

(114) 大規模地中管状構造物の非線形 地震応答解析

神戸大学工学部 李 騰雁
 神戸大学工学部 高田 至郎
 天津大学土木系 何 玉菽

1、はじめに

近年、掘削技術の進歩により、10mを超える大口径のシールドトンネルの建設が行われている。シールドトンネルは都市における重要度の高い構造物であり、しかも、耐震的には不利な地盤条件下に建設される場合が多いことから地震による影響についての慎重な検討が必要である。地中構造物の現行耐震計算法としては、①震度法 ②応答変位法 ③動的応答解析法がある。

シールドトンネルの耐震計算手法として、いくつかの設計指針などでは応答変位法をあげている。これは、シールドトンネルが線状地中構造物であり、また、見かけの比重が周辺地盤の比重に比較して小さい、という形態的な側面が一般の線上地中構造物と共通しており、地震時の挙動についてもこれら構造物の挙動に類似すると考えられるのがその理由であろう。ところで、シールドトンネル本体のモデル手法としては、現在のところ、覆工構造を等価剛性はりに置換する方法が多く用いられている。すなわち、本来不連続な構造の覆工を、長手方向剛性がこれと等価な一様連続なはりとしてモデル化するのである。従来の研究では、応答変位法であろうと動的解析法であろうとトンネル本体のモデル化はこの手法を使用している。しかし、以下のようにいくつかの問題点が残されている。

(1) 応答変位法の適用性：シールドトンネルは一般の線状地中構造物と違って不連続な構造体で、とくに大口径のシールドトンネルに対して応答変位法の適用性を十分に検討しなければならない。

(2) リング継手がシールドトンネルの応答に対する影響：不連続のシールドトンネルを等価な一様連続なはりとしてモデル化するのは、各継手が地震時にどのような挙動をしているかを表現することができない。

(3) シールドトンネルと土の相互作用問題：地震時のシールドトンネルと土の間にすべりと剝離が起こるのは言うまでもないことである。従来の研究では十分に検討されていない。

本研究では、動的応答解析法を耐震計算法として用い、伝達マトリックス法とジョイント要素を導入して上記の問題を解決することを試みている。

2、動的応答解析モデルと計算手法

図1は、シールドトンネルの動的応答解析モデルの概要図を示したものである。図1から分かる様に、シールドトンネル動的応答解析モデルは表層地盤とシールドトンネル本体からなっている。表層地盤モデルは4節点のアイソパラメトリック要素を用いており、降伏条件は式(2-1)に示すようなMohr-Coulombの条件に基づいて、塑性ポテンシャルは式(2-1)を用いる。

$$F = l_1 \sin \phi / 3 + \bar{\sigma} (\cos \theta - \sin \theta \sin \phi / \text{SQRT}(3)) - C \cos \phi = 0 \quad (2-1)$$

すなわち、関連流れ則を仮定している。シールドトンネル本体の覆工構造をモデル化する手法としては、セグメント

をはりに、リング継手をバネに、それぞれ置換し直列に連結した骨組みモデルが考えられる。しかし、この骨組みモデルによりトンネル全長にわたる解析を行うには、数百ないし、数千組のはり、バネ要素を必

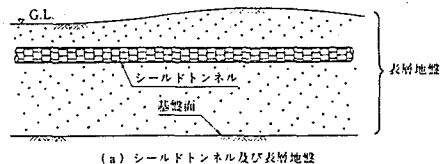


図1 シールドトンネル概要図

要とし事実上解析は困難である。その問題点を解決するために本解析では伝達マトリックス法を用いる。式(2-2)は図2に示すはりの格間伝達式とリング継手の格点伝達式と呼ばれ、列ベクトルに付したR,Lは、それぞれ右端および左端を意味する。

$$V_k^R = F_k V_k^L, \quad V_{k+1}^L = P_k V_k^R \quad (2-2)$$

式(2-2)から、シールドトンネルの左端の状態量ベクトル V_1^L は、右端まで伝達できるから、任意の2つの節点間の剛性マトリックスが求められる。有限要素法で動的相互作用問題を検討するとき、ジョイント要素がよく使用される。シールドトンネルと土の間の付着力は充分には高くなく、せん断応力が

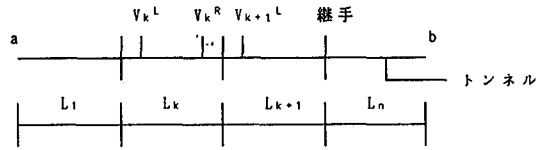


図2 シールドトンネル本体モデル

許容応力より大きければ、シールドトンネルと土の間はすべりが発生して破壊状態になる。従来の研究ではこの問題について十分に考慮されていない。本研究では新たに摩擦係数から仮想仕事原理を用いて要素剛性マトリックスを誘導した。ジョイント要素は図3に示すように、長さがL、幅が0の四つの節点の長方形要素である。破壊しない場合及び破壊状態になる場合、要素内のせん断応力及び正応力と変位差の関係は次のようである。

