

## 上下方向地震動に対する水中トンネルの応答特性

Response of Submerged Floating Tunnels to Vertical Seismic Excitations

山崎 晶\*・黒崎和保\*\*・山下俊彦\*\*\*・佐々木康彦\*\*\*・水野雄三\*\*\*\*

Akira Yamazaki, Kazuyasu Kurosaki, Toshihiko Yamashita, Yasuhiko Sasaki and Yuzo Mizuno

Submerged floating tunnels have been proposed for many strait crossing projects, but seismic response of the tunnels have not been investigated in detail. This paper presents analytical method to estimate response of submerged floating tunnels to vertical seismic excitations. Based on the one-dimensional wave propagation method, response of seabed and sea water to the input earthquake motions is calculated. Also hydrodynamic force of the tunnel is numerically evaluated by the boundary integral method using the Green's function. Then the equation of motion for the tunnel is established and response of the tunnel acceleration and the tendon forces is calculated by solving the equation.

Keywords: Submerged floating tunnels, Earthquake, Numerical analysis

## 1. はじめに

水中に緊張係留される水中トンネルは、海峡横断の手段として様々な構想が示され、技術課題の検討が行われているが、その耐震性の評価については十分な検討が行われていない。地震動に対する水中トンネルやこれと同様の係留方式のテンションレグプラットフォーム(TLP)の挙動を考えると<sup>1)</sup>、上下地震動に対しては構造物には係留索の海底端が振動することで係留索を伝わり作用する変動張力の他に、海底が上下振動することで海水運動が生じこれによる流体力も作用する。一方、水平地震動に対しては、海水はせん断抵抗を伝えないため海水運動は生じないので変動張力のみが作用する。このように上下動に対する挙動が水平動に対するものより複雑であることから、本研究では上下方向地震動に対する挙動に焦点を絞って検討する。

水中トンネルの耐震性を扱った研究は、僅かに R. Bruschiら<sup>2)</sup>、F. Brancaloni ら<sup>3)</sup>の検討があるのみで、この中では上下地震動に対する応答では海中に疎密波が生じ、これによる流体力が応答に大きな影響を与えると述べているものの、解析手法の詳細について記述がない。水中トンネルと同様の緊張係留方式を採用した構造物であるTLPの上下地震動に対する検討は J. R. Morgan ら<sup>4)</sup>、T. Kawanishi ら<sup>5)</sup>、小林ら<sup>6)</sup>、G-S. Liouら<sup>7)</sup>が行っている。そして、文献4)5)6)では海底振動により起こる流体運動で生じる流体力は無視して扱われており、係留索を伝わる変動張力のみを外力としている。一方、文献7)では外力として変動張力の他に海底振動で生じる流体力をモリソン式に重複反射波理論で求めた流体運動を適用して評価している。

本研究では、文献7)に示された方法を水中トンネルの場合に適用して、トンネル中央部分での2次元状態での地震応答解析手法を構築する。また、その際必要となる水中トンネルの付加質量係数等の流体力係数を、ポテンシャル理論に基づいた境界積分法で求める。こうして得られた応答解析手法を用いて、水中トンネルの代表的な諸元を用いた地震応答解析を行い、トンネル加速度や係留索張力の応答特性を検討する。

## 2. 地震応答解析手法の概要

## 2-1. 海底および海水の運動の評価

図-1に示すような角周波数 $\omega$ のP波が水深 $h$ が一定な水平な海底面に鉛直上向きに一様に入射する状況を考える。このとき、地盤および海水を弾性体とすると、海底の変位 $W_B$ および水面より $d$ 下方位置での海水の変位 $W_T$ と、海水層が存在しない場合の自由表面の変位 $W_F$ との関係は、重複反射波理論<sup>8)</sup>により以下のように求まる。

$$\frac{W_B}{W_F} = Z_B = \frac{\cos kh}{\cos kh + i\eta \sin kh} \quad (1)$$

\* 正会員 (株)熊谷組 技術研究所 (〒300-22 つくば市鬼ヶ窪下山1043)

