

沈埋トンネルの耐震設計について(1)

On Earthquake Resistant Design of a Submerged Tunnel (1)

田村重四郎*

Choshiro TAMURA

沈埋トンネルの耐震設計を行なう場合、従来の地上構造物の耐震設計の場合とは異った種々の概念と方法が必要になる。ここでは構造上および動的挙動の特質ならびに耐震設計上の課題と留意点を挙げて、本型式のトンネルの耐震設計上の考え方を述べる。

1. ま え が き

従来トンネルは、地中に建設されているので地震の加速度は小さく、トンネル自体は地盤と共に震動すると考えられていたことにより、耐震性は高いものとされていた。このことは一般に堅硬な地盤に建設されているトンネルの場合には認められている。しかしトンネル周辺地盤の地震時の強度や安定性が問題となるような場合および周辺地盤が軟質である場合には、改めて検討する必要がある。

沈埋トンネルは他の型式のトンネルとは著しく異なり、通常長さ100m前後のトンネルの要素を陸上で製作して、水上に浮べて曳航し、建設地点で水底に沈めて、あらかじめ堀削されたトレンチ内(一般に軟質地盤である)に据えつけて要素を互に連結した後土砂で埋め戻して完成するもので、一種のプレハブ工法のトンネルと言うことができる。構造としては鋼殻を使用した円形に近い断面のものとRCの箱形断面のものと2種に大別される。函体の比重は1.1程度で、地盤の支持力の面からみれば大変有利な構造である。

1894年米国で下水道用トンネルとして完成した Shirley Gut Syphoneがこの型式のトンネルの最初といわれていて、欧米に多く建設され、耐震性がそれ程重要視される事情に直面しないまま最近まで歩んで来た。最初に耐震性を考慮して構造設計が試みられたのは Deas Island トンネル(バンクーバー、1959年完成)であり BART トンネル(サンフランシスコ〜オークランド、1969年完成)である。前者は土被部分の地盤の地震時の迂りを考慮してトンネル横断方向の耐震性を検討しているのに対し、後者はトンネル軸線上の地震時の地盤の変位を想定して、トンネルに発生する地震力を算定している。本邦では古くは昭和19年に建設された沈埋区間長約49mの安治川河底トンネルを始めとして羽田トンネル(首都高速道路公団)などがあるが、何れも小規模なものであった。この数年、

多数の要素からなる本格的な沈埋トンネルが盛んに建設されるに到り、本邦の地震事情より耐震性の検討が盛んに行われるようになった。

昭和46年より沈埋トンネルの耐震性を研究する委員会が土木学会で設置され、昭和50年3月「沈埋トンネル耐震設計指針(案)」(以下指針(案)と言う)ができ上がった。その後も各方面で理論的、実験的検討並びに実構造物の地震観測が進められている。筆者も上記委員会の委員として参画した。ここではこの課題の基本的な事項の説明と研究の紹介を行いたい。

2. 耐震の面から見た沈埋トンネルの特質

構造上から見た場合、沈埋トンネルは所謂沈埋トンネル部と取付部および立坑・換気塔部から構成された構造であって、各部は夫々次に述べるような特性をもっている。

1) 沈埋トンネル部

水底もしくは地下水位以下で、通常軟質地盤中に埋設されている大断面の管状構造物である。それ故、トンネルの耐震性に対して地盤の地震時の安定性は必須の条件であり、地盤とトンネルとの相互作用は基本的なものとなる。トンネル壁には略々純圧縮または純引張の応力状態になる部位が発生することが予想される。一般にコンクリートを主要な材料としているから、この応力状態には留意する必要がある。

2) 取付部

沈埋トンネル部から地上までの部分で、トンネル構造、開渠構造またそれ等の組合せになっているのが普通である。これ等の構造の耐震性の検討には震度法が慣用されている。

3) 立坑・換気塔部

トンネルの施工とトンネル内の換気を主目的として、トンネル区間に設けられる壱型の構造物で、地表面より高さ40mに達するものもある。トンネルとの取付においては、トンネルの一部を構成している場合が多い。その挙動は一般の建築物の場合と類似しているものと考えられ、耐震設計は震度法で行われている。

