

(株)大林組技術研究所 正員 ○後藤 洋三
 (株)大林組機械計算部 正員 太田 順
 (株)東洋情報システム 正員 佐藤 拓男

1. まえがき

沈埋トンネルの地震応答を解析するため有限要素法を用いた地震応答計算とゼラチンを用いた模型振動実験を行った。前者はトンネル軸直交方向について弾性領域における3次元連成振動を取扱ったものであり、後者は $1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ の実験槽内にゼラチンの模型地盤とウレタンゴムの模型トンネルをセットし加振実験を行ったものである。

本研究の結果から入力地震波にトンネル軸方向で位相差がある場合、ならびに地盤の振動特性がトンネル軸方向に変化する場合について若干の結論が得られている。

2. 有限要素法による地震応答解析

本研究で用いた解法については既に発表している¹⁾ので、ここではその概要を説明するにとどめる。図-1は解析モデルの略図を示したもので、運動方程式を導くにあたって導入した仮定は次の通りである。²⁾

- 1) 地盤をトンネル軸方向に適当な間隔で分割する。
- 2) 分割したブロックを平面歪問題として有限要素化する。
- 3) 隣接ブロックを地盤の剛性に応じたせん断バネで結合する。
- 4) 地盤の質量は各ブロックの要素頂点に集中しているものとし、各質点はトンネル軸直交方向に水平鉛直の2自由度を持つものとする。
- 5) トンネルは多質点系の梁に置換する。軸方向の伸縮は考えない。

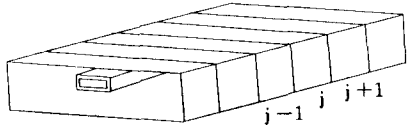


Fig. 1

この解析モデルに関する運動方程式に含まれる自由度数(未知数の数)は千のオーダーであり、大型計算機を用いても直接的に計算処理することは非常に困難である。そこで本研究では、不要な振動成分を除去するという考えに立った自由度縮小法を採用し計算能率の向上につとめた。すなわち、各ブロックを切り離しておいてモード解析を行い、得られたモード形状を検討することによって解析目的に比較的影響しないモードを分離切除する。そして残されたモードに関して最初の仮定通りに各ブロック間の結合を考慮し運動方程式を構成するものである。この方法によれば、誤差を小さな範囲に押えながら大巾な自由度縮小を行うことが可能であると考えられ、中型計算機によっても容易に地震応答を求めることができる。

さて、沈埋トンネルは長い延長を有する構造物であり、入力地震波が同一位相で作用すると考えることは現実的でない。そこで本方法では地震波が基盤内をトンネル軸方向に伝搬するものと仮に考え、

波が各ブロック毎に位相のズレを持って作用する場合についても考慮している。

3. 自由度縮小にとこな誤差の検討

ブロックが3個で1ブロックの自由度が32の簡単なモデルを設定する。図-2、図-3がその概略を示したものである。トンネル軸の一端は固定、他端はスライドである。このモデルについて自由度縮小の度合を変化させ、自由度縮小にとこな誤差の検討を行った。表-1は固有振動数の比較を行ったもので、表中右に行くほど縮小の度合が大きい。同表を検討すると残留自由度30までは誤差が非常に小さいことがわかる。自由度15と自由度9では中間の固有周期が欠落し高次の固有周期が現われている。これは中間の固有周期に大きく影響する各ブロック内のモードが不要と判定され切除されたためである。表-2は地震応答計算結果を比較したもので、入力波としてはEl Centro 40-NSを使用した。全体にバラツキがみられ、精度についてはさらに検討を要すると考える。

4. 模型振動実験の概要

通常のゼラチンを用い、 $1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ の剛な実験槽内に模型地盤を作成した。トンネルは帯状鋼板を芯にウレタンゴムで作成している。図-4はその概略を示したもので測定の際合上トンネル天端と地盤表面を一致させている。相似率ならびに周辺境界の処理については今回の実験の目的が実験と理論計算の対比であつたため特別の配慮はしなかつた。実験槽を大型振動台上にセットし、正弦波ならびにランダム波による加振を行った。トンネルならびに模型地盤の振中測定はトランシットを使った目測、写真撮影ならびに電氣的測定を併用した。

