

(149) 水中トンネルの地震上下動に対する応答

(株)熊谷組技術研究所 山崎 晶 ・ 森田知志
 北海道大学工学部 佐々木康彦 ・ 山下俊彦
 北海道開発局開発土木研究所 水野雄三
 五洋建設(株)札幌支店 渋谷哲人
 (株)間組技術研究所 黒崎和保

1. はじめに

水中トンネルは陸上ヤードで建設された比重が海水より軽い函体を水中に沈め、これを予め海底に設置した基礎に接続した係留索に取り付け、海面より30m程度下方に緊張係留しトンネルを構築する工法である。この詳細については、芳村ら¹⁾を参考にされたい。筆者らは上下方向地震動に対する水中トンネルの応答解析手法を提案し、海底の上下運動による流体運動で発生する流体力が応答に大きな影響を与えることを示した²⁾。この検討では係留索はバネとして扱っているが、水深が大きくなると係留索の質量が無視できなくなり、係留索中を伝達する応力波の影響を考慮する必要がある。これに関し、同様の係留方式を採るテンションレグプラットフォームの場合に、G-S Liouら³⁾、川西ら⁴⁾が応力波の影響を検討しているが、水中トンネルの場合に検討した例はない。本研究では、文献²⁾に述べた水中トンネルの地震応答解析手法を概観し、次に係留索を伝わる応力波の影響の考慮方法を述べ、水中トンネルの諸元を用いた計算を行い応力波の考慮の必要性を検討する。

2. 解析手法の概要

(1) 地震応答解析手法の概要²⁾

水深が一定な水平な海底面に鉛直上向きにP波が一様に入射する場合を考える。このとき、トンネル中央部分を対象とすれば、地震上下動で生じる水中トンネルの運動は式(1)の上下方向の運動方程式(単位長さ当たり)で表される。

$$(M + m_v)\ddot{u} + N_v\dot{u} + N_s(\dot{u} - W_B) + F = F_0\ddot{W}_T \quad (1)$$

ここに、 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、 \ddot{u}, \dot{u}, u : トンネルの加速度・速度・変位、 W_B : 地震動による海底の速度、 \ddot{W}_T : トンネルが無い状態で地震動により生じる水中トンネル中心位置での海水の加速度、 F : 係留索からトンネルに作用する力、 F_0 : 海底が単位の加速度で振動した場合にトンネルに作用する流体力、とする。そして、 m_v 、 N_v 、 F_0 については、非圧縮流体のポテンシャル理論に基づく境界積分法で算定し、 W_B 、 \ddot{W}_T については海水と地盤の2層系の重複反射理論で計算した。この方法の特徴は、水中トンネルの流体力特性は非圧縮流体を仮定して求めているものの、地震動による海水運動を評価する際に重複反射理論を用いることで、海水圧縮性を近似的に考慮している点である。

(2) 係留索を伝わる応力波を考慮した解析

図-1のように水中トンネルが鉛直に係留された状態を考える。そして、係留索の断面積・弾性定数・単位体積質量は長さ方向に一様であると仮定する。棒の縦振動の波動方程式を用いることで、係留索の運動方程式が係留索の変位を u_t として以下のように書ける。

$$c^2 \frac{\partial^2 u_t}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} \quad c^2 = \frac{E}{\rho_t} \quad (2)$$

ここで、境界条件は以下の通りである。

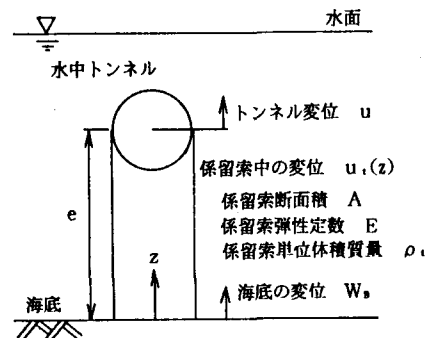


図-1 問題の設定

①係留索の水中トンネル端での変位の連続条件

$$u_t|_{z=e} = u \quad (3)$$

②海底面での変位の連続条件

$$u_t|_{z=0} = W_B \quad (4)$$

③係留索の水中トンネル端での力の連続条件

$$AE \frac{\partial u_t}{\partial z} |_{z=e} = F \quad (5)$$

以上から、角周波数 ω の調和振動を考えれば、式(2)の解 u_t が求まり、さら F が式(6)のように求まる。

$$F = \frac{AE}{e} \frac{\gamma e}{\sin \gamma e} (\cos \gamma e \cdot u - W_B) \quad (6)$$