本型式のトンネルは以上のような夫々異なった力学

* 東京大学生産技術研究所 第1部

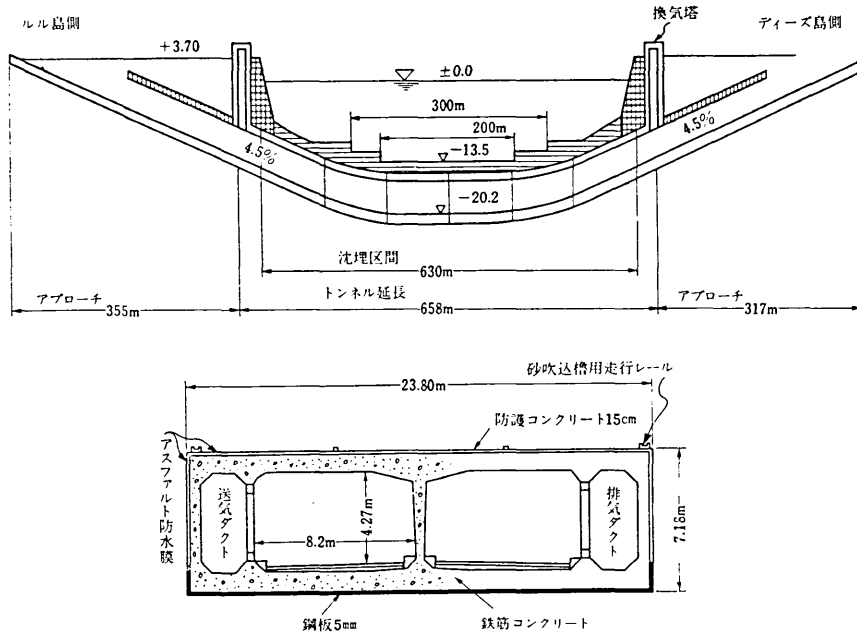


図1 Deas Islandトンネル

的特性をもつ部分を連続させたものである。それ故地震時に異なる挙動を示す構造各部をどの様に接続するかは当該構造の耐震上の重要な課題である。これを解明するためには、地盤の地震時の挙動、各構造部分の地震時の挙動のみならず、必要に応じて常時の挙動も亦知っておく必要がある。

現在までの調査研究によれば、トンネルの地震時の挙動は地上構造物の場合と異り、地盤の挙動に拘束されて自由に振動しにくい事実が認められている。その結果、トンネルの耐震性を評価するためには、トンネル軸線に沿う地盤の地震時の挙動を把握しなければならない。

耐震性の評価は構造力学的視点からのみならず、構造物の種類、機能、重要性、規模等の諸要素からも行われる。水底でしかも地中に建設されるこの長大な構造物が主要な交通路として使用される場合を想定すると、万一の場合の消火、排水等の保安設備の機能とその作動の確実性が地震時に維持されるよう特に考慮する必要がある。このことは構造そのものにも影響を及ぼすことになるので、計画の段階で調査検討しておくなければならない。

以上は沈埋トンネルの耐震性の特色を示すものである。

3. 震 害

沈埋トンネルでは未だ大地震の経験がないので、類似した構造物が強い地震動を受けた場合の挙動やどのような震害例があったかを知ることは、その耐震性を判断する上で重要な意味がある。

一般に山岳トンネルの震害は震央部の狭い範囲に限られており、被害状況も比較的一定している。図2は関東地震の際の鉄道、発電施設(導水路)のトンネルの被害ヶ所を示したものである。◎印は震源を示すが、被害ヶ所の大部分が、震央部分に集中していることが分



図2 トンネルの震害分布 (関東地震)

かる。比較的遠距離にあって被災した13~16のトンネルは何れも地山が良好でなかったことが報告されている。トンネル被害の大部分は坑門又はその附近に発生していて、一般に地質の良好なトンネル中央部には被害は少ない。トンネル中央部の被害が、被害位置の地盤の良好でない理由によるものであろうことが、関東地震、北美濃地震、新潟地震等で指摘されている。このことはトンネル周辺の地盤の条件がトンネルに大きな影響を与えていることを示している。

軟質地盤中のトンネルの被害例として関東地震の際の熱海線（現東海道本線）小峯トンネルがある。このトンネルの国府津方は赤土の地盤に建設されたもので、坑口より184呎は開削して擁壁を築造し、RCの桁をこの間に架け渡して天蓋とし、埋戻したもので、通常の場合とは著しく異なっている。この開削区間が崩壊したが、熱海方に進むに従って地質は良好となり被害は殆んどなくなる。この被害は、軟弱地盤内にあって、土被も僅かで、構造的に地震時の土圧に耐え得なかったため生じたものと考えられている。

図3は新潟地震に於ける新潟駅の地下道の被害であ

る。地下道はRCの箱形断面をもち、地下道よりホームに上る階段をもつ断面とこの箱形断面の部分が交互に連なっている。図で分かるように断面そのものに被害は殆んどないが、ブロック毎の回転、縦断方向の継手における回転、ずれが認められる。

沈埋トンネルは軟質地盤の表面近くに埋設されているものであるから、これ等の被害例は貴重な参考になるが、通常横断面の設計では荷重として水圧が大きな部分を占めるため横断面は堅固に作られているので、軸方向の構造と強度が重視されることになる。

4. 沈埋トンネルの地震時の挙動

4.1 地震観測

構造物の耐震性を検討する場合、地震時の挙動を知る必要がある。本邦の如く地震活動の活発な地域にあっては実構造物で地震の観測を行うことは、この目的のために最も確実で容易な方法であると思われる。著者の知る範囲では、羽田、衣浦港、東京港海底、扇島の各沈埋トンネルで地震観測が行われている。測定項目は必ずしも一定しないが、加速度、トンネル壁の歪、変位が主になっており、その他に鉄筋計、間隙計等が設置されている。又構造物の挙動と関連して地表面、地

