

水底トンネルとその周辺地盤の動的解析

名古屋大学

川本 勝乃 ○富樫 豊

Ⅱ. 序 近年、港湾、海峡等を横断する短から長大まで、種々の沈埋や水底トンネルが多く建設されるようになってきている。このような構造物は非常に軟弱な地盤中に横たわっているため、施工中あるいは建設後の安全性に対して、地盤軟弱性が静的土工計算、動的応答計算においてきわめて重要な因子となる。とりわけ動的問題においては、地盤軟弱性の本質である地盤中の水の存在が地震動により構造物に悪影響を及ぼす。また、軟弱層と硬層とがトンネル長手方向に対して傾斜し、トンネルが両層の境界を貫通する場合は、水がない乾燥した軟弱層であっても強制変形的な力が加わるのでトンネル自身にとって好ましいことではない。水底トンネルの耐震安全性には、このような因子の十分な考慮が必要である。しかし、長大構造物の力学問題を扱う場合、厳密な連続体力学による解法、近似解法としてのFEM、近似簡便法としての震度法があるが、いずれの方法によっても、単純明確な設計資料産出には問題がある。そこで、ここでは、従来の方法論の批判として“動的解析”を考え、構造物建設のための仮設計において大きな力を発揮するであろう簡便な新しい方法を提案する。そして次に、水底トンネルの耐震問題の細部の検討として、名古屋港付近海底地盤に通される導水用の水底トンネルをモデルに選りFEMによるシミュレーション解析を実行する。

Ⅲ. 動的解析考 A. 方法論一般 地盤・岩盤工学で扱う対象は、トンネル、大型基礎、ロックフィルダム等の長大な大型の構造物とその周辺の地盤・岩盤あるいは周辺地盤・岩盤そのものである対象物と、自重や地震動、風破動等の対象物への働きかけ（作用）とから成っている。作用に対する対象物の安全性は、対象物と作用の組合せにおいて、技術者あるいは社会的状況の基で付帯条件の導入として検討される。現場での構造物施工においては、対象物と作用の関係が設計レベルで十分に把握され、そこで得られる情報が設計資料として与えられ、これには2種類あると考えられる。一つは仮設計のための対象の把握に必要な資料であり、他の一つは実設計のためのそれである。両者はいずれも現場データに裏打ちされたものであるが、解析方法論において両者には差異がある。扱う問題を動的問題に限定すると、後者はシミュレーション解析が必要とし、前者は単に本設計のための資料づくりであるので対象の単なる把握で十分である。従来より動的解析には多くの方法が提案され実際に使用されているものに、簡便法として震度法、シミュレーション法としてFEMによる方法がある。仮設計レベルでは種々の批判がある震度法でも一応良いとされているが、その適用が常に完全であるとは限らない。ここで扱う水底トンネルについて考えても、長構造物が軟弱地盤そのものの中に埋設あるいは貫通されているので、軟弱性の水の存在が動的の“動”と統合して長トンネル自身への周辺地盤からの働きかけを要にする。しかしこの問題に対してFEMあるいは連続体力論を厳密に適用したのでは苦勞は多く、仮設計レベルでは高価な資料を生むだけである。よって震度法のように簡便であり、なにか“動”を若干評価する方法が必要であることになる。このことは、実際に複雑な対象と簡単な対象から絶えてとした、対象の概念的“より”のあることを意味し、従って新しい方法は、対象の“より”をうまく表現する概念思考から生み出されることになる。この立場に立って地震動を眺めると、強震でない地震動は対象の安全性に直接の強い影響を与えず破壊を生じめるための引きとなるだけであるから、対象の破壊現象が静的な力にのみ主に誘発されるとすると、地震動は対象の状態の急変変遷の原動力となる。すなわち弱震の場合、地震動は対象物の破壊のメカニズムを単純なメカニズムより概念的に“与える”作用を持つことになり、ただ、対象を概念的に歪ませるだけである。この歪みのプロセスの言及をさせると、地震動の“動”を“静”に組込ませることが可能になる。この考えによると、従来の動的等価な静的解析としての震度法は、力のレベルで“動”を“静”に組込ませる方法であると言える。式で表現すると、集中質量系の場合、 X を変形、 M を質量、 K を剛性、 P を荷重とし、簡単のため減衰を無視し $M\ddot{X} + KX = P$ (1)

