

沈埋トンネルの地震応答解析について

(株) 大塚組技術研究所 正員 ○ 後藤 洋三
(株) 大塚組機械計算部 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解析をするために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なった。前者は、地盤を弾性体とし解析方向もトンネル軸直角方向に限定しているが、3次元の連成振動を取り扱ったものである。有限要素法の適用によって生じる膨大な未知数は特殊な解法によって処理した。後者は、実験槽内にゼラチンの模型地盤を作製し大型振動台に載せて加振したものである。模型のトンネルはウレタンゴムで作製した。実験のまたる目的が、実験結果を実験と同一条件で行なった理論計算結果と対比してみることであったので、相似率ならびに境界の処理については特別の工夫をしていない。

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インピーダンス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法

本研究で用いた解析方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は解析モデルの概図を示したものである。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。

- 1) 地盤をトンネル軸方向に適当な間隔で分割する。
- 2) 分割した各ブロックを平面歪問題と考へて有限要素化する。(三角形要素を用いた。)
- 3) 隣接ブロックは互いに地震の剛性に応じたせん断バネによって結合する。
- 4) 地盤の質量はブロック内の各要素頂点に集中しているものとし、各頂点は水平と鉛直の2自由度をもつものとする。
- 5) トンネルは曲げで抵抗する多質点系の梁に置換する。軸方向の伸縮は考へない。

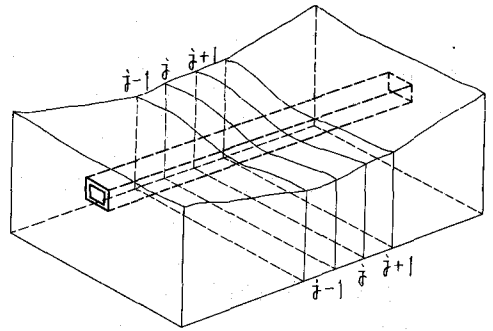


図-1

さて、実際の沈埋トンネルの解析を行う場合、このような解析モデルを設定すると運動方程式に含まれる自由度(未知数)の数は数千のオーダーとなり最新の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、不用な振動成分を除去するという考へに基づい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、各ブロック内で独立してモード解析を行い、得られたモードからトンネル部分ならびに梁全体の振動に影響しないと考へられるモードを除去する。そして残されたモードに関して各ブロック間でのつながりを考へし運動方程式を構成する。

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り、中型の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。

3. 自由度縮小にともなう誤差の検討

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。図一乙、図一丙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、他端はスライドとした。このモデルでは全体の自由度が最高95であるので、縮小の度合を変化させて比較することができる。表一は横方向に全体の自由度を変えて固有周期の比較を行なったものである。自由度30までの誤差は非常に小さいが、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。これは中間の固有振動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ているためである。表一は地震応答計算の結果を比較したもので、入力波としては *El Centro 40 NS* を最大 100 gal として使用した。全体に若干のバラツキがあるが実用的な精度は保持されていると考えられる。

Maximum Response 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

4. 模型振動実験の概要

実験槽は $1.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ の鋼製箱で剛性を高めるためリブで補強されている。この槽内に通常のセラチンを使って厚さ 40 cm の模型地盤を製作した。図一丁はその概略を示すもので、トンネルは長さ 7 m 、断面 $700 \times 700 \text{ mm}$ の直方体にウレタンゴムで製作している。そして剛性を高めるために帯状鋼板を断面中心に通した。トンネルはセラチン地盤内にセットされるが、今回の実験では測定の新倉からトンネル天端と地盤表面を一致させている。なお相似率については、今回の実験の目的が実験と同一条件で行う理論計算との対比であったため特別な配慮はしなかった。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なった。トンネルならびに地盤表面の振中測定はトランシットと写真撮影で行い、トンネル断面内の帯状鋼板の歪については電気的に測定した。

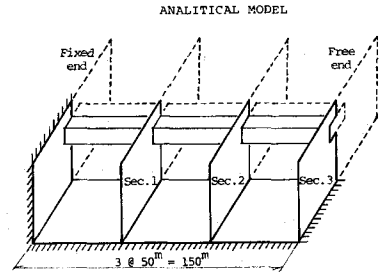


Fig. 2

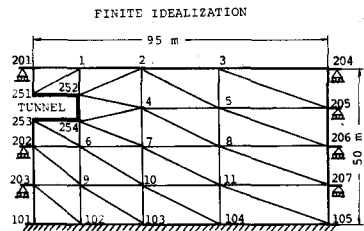


Fig. 3

Periods of Free Vibrations

Order of Effective Mode	Total Degrees of Freedom				
	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	0.61251	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

5. 実験結果と理論計算結果の比較

正弦波が作用する場合の入力波の振幅数と応答変位の関係を求め比較して図-6と図-7に示した。図中実線は理論計算によるものであり、破線は実験から求めたものである。

理論計算では模型地盤を9個のブロックに分割している。図-5はその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1305から100まで縮小し応答変位を求めた。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、セラチンの弾性定数は時間的に若干変化していくため一定値として求めることはできない。そこでこの計算では一次共振点を実験と一致するように逆算して定めた。