盤内にも加速度計が設置されている例がある。ここでは最も観測資料の充実している羽田沈埋トンネルの地震観測を中心にして記述する。

トンネルは羽田空港入口附近より幾分上流によった多摩川左岸より、上流側に僅かに凸に湾曲した路線で多摩川を横断して川崎側に達しており、トンネル区間長は480mである。トンネルは、厚さ6mmの防錆装置を施した鋼板を外殻とした長さ80m、高さ約8m、巾約13mの卵形の断面をもつRCのエレメント6ヶよりなっている。地盤については、河川中央部で約40m、川崎側で10数mの厚みの軟質な沖積層が、よく締った所謂東京砂礫層を覆っている。地盤の卓越振動数を常時微動観測より求めると0.3 Hz前後、0.5~0.8Hz、0.9~1.1Hzなどが得られた。観測計器としては、エレメントNo. 2とNo. 4に加速度型地震計を夫々2台と側壁の軸方向の歪を測るための歪計を夫々4台設置している。

昭和45年4月より今迄に歪又は加速度の大きさが解析上有意義とみられる地震を約30個記録することができた。図5は昭和47年12月4日八丈島東方で発生したM=7.3の地震の記録の一部で、現在までの地震の中で最大の歪が記録された。図中No.4TSA, No.4TAAは夫々エレメントNo. 4で観測されたトンネル軸直交方向およびトンネル軸方向の水平方

