

単円・複円形シールドトンネル模型振動実験の解析

ANALYTICAL SIMULATIONS OF SHAKING TABLE TEST OF SINGLE AND MULTI-CIRCULAR FACE SHIELD TUNNEL

西山誠治¹⁾・加藤淳一²⁾・西村昭彦³⁾・鈴木猛康⁴⁾・浦野和彦⁵⁾

Seiji NISHIYAMA, Jyunichi KATOU, Akihiko NSHIMURA, Takeyasu SUZUKI, Kazuhiko URANO

In order to get a fundamental data for seismic design of multi-circular face shield tunnel, shaking table tests have been carried out. As a result, the subgrade reaction is very small on the sea gull type segment of multi-circular face shield tunnel. Here, Analytical simulation have been carried out using two-dimensional dynamic FEM analysis and aseismic deformation method. And also the relation between subgrade reaction and stress of soil element is studied.

Key Words : shield tunnel, multi-circular face shield tunnel, dynamic, aseismic design, subgrade reaction

1. はじめに

複円形シールドトンネルの地震時挙動の把握のために、シリコン地盤における単円、および複円形シールド模型の振動実験を実施した¹⁾。

ここでは、2次元有限要素法による実験結果のシミュレーションを実施し、トンネルに作用する地盤反力とそれに隣接する地盤の応力状態の関係を調査し、実験結果をよく説明できることが分かった。次に、応答変位法による解析を行い、地盤ばねを適切に設定することにより、実験を精度よく説明できることが分かった。これらにより、複円形シールドトンネルの動的挙動を解明し、耐震設計に用いる解析手法に関する基礎資料を得ることができた。

2. 2次元有限要素解析「FLUSH」によるシミュレーション

2.1. 解析モデルおよび解析に用いる諸定数

(1) トンネル構造物

FEM解析モデルを図1に示す。今回の実験に用いた模型シールドトンネルは、文献1)に示すように、受圧板+2方向ロードセル+内フレーム+中壁からなる複雑な模型構造となっている。これを、シールドトンネル外周面を軸線とした弾性梁要素によりモデル化した。

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

複雑な模型を、ロードセル、受圧板や内側フレームまで、あるがままに詳細にモデル化することも考えられるが、①模型地盤の全体的な挙動、受圧板に作用する地盤反力の把握には、トンネル構造としての挙動が模型と等価であれば表現できること、② 詳細な解析モデルでは、解析モデルの作成が煩雑となることなどから、簡易なトンネルモデルとした。

断面諸元は、予め実施したトンネル下床を固定して、上床に水平荷重を載荷する水平載荷試験¹⁾の変位と、同じように載荷して計算から得られる解析モデルの変位が等価となるように、内フレーム部材の断面剛性を2倍することにより設定した。解析に用いる断面諸元を表1に示す。なお、外周部材および中壁は、一様な断面諸元を有する梁とし剛域等は考慮していない。

断面剛性を高める理由は、軸線を外側でモデル化したために、内側でモデル化した場合に比較して構造全体系の剛性が低下すること、ロードセルの取付けの拘束効果により梁剛性が高まるためである。

(2) シリコン地盤

シリコンのせん断弾性係数G、ポアソン比 ν 等の物性値は、試験試料を用いた物性試験により把握している。しかし、解析では振動実験で得られた地盤の共振振動数(3.70Hz)と基盤入力加速度に対する地表面加速度の比に基づいて、シリコン物性値を若干調整した。解析に用いたシリコン物性値を表2に示す。

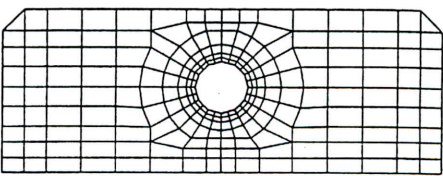
なお、シリコン地盤の境界条件は、実験の条件に合わせて、側方は自由、底面は固定とした。