実験結果の応答変位はトランシットによる測定から求めたものであるため一次共振点近くを除いて精度がよくない。測定法をさらに検討していく必要がある。

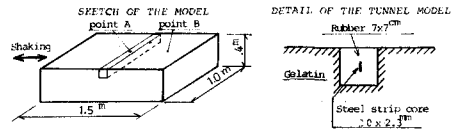


Fig. 4

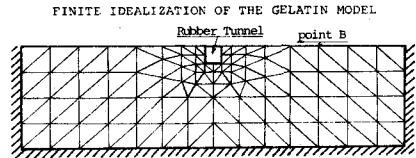


Fig. 5

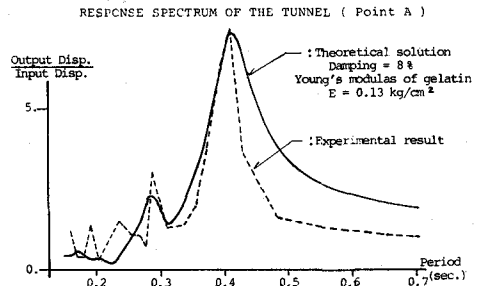


Fig. 6

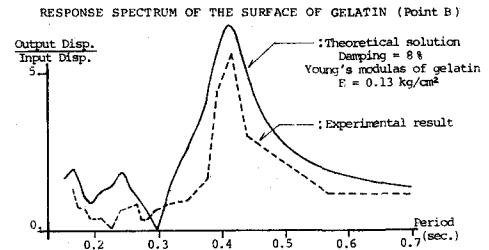


Fig. 7

6. 道路用沈埋トンネルの地震応答計算

大規模な道路用の沈埋トンネルを対象として一連の地震応答計算を行なった。すなわち $9 \times 30 \text{ m}$ の断面を有するトンネルが長い延長にわたって厚さ 50 m の軟弱層中に沈没されている場合を考える。この問題に対して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なった。

図-10ならびに図-11は入力地震波が基礎からトンネル軸方向に位相遅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。位相遅れは最大変位には影響していないが、最大モーメントには大きな影響があり位相遅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内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。同図からその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力が作用したことを示すものである。

7. 結語

6.で示した計算結果から沈埋トンネルに作用するモーメントに大きな影響を与える問題として次の二点が重要であることがわかった。すなわち、入力地震波のトンネル軸方向に関する位相特性の問題、ならびに地盤のインピーダンスがトンネル軸方向に変化する問題である。本研究ではトンネル軸方向に関する解析ならびにトンネル周辺地盤に発生する応力の解析は行っていない。いずれも重要な問題であることが指摘されており、本研究においても今後プログラムを改良することにより解析を進めていきたいと考えている。

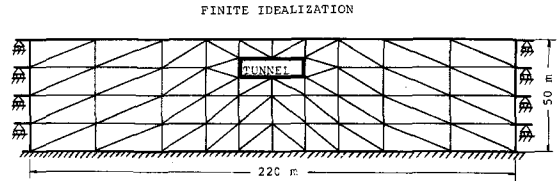


Fig. 8

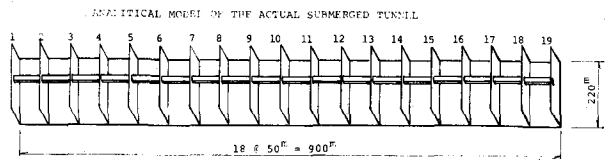


Fig. 9

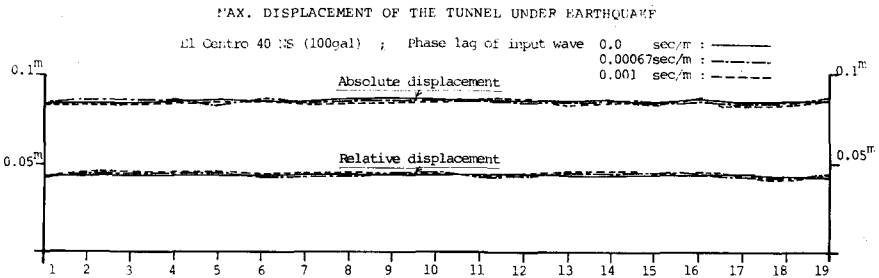


Fig. 10

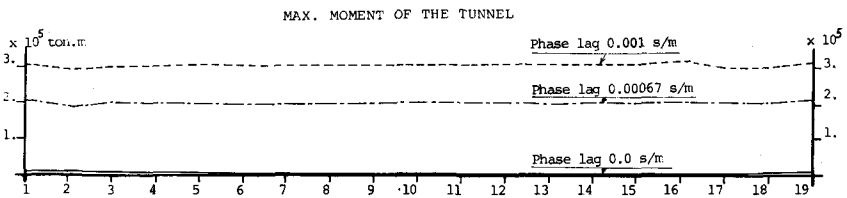


Fig. 11

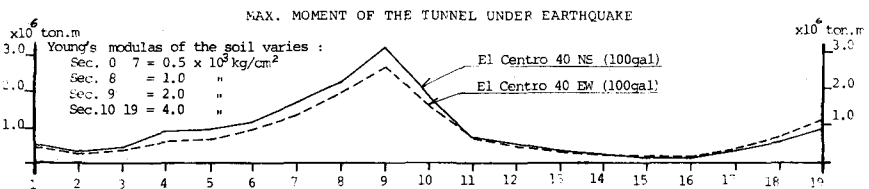


Fig. 12

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巻, 昭和46年10月