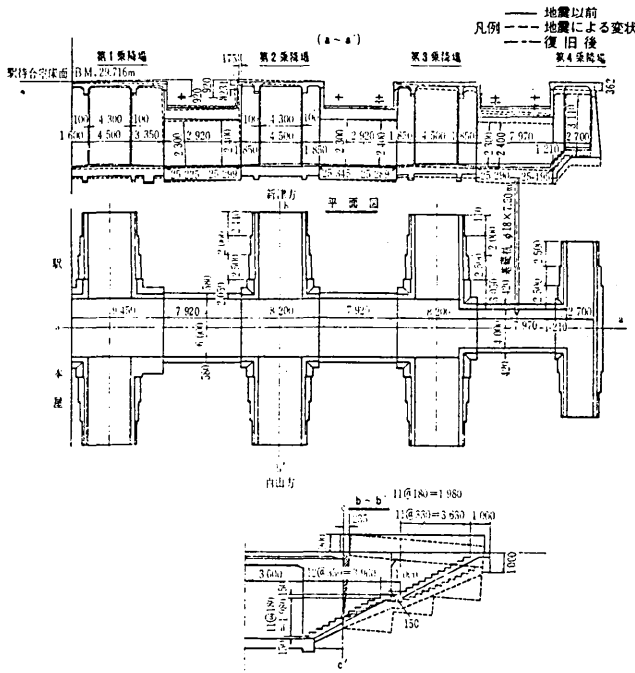


図3 新潟駅地下道変状図

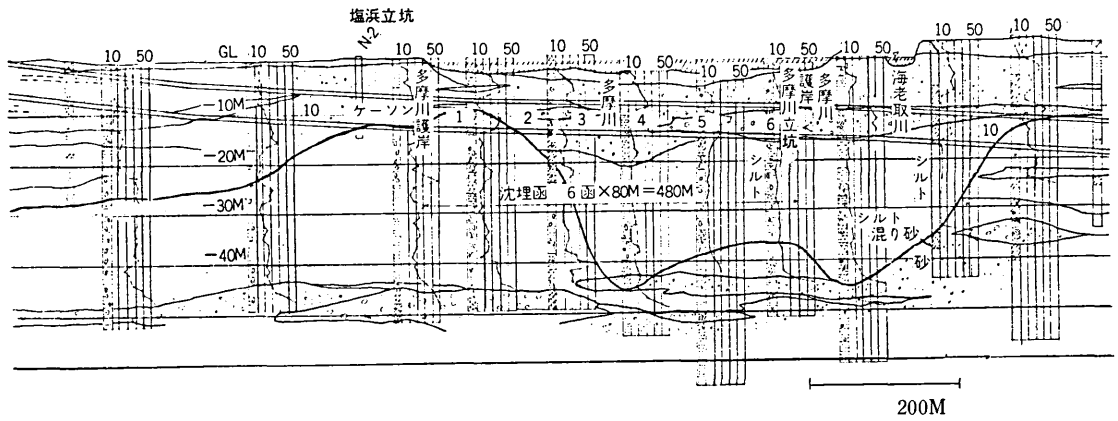


図4 羽田沈埋トンネル地点の地盤

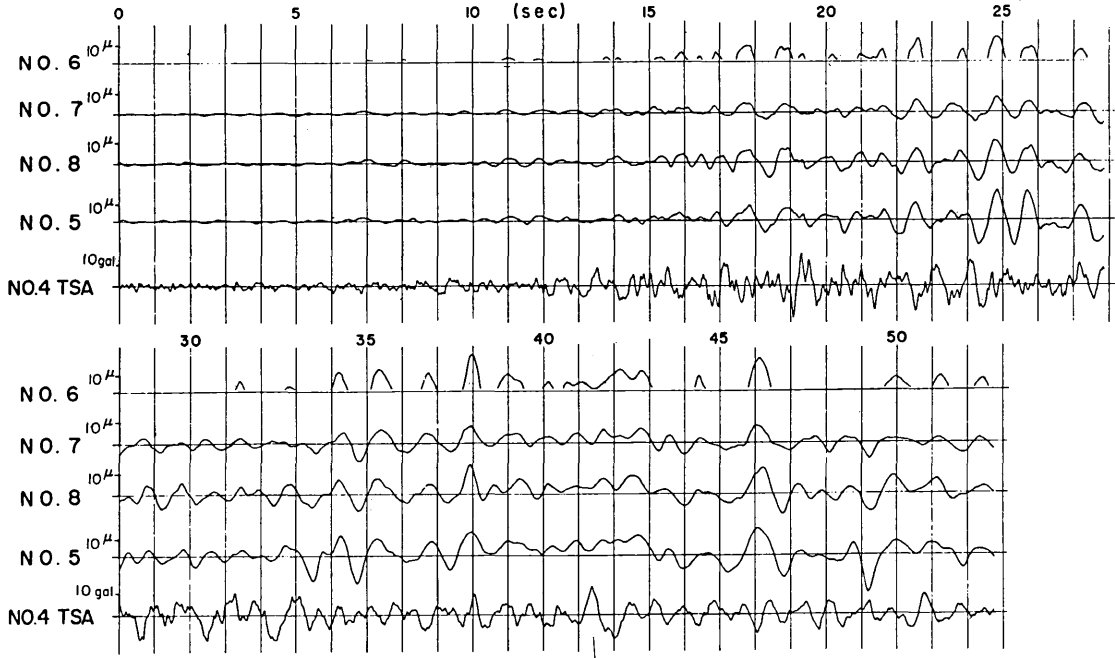


図5 地震記録(1972年12月4日)

向加速度であり、No. 5～8はトンネル側壁で記録したトンネル軸方向の歪である。歪の測定は50mはなれた2点で行われているにも拘らず、歪波形が互に非常によく似ており且つ位相差が殆んどないこと、歪波形の卓越振動数は地盤の低次の卓越振動数に一致していること、記録の終部で約7秒の卓越した振動がみられることなどが特色である。因に歪記録には測定装置による周波数特性の影響が全くないことに注目されたい。

図6は地震毎に最大加速度と最大歪を選んで図示したものである。2本の略々平行な直線の間で大部分の測定結果が含まれ、2直線が上限と下限をあらわしていることが推測される。下限の直線の近傍の点はマグニチュードが小さく(5以下)震央距離が短い地震の場合で2～3 Hz以上の比較的短い周期の振動成分が卓越している。上限の線に近く図示されるのは前述のような比較的周期の短い振動成分は殆んどなく1

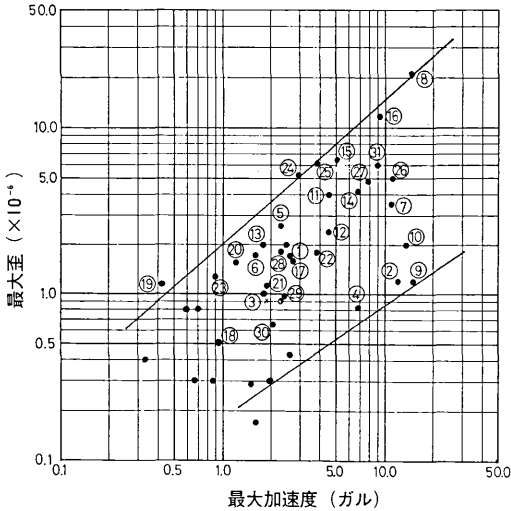


図6 最大加速度と最大歪の関係 (羽田トンネル)

～2秒又はそれより長い周期の振動成分が卓越している場合であって、加速度の大きさの割に大きい歪が発生している。同じ最大加速度値に対して歪の大きさが10倍以上変化することは重要である。

図7は最大歪と震央距離との関係を、マグニチュードをパラメーターとして表わしたものである。マグニチュードを一定とした場合、震央距離の増加による最大歪の減少の割合は、地震動の最大加速度のそれにくらべて、著しく小さく、距離によってそれ程減少しないことがわかる。これは、地盤の低次の卓越周期が長いため、この周期をもつ地震動成分が距離の増加によ

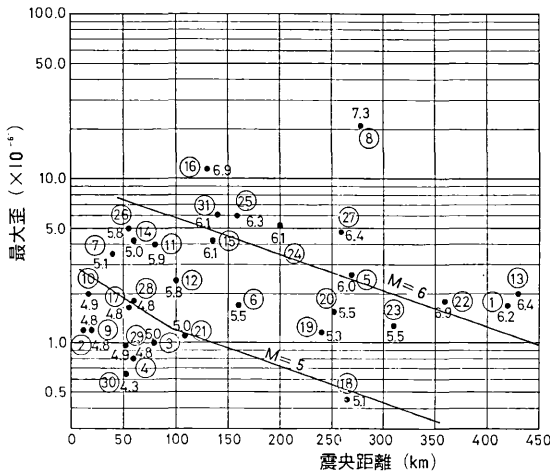


図7 最大歪と震央距離の関係 (羽田トンネル)