2.2. 解析結果

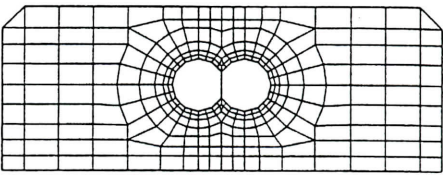
(1) 地盤の応答性

実験同様に、4Hzの水平正弦波加振を行った結果を表3に示す。地盤の固有振動数、応答加速度はよく一致しており、設定した物性値の妥当性が確認できる。

つぎに、遠方位置と近傍位置における地盤水平加速度(最大値)の深さ方向分布の比較結果を、図2、図3に解析値のコンター図と共に示す。解析結果と実験結果は良好に一致していること、また、トンネル上部は、構造物の影響で遠方地盤より応答加速度の小さいこと、側部では側面の影響で加速度の大きいことが分かる。



(a) 単円形



(b) 複円形

図1 FEMモデル

表1 部材諸元

		E (tf/m ²)	A ¹⁾ (m ²)	ν	I ¹⁾ (m ⁴)	G (tf/m ²)	h	γ ²⁾ (tf/m ³)
単円	〈体	7.0E6	0.001	0.345	1.70E-10	2.6E6	0.03	63.6
複円	〈体	7.0E6	0.0012	0.345	2.90E-10	2.6E6	0.03	53.4
	中柱	8.7E2	0.01	0.5	1.70E-5	2.9E2	0.03	1.43

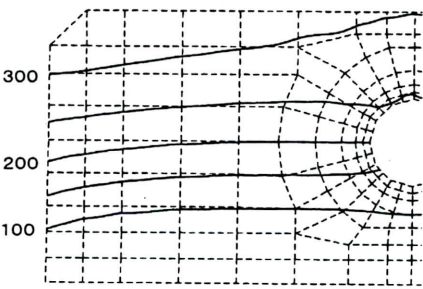
1)単位奥行き当たり(1/m). 2) γ はロードセルおよび受圧板を考慮した換算単位体積重量

表2 シリコン地盤の物性値

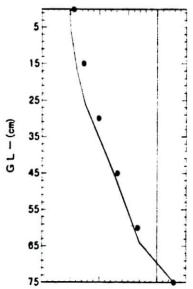
		試験値	解析に用いる物性値
せん断弾性係数 G	kgf/cm ²	1.20	1.37
減衰定数 h	%	2.5	9.0
ポアソン比 ν	—	0.49	0.49
単位体積重量 ρ	kgf/cm ³	0.97	0.97

表3 実験および解析結果

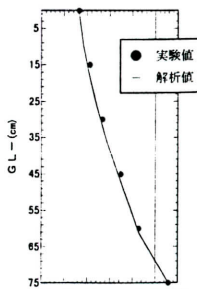
		実験結果	解析結果
単円形	地盤の固有振動数 F_i	Hz	3.70
	加振加速度 A_i	gal	59.4
	応答加速度(遠方地盤) A_{rf}	gal	332.6
	応答加速度(近傍地盤) A_{rn}	gal	286.9
複円形	地盤の固有振動数 F_i	Hz	3.71
	加振加速度 A_i	gal	64.7
	応答加速度(遠方地盤) A_{rf}	gal	428.7
	応答加速度(近傍地盤) A_{rn}	gal	379.3



(1) 加速度コンター図 (gal)



(2) 近傍



(3) 遠方

図2 最大加速度分布 (単円)

2) 地盤反力分布

解析によって得られた地盤反力を、単円および複円形について、図 4、図 5にそれぞれ示す。なお、地盤反力の値は、梁要素に接する地盤要素の発生応力を、受圧板の法線および接線方向に作用する応力成分に変換し、これに受圧板の面積を乗じることににより算出した。

接線方向最大せん断力分布について、実験では上下左右方向が大きく、斜め上 45 度、斜め下 45 度方向（カモメ部も含む）における地盤反力の値が小さい、といった発生モードが得られているが、本解析によっても、この傾向を良好にシミュレートできていることが分かる。