なる運動方程式から慣性項を移項して $KX = P - M\partial_{tt}X$ (2) である。しかし力のレベルでの“動”から“静”への組込みは、対象の作用に関する組込みであるので、対象の設計を対象物に対して行うものであるなら、対象物への概念的“そり”の操作を行うことが、仮設計レベルではより簡単でありかつ一般的であると考えられる。従って著者は対象物レベルでの“動”の“静”への組込みを考えた。これは先の方程式で表示すると慣性項を復元力の項と結合させて $[M(\partial_{tt}X)X^{-1} + K]X = P$ (3) と表わされる。変形場が時間調和とすると本考えは、形式的に $[K - \omega^2 M]X = P$ (4) として表わされ、“動”の含入による対象物剛性の低下として表現される。すなわち、“動”からの“静”への組込みは、対象物の材料の構成関係のレベルで実行されて、結局構成関係が概念的“そり”を持ったことになる。この操作の実行は対象物全体にあたり一度に施される必要はない。対象がいくつかの部分対象に分けられる並列構造、対象が階層構造を有する直列構造の対象においては、各々のレベルの対象にて材料剛性劣下特性として地震動が考慮される。このことは対象にて集中質量系表示でなく連続体系表示によると明らかになる。簡単のため断面運動のみを考えて、線型連続体の運動方程式は、体積外力を P として

$$M\partial_{xx}u = P + \rho\partial_{tt}u \quad (5)$$

である。慣性項を復元力項に無理に結びつけて $(u - \rho\partial_{tt}u^{-1})u = P$ (6) とする。上式左辺第2項の演算は困難なので、ここでは、対象が階層構造あるいは単純な並列構造になっている場合のみを扱う。前者の場合は、無限体内の単位微小領域において体積外力が無いとし変形場が時間調和で表示されるとして、この変形場を運動方程式に代入して得られる振動方程式をまとめて代用できる。また後者の場合は、数個の境界条件を付加させて前者と同様に振動方程式を用いる。以上の例でもって、“そり”を有する対象を静的解析の範疇にとり、“動”の組込みを構成関係のレベルで行なえることがあつたが、ここでは動的問題用の範疇にオリジナル範疇を変えるため、ヤング率等の構成係数と密度とを結びつけた係数を考える。この係数は対象の材料学的な構成及び対象の空間的広がり、さらに運動(地震動)の程度を十分によく反映する因子で構成され、位相速度、群速度、消散係数で代表される。対象が階層あるいは並列構造を成しているときに、これらの係数は、ミクロ的な構成関係のうえにあり、対象の容易な等価弾性係数論によるマクロ的単純な関係でないで、ミクロ的マクロの関係の係数となる。

B. 階層構造における“そり”——土の内部構造を考慮する場合—— 対象の階層構造として複合媒体を考える。ここで扱う水底トンネルは非常に軟弱な海底地盤を貫通するので、地盤中における水の存在の影響をトンネル応答解析に際し十分に考慮する必要がある。水底トンネルの地盤軟弱性による影響を仮設計レベルで評価するために、トンネル周辺地盤の構成関係において“動”の“静”への組込みを考える。そのためにまず地盤は、ニュートン粘性を有する水で飽和された間隙を有する均質等方弾性固体から成る複合体とし、さらに間隙のオーダーが十分に小さいとして、水と弾性固体の混合体であると考え。混合体の運動方程式 (慣性力) + (復元力) = $(-1)^n$ (輸送運動量) in 第 n 相 (7) において、輸送運動量が水の粘性による減衰力で構成されるとして、ポアソン比二相体は
$$\begin{bmatrix} -(\beta_0\partial_{tt} + \beta_1\partial_{tt}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N\nabla^2 + (A+N)\nabla\nabla \cdot & 0 \\ 0 & R\nabla\nabla \cdot \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_f \end{pmatrix} = B\partial_{tt} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_f \end{pmatrix} \quad (8)$$
 で運動を支配される。ここに 指標 n は固相、液相を意味し、 u は変形、 P は密度、 A, N は固体テマ定数、 R は液体の体積弾性率、 B は透水係数 k_0 により $B = \frac{P_0 + \beta_0}{k_0}$ である。水の透水性(B)と運動の程度(ω : 円振動数)とを反映したマクロ的構成関係は、式(8)と解の時間調和性の仮定から得られる振動方程式
$$\left(\frac{1}{\omega^2}\right) \left[P_{tt} + N + i\frac{B}{\omega} N \right] - (\beta_0\beta_{tt} + i\frac{B}{\omega}(\beta_0 + \beta_{tt})) = 0$$