\*\* 正会員 (株)間組 技術研究所

\*\*\* 正会員 北海道大学工学部 土木工学科

\*\*\*\* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所

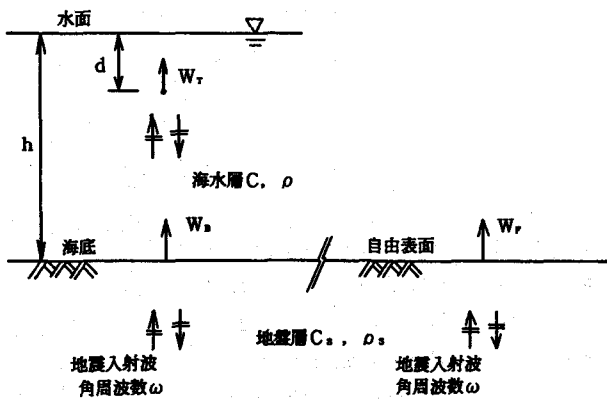


図-1 地震動の伝搬

$$\frac{W_T}{W_F} = Z_T = \frac{\cos kd}{\cos kh + i\eta \sin kh} \quad (2)$$

ただし、 $k = \omega/c$ 、 $\eta = c\rho/c_s\rho_s$ 、 $c, c_s$  : 海水および地盤中の音波速度、 $\rho, \rho_s$  : 海水および地盤の単位体積質量、とする。

### 2-2. 水中トンネルに作用する流体力の評価

図-2のように水深が一定 $h$ の海域に2次元構造物が存在する場合を考える。ここで、地震により角周波数 $\omega$ で海底の上下運動が生じると、これによる流体の運動のため構造物に外力が生じ構造物の運動が起こる。ここに、「①流体は非圧縮・非粘性・渦なしとする。②地震動および構造物の運動は微小とする。③地震により海底は上下方向に一樣に振動する。」なる仮定を採用し、時間変動項 $e^{i\omega t}$ を省略すると、場の流体運動は次の速度ポテンシャル $\phi$ で表される。

$$\phi = \phi_0 + \phi_D + \phi_R \quad (3)$$

ただし、 $\phi_0$  : 構造物がない状態で海底振動で生じる入射波ポテンシャル、 $\phi_D$  : 入射波の回折・散乱によるポテンシャル、 $\phi_R$  : 構造物の振動で生じる放射波のポテンシャル、とする。ここで、 $\phi$ は以下の条件を満たす。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \quad \text{on } S_F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = v_0 \quad \text{on } S_B \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = v_l \quad \text{on } S_V \quad (7)$$

ただし、 $v_0$  : 海底の上下方向振動の速度振幅、 $v_l$  : 構造物表面での外向き法線方向速度振幅 ( $l=1 \sim 6$ )、 $\partial/\partial n$  : 流体表面の外向き法線方向微分、とする。入射波ポテンシャルは式(4), (5), (6)を満たすので、式(8)のように求まる。

$$\phi_0 = v_0(z + g/\omega^2) \quad (8)$$

ここで、地震時の波長が海水と構造物の運動に比べて十分大きいので、波浪時の浮体動揺解析のように、問題を構造物平衡状態における回折・散乱問題(diffraction問題)と静止流体中で構造物が運動する場合の発散波問題(radiation問題)に分離することができ<sup>1)</sup>、線型性を考慮すると、 $\phi_D$  および  $\phi_R$  は、式(4)(5)(9)を満たし式(10)の条件のみ異なる問題の解となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad (\text{for } \phi_D) \quad \text{または、} \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = v_l \quad (\text{for } \phi_R) \quad \text{on } S_V \quad (10)$$