法線方向最大地盤反力分布については、実験・解析の間に若干差異がみられるものの、カモメ部における地盤反力の発生が小さいという傾向は、よく一致する結果となった。

なお、絶対値そのものに関しては、解析値・実験値の間にある程度の差異が生じた。これは、実験模型では、1 枚の受圧板はロードセルを介して

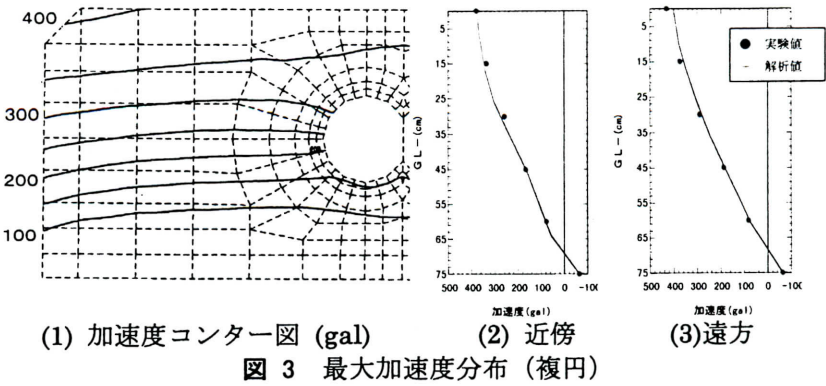
内フレームで接続されており、地盤との接触面では隣接する受圧板の影響を直接的に受けることはない。しかし、今回の解析モデルでは、外周面を連続した梁要素でモデル化したため、受圧板としての梁要素は端部で隣接する受圧板と剛結合されており、受圧板は隣接する受圧板の影響を直接的に受けることが原因と思われる。

2.3. 地盤の応力状態

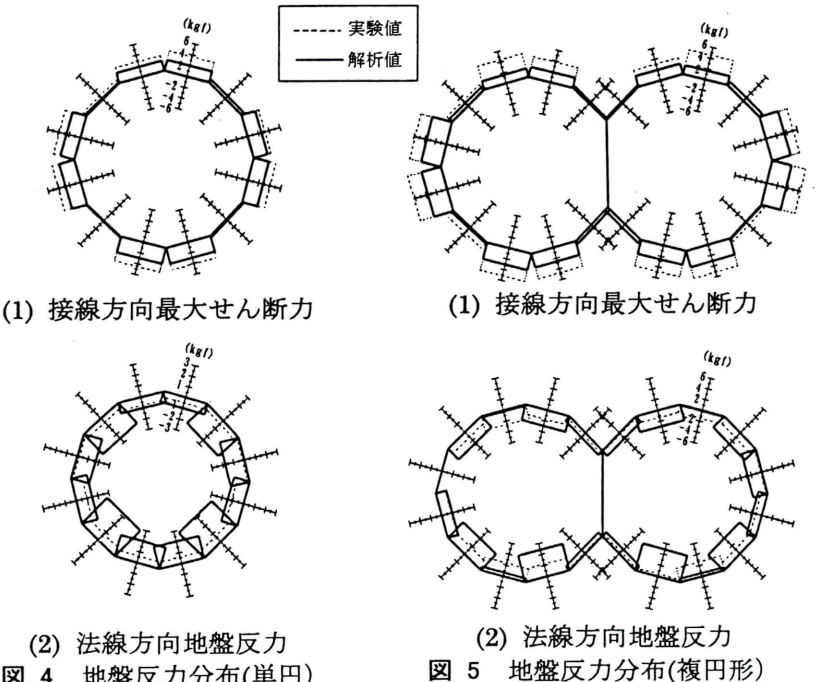
ここでは、実験結果および解析で得られたトンネルに作用する地盤反力と、地盤の応力状態との関係について調査する。なお、以下の説明には 図 6に示す名称を用いる。

(1) 接線方向せん断地盤反力

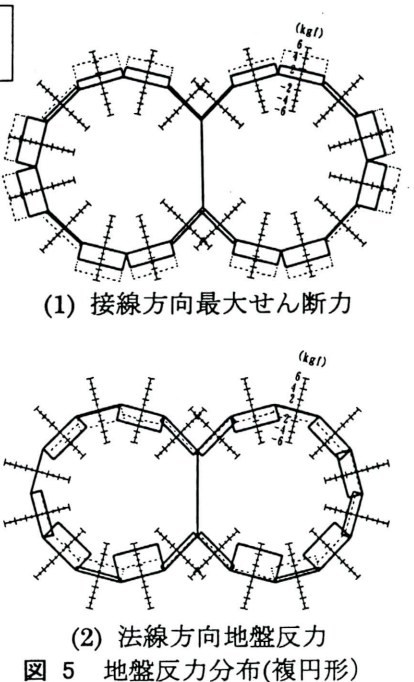
主応力図ならびにモービライズ面（せん断破壊を起こす面）と面上のせん断応力の大きさをベクトル表示したものを、図 7～ 図 10に示す。地盤およびトンネルの変形方向は、左方向である。ただし、これらは、初期自重は考慮せずに、加振時に発生する増分応力値より算出した。