ここで、 T を地震動の周期とすると、

$$\gamma e = 2\pi \frac{e/c}{T} = 2\pi \frac{\text{応力波が係留索を伝わるのに要する時間}}{\text{地震動の周期}}$$

と書け、水深が浅く応力波が係留索を伝達するのに要する時間が地震動の周期に比べて十分短ければ、 $\gamma e \rightarrow 0$ と考えられ、このとき、

$$F \rightarrow \frac{AE}{e} (u - W_B) \quad (7)$$

となり、係留索をバネと見なした場合に一致する。式(6)を式(1)と組み合わせ、重複反射波理論を用いれば入力地震動より $W_B, \dot{W}_B, \ddot{W}_T$ が求まるので、これから水中トンネルの運動が求まり、さらに係留索張力応答が計算できる。

3. 解析結果と考察

図-2に示す条件で係留索を伝わる応力波を考慮した場合および考慮しない場合の水中トンネルの地震応答解析を行った。

①水深100mの場合

水深100mの場合の入力地震動に対する水中トンネル側端部での係留索の変動張力(ただし、初期張力 T_0 で無次元化した)の周波数応答特性を図-3に示す。図から係留索中を伝わる応力波の考慮の有無に係わらず張力応答は変わりがなく、水深100m程度では係留索をバネとして扱えることが分かる。

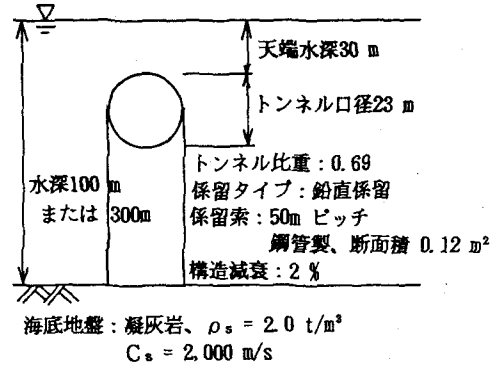


図-2 検討条件

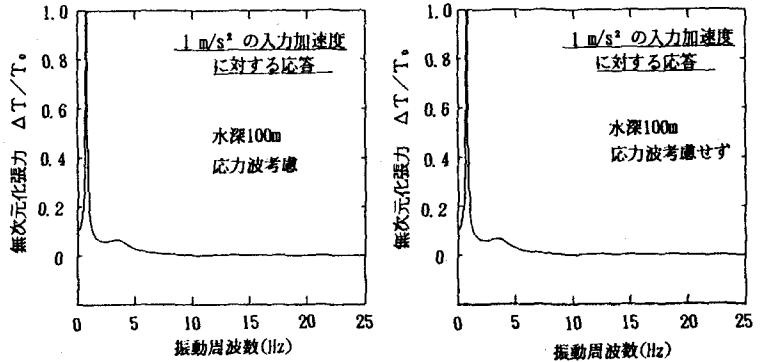


図-3 係留索変動張力の周波数応答特性 (水深100m)

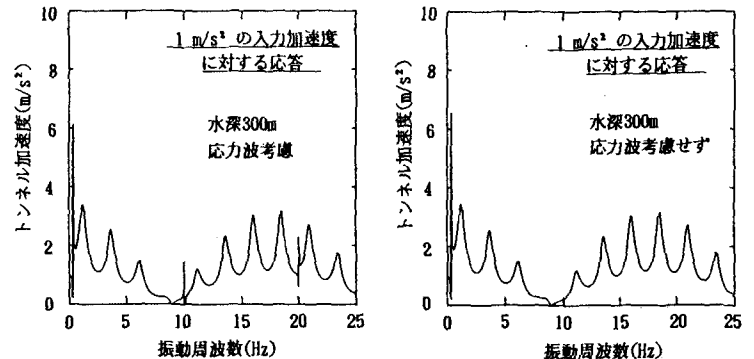


図-4 トンネル加速度の周波数応答特性 (水深300m)