(1)、破壊しない場合： $\tau_s = \lambda_s \Delta u$, $\sigma_n = \lambda_n \Delta v$

(2)、破壊状態になる場合： $\tau_s = \sigma_n f = f \lambda_n \Delta v$, $\sigma_n = \lambda_n \Delta v$

ここに、 f と λ_s, n はそれぞれ摩擦係数とX,Y方向の剛性を表し、 $\Delta u, \Delta v$ はX,Y方向の変位差である。上式と仮想仕事原理を用いて要素剛性マトリックスが得られる。地盤の入力境界をb、振動

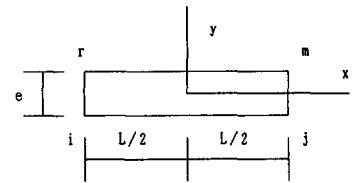


図3 ジョイント要素

系の内部をaで表示して、振動系の内部には変動外力がないとすると、動的方程式は次式のようなになる。

$$[M_a] \{\ddot{X}_d\}_a + [C_a] \{\dot{X}_d\}_a + [K_a] \{X_d\}_a = [M_a] [K_a]^{-1} [K_{ab}] \{\ddot{X}\}_b \quad (2-3)$$

ここに、 $\{X_d\}_a$ は動的変位で、 $\{\ddot{X}\}_b$ は基盤加速度である。振動系内部の変位は式(2-4)で求められる。減衰はRayleigh減衰とする。

$$\{X\}_a = \{X_d\}_a - [K_a]^{-1} [K_{ab}] \{X\}_b \quad (2-4)$$

本研究の計算は2つの部分からなる。一方は振動数と振動モードの計算で、他方は非線形動的運動方程式の計算である。振動数計算はSubspace法を用い、動的計算はWilson θ 法を用いている。

3、動的応答解析例

本解析の計算モデルは図4に示すように地盤は六種の材質から構成されている。地震水平方向入力では $A \cdot \sin(50(t-d/V))$ で与えている。ここに、Aは振幅、dは距離、Vは伝播速度(726m/s)である。波動は左から右へ伝播していく。計算に用いた入力データは下記のようなである。

①シールドトンネル：ヤング率=2.94E+9 kgf/m²、密度=244.89 kg f-s²/m、断面積=1.862 m²、断面二次モーメント=0.8 m⁴

②シールドトンネル継手と土とトンネルの間のジョイントの力と変位の関係は図5に示す。モード計算と応答計算では表1のようなCASEに分けられる。計算結果は図6から図11、表2に示す。表2は各CASEの固有振動数を表している。CASE-1からCASE-3まで順次、固有振動数が低くなる。図6はCASE-1の場合、シールドトンネルの左端X方向変位が時間にもなって変化するものである。図7はCASE-2の場合、シールドトンネルの左端と右端及びまん中のX方向変位が時間にもなって変化するものである。図7から位相差の影響が知られる。図8はt=0.3sの時、CASE-1とCASE-2のシールドトンネルの変形状態を示す。図8から分かるように位相差入力の方は同時入力より相対変位が大きい。そして、川底と土層の構成が変化する場所

での変位が大きい。図9は $t=0.078s$ の時、各CASEのシールドトンネルの軸方向の変形状態を示す。図を見ると、土の塑性及び土とトンネルの間のジョイントを考慮しているので相対変位が小さくなる事が分かる。図10はCASE-2の各振動モード図で、図11は左端から12番目の継手の力と変位関係図である。計算の結果から以下の結論が得られた

- 1) トンネルの継手と土とトンネルの間のジョイントを考慮すると固有振動数が小さくなる。
- 2) 川底と地盤材質変化の箇所で応答変位が大きい。
- 3) 位相差入力の場合の相対変位は同時入力より大きい。
- 4) 土の塑性及び土とトンネルの間のジョイントを考えるほうが考えない場合より相対変位が小さい。

表1 計算CASE

	計算ケース	トンネル継手	土とトンネルのジョイント要素	同時入力	位相差入力	土の塑性	振幅(A)
モード解析	1	×	×				
	2	○	×				
	3	○	○				
応答解析	1	×	×	○	×	×	1
	2	×	×	×	○	×	1
	3	○	×	×	○	×	1
	4	○	×	×	○	○	1
	5	○	○	×	○	×	1
	6	○	○	×	○	○	1

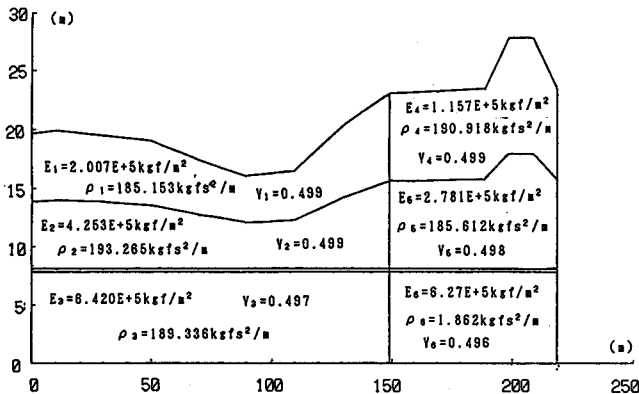


図4 計算例モデル

表2 各CASEの固有振動数

	モード: 1	モード: 2	モード: 3	モード: 4
CASE-1	3.3941	8.2885	15.4833	20.2030
CASE-2	3.0507	6.6032	9.7339	15.0044
CASE-3	2.9970	3.7436	4.9989	8.5962