(1) 加速度コンター図 (gal) (2) 近傍 (3) 遠方
図 3 最大加速度分布 (複円)



(1) 接線方向最大せん断力 (2) 法線方向地盤反力
図 4 地盤反力分布(単円)



(1) 接線方向最大せん断力 (2) 法線方向地盤反力
図 5 地盤反力分布(複円形)

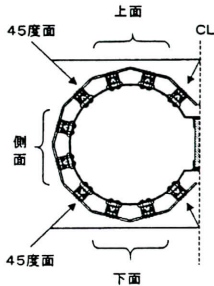


図 6 受圧板名称

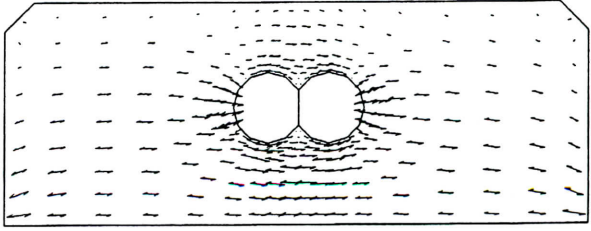


図 7 モービライズ面応力 (複円形)

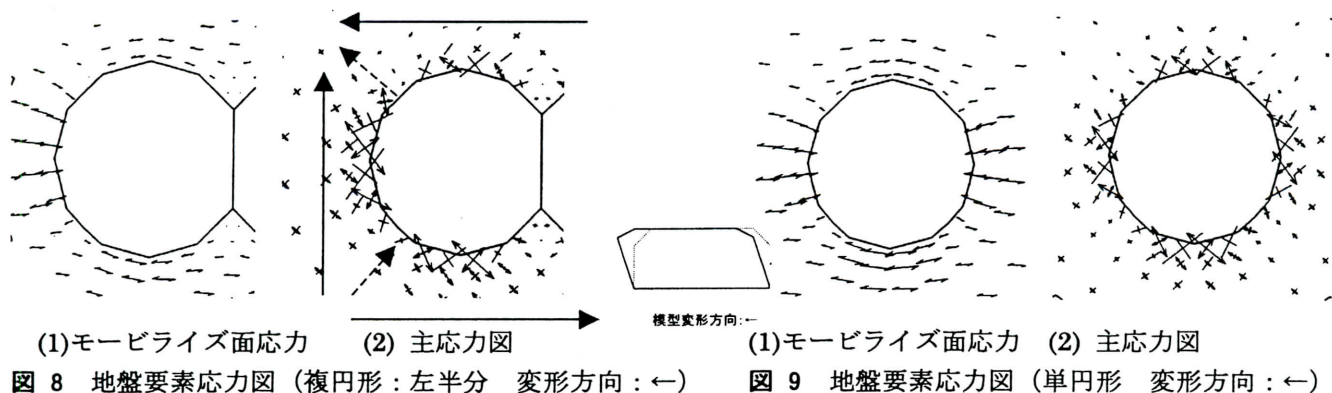
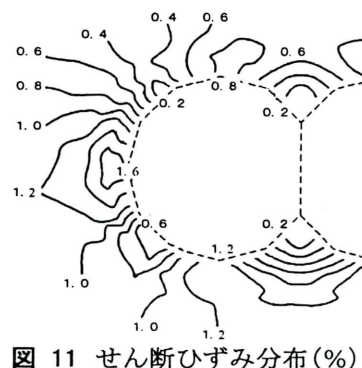
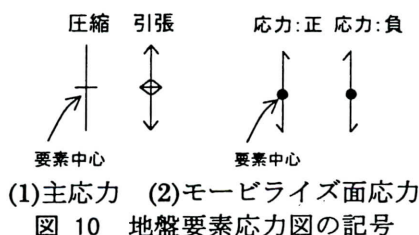


図 7より, トンネル側面では, 同深度の遠方地盤よりもせん断変形量は大きいことが分かる. 図 8, 図 9より, トンネルの上下面および側面で地盤のせん断力の大きくなることから, 受圧板に作用するせん断方向地盤反力が, 上下面と側面で大きくなる傾向と合致している.

