|
| 1) 正会員 | 工学修士 | (財) 鉄道総合技術研究所 |
| 2) 正会員 | | (財) 鉄道総合技術研究所 |
| 3) 正会員 | 工学博士 | (財) 鉄道総合技術研究所 |
| 4) 正会員 | | DOT 工法協会・多円形シールド工法協会 |
| 5) 正会員 | 工学博士 | DOT 工法協会・多円形シールド工法協会 |

予備実験の共振試験結果をふまえて入力地震波を決定し、加振を行った。

実験は正弦波による水平、鉛直および水平・鉛直同時加振と地震波による水平加振の計4ケースを複円形模型、単円形模型各々について行ったが、本報告では紙面の都合上、複円形模型、単円形模型の正弦波水平加振結果についてのみ報告する。

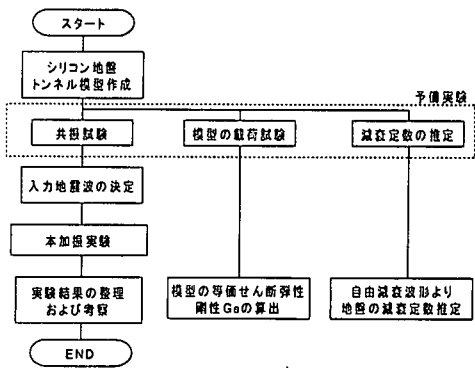


図-1 実験のフロー

2.1. 対象地盤およびシールドトンネル

実験地盤およびシールドトンネル模型は、表層厚18.75m、N値3～4程度の軟弱な粘性土地盤中に土被り約6mで施工された複円形シールドトンネルを想定した(図-2参照)。また、単円形シールドトンネルについても同地盤中に施工されたトンネル(覆工厚0.3m、直径6m)を想定した。

地盤のせん断弾性係数は地震によって地盤が非線形化することを考慮し、せん断弾性波速度を1/2に低減して算出した。

対象としたシールドトンネルを、下端を単純支持した骨組解析モデルで表し、そのモデルの上端に水平力を載荷したときの変位から算出される等価せん断弾性剛性を算出すると、複円形で $G_s = 420\text{tf/m}^2$ 程度であり、地盤の約1/3程度の剛性であった。また、単円形のせん断弾性剛性は $G_s = 430\text{tf/m}^2$ 程度であり、複円形と同程度の剛性であった。

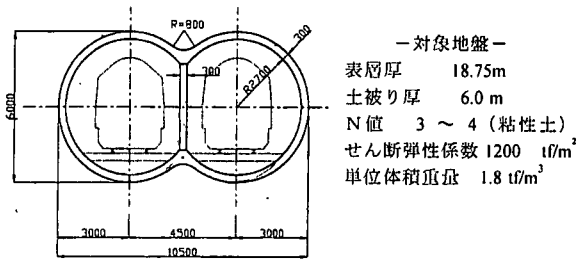


図-2 実験対象シールドトンネルの概要

表-1 地盤物性値

	対象地盤	実験地盤
せん断弾性係数 G (kgf/cm^2)	120.0	1.2
単位体積重量 γ (tf/m^3)	1.8	1.0
表層地盤厚 (m)	18.75	0.75

2.2. 実験地盤

実験に用いる地盤は相似則に基づき、シリコンで作製した(表-1参照)。

相似則⁹⁾は構造物の変位、応力について実験を行う場合、弾性範囲内においては構造物の幾何学的相似の縮尺を満足させればよいので、実験は構造物の縮尺および等価せん断弾性剛性比を満足するように設定した。

実験地盤の寸法は相似則に基づき、高さ750mmで作製し、模型は土被りが240mmになる位置に設置した。また、実験地盤の幅は2000mm、奥行きは700mmで作製した(図-3参照)。なお、実験地盤は境界の影響を最小限に抑える配慮として両端の上部を角切りした。

地盤中にはシールドトンネル模型近傍と遠方位置に加速度計をそれぞれ5個ずつ深さ方向に設置し、水平・鉛直方向の加速度を計測した。また、トンネル模型内の上下、左右および振動台にも加速度計を設置した。