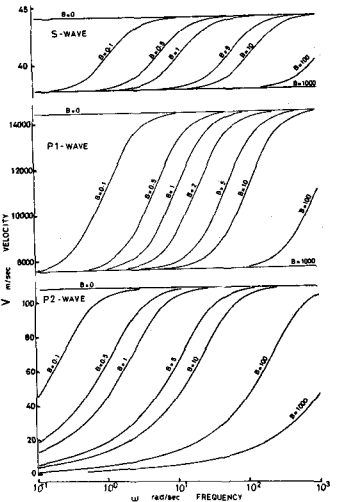


FIG.2.1 PHASE VELOCITY

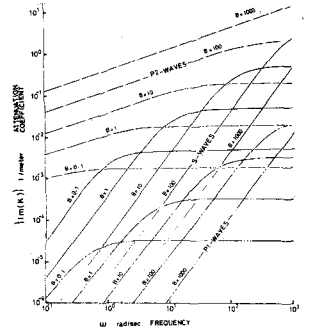


FIG.2.2 ATTENUATION COEFFICIENT

$$\left(\frac{1}{v}\right)^2 PR - \left(\frac{1}{v}\right)^2 (-P\beta_1 + R\beta_{33}) + i\omega(P + R) + (\beta_{33}P_{tt} - i\omega(\beta_{31}P_{tt} + \beta_{33}P_{tt})) = 0 \quad (9)$$
 を v と $\ln(k)$ について解いて得られる。ただし $\beta_{33} = \beta_1 \beta_3$, $P_{tt} = \beta_1 P_t$ である。簡単のため $\beta_1 = \beta_3 = 1$ とし、ヤング率 $E = 15.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, ポアソン比 $\nu = 0.4$, B を $0 \sim 1000$ の値とすると、マクロ的構成関係は Fig. 2.1, 2.2 で示される。振動数依存の剛性変化, 消散性変化の傾向がつかえる。透水係数考慮, 振動数考慮の構成関係は, 水府トンネル周辺地盤特性のみならず, フィルダム及びその直下の岩盤等へも適用できると思われる。フィルダムの場合, マクロ的構成関係は, コア材内及び間隙内の水の透水及び地震動との連成の程度を, 静的範疇において十分に適切に表現する。また, 材料が多くのミクロクラックを有しているとき, クラックを集合体的に適切に処理できるならば, 材料強度, 降伏条件を位相速度, 消散係数で表示することが可能となり, マクロ的構成関係は破壊問題へも拡張可能となり, さらに粒状体等における遊び粒子の考慮も自動的に構成関係へ組み込むことができる。

Ⅰ. 並列構造の“セリ”——多層地盤の場合——：水府トンネル周辺の地盤は一般に多層の状態で存在することが多い。トンネルの安全性はトンネル断面方向運動とともに長手方向運動に対しても検討されるべきである。

長手方向に伝播する波動(表面波等)に関する耐震問題を考えると, 地盤の多層性はトンネルそのものに震動障害を与えるであろう。トンネルとトンネル周辺地盤の相互作用が異なる地層同志の相互作用に比べてオーダー的に十分小であるので, トンネルの簡便な応答計算を容易に実行するために, 地盤多層を単層に置換することを考える。水平層状地盤の場合, 多層における運動方程式と層境界における条件式により, 時間調和の変形場を仮定して得られる振動数方程式によってその置換はなされる。すなわち, 単層がオリジナルな範疇を形成するとし, 多層及び運動の程度をその範疇からの“セリ”として概念づけることにより並列構造の対象が単純化される。並列構造におけるこのような考えは, 対象物の解析領域の規定に直接関係する。例えば上述の表面波伝播の多層地盤では, 波動波長と層厚との兼ね合いにより解析対象が規定される。従ってこの場合, マクロ的構成関係はトンネル位置周辺地盤の運動学的な影響範囲を指定することになる。簡略計算では, このことについて留意する必要がある。なお層状形態が斜層である場合は, 水平層状の場合とまったく同様に考えられる。