てそれ程減少しないことによるものと考えられる。

次に地盤とトンネルの相互作用であるが、本トンネルの地震観測では測定の都合上地盤の観測をしなかったが、著者等が実施したシールドトンネルでの地震観測や他の観測例並びに次にのべる実験的研究によって、地震時のトンネルの挙動は震動する地盤にバネで結ばれた質量を無視し得る梁 (または管) と考えてよいことが分かっている。トンネルを弾性床上の梁とすれば羽田沈埋トンネルの場合、トンネル軸直交水平方向の振動に着目すると、地盤のトンネル軸線上の変位波形を正弦波と仮定すれば波長が200m以上であれば地盤とトンネルは略々同程度の振巾を示すことが推定される (図8参照)。図でEIはトンネルの曲げ剛度で、Kyはトンネルと地盤を結ぶバネのバネ係数である。

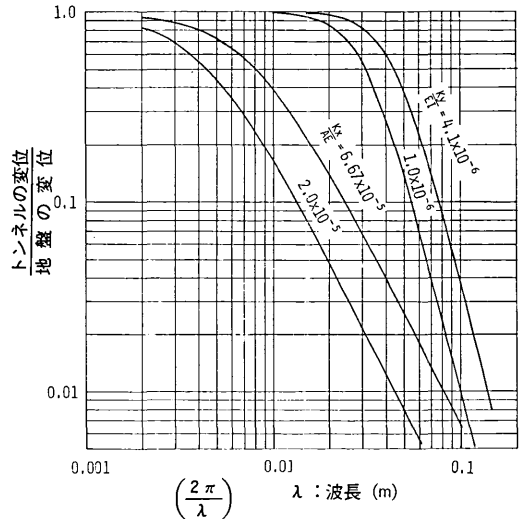


図8 波長とトンネルの変位との関係

4.2 模型実験

地震時の沈埋トンネルの挙動を調べるため、実地盤に埋設した模型の振動実験、室内で振動台を用いて行う模型試験および、埋設土に静的な変位を与えてトンネルの変位をみる実験の3種の実験が実施された。実地盤の実験では比較的口径の大きい長い鋼管又ビニール管を地表近くに埋設し、特殊なS波発生装置或いは爆発、衝撃等により地盤に振動を発生させ、模型と地盤の変位、加速度、歪をトンネル軸線又はその周辺を含めた地盤で測定している。室内振動実験では、ゼラチンなど低弾性係数をもつ材料を地盤模型材料とし、これにシリコンゴムなどを材料としたトンネル模型を模型地盤に埋設した3次元模型を振動台上に据えて加振し、地盤およびトンネルの挙動を立体的に調査している。

之等の実験の結果の主なもの概ね次のようである。

- i) トンネルの慣性力は無視することができる。
- ii) 地盤では地形、土質、地盤構造などの地盤条件に応じて固有の振動が卓越すると考えられる。
- iii) トンネルは軟質地盤中であっても、トンネル軸方向および曲げの変形を受ける。

5. 動的解析用モデル

筆者等は地震観測と模型実験で得られた地盤およびトンネルの地震時の挙動に関する前述のような基本的な知見をもとにして、動的解析のための原理的かつ実用を目指したモデルを提案した。このモデルは図9に示すように、トンネル周辺の地盤を、トンネル軸に直交する面により多くのセグメントに分割し、セグメント毎にその剪断一次振動に等価な1質点-バネ系に置換し、それ等の質点を更にトンネル軸方向でバネで接続したもので、地盤の地震時の平面的な変位波形を算定し、之とトンネルとをバネで結んでトンネルの変形を求めるようになっている。このモデルは高次振動に対する対応が充分でないため、応答加速度は可成り小さく算定された例があるが、トンネルの軸方向の歪に対しては地盤の高次振動の影響は少ないため十分な精度が得られ、また歪に対する高次振動の影響はモデルの適用方法を工夫することによって略々算定することができる。但し地盤状態が3次的に非常に複雑な場合にはこのモデルが充分でない場合が起り得る。

設計用として、地震記録を、表層地盤のS波の伝播速度で進行する波動を一地点で測定した記録とみなして、トンネル軸線に沿う平面的波形を推測し、これに基づいて地震時のトンネルに発生する歪又は応力を算定するモデルも検討されている。このモデルは非常に簡

単であると言う利点をもつが、従来表層地盤の挙動が重複反射理論によって可成りよく説明されていることから、実用上の問題として、振巾、波長をどの様に変えようか、また地盤条件の変化を如何に算入するか等のことが残されている。

6. 耐震設計における基本的な考え方

既述のように、地上構造物とは異なった地震時の挙動を示す新しい型式の構造物であるため、現在考えられている耐震設計の方法にも、幾つかの新しい視点からの見解が含まれている。次にそれについて記述する。