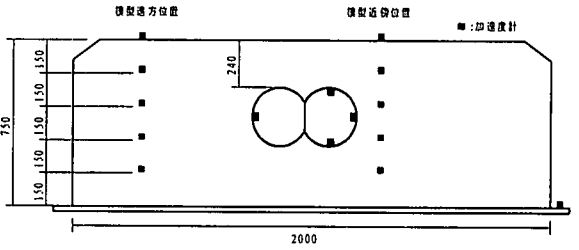


図-3 実験地盤の寸法および加速時計の設置位置

2.3. シールドトンネル模型

シールドトンネル模型は相似則に基づいて、複円模型が長径約450mm、短径240mm、中壁厚10mm、単円

模型が直径 240mm に作製した (図-4 参照)。模型には、アルミ版で作製した内フレームに法線方向の地盤反力および接線方向のせん断力を同時に計測することが出来る二方向ロードセル²⁾を受圧板を介して計測できるように複円形模型に 20 個、単円形模型に 12 個設置した。なお、ロードセルは弾性範囲が大きいリン青銅により、受圧板はアルミ版により各々作製した。また、複円形模型の中壁は 10mm 厚の硬化ゴムで作製し、ひずみゲージを前後、表裏に計 8 枚貼付した。

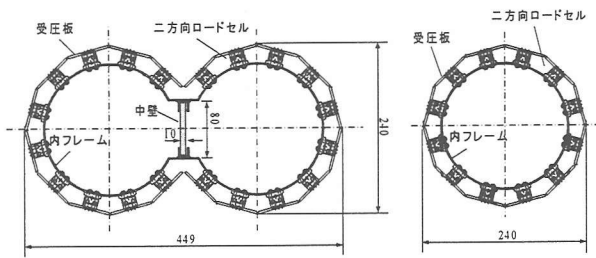


図-4 シールドトンネル模型断面図

模型の完成状態を写真-1 に示す。模型は境界の影響を受けないように、奥行き方向 70cm のうち前後 20cm をダミー板で、中間 30cm を計測用の受圧板で構成した。また、シリコン地盤にトンネル模型を設置した全体概要を写真-2 に示す。

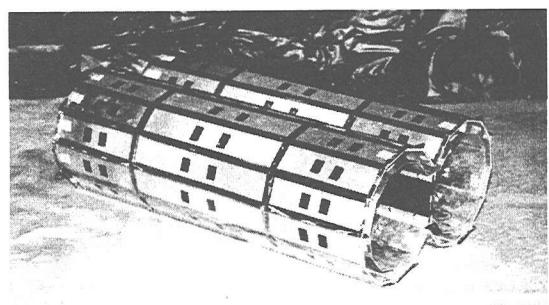


写真-1 シールドトンネル模型 (複円形)

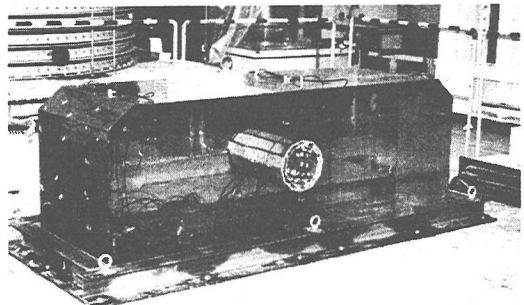


写真-2 実験地盤全体概要

2. 4. 予備試験

(1) 共振試験

実験地盤の 1 次固有振動数を把握するために共振試験を行った。試験は振動台に設置した実験地盤に正弦波 2.0 ～ 5.0Hz の振動数範囲で加振を行った。その結果を図-5 に示す。この図から実験地盤の 1 次固有振動数は 3.7Hz であることが確認できた。

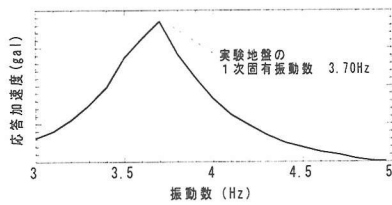


図-5 共振曲線

(2) 自由減衰振動波形から実験地盤の減衰定数の推定

実験地盤を強制的に変形させた後の自由減衰振動波形 (図-6 参照) から実験地盤の減衰定数を推定した。この減衰波形から得られる対数減衰率 Δ から減衰定数 D を以下のように算出した。その結果、実験地盤の減衰定数は 2.5% と推定できた。

対数減衰率 Δ の平均値 = 0.158

$$\begin{aligned} \text{減衰定数 } D &= (\Delta^2 / (4 \pi^2 + \Delta^2))^{1/2} \\ &= 0.025 \text{ (2.5\%)} \end{aligned}$$