さらに, シリコン地盤はシリコン地盤底面では水平方向にせん断変形しているが, トンネル 45 度面では, モービライズ面が 45 度方向を向き, 絶対値も小さくなることから主応力差の小さい状態で圧縮および引張り (常時応力を考慮すると圧縮応力の減少) 状態にあることが分かり, 測定されたせん断方向地盤反力が小さいことに対応している. なお, これらの地盤反力状態ならびに地盤応力状態は, 図 8(2)に示す地盤のせん断力とその方向成分を考慮することで説明できる.

また, 複円形のカモメ部ではせん断応力値が小さい. 図 11のせん断ひずみ分布からも, カモメ部の地盤のせん断変形量は小さく, この部分の地盤はセグメントに拘束された状態のままトンネルと一体となって挙動していることが分かる.



(2) 法線方向地盤反力

各受圧板は 2 要素の地盤要素と接しているが, 図 8(2), 図 9(2)の主応力図によると, トンネルの上下面および側面の受圧板では地盤要素の一方が圧縮, 一方が引張り状態であるのに対し, 45 度面では 2 要素とも下部で圧縮, 上部で引張りとなっている. このことにより, 解析では 45 度面の法線方向地盤反力が大きくなったと思われる. 実験では上下面および側面の受圧板は回転方向の挙動を示していると考えられ, このことが, 今回の外周面を軸線としたトンネルモデルでは, 法線方向の地盤反力の実測結果との定量的な整合が好ましくなかったことが原因と思われる.

2.4. 地盤の剛性比の影響

地中構造物の地震時挙動は, 地盤と構造物の剛性比により変化することが指摘されているが, 実験では限られたケースしか実施できなかった. それを補足するため, 複円形シールドを対象に, トンネルの剛性の変化が, トンネルの動的挙動に及ぼす影響を解析的に実施する.

シミュレーション解析に用いた初期のトンネルモデルの剛性を EI_0 とし, トンネルの剛性を $EI=0.01EI_0, 10.0EI_0$ として解析を行った. この結果, 中壁の層間変形量は, EI_0 で 0.28cm が $0.01EI_0$ で 0.30cm, $10.0EI_0$ で 0.18cm となった. この時点の主応力図を図 12に示す. なお, 図中には地盤のせん断力の概念も併せて示している.

これより, 通常の箱型断面で指摘されているように, 構造物と地盤の剛性比により地盤反力状態が異なるこ

とが分かる。10.0EI₀ では、構造物が地盤よりも相対的に硬く地盤の変形に構造物が抵抗するため、左下 45 度面では圧縮地盤反力の大きくなること、左上 45 度面では引張地盤反力の大きくなることと分かる。一方、0.01EI₀ では、これらが極端に小さくなっており、トンネルが地盤に追従した挙動を示し、トンネルと地盤との相対変位が少ない状態であることが分かる。

また、図 8(2)と同様に、45 度面での主応力差は小さく、この部位の接線方向地盤反力が小さいことは、剛性比に関わらない傾向と考えられる。一方、法線方向地盤反力は、構造物の剛性が大きくなると、大きな反力の生じることが予想できる。

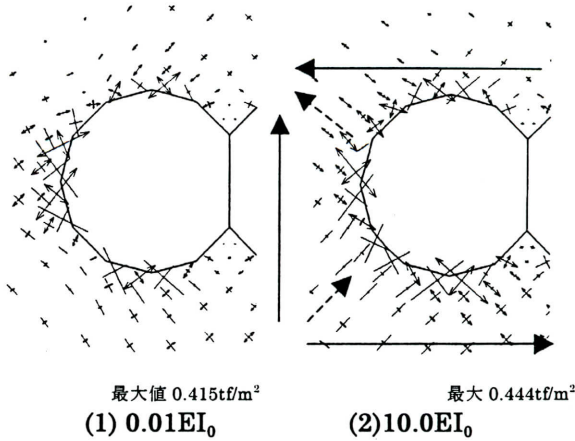


図 12 主応力図（複円形：左半分 変形方向：←）

2.5. 単円形および複円形モデルの比較

実験においては、単円形と複円形では、受圧板で地盤反力を計測している。解析では、外周を梁要素でモデル化を行ったため、地盤反力を受けた結果として発生する内フレームの応力状態を推察することができる。