6・1 設計のための地盤

図7が示すように、地盤の低次の卓越振動の周期が1秒又はそれ以上である場合には、地震時にトンネル壁に発生する軸方向の歪は、震央距離が増加してもそれ程減少することなく、むしろ地震のマグニチュードが歪に大きな影響を与えているので、耐震設計で対象とする地震は、比較的広範囲で発生する地震の規模を考慮してきめる必要がある。指針(案)では、建設地点を中心として半径200kmの範囲で、有史以来の地震記録より大地震の発生位置を調べ、最近70年間の地震記録より石本-飯田の式を用いて地震の発生頻度を推定することが提案されている。これによって将来の一定期間に発生する地震の規模と回数を推測する訳である。東京近傍の沈埋トンネルの動的解析に多用されている地震とその規模は、外側地震帯に属しているマグニチュード8程度の巨大地震と、近距離に発生した場合のマグニチュード7程度の地震である。一方指針(案)では、沈埋トンネルの保安対策をも含めて、トンネル地点の地震動の性質を知るため、地震観測を行うことをきめている。

6・2 地盤の安定性

沈埋トンネルの耐震性については之を囲む地盤の地震時の安定性は、新潟地震、アラスカ地震などの地盤震害から推測されるように、基本的な事項である。現在行われている地震時の地盤の安定の検討は、斜面の安定の検討と砂地盤の流動化の検討に大別される。何れも地震動、地形、土質、地盤構造が互に関連した極めて難解な課題であり、多くの調査・研究が進められている。沈埋トンネルの場合には、流動化しにくい粘性土の地盤の場合でも、地震時の地盤の変位が大きく、トンネルに被害を与えるようになってはならず、更に支持力の低下が著しくても耐震上不都合が発生することがあることに注意しなければならない。

また此の課題はトンネル地点の比較的広範囲な地盤の安定と、トンネルの極く周辺の地盤の安定とに分けても考えることができる。

従って構造設計のためのみならず地盤の安定性を検討するためにも、サンプルを用いた各種静的および動的

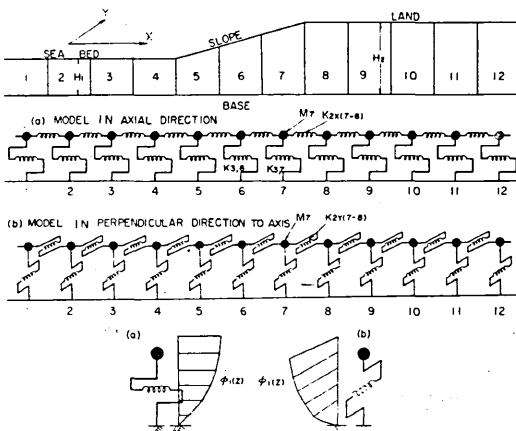


図9 沈埋トンネルの数学モデル

的な室内試験の他、現地での速度検層、PS検層などの各種検層や弾性波探査等の実施が必要となる。指針(案)では調査・試験を実施すべきものとして次のものを挙げている。

- イ) ボーリングおよびサウンディング
- ロ) サンプリングおよび試料の室内試験
- ハ) PS検層
- ニ) 密度検層
- ホ) 常時微動測定

此等の試験・調査で、同一の力学量について複数の試験で求めた値が一致しないことがある。歪レベル、試験方法、試験過程によって相異が生ずる訳である。特に動的試験の結果がそうであり耐震性と関連して評価する場合多くの困難な問題があり、現状ではその方法は必ずしも確立されているとは言いが工学的判断を行う場合の重要な資料である。以上のことは沈埋トンネルの耐震設計では、地震動、地盤条件についても調査が重要な事項であることを示している。

地盤の安定は斜面等については通常迂り面法が慣用されている。沈埋トンネルでも斜面では之に據って検討されるが、水平地盤に於いても、地中に水平な迂り面を仮定して震度法を適用し、その面での滑動を検討するものとしている。場合によっては表層を一自由度の剛塑性パネ特性をもつ剪断振動モデルに置換して地震応答計算を行い地盤の変位量を検討する。

流動化については、よく締まっていない、粒径の揃った砂分を主とした地盤が問題であるとされている。検討方法としては、地震時の応力状態を仮定し、サンプルにその応力状態を再現したり、シリンドー状のサンプルに定常波形や実地震波形の荷重を加えるなど応力の面よりの方法と、N値、粒度分布など主に地盤状態材料の面からの方法がある。液状化に関する研究は現在盛んに進められ次第に明かになってきているが、猶検討が必要であって、指針(案)では土の動的試験を行って、土の地震時の性状を把握しつつ、粒度分布、N値、地盤の最大加速度から地盤の安定性を判断する立場をとっている。その結果によっては、地盤改良、路線変更、構造の変更がはかられることになる。

これと並行して埋戻し土の地震時の安定も亦重要である。この流動化は不等沈下や浮上などトンネルの不安定を惹き起すことにもつながるからである。

6・3 耐震設計

前述のように構造的にいくつかの特質をもっているため、耐震設計方法においても他の種類の構造物と異った部分がある。そこで指針(案)で挙げている基本方針の要点を次に記すことにする。