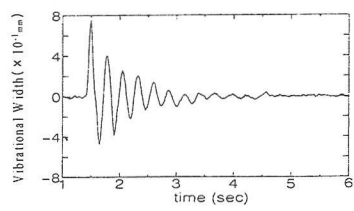


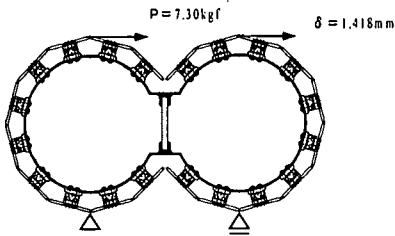
図-6 自由減衰振動波形

(3) トンネル模型の載荷試験

実験に用いたトンネル模型の等価せん断弾性剛性を把握するために、図-7 に示すような載荷試験を行った。載荷試験は、単純支持したトンネル模型の上端を水平に引っ張り、模型上端位置の変形量を計測した。試験結果から複円形模型の等価せん断弾性剛性を算出すると、 $G_s = 0.40 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であることが確認され

た．実験の対象とした実シールドトンネルの相似則を考慮した等価せん断弾性剛性は 0.42kgf/cm^2 程度であり，作製した複円形模型は概ね目標の剛性であることが確認できた．また，単円形模型も概ね目標とする剛性で作製されていることを確認している．

FLUSH などの等価線形化法による動的解析プログラムは通常，構造物を線形部材として計算することしかできないため，構造物の部材は等価せん断弾性剛性を用いることが多い．本報告の続編では載荷試験結果より得られた模型の等価せん断弾性剛性を用いて FLUSH による実験結果のシミュレーションを行っている．



図－7 載荷試験概略図

表－2 実験ケース

トンネル形式	入力地震波	加振方向
複円形	正弦波 4.0Hz	水平
		鉛直
単円形	地震波 (PI GL-83m)	水平・鉛直
		水平

2. 5. 本加振実験

(1) 実験ケースと入力地震波

実験は正弦波による水平，鉛直および水平・鉛直同時加振と地震波による水平加振の計 4 ケースを複円形模型，単円形模型各々に行った．(表-2 参照) シリコン部材は線形部材であるが，共振状態がシリコン地盤の非線形化を引き起こす恐れがあることや，応答値の増幅特性にも影響があると思われるため，実験に用いた正弦波の振動数を 3.7Hz から少しずらして 4.0Hz とした．また，その振幅は最大 50gal とした．地震波はボートアイランド GL-83 m で観測された地震波を用い，その振幅および時間軸は相似則に基づき調整を行った．

(2) 計測項目

本実験で行う主な計測項目を以下に示す．

- トンネル模型に設置した二方向ロードセルで計測される法線方向の地盤反力および接線方向のせん断力
- 実験地盤内および振動台に設置した加速度計によって計測される地盤の応答加速度および入力加速度
- トンネル模型に設置した加速度計によって計測される模型の応答加速度（模型の変形量算出に用いる）
- 複円形模型の中壁に貼付したひずみゲージで計測される動ひずみ（中壁の曲げモーメント算出に用いる）

3. 実験結果

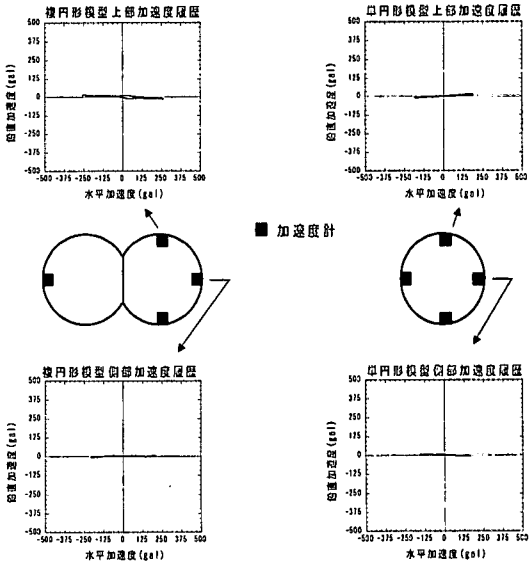
3. 1. トンネル模型の加速度履歴分布

正弦波水平加振時の模型の加速度履歴分布は，複円・単円形模型ともに鉛直加速度の応答がほとんどなく，回転を起こしていないことが確認できる (図-8 参照)．

複円形模型の上下部に設置した加速度計の最大相対加速度は 138gal (上部 267gal，下部 129gal) であり，最大相対変位に換算すると $\delta = 0.22\text{cm}$ であった．一方，単円形模型の最大相対加速度は 98gal (上部 196gal，下部 98gal) であり，最大相対変位は $\delta = 0.16\text{cm}$ であった．