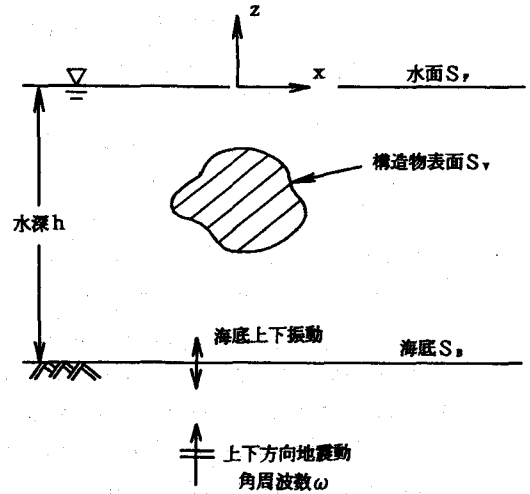
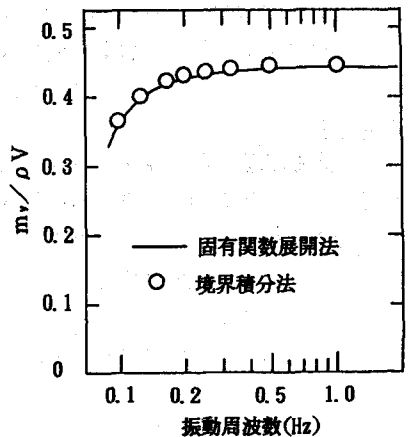
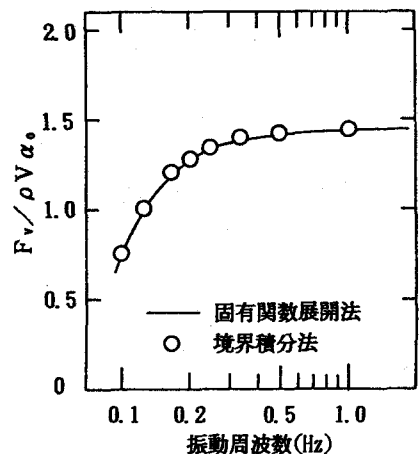


図-2 流体力解析での問題設定



(a) 付加質量係数



(b) 海底の振動による流体力  
図-3 矩形構造物の流体力

以上の定式化は、 $\phi_0$ の表現のみ異なるが波浪時の浮体動揺解析と同一であり、例えばグリーン関数を用いた2次元境界積分法等により、本検討の場合に必要な構造物の上下方向運動の付加質量係数 $m_v$ や造波減衰係数 $N_v$ および、海水運動( $\phi_0 + \phi_D$ )による構造物に作用する上下方向の流体力が算定できる。

### 2-3. 入力地震動に対する応答

地震応答解析でよく行われるように、海水層の影響のない自由表面で地震動の入力を行う。そして、自由表面が、

$$\dot{W}_F = e^{i\omega t} \quad (11)$$

なる加速度で調和振動した場合の、水中トンネル加速度および係留索張力の周波数応答関数を求める。

2-2. より海底の加速度振幅が $\alpha$ の時の海水運動によるトンネルに作用する流体力が $F_v$ と求まった。このとき、非圧縮流体の扱いをしているため、式(8)より入射波による海水の運動は一様であるので、トンネル中心位置での単位の加速度振幅の流体運動で生じる流体力は $F_v/\alpha$ となる。ここで、現実の海水は地震時のような高周波数の運動では圧縮性の影響が無視できず、入射波によるトンネル中心位置の加速度も海底での加速度と異なる。本研究ではこの影響を考慮するため、2-1.の重複反射理論で $d$ をトンネル中心位置までの距離とし、入射波によるトンネル中心位置での海水運動による加速度を $\dot{W}_T$ を求め、 $F_v/\alpha$ に $\dot{W}_T$ を乗じトンネルの流体力とすることで、海水圧縮性の影響を近似的に評価した。このとき、係留索の質量の影響を無視しこれをバネと考え、地震上下動を受ける時に水中トンネルは上下方向の運動のみ生じるとすると、運動方程式(単位長さ当たり)は以下のようになる。

$$(M + m_v)\ddot{u} + N_v\dot{u} + N_s(\dot{u} - \dot{W}_B) + k_T(u - W_B) = F_v\dot{W}_T/\alpha \quad (12)$$