5. 実験結果と理論計算結果の比較

正弦波が底部ならびに周辺から作用する場合の入力波の振動数と応答変位の関係を、実験と理論計

ANALITICAL MODEL

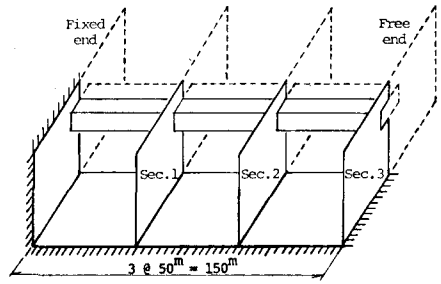


Fig. 2

FINITE IDEALIZATION

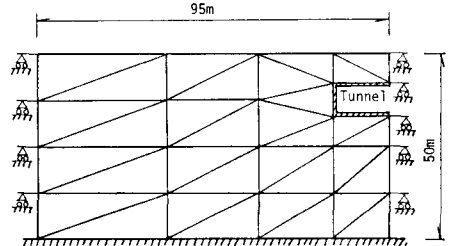


Fig. 3

Periods of Free Vibrations

Order of Effective Mode	Total Degrees of Freedom (sec)				
	90	60	30	15	9
1	1.19683	1.19681	1.19554	1.19133	1.18708
2	0.81272	0.81269	0.81152	0.80748	0.79593
3	0.64381	0.64377	0.64328	0.63815	0.50841
4	0.61252	0.67251	0.61203	0.60322	0.16015
5	0.52829	0.52824	0.52862	0.51869	0.04711
6	0.48222	0.48207	0.47804	0.32341	0.02727
7	0.47350	0.47350	0.47327	0.28167	0.02557
8	0.46780	0.46780	0.46777	0.15726	0.00346
9	0.45937	0.45917	0.45523	0.15467	0.00296

Table 1

Maximum Responce of The Tunnel
(Horizontal Displacement in Meter)

Section	Degree of Freedom				
	90	60	30	15	9
1	0.03910	0.04671	0.03304	0.03055	0.04063
2	0.06480	0.06062	0.06057	0.06218	0.05642
3	0.06704	0.06247	0.06332	0.06638	0.05930

Table 2

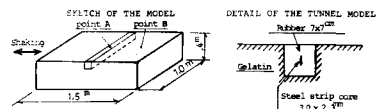


Fig. 4

算から求め比較したものが図-7と図-6である。図中破線は実験値であり、実線は理論計算値である。

理論計算では寸法、境界条件とも模型と同一にしている。ブロック分割数は9個で図-5に代表的なブロックの有限要素化の状況を示した。この計算モデルについて全体の自由度を1305から90まで縮小し正弦波による定常振動応答を求めた。計算に必要なトンネルの曲げ剛性は実測から求められるが、ゼラチンの弾性定数は温度、経過時間等によって複雑に変化していくため、一定値として定めることができない。そこでこの計算では一次の共振点が実験値と一致するよう試算して決定した。

実験結果の応答変位はトランシットを用いた目測によるものであり、一次共振点近くを除いて精度がよくない。したがって理論と実験の対比を行い、いくためには、実験における測定法をさらに改善していく必要があると考える。

6. 道路用沈埋トンネルの地震応答計算例

大規模な道路用沈埋トンネル(RC製)を対象として連の地震応答計算を行った。すなわち、 $9\text{m} \times 30\text{m}$ の大きな断面を有するトンネルが長い延長にわたって厚さ50mの軟弱地盤中に沈設された場合を考える。この問題に対し19個のブロックを持つ計算モデルを設定した。図-8は1ブロックの有限要素分割を示したものである。この計算モデルについて全体の自由度を1501から95まで縮小し地震応答計算を行った。

図-10および図-11は入力地震波がトンネル軸方向に位相のずれを持って作用する場合の計算結果を示したものである。位相のずれは最大変位に影響しないがトンネルに発生するモーメントには大きな影響があり、位相のずれが大きくなる程最大モーメントも大きくなることわかる。

図-12はトンネルが異なる剛性を持つ二つの地盤を通過している場合の解析例である。すなわち、軟弱な沖積粘土層から比較的硬い砂礫層に地盤が変化する場合を想定し、ブロック8, 9, 10の間で弾性定数を8倍に変化させた。同図から、遷移領域ではトンネルに作用するモーメントが非常に大きくなることが明らかにされる。これは地盤の振動特性が変化したことにより、トンネル軸方向に位相の異なる振動が発生しトンネルに大きな歪が生じたことを示すものである。

