# 沈埋トンネルの動的解析

―模型振動実験と地震応答解析―

岩 男\* 崎 敏 いま島 かわ かず ひと き\*\*

1. まえがき

近年,わが国における交通運輸施設の整備拡充は目ざま しいものがあり,大都市においては土地空間の有効利用の 面,あるいは安全性確保の面から,河口や海峡部を横断す る手段として沈埋工法によるトンネルの建設が活発となっ てきた。沈埋トンネルは19世紀末米国東海岸で始めて建 設されているが,わが国においても昭和19年に竣功した 大阪安治川河底横断トンネルを手始めに,首都高速羽田海 底トジネル,京葉線多摩川水底トンネル,衣浦湾沈埋トン ネル,扇島連絡トンネル等がすでに完成し,首都高速東京 港横断海底トンネルが現在建設中である。また,東京湾の 川崎と木更津を結ぶ東京湾横断道路の計画においても全長 3,000 m 余の沈埋トンネルの建設が検討されている。

沈埋トンネルは一般に軟質な地盤中に埋設されるため, わが国のような地震多発地域では耐震安全性の確保は非常 に重要な問題である。しかしながら,沈埋トンネルの耐震 設計に関してはまだ確固たる設計法が確立されていないの が現状であり,多くの未解決の問題が残されている。これ らの問題点の解明を図るために各方面で,耐震性の検討が なされているが<sup>1)~6)</sup>,ここでは建設省土木研究所が現在ま でに行なってきた,沈埋トンネルおよび周辺地盤を対象と した模型振動実験ならびに地震応答計算による動的解析の 結果について紹介する。

# 2. 東京湾岸道路沈埋トンネルの例

### 2.1 模型振動実験

#### (1) 実験の概要

東京湾岸道路沈埋トンネル計画案を参考にして、図-1 に示すように沈埋トンネルが上下二層から構成されている 地盤に埋設されている場合の振動特性を検討するため、3 種類の沈埋トンネルー地盤系の振動モデルを振動台上に製 作した。この実験および次節に述べる実験は、ともに科学 技術庁国立防災科学技術センターの大型耐震実験装置を用

\* 建設省建築研究所第二耐震工学室室長

いてなされた。

原型に対する模型の相似率(縮尺比)は、振動台の性能、 模型材料、計測方法などを検討して、長さ  $(n=L_p/L_m)$ 、 時間  $(t=T_p/T_m)$ 、密度  $(m=\rho_p/\rho_m)$  をそれぞれ、n=500, t=5, m=1.5 (第1層) および 2.0 (第2層) とした。 これらを基本の相似率として選ぶと、その他の物理量の相 似率は次元解析<sup>7)</sup> によって求められる。

地盤模型材料にはゼラチンを使用し、その弾性係数は弾 性係数の相似率から表-1のように定めた。ここで、実地 盤の弾性係数はせん断弾性波速度から推定している。

沈埋トンネル模型の断面と形状は水平面内のトンネル軸 直角方向の曲げ剛さを模型相似則から決まる値と一致させ るとともに,沈埋トンネルと周辺地盤の平均単位体積重量 の比が原型の場合の比と同程度になるように考慮して求め ている。したがって,ここでのトンネル模型は軸方向の伸 び剛性比および鉛直面内のトンネル軸直角方向の曲げ剛さ の比は模型相似則を満足していない。トンネル模型には合 成ゴムを使用した。



<sup>\*\*</sup> 建設省土木研究所千葉支所振動研究室研究員

No. 780

模 型 地 盤 地 層 実 地 盤 実際の値(平均値) 相似則から決まる値(目標値) 項目 第1層(軟質層) 第2層(土丹層) 第1層(軟質層) 第2層(土丹層) 第1層(軟質層) 第2層(土丹層) Ψ  $750 \times 1,350 \text{ m}$  $1.5 \times 2.7 \text{ m}$ 同 面 寸 法 左 層 厚 30~55 m 70~95 m 6~11 cm 14~19 cm 同 左  $1.5 t/m^{3}$  $2.0 t/m^{3}$  $1.0 t/m^{3}$  $1.0 t/m^{3}$ 単位体積重量 同 左 セン断弾性波速度 100 m/sec300 m/sec1 m/sec 3 m/sec  $1.5 \,\mathrm{m/sec}$ 3 m/sec  $4,590 \text{ t/m}^2$  $53,200 \text{ t/m}^2$  $31 \text{ g/cm}^2$ 性係数  $266 \, {\rm g/cm^2}$  $70 \text{ g/cm}^2$  $270 \text{ g/cm}^2$ 弾

表一1 実地盤と模型地盤の相似率

振動台の入力としては 1~10 c/s の正弦波と時間の縮尺 に従い時間軸を 1/5 に縮小した El Centro (1940) NS 成 分などの地震動の波形を採用し、それぞれ、トンネル軸方 向およびトンネル軸直角方向に加振した。