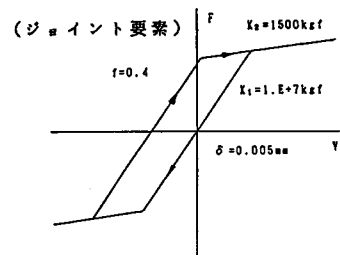
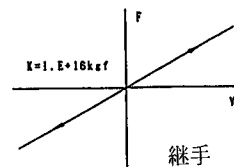
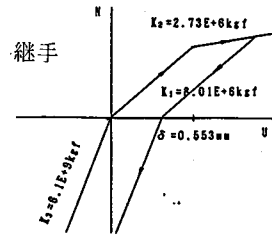
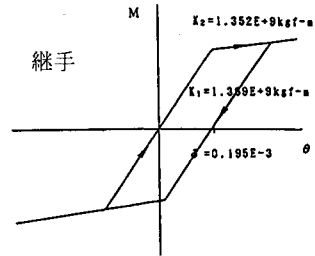


図5 継手とジョイント要素での力と変位の関係

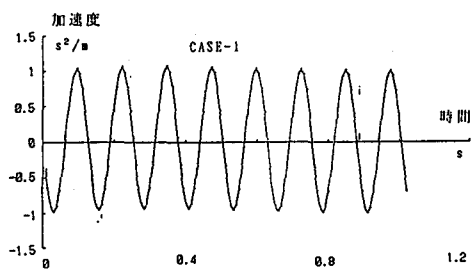


図6 シールドトンネル左端の応答加速度

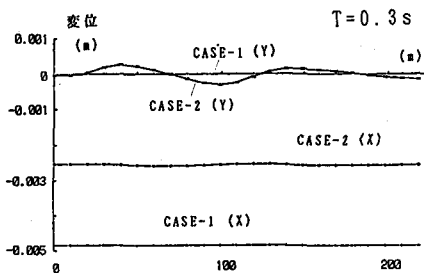


図8 シールドトンネルの変位

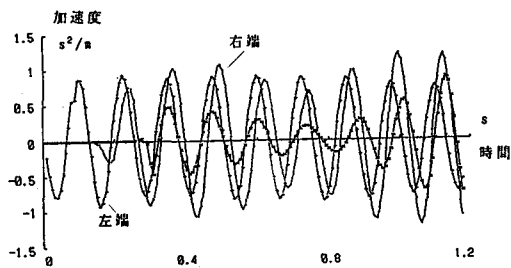


図7 シールドトンネル左端と右端の応答加速度

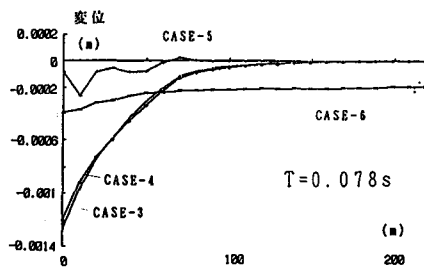


図9 X方向シールドトンネルの変位

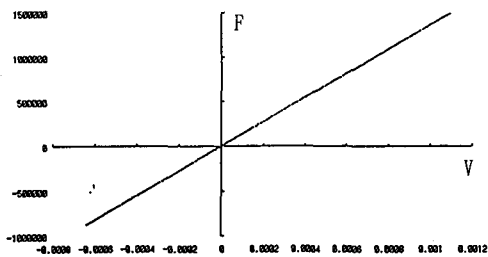
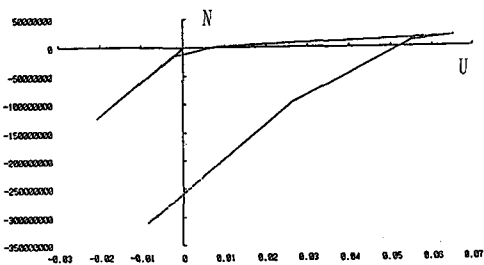


図11 左端から12番目の継手の力と変位関係 (CASE-3, A=1500)

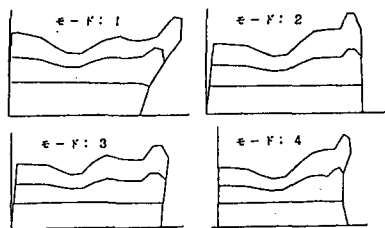


図10 CASE-2の振動モード図

参考文献

- 1) 土木学会：ライフライン施設、動的解析と耐震設計、第4巻
- 2) 志波由紀夫・川島一彦：シールドトンネルの耐震解析に用いる長い手方向覆工剛性の評価法、土木論文集 N0.398, 1988
- 3) 高田至郎・何玉菽・李騰雁：継手非線形を考慮したシールドトンネルの地震応答解析、平成3年度土木関西支部年次学術講演会講演概要集