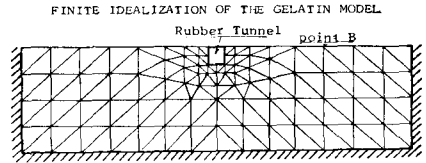


Fig. 5

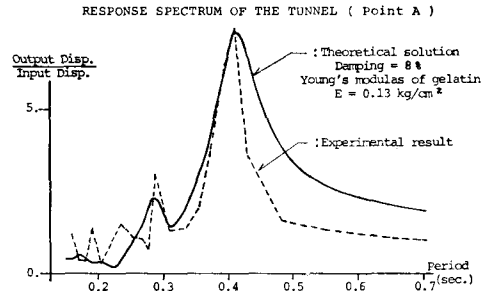


Fig. 6

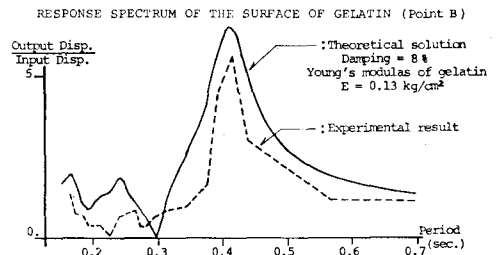


Fig. 7

7. 結語

6. ア示した計算結果から入力地震波の位相のずれ，ならびに地盤の振動特性のトンネル軸方向の変化が，トンネルに作用するモーメントに大きな影響を与えることが明らかになった。

本研究ではトンネル軸方向に関する解析を行，ていない。軸方向の問題が重要であることはすでに指摘されており，本研究もその方向に発展させていきたいと考えている。

FINITE IDEALIZATION

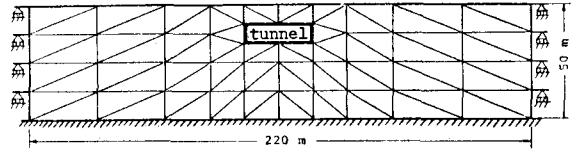


Fig. 8

ANALYTICAL MODEL OF THE ACTUAL SUBMERGED TUNNEL

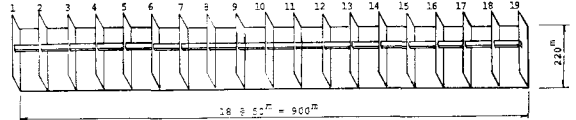


Fig. 9

MAX. DISPLACEMENT OF THE TUNNEL UNDER EARTHQUAKE

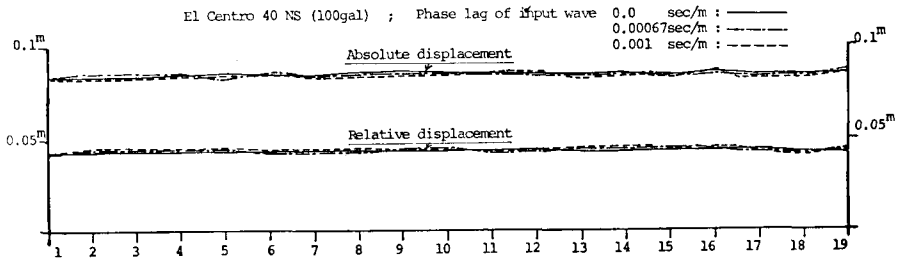


Fig. 10

MAX. MOMENT OF THE TUNNEL

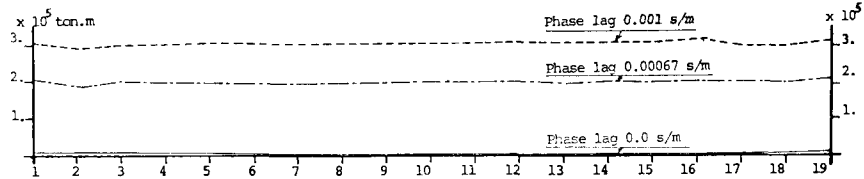


Fig. 11

MAX. MOMENT OF THE TUNNEL UNDER EARTHQUAKE

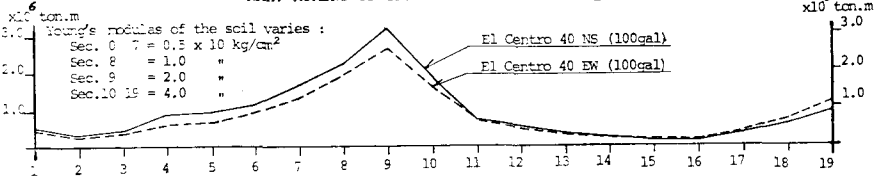


Fig. 12

参考文献

- 1) 後藤，太田，佐藤； F.E.M.による沈埋トンネルの地震応答計算法について
土木学会第26回年次学術講演会講演集第一部，昭和46年10月
- 2) 武藤，内田，津川； 沈埋函の地震応答解析
第3回日本地震工学会講演概要集，昭和45年