

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

神戸大学 正員 高田 至郎
 天津大学 何 玉菽
 神戸大学 〇正員 李 騰雁

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、地震による影響についての慎重な検討が必要である。本研究では、シールドトンネルの動的応答解析手法として、有限要素法と伝達マトリクス法を用いる新しい計算方法を提案する。本手法では、シールドトンネルと土の相互作用問題も考慮している。

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からわかる様に、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節点のアイソラマトリクス要素を用いており、シールドトンネル本体については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、リブ継手をハネに、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、ハネ要素を必要とし、事実上解析は困難である。

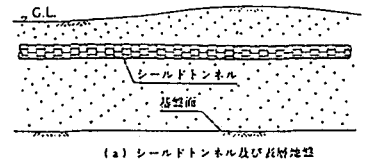


図-1

その問題点を解決するために、本解析では伝達マトリクス法を用いる。式(2.1)ははりの格間伝達式とリブ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。

$$V^R = F V^L \quad V^L = P V^R \quad \text{----(2-1)}$$

式(2.1)から、任意の2つの節点間の剛性マトリクスが得られる。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。しかし、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充分に考慮されていない。本研究では新たに摩擦力から仮想仕事原理を用いて要素剛性マトリクスを誘導した。ジョイント要素は、長さがL、幅が0の長方形要素である。破壊状態にある場合、要素内応力と変位差の関係は次のように与えられる。

$$\tau = \sigma f = f \lambda u, \quad \sigma = \lambda u \quad \text{----(2-2)}$$

ここに、fとλはそれぞれ摩擦係数と垂直方向の剛性を表し、uは変位差である。地盤の入力境界をb、振動系の内部を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にになる。

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

ここに、{X_d}_aは動的変位で、{Ẍ}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。

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

本解析の計算手法は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Wilsonθ法を用いている。地震上下・水平の両方向入力ではCOS(50(t-d/V))で与えている。ここに、dは距離、Vは伝波速度(728m/s)である。

3.動的応答解析例：本解析の計算モデルは図2に示されている。計算の入力データは下記のようである。
 ①シールドトンネル：ヤング率=2.94E+9 kgf/m² 密度=244.89 kg f^{-s}/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3に示す。モード計算と応答計算では表1のように3つのCASEに分けられる。計算結果は図4から図9、表2と表3に示す。

4. 結論： 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) 地盤材料変化の所で変位差が大きい。 3) 地盤入力力が時間によって変わる変位差は同時に入力より大きい。 4) 土とトンネルの間のジョイントを考えるほうは考えないより変位差が小さい。

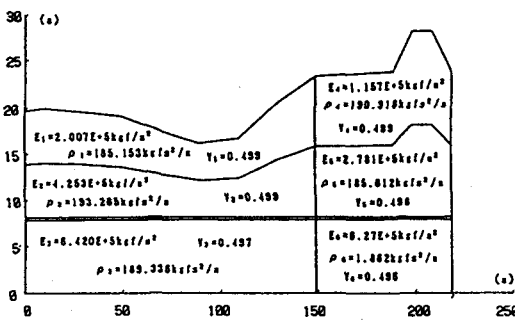


図-2 計算モデル

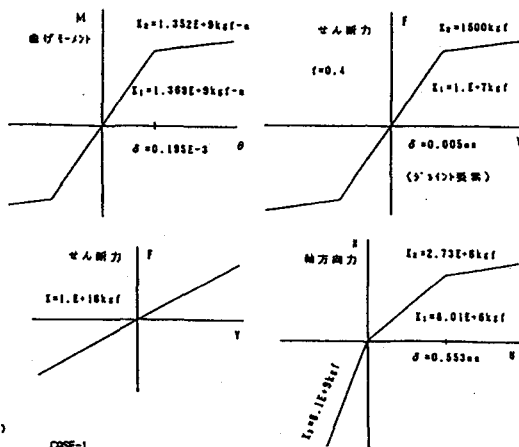


図-3 力と変位

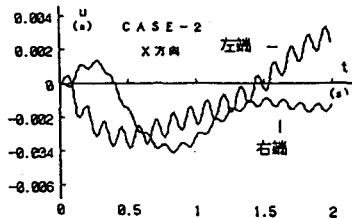


図-4 シールドトンネルの左端と右端の変位

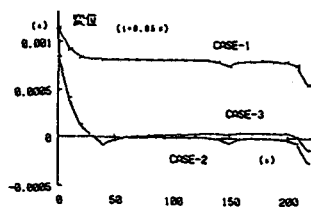


図-5 X方向シールドトンネルの変位

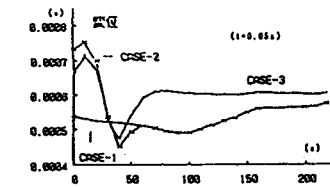


図-6 Y方向シールドトンネルの変位

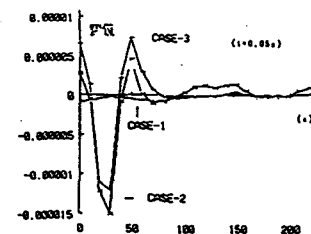


図-7 θ方向シールドトンネルの変位

表-1

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	面間入力	位相遅入力
1	X	X		
2	O	X		
3	O	O		
1	O	X	O	X
2	O	X	X	O
3	O	O	X	O

表-2 各CASEの固有振動数

	t-T: 1	t-T: 2	t-T: 3	t-T: 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

表-3 各CASEの最大変位値

	CASE-3	CASE-2	CASE-1
最大変位値 (T)	1.420E-4m	1.832E-4m	1.490E-5m
最大変位値 (X)	4.260E-4m	4.897E-4m	2.293E-4m
最大変位値 (θ)	1.413E-5	1.414E-5	8.350E-7

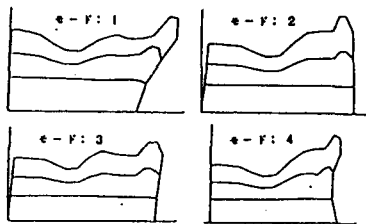


図-8 CASE-2の振動モード図

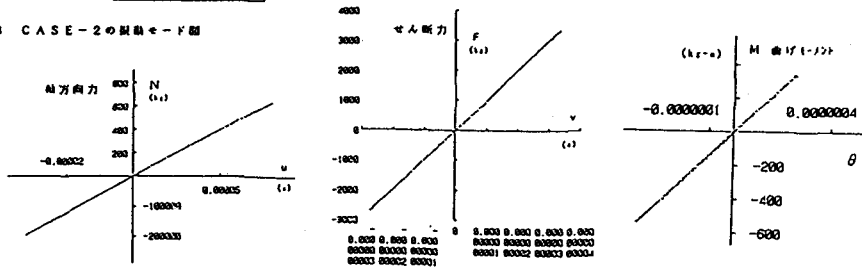


図-9 左端から12番目の継手の力と変位関係 (CASE-2)