各部の振動は光学式変位計および 16 mm 撮影機によっ て変位を中心に計測した。

(2) 実験結果

2.2 応答解析

正弦波振動実験により共振振動数付近で得られた振動モ ードの例としてモデル3(図-1参照)の振動モードを図-2に示す。図-2より1次モードはセン断振動型であるこ と,沈埋トンネルは周辺の地盤とほとんど同じように振動 していることが認められる。また、軟質な上層の厚さが異 なる場所がそれぞれ、別の振動数で共振しており、軟質層 の厚い部分がよく振動しているモードと、薄い部分がよく 振動しているモードの違いがよく現われている。したがっ て、地震の際には、このような断面の急変部においては互 いに違った周期と振幅で振動することが予想され、かかる 地盤中に埋設される沈埋トンネルは一様な地盤中に埋設さ れている場合よりも大きなヒズミが地盤から伝達されるこ とが予想される。

模型の減衰定数は1次の共振状態から模型に自由減衰さ せて求めたが、1%程度の小さい値である。

₫ 14 13 12 10 9 Н 8  $\bigcirc$ 6 5 4 3 2 沈埋トンネル  $\bigcirc$ 加振方向 変位 図-2 振動モード図 (モデル3)

実験結果の検討のため,実験に用いた振動モデルの主要 な断面を二次元平面ヒズミ状態にモデル化し,有限要素法 による応答解析を行なった。

図-3 はその一例で、軟質な上層の厚さが変化する場合 の1次および2次の固有振動モードである。1次モードは 軟質な上層の厚い部分が、2次モードでは上層の薄い部分 が、それぞれ大きく変位しており、図-2 に示した実験



図-3 固有振動モード図



土と基礎, 22—3 (193)

No. 780

表--2 固 有 周 期 の 比 較

単位:秒

実験モデル1)	1		2		3	
振動方向 項 目	トンネル軸方向	トンネル軸直角方向	トンネル軸方向	トンネル軸直角方向	トンネル軸方向	トンネル軸直角方向
実 験 値	0.338	0.332	0.395	0.388	(1次) 0.420 (2次) 0.336	(1次) 0.440 (2次) 0.336
計算值	0.346	0.346	0.388	0.4022>	-	0.3463)
計算值/実験値	1.02	1.04	0.98	1.04	-	1.03

1) 図-1参照

2) 表層地盤の厚い部分を対象とした。

3) 表層地盤の薄い部分を対象とした。

による振動モードに対応するものと考えられる。ただし, ここでの解析モデルは地盤のみを対象としている。1次の 固有周期について実験結果と解析結果を比較すると表-2 のようになり,両者は非常によく一致している。また,有 限要素法による解析によって,沈埋トンネルを埋設した場 合と埋設しない自然地盤のままの場合の振動特性を固有周 期の面から比較すると,10次程度までの値はほとんど同じ である。したがって,沈埋トンネルの存在は比較的低い振 動数の範囲内では地盤の周期にほとんど影響を与えていな いといえる。

# 3. 東京湾横断道路沈埋トンネル

#### 3.1 模型振動実験

#### (1) 実験の概要

東京湾の川崎と木更津を結ぶ東京湾横断道路のモデルプ ランの1つとして,主航路部に2本の沈埋トンネルを配置 し,中央部と両端を人工地盤(海中人工島)によって接続 する構造が考えられている。東京湾の海底の表層地盤約 30 m は N 値 10 以下の軟質なチュウ積層より構成されて いる。このような地点に建設される沈埋トンネルに及ぼす 周辺地盤の動的な影響を検討するため、図-4 および写真 -1 に示すように自然地盤および人工地盤に敷設された沈 埋トンネルを対象とした模型振動実験を行なった。原型に 対する模型の縮尺は、長さで 1/550、時間で 1/5、密度で 1/1.40~1/1.90 とした。

地盤は水平面下 200 m までを考慮して一様な厚さの水 平な5層にモデル化しており,弾性係数は実測されたセン 断弾性波速度から推定している。地盤の表層と基盤の弾性 係数の比は約1:13になっている。

沈埋トンネルと地盤のモデル化の手法は前述したとおり であるが、地盤模型材料にはゼラチンの代りにアクリル・ア マイド系グラウト剤(商品名:日東SS)のゲルを使用し ている。この材料は弾性的な性質をもっていること、弾性 係数の調整が比較的広い範囲で可能であること、減衰定数