ここでは、簡易的に、断面力の性状を比較することにより、単円形と複円形の挙動の違いを把握する。

単円形および複円形トンネルの発生断面力を、それぞれの最大値で正規化して、図 13、図 14に示す。これより、単円形と複円形の外周部分は、同様の断面力状態であり、カモメ部分は外周部よりも小さな断面力分布であることが分かる。

これより、中壁部分を除けば、単円形と複円形の地震時における断面力の発生状況の違いは少ないことが分かる。

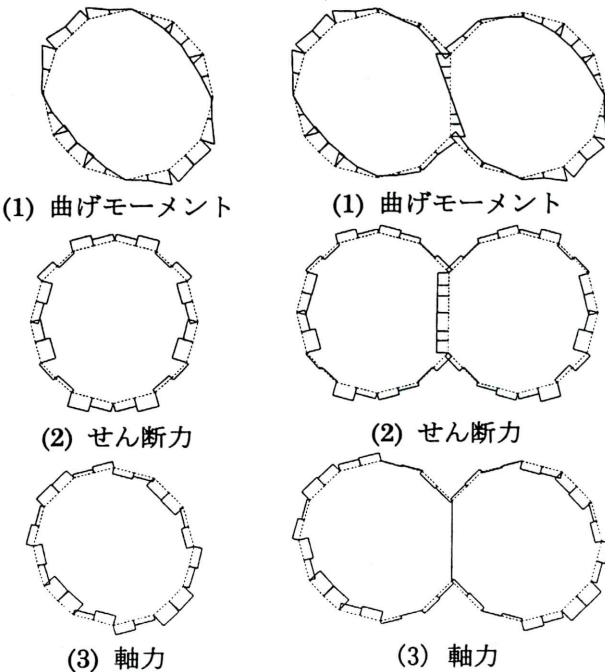


図 13 断面力図（単円） 図 14 断面力図（複円形）

3. 応答変位法による実験シミュレーション

3.1. 応答変位法の解析モデル

地下構造物の横断面の耐震検討には、一般的に骨組みモデルの応答変位法を用いることが多い。しかし、複円形シールドでは、現段階では、設計手法として確立された応答変位法による解析手法が提案されていない。

一方、一般的な規模の地下構造物については、構造条件・形態に関わらず、サブストラクチャー法に基づく手法により、適切な地盤ばねを用いて、自然地盤系の周面せん断力、地盤変位および構造物に作用する慣性力を考慮すれば、地震時挙動の解明は可能である²⁾。ここでは、上記手法に基づいた応答変位法による解析を実施する。

応答変位法では、地盤ばねの評価が重要である。事前検討として、軟弱粘性土地盤における実物の複円形シールドトンネルを想定した FLUSH および応答変位法の比較解析により、地盤ばねのパラメータスタディを実施した。この結果、静的 FEM に強制変位を与え地盤ばねを算出する手法³⁾および鉄道の設計標準による算定式⁴⁾の適用性が高いと判断した。ここでは、鉄道基準による地盤ばねを用いる。これは、矩形トンネル設計用の地盤

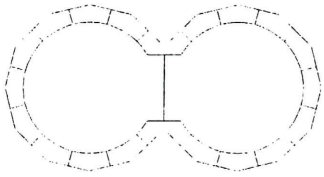


図 15 応答変位法解析モデル

ばねであり、側壁、および床版で異なる値を用いる。ここでは、トンネルの中心から 45 度位置を上下床版用および側壁の境界として、それぞれのばねを法線方向、接線方向に設定した。

部材剛性および断面積は、実験報告¹⁾に示す諸元と材料定数から決定し、ロードセル部分は剛部材とした。

応答変位法の外力となる地盤の水平変位量は遠方位置の加速度の 2 回積分により算出した。自然地盤の周面せん断力は、上記で求めた地盤変形分布からせん断ひずみを算出し、これに地盤のせん断弾性係数を乗じることにより算出した。慣性力は模型重心位置の加速度より算出した。