②水深300mの場合

本研究は(地)水中トンネル研究調査会の活動の一環として行われたものであるが、同調査会が水中トンネル建設のモデル地区としている北海道の噴火湾横断ルートでの最大水深は100m程度である¹⁾。一方、水中トンネルはメッシナ海峡(イタリア)やジブラルタル海峡(スペイン-モロッコ)の横断計画でも検討されているが、両プロジェクト

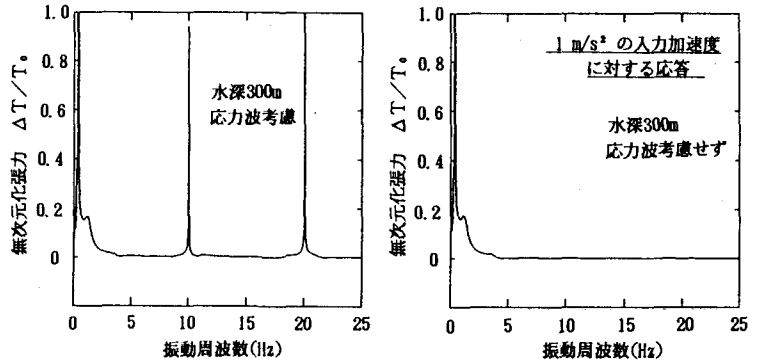


図-5 係留索変動張力の周波数応答特性(水深300m)

の最大水深は各々300m、270m程度である。このように、水深が300m程度の海域に水中トンネルの計画があることから、水深300mの条件で係留索を伝わる応力波の影響を検討する。図-4にトンネル加速度、図-5に係留索の変動張力の周波数応答特性を、応力波を考慮した場合および考慮しない場合の両者で示した。ここで、水中トンネル上下方向の1次の固有周波数は、係留索をバネとして約0.8Hzと求めることができるが、図からこの周波数で応答が極値をとるのが分かる。応力波を考慮した解析では、係留索内の応力波の伝搬で生じる高次の固有周波数のときに応答が増大している。これは、式(6)で $\sin \gamma e = 0$ とおくことにより、固有周波数が、 $f_{n+1} = n c / 2 e$ ($n = 1, 2, \dots$)と求まる。水深300mの今回の条件では、 $e = 258.5$ m、 $c = 5,170$ m/s より $f_2 = 10.0$ Hz、 $f_3 = 20.0$ Hzとなる。この周波数周辺で応力波の影響が顕著に現れて、応力波の考慮の有無で周波数応答特性が大きく違ってくる。

次に、(地)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⁵⁾入力地震動〔最大加速度120gal〕に対する応答を計算した。図-7、8にトンネル加速度および係留索張力の時刻歴応答を示す。図-7から加速度応答については、応力波の考慮の有無に係わらず波形に殆ど変化が見られない。一方、図-8の係留索張力応答から、応力波を考慮した解析では係留索内の応力波の伝搬で生じる高次の固有周波数に相当する振動成分が、応力波を考慮しない解析の場合に付け加わっているのが分かる。しかし、設計で重要となる応答の最大値は応力波の考慮の有無に係わらず変化がなく、今回の水中トンネルの諸元の場合は水深300m程度では応力波の影響は小さく係留索をバネとして扱える。