ここで、 $M$ :水中トンネル質量、 $m_v$ :トンネル上下動の付加質量係数、 $N_v$ :トンネル上下動の造波減衰係数、 $N_s$ :構造減衰係数、 $k_T$ :係留索によるトンネルの上下方向運動に対するバネ定数、 $F_v$ :加速度振幅 $\alpha$ の海底振動で生じる海水運動によりトンネルに作用する流体力、 $\ddot{u}, \dot{u}, u$ :トンネル絶対加速度、速度、変位、とする。ここで、式(1)(2)(11)より、 $\dot{W}_B, W_B, \dot{W}_T$ が求まり、またトンネル加速度の入力加速度に対する周波数応答関数を $Z_A(\omega)$ とすると、 $u = Z_A e^{i\omega t}$ より、これらを式(12)に代入すると $Z_A(\omega)$ が求まる。また、係留索張力 $T$ とその変動量 $\Delta T$ は、

$$T = T_0 + \Delta T \quad \Delta T = k_S(u - W_B) \quad (13)$$

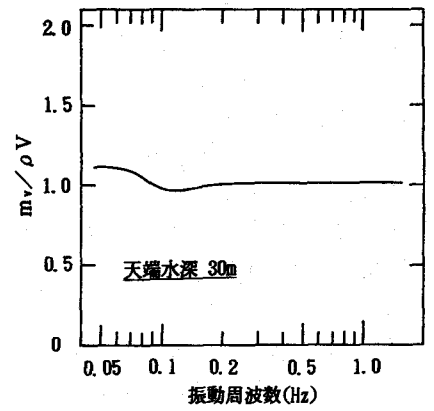
ただし、 $T_0$ :係留索の初期張力、 $k_S$ :係留索1本当たりのトンネル上下方向運動に対するバネ定数、と書け、加速度と同様に周波数応答関数 $Z_T(\omega)$ が求まる。

不規則な地震動に対する水中トンネルの時刻歴応答は、①入力地震動の加速度時刻歴をフーリエ変換し、各周波数成分 $\omega$ でのフーリエ係数 $C(\omega)$ を求め、② $C(\omega)$ に求める応答値の周波数応答関数(例えば加速度応答を求めるならば、 $Z_A(\omega)$ )を乗じ、③これを逆フーリエ変換することにより求まる。

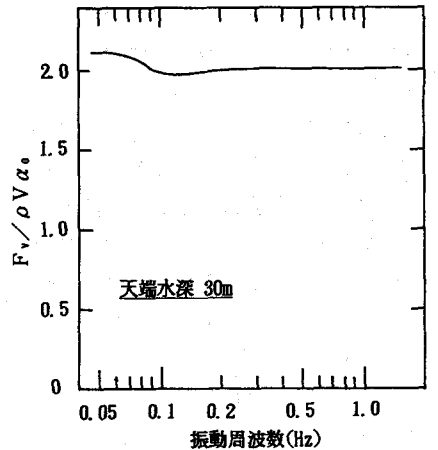
## 3. 解析結果と考察

### 3-1. 水中トンネルの流体力特性

水中トンネルを対象とした流体力特性の解析を行う前に、矩形構造物の流体力の評価を地震時のような高周波数の場合でも厳密解が求まる固有関数展開法(領域分割法)と境界積分法の両者で行い、結果を比較することで境界積分法の地震時の周波数領域での適用性を検討する。図-3に付加質量係数と海底の振動で生じる流体力の比較を示す。ここに、付加質量係



(a) 付加質量係数



(b) 海底の振動で生じる流体力

図-4 トンネルの流体力(基本条件)

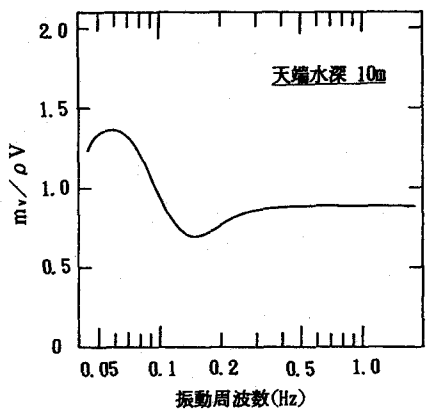


図-5 トンネルの付加質量係数  
(天端水深10m)