(1) 建設地点の地形、地質などをふくめて全体の構造系が耐震的になるよう配慮する。

(2) トンネル各部の耐震設計を行う場合、地震時の

地盤の変位もしくは設計震度に基づいて設計し、全体の構造系に対しては動的解析に基づく設計と検討を行う。

(3) 継手その他剛性の変化が著しい部分の設計については、その影響と効果を検討する。

(4) 地震時の保安対策に当っては保安対策のための諸設備の管理運用が確実にできるよう配慮する。

これ等の諸点はトンネルの特質に対応しており、その特質に基づいて種々の角度から総合的に耐震性を検討し、地震時の安全をはかる立場が示されている訳である。(1)については既に概略を説明した。(2)で注目されるのは地盤の変位に基づいて設計を行うことと構造系全体に対し動的解析を行うことをきめた点にある。従来通常の構造物の耐震設計では構造各部材の慣性力が基本要素になっているのであるが、沈埋トンネルの場合には、地盤の地震時の変位を基本要素としたものであり、これに伴って設計の考え方が非常に変わって来る訳である。設計震度と言う地震力を考える尺度が、地盤の変位に変わるため、それに要する資料、加速度と変位の関連等の検討が必要になる。また既述のように地震応答の異なる部分の結合連続した構造であるから、構造各部が夫々既に確立されている方法で設計されても、更にそれ等の接續と全体としての挙動を検討する必要が生ずる。(3)は(2)と関連がある。構造各部の接續方法、エレメント間の継手の種類・方法は、発生する応力値に著しい影響を与えるだけでなく、トンネルの機能にも関係するため、特に慎重に検討するようのべたものである。解析例によれば沈埋トンネル区間長が約1kmで、沈埋トンネル部と立坑との間で、自由な変位を許した場合、数cmの相対変位が算定された。(4)では構造設計に加えて地震時の保安対策を講じ、その保安対策が確実に作動するよう、計画、構造、機材に配慮を加えることが指示されている。このことは、構造物の特質により、従来個々に行っていた耐震設計を統一的に実施することを意味し、広義の意味の耐震設計と言うことができる。

次に動的解析について概略をのべる。換気塔、取付部の擁壁等は慣用の震度法或いは修正震度法によって耐震設計がなされ、その耐震性については多くの経験をもっているが、本型式のトンネルは大地震の経験がない。そこで、地盤を含めて構造系の動的挙動をより正確に把握するため動的解析を実施することになったのである。動的解析としては、地震応答計算の他に室内での模型振動実験による実験解析を行うことを指針(案)では提案している。両者を有機的に組合せる事により、三次元的で、複雑な地盤条件下での地盤とトンネルの地震時の挙動を、詳細に確実に把握しようとするものである。地震応答計算では三次元の有限要素法によって応答を求める方法と前記の解析モデルを利用する方法があるが、後者が一般に利用されている。模

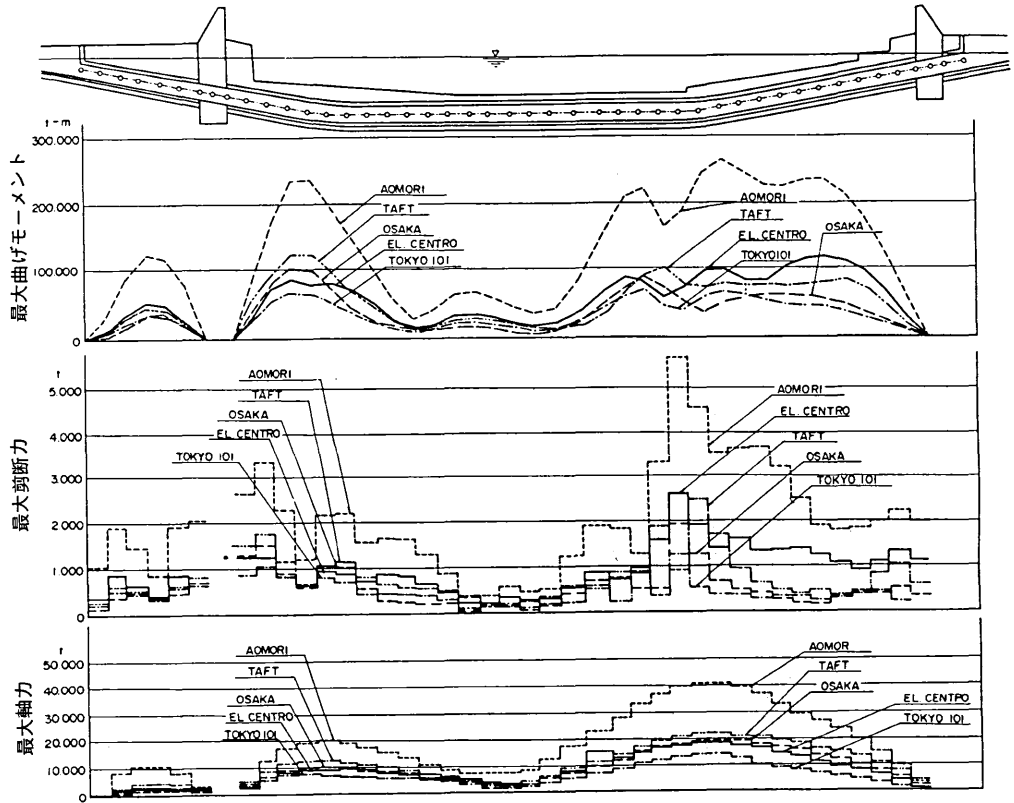


図10 東京港海底トンネルの地震応答諸量の分布

型実験では地盤材料としてゼラチン、アクリルアミド系の地盤安定材が使用され、トンネル材料としてはシリコンなどが使用されている。

沈埋トンネル部の設計の対象となる地盤の変位については、トンネルの長さに比してより広い範囲で一様に起る変位や波長の長い変位成分はトンネルの歪には大きな影響を及ぼさず、トンネルの剛性に関連があるが波長が非常に短い場合も同様であることがわかっている。また普通は地表層の応答変位が検討の対象となっている。