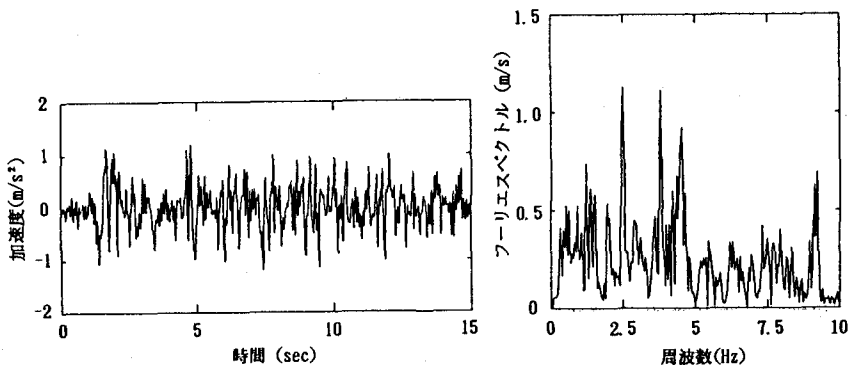


図-6 入力地震動の波形とフーリエスペクトル

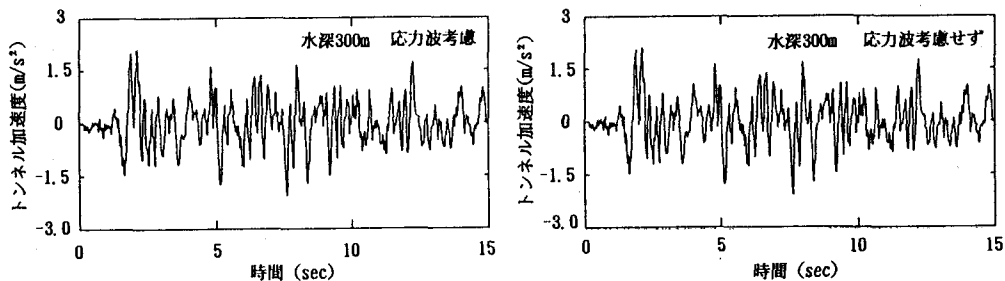


図-7 トンネル加速度の時刻歴応答 (水深300m)

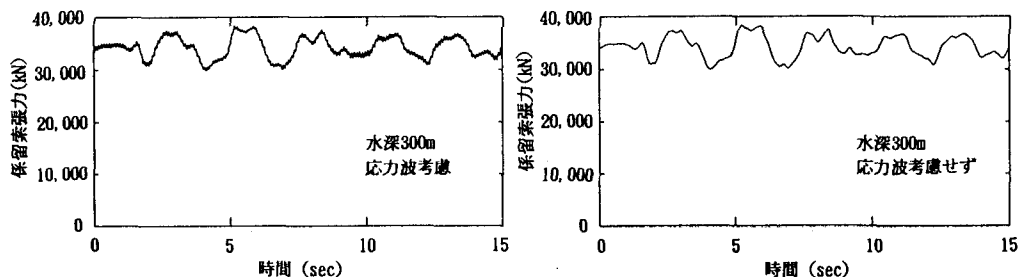


図-8 係留索張力の時刻歴応答 (水深300m)

4. おわりに

係留索内を伝搬する応力波を考慮した水中トンネルの地震応答解析手法を用いて、応答に与える応力波の影響を調べ、以下の結論を得た。

①水深100mの場合は応力波の影響は無視できる。

②水深300mの場合の地震波に対する係留索張力の応答波形には、応力波を考慮すると高次の固有周波数に相当する振動成分が、応力波を考慮しない解析の場合に付け加わる。しかし、設計で重要となる応答の最大値は応力波の考慮の有無に係わらず変化がなく、水深300m程度では係留索をバネとして扱える。

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) 芳村ら：水中トンネルの現状と課題、海洋開発論文集、Vol.8、1992
- 2) 山崎ら：上下方向地震動に対する水中トンネルの応答特性、海洋開発論文集、Vol.9、1993
- 3) G-S.Liou et. al.: Response of tension-leg platforms to vertical seismic excitations, Report No. UCB/EERC-85/14, 1985
- 4) 川西ら：垂直地震動による緊張係留浮体の応答、日本造船学会論文集、第161号、1987
- 5) (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