Ⅱ. 局所非均質性の組み込み——構造物と周辺地盤の相互作用——：岩盤中トンネル, 橋脚等の構造物は, 互換的オーダーの広がりを持つ周辺地盤に囲まれているので, それらの構造物自体の勝手な運動があまりみられないため, 従来より, 複合問題としての構造物と地盤との系の問題は, 構造物と地盤とを完全に分離させた部分系の単なる重ね合わせ問題としてとらえられている。しかしながら水府トンネルにおいては, 周辺地盤の劣悪な軟弱性により, 两部分系の運動学的オーダーの差は, あまり大きくない。従ってこの場合, 構造物と地盤との連成すなわち相互作用を考える必要が生じ, 構造物と地盤の一体解析が FEM 等により行なわれている。しかし, 仮設計の段階で仮に多小の厳密さを資料入力が必要となった場合には, 一体解析実行の必要はなく, 相互作用を若干考慮する方法が有用となる。幸いことに構造物の極周辺地盤のみが構造物の存在の影響を受けるだけであるから, 相互作用問題において, 周辺地盤の系をオリジナル系としトンネル位置周辺の地盤特性がトンネル存在によりトンネル無しの場合より“セリ”と考える。すると相互作用はオリジナル系からの局所的な“セリ”で表わされることになり, よって“動”を含めたマクロ的構成関係により, 局所非均質性(トンネル存在)が単純体系に組み込まれる。この場合の“セリ”は, 対象物において適当な単純化を相互作用範囲が記述されなくなる直前のレベルまでレベルダウンして施しておかれるであろう。従ってこれは, 半無限体における局所的異物存在の問題を解いて得られるであろうし, もっと簡単に, トンネル周辺の地盤の変形場を相互作用の場の表示として関数表現してもさしつかえはないと考えられる。このようにしてしまえる局所非均質性の特性を大域的な構成関係に並列に組み込むと, 相互作用を若干考慮したことになる。ただし, このような操作の実行可能性は, 対象の大きな階層構図にあるので, 地盤及び構造物の形状, その他があまり特異でないという条件が必要である。

Ⅲ. 再び一般論について：動的問題解決の簡便化は, 静的体系をオリジナル系とし“動”を系の“セリ”としてとらえられることでなされる。対象が複雑であれば, 対象を部分化し, その各々に“動”を組みこまれ, 一つの太

きな階層及び並列構造の骨組により、動的対象が単純化された。この考えは、いかなる対象においても有効であるから、簡便法ではとりわけ有効であり、さらに動的シミュレーション解析にも適用できる。

B. 水底トンネルの応答計算 **A. モデル:** 水底トンネルの地震動に対する安全性の検討として、地盤軟弱性、斜層存在などの影響をトンネルに及ぼすを調べる。解析モデルは名古屋港付近海底地盤とそこに建設されるトンネルから成るとする。地盤の材料係数及び形状はFIG.3.1の如くで、第3期層(T)の上に洪積層(D)、沖積層(A)の3層から成るとする。トンネルについてはコンクリート製、直径3mでほぼ水平にある深さで設置される。解析手法には、ここで提案した等価静的解析法とFEMを用いる。まずFEMでは計算機容量の制約上2つの2次元問題とする。一つはトンネル断面方向であり、他の一つは長手方向である。各々の場合について地盤、トンネルを平面歪の問題として扱う。断面方向においてはトンネルと地盤とを要素に要素分割し、地盤境界を鉛直下方水平面に對して水平ローラー支持、側方境界に對して左端^[1]の境界処理を施す。一方長手方向については、解析対象領域が広いので、トンネルを構材とし、地盤のみを要素分割し、境界については断面方向の場合と同一であるとする。ただしいずれの場合も地盤はものに減衰はないとする。このようなモデルにおいて過去の地震記録、定常距離の人工地震波に対する応答計算を中間加速度法により実行する。一方、簡便法では、入力地震波をスペクトル分解し、各々のスペクトル域で等価静的計算を行ないスペクトル領域で結果を統合する。