3. 2. 地盤の最大加速度分布

複円形模型近傍位置の地表面で計測された最大



図－8 トンネル模型の加速度履歴分布

加速度は約 380gal であり、変位に換算すると約 0.60cm であった。一方、模型遠方位置の地表面で計測された最大加速度は約 430gal（変位で約 0.68cm）であり、模型近傍位置で計測された加速度より大きい加速度であった。これは、模型遠方位置で計測された加速度は、実験地盤の両端を切り欠いたにもかかわらず、境界の影響を若干受けて大きくなったと思われる。

単円形模型の模型近傍位置地表面の最大加速度は約 280gal であり、変位に換算すると約 0.44cm であった。また、模型遠方位置の加速度は複円形模型と同様に境界の影響を受けて模型近傍位置の加速度より若干大きい値を示した（地表面で加速度約 330gal, 変位約 0.52cm）。

3. 3. 最大せん断力および最大法線方向地盤反力分布

正弦波加振時に作用する最大せん断力は、複円・単円形模型ともに上下面、左右面に大きなせん断力が発生している。しかし、斜め上方、下方 45° の面に発生するせん断力は小さく、また、複円形模型のカモメ部における発生せん断力も小さいことが確認できた。

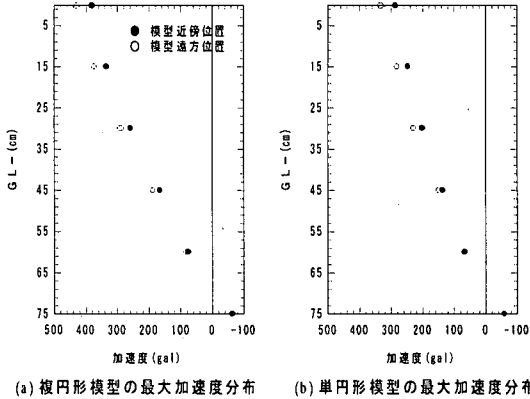
一方、最大法線方向地盤反力は上下面の地盤反力の大きさが左右面と比較して大きく現れることが確認できた。また、最大法線方向地盤反力においてもカモメ部に発生する地盤反力は小さいことが確認できた。

3. 4. 地盤反力の経時変化

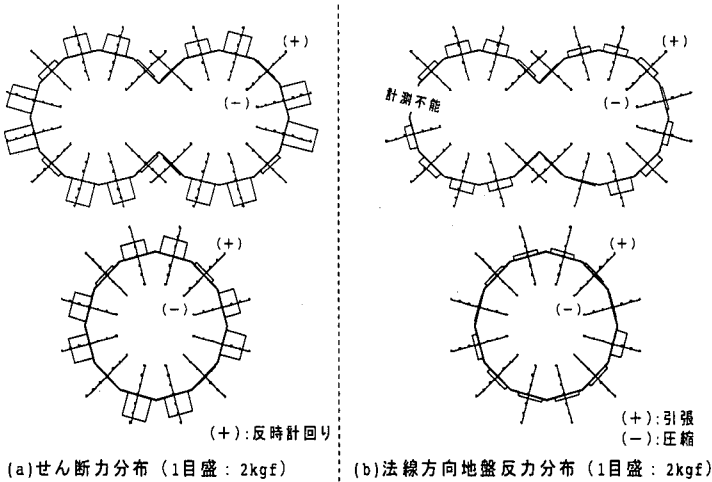
複円形模型の上端、下端の加速度の差（以下、相対加速度と呼称）の時刻歴図、複円形模型の地盤反力経時変化を図-11、12 に示す。

地震時におけるせん断力は理論的に変形の方に応じて図-13 のような方向を示すことが考えられるが、図-12 からせん断力は変形に応じて理論と同様の方向を示すことが確認できた。

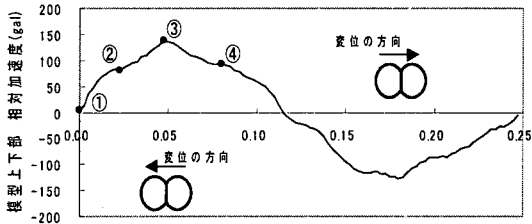
また、模型の相対加速度が最大となる時刻では、地盤の反力も最大となる。これは、図-12 から法線方向地盤反力は模型の相対加速度が 0 の時刻（図中①参照）に反力は最小を示し、相対加速度が最大時（図中③参照）に反力は最大を



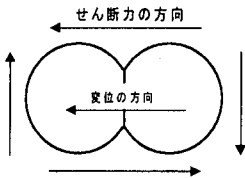
図－9 地盤の最大加速度分布



図－10 最大地盤反力図



図－11 模型上下部の最大相対加速度時刻歴図



図－13 せん断力の方向

示していることから確認できる。しかし、せん断力の最大を示す時刻は相対加速度最大時と約 45° の位相差があることわかった（図中では④の時刻で最大を示している）。この現象については、現在、動的解析等により、検討を進めているところである。