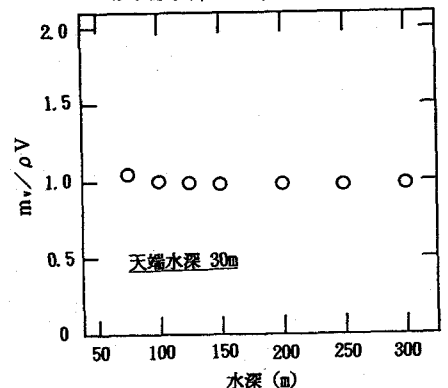
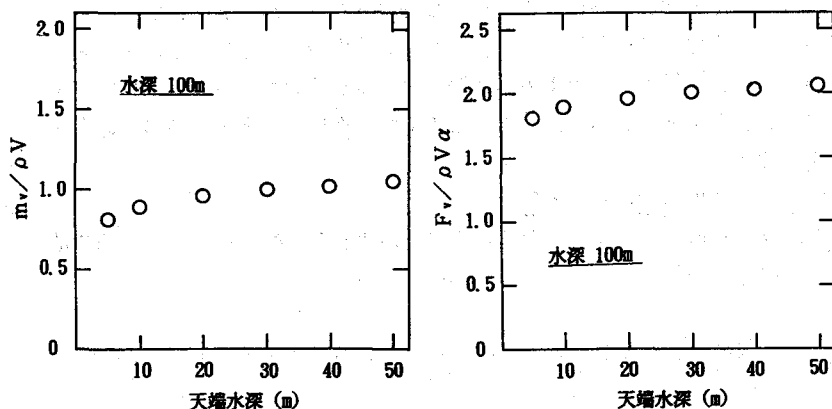


図-6 付加質量の水深による変化

数は構造物排水量 $\rho V$  ( $V$ :構造物体積)で、海底の振動で生じる流体力は排水量と海底の加速度振幅 $\alpha$ の積で無次元化している。これより、地震時の卓越周波数領域では表面波の影響は無視でき、非圧縮流体を用いた本解析では付加質量係数の流体力係数は周波数に依存しない一定値をとる。境界積分法による計算は表面波の影響が無視でき係数が一定となる1 Hzまで行ったが、固有関数展開法と結果がよく一致し、境界積分法が地震時の周波数領域の流体力解析に適用できることを確認した。



(a) 付加質量係数 (b) 海底の振動で生じる流体力

図-7 流体力の天端水深による変化

次に、基本設計条件である水深100m、天端水深30m、口径23mの円形断面の水中トンネルの流体力特性を境界積分法で計算した。図-4に付加質量係数と海底の振動で生じる流体力の振動周波数による変化を示す。これより、地震動の周波数領域では表面波の影響は無視でき、流体力係数については $m_v/\rho V = 1.0$ 、 $F_v/\rho V \alpha = 2.0$ となることが分かる。図には示していないが、造波減衰についてはこれ無視できることが分かった。図-5には天端水深10mの場合の付加質量係数の周波数による変化を示した。この場合は、天端水深30mの場合に比べて水面の影響を大きく受けるものの、地震動の卓越周波数領域では表面波の影響は無視できる。

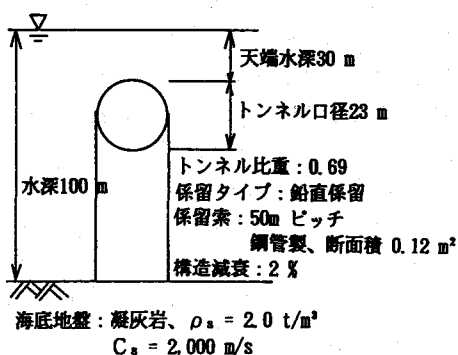
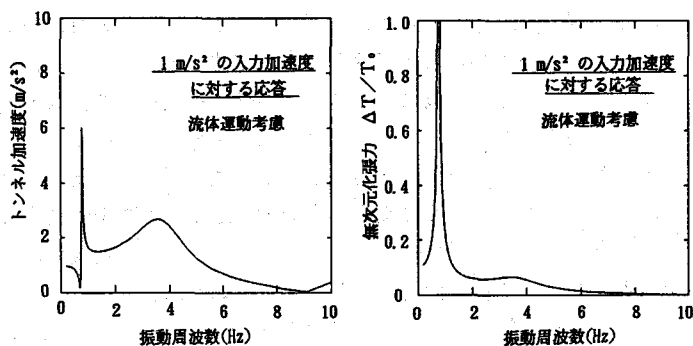