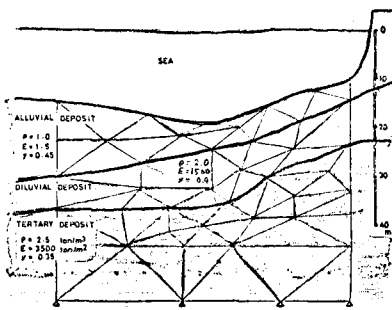


FIG. 3.1 GROUND PROFILE IN NAGOYA HARBOR

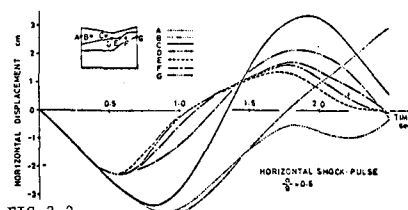


FIG. 3.2 GROUND RESPONSE UNDER HORIZONTAL SHOCK PULSE

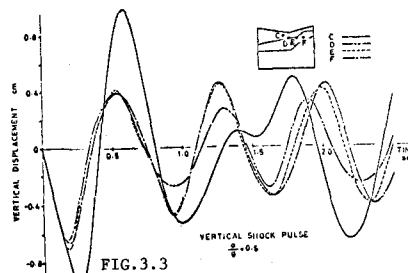


FIG. 3.3 GROUND RESPONSE UNDER VERTICAL SHOCK PULSE

B. 結果と考察: 地盤の斜層状の振動特性を調べるため、トンネルを無視し、加速度 $0.5g$ のShock Pulse 外乱に対する地盤の応答を時間幅 $\Delta t=0.01\text{sec}$ で表し、水平Pulseに対する地盤水平方向変位をFIG.3.2に、鉛直Pulseに対する鉛直変位をFIG.3.3に示す。両図の結果では側方境界を単にローラー支持(外乱方向によってローラー方向を異にする)としたため、側方境界節点が境界内部の節点の変位に比して大きい。この傾向は水平Pulseの場合特に著しいが、鉛直の場合、斜層の配りやういたためモデルは完全水平層状地盤とみなせれることにより、側方境界の未処理による影響は前者の場合に比してあまりない。斜層存在の影響は両Pulseの場合共に現れている。水平Pulseの場合、D層とT層境界を挟んだ2地点(図中点EとF)、A層とD層の点(点CとD)で大きな変形差が生ずる。鉛直Pulseの場合もまた、前者の2地点間で変形差がある。メッシュサイズが水平方向に極端に大きいので断言できぬが、奥縁近の境界を挟んで同一深さの2つの層で変形に差がみとめられることから、トンネルが水平に設置された場合、強制変形的な力かトンネルに加わる。これら以外の結果については省略する。

4. 結び 水底トンネルの地震動に対する安全性を検討するために、応答特性を究明すべく、簡便な解析手法を開発し、名古屋港付海底地盤をモデルとしてFEMによる解析を実行した。提案した手法は“簡便”なるもので“確信”なものも表わす考えに立脚する。ここでは地盤の形状、物質構成、構造物と地盤の相互作用等を“放物”なうしめる“そり”なる概念に置き換える。この方法とFEMによる水底トンネルの地震応答解析結果から、地盤軟弱性、斜層の存在は、トンネル耐震に對して重要な因子となることがわかる。

◇未算なす多賀助教授、当研究所の加藤章、加藤保正、中西信輔の諸氏に感謝の意を表します。

A. 参考文献 (1) 岡田 敏 “地盤の動的解析” 第4回地震工学大会 論文集 1975 (2) 多賀助 “水底トンネルの耐震設計” 第4回地震工学大会 論文集 1975 (3) 佐藤 隆 “地中構造物の動的応答” 第4回地震工学大会 論文集 1975

DYNAMIC ANALYSIS OF UNDERSEA TUNNEL

Toshikazu KAWAMOTO

Yutaka TOGASHI

Depart. of Civil Engng.

Nagoya University

ABSTRACT

The proposed method is presented for the discussion of the safety of undersea tunnel during earthquake, and the finite element simulation is applied to the system of tunnel and ground. This method is based on the deviated space composed of "simple" system under consideration of "complex" system of a structure and a ground. The deviation between simple system and complex system is described by deviatoric operator that reflects on a inertia force and interaction between a structure and a ground. From these points of view this method will be available for several mechanical problems.

By using this method and finite element simulation, vibrational properties of undersea tunnel are examined for earthquakes. Dynamic properties of a tunnel and a surrounding ground are effected by softness and nonhorizontality of layered ground in the direction of tunnel. The response of tunnel (for example, in Nagoya Harbor), which is considered to be nearly parallel with multi layered ground, is simulated by finite element method.