図10は著者等が提案した解析モデルを用いた東京港海底トンネルの地震応答の計算結果の一部である。応答諸量のトンネル軸線にその分布が、地震により大きさが変わるにも拘らず幾何学的に類似した形状をなし、地盤条件の変化が地震力の分布形状に著しい影響を与えていることが分かる。

既に耐震設計における地震時の保安管理施設の位置づけと重要性についてのべたので、最後に指針(案)で挙げられた保安設備の種類を記す。

- i) 地震動の検知・記録・通報設備

- ii) 潮位および波高の検知・記録・通報設備
 - iii) 地震時および直後の交通管制設備
 - iv) 沈下・洩水の検知・記録・通報設備
 - v) 避難・誘導設備
 - vi) 無停電設備
 - vii) 交通監視設備
 - viii) 排水設備および浸水防止設備
 - ix) その他(歪計・鉄筋計・応力計など)
- 之等の設備の外に消火等の通常のトンネルの保安設備が加えられることは勿論である。

まとめ

以上沈埋トンネルの耐震性ならびに耐震設計の基本的な考え方について主にのべた。具体的な問題については次の機会に述べる心算である。

(1976年3月1日受理)

参考文献

T. R. Kuesel: Earthquake Design Criteria for Subways, Proc. of ASCE 95, ST6, 1969

- 土木学会：沈埋トンネルの設計・施工法に関する調査報告書，1971年
- 土木学会：沈埋トンネル耐震設計指針(案)，1975
- 土木学会：関東大地震震害調査報告書，1927
- 土木学会耐震工学委員会：北美濃地震について，土木学会誌，48巻10号，1963
- 土木学会新潟震災調査委員会：新潟地震調査報告，1966
- 田村重四郎：トンネルの耐震性について，最近のシールド工法，新総合土木研究所，1975.
- 岡本舜三，加藤勝行，伯野元彦：地中の構造物に働く地震力に関する研究，土木学会論文集，92号，1963
- 桜井彰雄，高橋忠，堤一，矢島浩，野口俊郎，岩片透：松代地震を利用した超高压地中電線路埋設管の耐震研究，電研，土-67058号，1967.
- 桜井彰雄，高橋忠：Dynamic Stresses of Underground Pipe Lines during Earthquakes, Proc. of IV-WCEE, B-4, 1969.
- 岡本舜三，田村重四郎：軟弱層内での管路の振動実験について，生産研究，19巻12号，1967.
- 田村重四郎，加藤勝行，前田弘：軟弱地盤表面の線路上における地震動の特性について，土木学会29回年次学術講演会，1974.
- 岡本舜三：Introduction to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press, 1973.
- 田村重四郎，岡本舜三，加藤勝行，中川良隆：Earthquake Observation on Trench-Type Subaqueous Tunnel, 生産研究23巻1号，1971.
- 田村重四郎，岡本舜三，加藤勝行，沈埋トンネルの地震時の歪の観測，関東地震50周年記念地震工学シンポジウム，1973.
- 土田肇，倉田栄一：Observation of Earthquake Response of Ground with Horizontal and Vertical Seismometer Arrays, 第4回日本地震工学シンポジウム，1975.
- 中山茂雄，清宮理，田沼民雄，土田肇：衣浦港沈埋トンネルにおける地震応答解析：第13回地震工学研究発表会土木学会，1974.
- 田村重四郎，岡崎孝夫：沈埋トンネルの模型振動実験，第11回地震工学研究発表会，土木学会，1971.
- 後藤尚男，土岐憲三，高田至郎：地中埋設管の振動性状について第11回地震工学研究発表会，土木学会，1971.
- 青木謙典，上田肇，林 聡：沈埋トンネル水平部の野外模型振動実験第11回地震工学研究発表会，土木学会，1971
- 岩崎敏男，若林進，若月高晴，辻勝成：沈埋トンネルの地震応答，第12回地震工学研究発表会，土木学会，1972.
- 後藤洋三，太田順，佐藤拓男：沈埋トンネルの地震応答解析について，第12回地震工学研究発表会，1972.
- 粟林栄一，岩崎敏男，辻勝成：沈埋トンネルの模型振動実験，第7回土工学研究発表会，土質工学会，1972.
- 那須信治，沈埋管の振動実験，土と基礎，20巻4号，1972.
- 岡本舜三，田村重四郎：Behavior of Subaqueous Tunnel during Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, No. 3, 1973
- 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，1970.
- 武藤清，内田一義，津川恒久：沈埋管の地震応答解析，第3回日本地震工学シンポジウム，1970.
- 田村重四郎，岡本舜三，浜田政則：Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes, 東京大学生産技術研究所報告24巻5巻号，1975.