図-8 解析条件

以上のように地震動の周波数領域では表面波の影響は無視でき、非圧縮流体を用いた本検討では水中トンネルの流体力係数は周波数に依存しないことが分かった。そこで、口径23mの水中トンネルの流体力係数を水深、天端水深を変化させて計算した。図-6に天端水深30mの場合の付加質量係数の水深による変化を示した。水深の変化により付加質量係数は殆ど変化せず $m_v/\rho V = 1.0$ と見なせることが分かる。図には示さないが、海底の振動で生じる流体力も、水深の違いによる変化は小さくほぼ $F_v/\rho V \alpha = 2.0$ となった。図-7には付加質量係数と海底の振動で生じる流体力の天端水深の違いによる変化を示す。両者とも天端水深が増加するにつれて値が僅かに増加している。

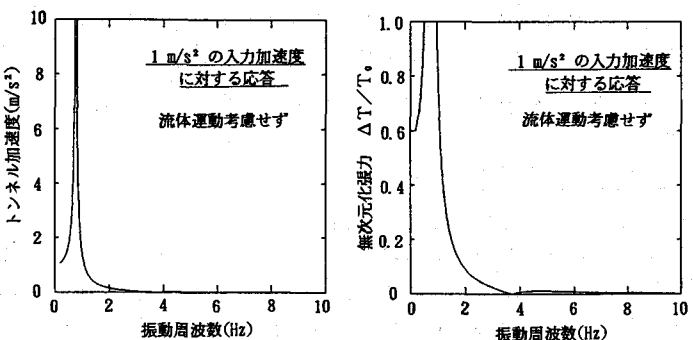


(a) トンネル加速度 (b) 無次元化変動張力

図-9 周波数応答特性

### 3-2. 入力加速度に対するトンネル加速度・係留索張力の周波数応答特性

図-8に示す条件で、2-3の方法により自由表面での入力加速度に対する水中トンネル加速度、初期張力で無次元化した係留索の変動張力の周波数応答特性を計算した。結果を図-9に示す。また、TLPの解析でよく行われているように、海底振動で生じる流体力を無視した場合の周波数応答特性を図-10に示す。図-9、10を比べると、トンネル加速度、係留索張力と



(a) トンネル加速度 (b) 無次元化変動張力

図-10 周波数応答特性(海底振動による流体力無視)