March, 1974

#### No. 780



(a) 自然地盤部モデル

写真--1 実

は1%程度であることなど、模型地盤材料としてはゼラチ ンのゲルとよく似た性質をもっている。また腐敗の心配が ない特質を有している。

(2) 実験結果

トンネル軸直角方向に加振した場合の正弦波振動実験か ら得られた自然地盤表面の変位応答と自然地盤中に埋設さ れた沈埋トンネルの加速度応答の共振曲線を図-5に示す。 図-5より、沈埋トンネルと自然地盤表面の共振振動数は ほとんど一致しているのが認められる。また、0~22 c/s (原型:0~4.4 c/s) の範囲内では沈埋トンネルが独自に共 振する現象は認められず、沈埋トンネルは、周辺の地盤が 共振状態となったときにその影響を受けて大きく振動して いると考えられる。

地盤が共振しているときの基盤に対する変位の応答倍率 は、自然地盤の表面は70~90倍、自然地盤中に埋設された 沈埋トンネルは函軸直角方向には約80倍、函軸方向には約



(b) 人工地盤部モデル

#### 験 模 型

80

20 倍であった。したがって、地盤共振時における基盤に対 する沈埋トンネルの函軸直角方向の変位の応答倍率は周辺 の地盤と同程度であるといえよう。沈埋トンネルの函軸方 向の変位増幅倍率が周辺の地盤よりも小さいのはトンネル 模型の函軸方向の剛性が模型相似則から決定される値より も大きい(約6倍)ことが原因と考えられ、忠実に模型化 された場合の変位の増幅倍率は上記の値よりもやや大きく なると思われる。

つぎに、時間軸を 1/5 に縮めた El Centro (1940) NS 成分、建設地点付近の地中で記録された地震動などの波形 を模型に作用させ、各部の振動特性を調べた。このうち、 トンネル軸直角方向に El Centro NS 成分地震動の波形



土と基礎, 22-3 (193)



図-6 地震波振動実験の解析例

表面の変位応答はいずれも 6 c/s 付近に鋭いピークをもち, 他の周波数成分はあまり含まれていない。この原因は作用 させた El Centro NS 成分地震動の卓越振動数と沈埋ト ンネル周辺の地盤の共振振動数が,たまたま,ほぼ一致し たことと,減衰定数が実際の地盤で想定される値よりもか なり低いため図-5 に見られるように共振振動数付近の振 動が非常に顕著に現われてきたためと考えられる。

#### 3.2 応答解析結果

# (1) 解析の概要

沈埋トンネルを支える人工地盤(海中人工島)の長手方 向に直角な断面に対して二次元平面ヒズミ状態を想定し, 有限要素法による地震応答解析を行なった。

地盤の構成,弾性係数などは上述した実験のうち人工地 盤部モデル(図ー4(b)参照)を対象として決定し,幅だ けを 2 m に縮小している。また,固有値解析にあたって は静的縮合法により1668の自由度を130に縮小しており, モーダルアナリシスによる応答解析にはこのうちの10次 までを考慮している。

(2) 解析結果および実験結果との比較

固有振動解析結果によれば、固有振動数は1次が 3.99 c/s, 2次が 5.12 c/s, 3次が 5.36 c/s であり、10次では 10.21 c/s であった。

減衰定数を1%とした場合の人工地盤頂面の変位応答と 絶対加速度応答の共振曲線を実験結果と比較して図-7 に 示す。1次共振振動数は人工地盤頂面で 3.99 c/s (実験: 3.7 c/s),自然地盤表面で5.36 c/s (実験:4.8 c/s) であり, 実験結果と比較すると解析結果の方が7~11%程度高い値 になっている。また,実験結果より求められた共振曲線で は8 c/s 付近にも1つの応答のピークが現われているが, 解析結果にはこれに相当する明瞭な応答のピークは認めら れない。この原因は,解析モデルでは盛土横断面を平面ヒ ズミ状態と仮定しているため,盛土縦断方向に沿って変化 する振動モードの影響を考慮できないためと思われる。し たがって,人工地盤(海中人工島)のような構造物の振動 特性を正確に評価するためには三次元的な解析が必要にな ると思われる。

つぎに、模型実験において実際に模型に作用させた El Centro NS 成分地震動の波形を用いた応答解析を行なっ た。最大応答変位および最大応答絶対加速度を、それぞれ、 基盤近くの節点の応答変位および最大入力加速度との比で 等高線状に表わすと図-8 のようになる。これらの図から、 人工地盤が存在することにより、応答変位および応答加速 度の分布が大きく影響を受けることがわかる。

なお、この場合の減衰定数は2%としている。

自然地盤部および盛土中央部における最大応答加速度の 深さ方向の分布について実験結果と減衰定数を1%とした 場合の解析結果を比較して図一9に示す。盛土部について は実験結果と解析結果はあまり良好な一致は認められない

53





図-9 最大応答速度(gal/gal)の深さ方向の分布

mm

(a) 自然地盤部

7777777

(b) 人工地盤部

土と基礎, 22-3 (193)