決定した荷重を解析モデルとともに図 16 に示す。解析の結果、ロードセル要素の軸力およびせん断力から求まる地盤反力分布を図 17 に中壁の曲げモーメントを図 18 にそれぞれ実験結果とともに示す。

地盤反力分布では、定量的には整合性に乏しい部位も存在するが、定性的な傾向はよくあっている。また、中壁の曲げモーメント、および上下端の変形量はよくあっている。これより、実験結果のシミュレーションが可能であり、複円形シールドトンネルの耐震設計にも、応答変位法の適用が可能と考えられる。

4. まとめ

- ① 単円形および複円形シールドトンネルの振動実験に対して、2 次元有限要素解析およびサブストラクチャー法に基づく応答変位法によるシミュレーション解析を実施し、トンネル全体の挙動は解析的にも再現できることを示した。これらの手法は、耐震設計への適用が可能と考えられる。
- ② 単円形と複円形トンネルで、躯体の断面力は同様の形態であり、複円形トンネルの中柱部分を除き、両者の耐震性に決定的な相違はないと考えられる。
- ③ 複円形のカモメ部の地盤応力状態より、この部位の地盤はほとんどせん断変形を生じずにトンネルと一体となって挙動していることが分かった。
- ④ 複円形の剛性を変化させた解析により、実験で想定した以外の地盤条件においても、この 45 度位置で地盤反力の小さくなる傾向は変化しないが、法線方向地盤反力が増減することが確認できた。
- ⑤ トンネル周辺の地盤反力状態は、せん断変形した地盤のトンネル直交面での応力状態と密接に関連していることを示した。

今後は地盤および構造の非線形性を考慮した検討を実施し、複円形シールドトンネルの耐震設計法の確立に向けて検討を行う予定である。

参考文献:

1) 室谷 他: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,トンネル工学研究発表会, 1998.11
2) 立石 章:応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究,土木学会論文集, No.441/I-18,pp.157-166,1992.1
3) 地下駐車場設計・施工指針・同解説,平成4年 11 月,(財)日本道路協会
4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物,平成9年3月,(財)鉄道総合技術研究所

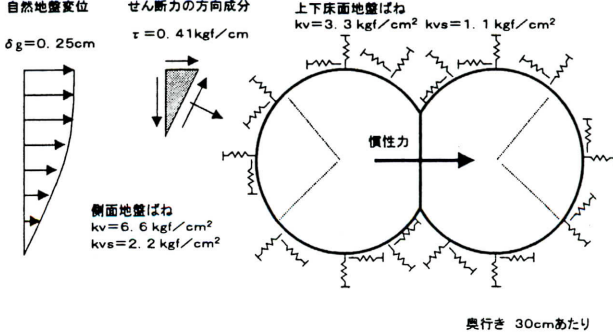


図 16 構造解析モデル

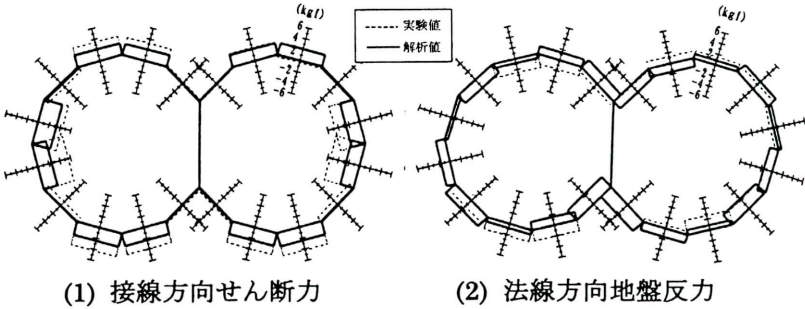


図 17 地盤反力分布

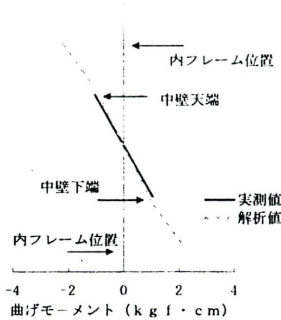


図 18 中壁モーメント分布