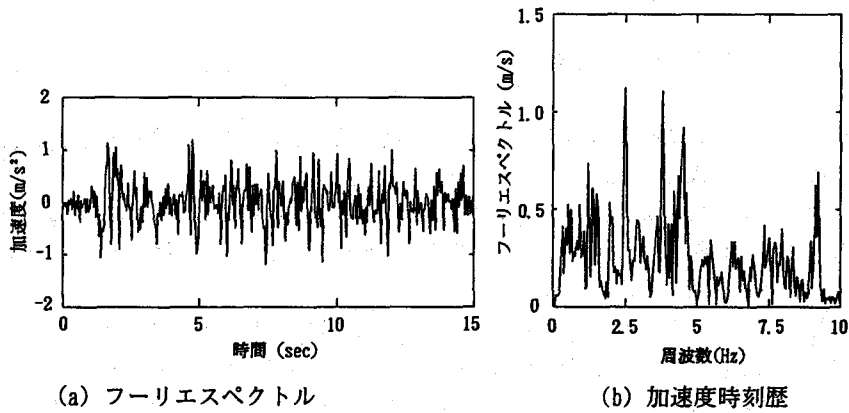


図-11 入力地震動

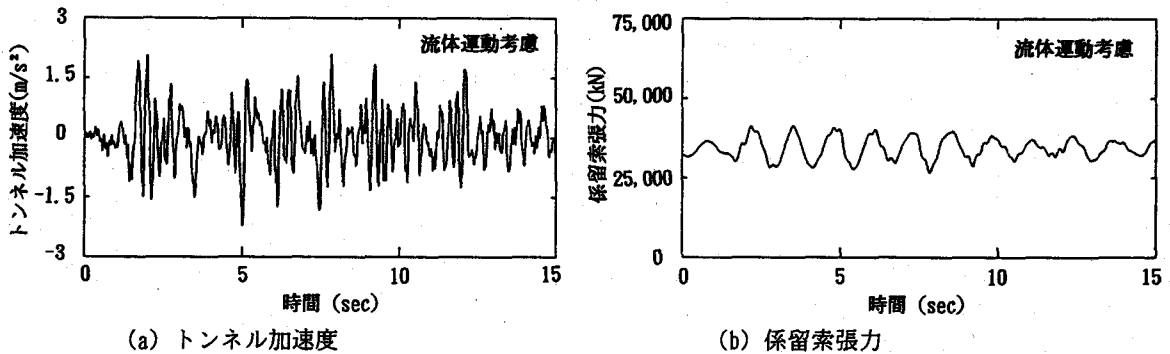


図-12 入力地震動に対する応答

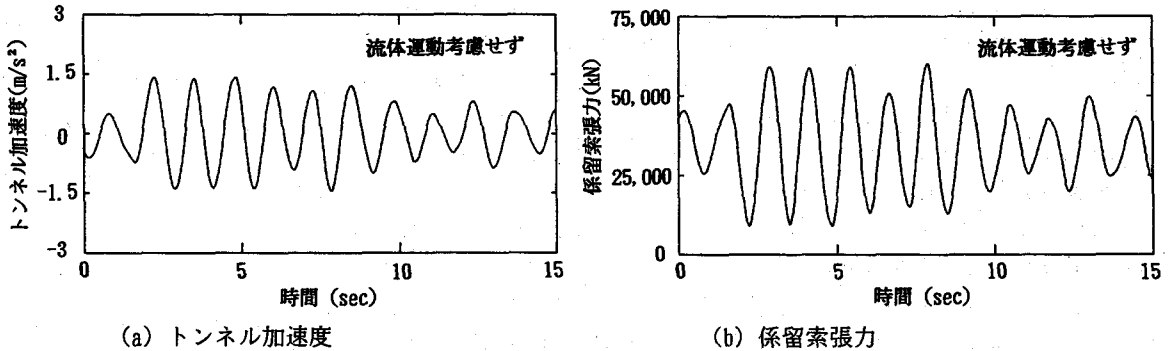


図-13 入力地震動に対する応答（海底振動による流体力無視）

もに海底振動による流体力を無視した場合はこれを考慮した場合に比べて周波数応答特性が大きく異なるのが分かる。なお、応答値が0.8Hz付近で増加しているのは、この周波数がトンネル上下方向の固有周波数に対応しているためである。

### 3-3. 地震動に対する応答特性

〔社〕水中トンネル研究調査会海底土質研究小委員会で作成された<sup>10)</sup> 海底地盤が凝灰岩の場合の入力地震動〔最大加速度120gal、再現期間950年〕に対するトンネル加速度、係留索張力応答を計算した。図-11に入力地震動の特性を示す。これに対する加速度、係留索張力の時刻歴応答を、海底振動で生じる流体力を考慮した場合および考慮しない場合の各々につき図-12、13に示した。両図の加速度応答を比較すると、流体運動を考慮した計算では応答波形は入力加速度に類似な形状であるが、流体運動を考慮しない計算ではトンネル上下方向固有振動数付近の振動成分が卓越するのが分かる。また、係留索張力の応答は、波形の違いに加えて応答の最大値が流体運動の有無で大きく異なるのが分かる。これを検討するため、変動張力を初期張力で除した無次元化張力の最大値を、流体運動を考慮した場合と考慮しない場合の両者で求めると、前者で0.228に対し、後者は0.759となっている。流体運動を無視した場合は、これを考慮した場合に比べ係留索張力の最大値が3倍にもなるわけで、流体運動の考慮の必要性が理解される。このことは、G-S Liou<sup>7)</sup>がTLPについて行った解析で、流体運動を考慮しない解析は係留索張力を過大評価すると述べていることと一致する。