が、全体の傾向についてはよく一致していると思われる。

なお、上述の二次元有限要素法による解析に加えて、人 工島部を対象とした三次元有限要素法による解析、ならび に沈埋トンネル部を対象とした質点系モデルによる軸方向 の解析を実施しているが、ここでは省略した。

## 4. まとめ

以上述べてきた沈埋トンネルー地盤系の2例の模型振動 実験結果およびこれに対応させた応答解析の結果をまとめ るとつぎのとおりである。

(1) ゼラチンなどを用いた模型振動実験は地盤および沈 埋トンネルの振動特性を三次元的に把握できる点で有効な 資料を提供する手段であると考えられる。しかし、実験結 果の解釈にあたっては、地盤の減衰定数など模型相似則を 満足させられないパラメーターや、模型境界面における波 動の反射およびこの部分の独自の振動現象など実際とは異 なる現象の影響について十分検討する必要があろう。

(2) 沈埋トンネルは、一般に、函軸直角方向には周辺の 地盤の振動に従って振動し、地震波の勢力が優勢な、比較 的低い振動数の範囲では沈埋トンネル独自の振動は現われ てこないと考えられる。トンネル軸方向の振動については トンネル周面の摩擦やスベリなどの影響も考慮に入れなけ ればならないと考えられ、今後、検討する必要があろう。

(3) 二次元平面ヒズミ状態を想定し、有限要素法を用いた応答解析は、実験により求められた沈埋トンネルー地盤の振動特性をよく説明することができる。したがって、減衰定数など実験では相似させることが困難な条件の場合の振動特性を推定するためには有力な手法であろう。しかし、海中人工島の解析のように、二次元的な振動解析では説明できない場合もある。このような場合には三次元的に解析していくことが必要と考えられる。

# 5. あとがき

沈埋トンネル建設の活発化に対処するため,建設省・運 輸省の要請をうけて土木学会の沈埋トンネル耐震設計委員 会(岡本舜三委員長)では,現在沈埋トンネルの耐震設計 指針の作成を急いでいる。この指針原案<sup>10)</sup>をみると, 沈埋 トンネル本体の基本設計は, 地盤の動的変位を考慮した簡 易計算法(許容応力度法)を採用し, これに対して動的解 析(地震応答計算ならびに振動実験)を施すことが規定さ れている。このように, 沈埋トンネルの耐震設計では, 動 的解析が高い重要度をしめており, 今後とも多方面で動的 解析による沈埋トンネルの耐震性の検討がなされていくも のと思われる。本小文がその際の一助となれば, 筆者らの 幸甚とするところである。

沈埋トンネルの地震時挙動をより的確に把握するために は、本小文で記述した解析のほか、周辺地盤の三次元的な 応答解析およびトンネル軸方向の質点系モデルなどによる 応答解析が必要となるが、これについては別の機会に報告 したい。

最後にここで記述した各種の調査は,主に建設省土木研 究所振動研究室で実施されたものであり,栗林室長をはじ め同研究室の皆様に心から感謝致します。また,大型振動 実験を協同で実施した科学技術庁国立防災科学センター耐 震実験室(筑波)の各位に対して謝意を表します。

#### 参考文献

- 田村重四郎他:沈埋トンネル 模型振動実験,第11回地震工学 研究発表会講演概要集,S46.7,pp.25~28.
- 2) 田村重四郎他:沈埋トンネルの応答解析,第12回地震工学研 究発表会講演概要集,S47.7,pp.107~110.
- 青木義典他:沈埋トンネルの野外模型振動実験,港湾技術研究 所報告, Vol. 11, 1972.6, pp. 261~307.
- 浜田政則:沈埋トンネル耐震設計計算法に対する一試案,第3
   回日本地震工学シンポジウム講演集,1970.11, pp. 739~746.
- 5) 武藤清他:沈埋函の地震応答解析,第3回日本地震工学シンポ ジウム講演集,1970.11, pp. 437~444.
- 6) 後藤洋三他:沈埋トンネルの地震応答に関する研究,土木学会 第27回年次学術講演会,S47.10,pp. 519~522.
- 7) 畑野正:振動実験における模型相似律,電力中央研究所技術研究所所報,第8巻第4,5号
- 岩崎敏男他:沈埋トンネルの地震応答,第12回地震工学研究 発表会講演概要集,S47.7,pp.111~114.
- 岩崎敏男他:地盤と埋設構造物の振動性状, 関東地震 50 周年 記念地震工学シンポジウム論文集, 1978.10, pp. 155~162.
- 土木学会: 沈埋トンネルの耐震性に関する調査研究報告書,土 木学会, S 48.3.

(原稿受理 1973.12.14)

\*

\*