3.5. 中壁の曲げモーメント分布

ひずみゲージは中壁の片面に上下端から 20mm の位置に 2 枚ずつ前後に貼付しているため、それぞれの平均値を採用した。計測結果から算定された曲げモーメントはひずみゲージの位置で上下端ともに約 $1.09\text{kgf}\cdot\text{cm}$ であった（図-14 参照）。

4. まとめ

○地震時におけるせん断力は斜め上方、下方 45° 位置ではほとんど発生していなかった。また、法線方向地盤反力は、左右面に比べて上下面の方が大きな値を示すことが確認できた。

○複円形模型のカモメ部における地盤反力は、せん断力、法線方向地盤反力ともにほとんど発生していないことが確認できた。

○せん断力の方向は理論と同様の方向を示すことが確認できた。

○模型の相対加速度が最大時に法線方向地盤反力は最大値を示すことが確認できた。しかし、せん断力の最大値発生時刻はずれることがわかった。

最後に、本実験を実施するにあたり、電力中央研究所地盤耐震部の当麻上席研究員には多大なるご協力をいただきました。紙面を借りて篤くお礼申し上げます。

一参考文献一

- 1) 江守一郎・D.J シューリング：模型実験の理論と応用，技報堂，1973
- 2) 川島一彦編著：地下構造物の耐震設計，鹿島出版会
- 3) 佐藤・龍岡・生原・山田：2 方向ロードセルの試作とその特性について，第 38 回土木学会年次学術演会講演概要集，昭和 58 年 9 月

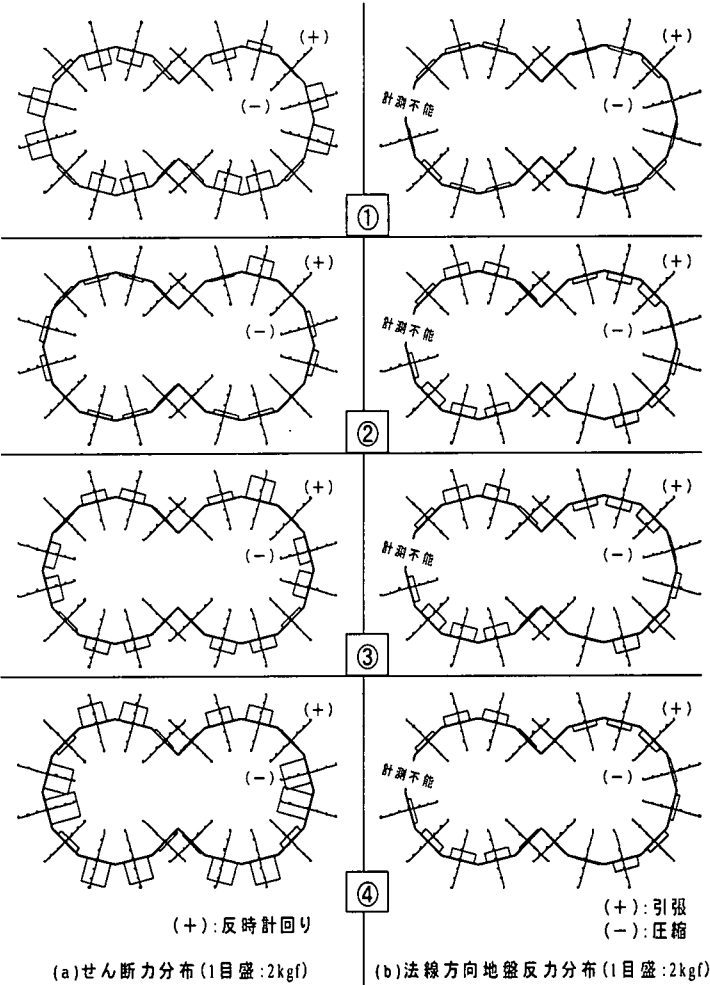


図-12 地盤反力経時変化図

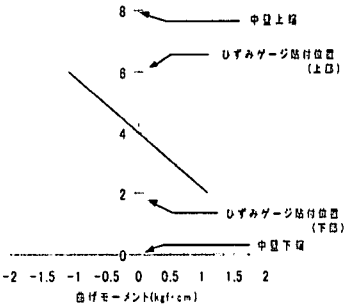


図-14 中壁の曲げモーメント図