#### 4. まとめ

トンネル中央部分の2次元状態での水中トンネルの上下方向地震動に対する応答特性の検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 地震時の周波数領域での振動問題で厳密解が求まる固有関数展開法により矩形浮体の解析を行い、境界積分法の地震周波数領域での適用性を確認した。
- (2) ポテンシャル理論を用いた境界積分法解析により水中トンネルの流体力解析を行い、地震の周波数領域では表面波の影響は無視できることが判明した。そして、口径23mの水中トンネルについて水深および天端水深を変化させた計算を行い、流体力係数を求めた。
- (3) 重複反射理論により地震動による海底と海水の運動を求め、これと(2)の結果を組み合わせることで水中トンネルの運動方程式を作成し、地震動に対する応答を求めた。TLPの解析でよく行われる海底振動で生じる流体運動による流体力を無視した計算をこれを考慮した計算と比較したところ、トンネル加速度と係留索張力の周波数応答特性とともに地震波に対する応答も両者で大きく異なることが判明した。

今後の残された課題としては、①係留索中を伝わる応力波の影響を評価すること、②圧縮流体を用いて水中トンネルの流体力特性を求め、海中を伝わる圧力波の影響を厳密に評価すること、③振動台実験等で現象を把握し理論の検証をすること、などであり、これらについても今後検討する予定である。

#### 5. 謝辞

本研究は、(株)水中トンネル研究調査会事務局および会員各位を始め、北海道大学、北海道開発局開発土木研究所のご指導、ご理解のもとに行われた。特に、流体力研究小委員会委員長北海道大学佐伯浩教授、構造研究小委員会委員長北海道大学角田與史雄教授、三上隆助教授には貴重なご指導を頂いた。ここに感謝の意を述べさせていただくとともに、構造および流体力研究小委員会参加各社を以下に紹介する。大成建設、日本鋼管（以上構造幹事）、五洋建設、西松建設（以上流体力幹事）、岩倉建設、オリエンタルコンサルタンツ、熊谷組、鴻池組、地崎工業、日本国土開発、飛島建設、間組、日立造船、北海道電力、北興工業、前田建設工業、横河ブリッジ（以上会員、五十音順）。

#### 参考文献

- 1) 松岡一祥：浮遊式構造物の免震性、日本造船学会誌、第706号、1988
- 2) R. Bruschi et. al.: Submerged buoyant anchored tunnels: Technical solutions for the fixed link across the Strait of Messina, Italy, Strait Crossings, 1990
- 3) F. Brancaleoni et. al.: The response of submerged tunnels to their environment, Engineering Structure, Vol.11, 1989
- 4) J. R. Morgan et. al.: Dynamic analysis of tension-leg platforms, A final report for NSF Research Initiation Project PFR-8006467
- 5) T. Kawanishi et. al.: Earthquake response of tension leg buoy, Proc. of 6th OMAE, 1986
- 6) 小林 浩ら：JOIA TLPテンプレートの地震時および波浪時の挙動の研究、第9回海洋工学シンポジウム、1989
- 7) G-S. Liou et. al.: Response of tension-leg platforms to vertical seismic excitations, Report No. UCB/EERC-85/14, Univ. of California, Berkeley, 1985
- 8) 土木工学大系8、土質力学、彰国社、pp.251-284、1980
- 9) 波と漂砂と構造物、技報堂出版、1991
- 10) (社) 水中トンネル研究調査会 海底土質研究小委員会：噴火湾における設計用入力地震動の作成、1992