

緊張係留された水中トンネルの振動台実験

古川 敦* ・山下俊彦**・水野雄三***
 峯田 稔****・黒崎和保*****

1. 研究の目的

水中に緊張係留方式で設置される水中トンネルは新しい海峡横断の手段として注目されているが、特に地震応答の評価手法については参考となる既存の研究例が少なく、重要な課題と言える。

水中構造物に対する地震動の影響を評価するに際しては、現在大きく2つの問題が挙げられよう。すなわち①鉛直地震動による流体運動考慮の必要性と評価方法、そして流体運動を考える場合においては②海水の圧縮性の影響をどのように考えるか、である。①の問題に関しては、テンションレグプラットフォームの研究例によると構造物への加振力として流体力を考える研究者 (G.S. Liouら, 1985) と考えない研究者 (T. Kawanishiら, 1986) の両者があり、決着はついていないようである。また②の問題についても実設計に適した系統的な評価方法は確立されていないのが現状である。

本研究では、まず①の問題を解決するために筆者の知る限りにおいてこれまでに例のない水中に緊張係留されたトンネルモデルの鉛直加振を実施し、流体運動を考慮する必要性とその評価方法について検討する。これに引き続き縮尺模型実験では検討できない②の問題について理論的な検討を実施し、最終的には水中トンネルの鉛直地震動に対する応答解析手法について示すものである。

2. 解析方法

実験に先立ち、①および②の問題を検討するための解析方法を示す。海底の上下運動が角振動数 ω の調和振動で表されるとき、水中トンネル (単位長さあたり) の運動方程式は次式のように表される。

$$\{M + m_z\} \ddot{u} + N_z \dot{u} + N_s (u - \dot{W}_B) + k_T (u - W_B) = F_D e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

\ddot{u}, \dot{u}, u : トンネル絶対加速度, 速度, 変位

- M : トンネル質量
- m_z : 付加質量
- N_z : 流体力学的減衰
- N_s : 構造減衰
- k_T : 係留索のパネ定数
- F_D : トンネルに作用する起振力

また、 \dot{W}_B, W_B は海底面の速度と変位であり、地盤上に海水層が存在しないときの速度 \dot{W}_F あるいは変位 W_F から次式によって求められる。

$$\left(\frac{\dot{W}_B}{W_B} \right) = \frac{\cos kh}{\cos kh + ia \sin kh} \left(\frac{\dot{W}_F}{W_F} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- h : 水深
- $k = \omega/C$
- $a = C\rho/C_s\rho_s$
- C : 海水中の音波伝搬速度 (1480 m/s)
- ρ : 海水の単位体積質量 (1.03 tf/m³)
- C_s : 地盤中の音波伝搬速度
- ρ_s : 地盤の単位体積質量

本研究では前出の問題①および②の検討を行うため、海水の運動や圧縮性の取扱い方を変えた3種類の解析を行った。それらを以下に示す。

方法 a : 水中トンネル位置での流体運動をゼロと仮定した解析方法で、水中トンネルへの起振力は係留索のみから作用するとしたものを。

方法 b : 重複反射波理論により水中トンネル位置での流体運動は伝達関数 Z_T に従うものとし、水中トンネルへの起振力は係留索に加えて流体からも作用する。(山崎ら, 1993)

方法 c : 流体運動による起振力および流体力係数の両者を圧縮性流体を仮定した解析方法で、起振力および流体力係数は周波数によって変化する。

各々の方法における式(1)中の変数の取扱いを、まとめて表-1に示す。

- C_M : 慣性力係数 (≈2.0, 一定値)
- C_A : 付加質量係数 (≈1.0, 一定値)
- $C_M(\omega), C_A(\omega), C_D(\omega)$: 流体の圧縮性を考慮した場合の周波数依存型の

* 正会員 (株)熊谷組 技術研究所
 ** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所水工部
 **** 正会員 北海道電力(株) 土木部
 ***** 正会員 工修 (株)間組 技術研究所

表-1 各解析方法における運動方程式中の変数

方法	加振力項 F_D	付加質量 m_2	減衰力項 N_2
a	$\rho C_M A \dot{W}_B$	$\rho C_A A$	ゼロ
b	$\rho C_M Z_T A \dot{W}_B$	$\rho C_A A$	ゼロ
c	$\rho C_M(\omega) A \dot{W}_B$	$\rho C_A(\omega) A$	$C_D(\omega)$

慣性力, 付加質量力, 減衰力の各係数

$$Z_T = \frac{W_T}{W_B} = \frac{\cos kd}{\cos kh + ia \sin kh} \dots \dots \dots (3)$$

: 海底と水中トンネル位置の水粒子運動の位置関数 (d : トンネル中心位置の水深)

A : トンネルの断面積

ρ : 流体の単位体積質量

なお, 方法 c はポテンシャル理論に基づく境界積分法により流体力係数を算定するもので, 海水の圧縮性を厳密に評価できる解析法である. これらの流体力係数は周波数によって変動するため, 応答値を求めるための計算は格段に煩雑となる.

3. 実験方法

実験はスケール 1/72.3 のフルード則に従い, 水深 100 m・トンネル天端水深 30 m・トンネル外径 ϕ 23 m の実機を想定して行った. 表-2 に模型およびベッセル (水槽) の諸元を示す.

また, 実験はトンネル模型の比重および係留索 (ワイヤ) を変化させ, 計 4 種類 (表-3) の振動系で流体力試験・自由動揺試験・係留加振試験を実施した. なお, 結果については全てケース 1-1 のみを示す.

(1) 流体力試験

水中トンネル模型を振動台テーブル外の床に固定されたフレームに分力計を介して固定し, 振動台を鉛直方向に加振する (図-1). これにより水中トンネル位置に作用する流体力 [式(1)中の加振力項 F_D] を図中の分力計により測定したことになる. なお, 加振は正弦波加振 (25 gal, 1~25 Hz) を行った.

(2) 自由動揺試験

ベッセル内に係留ワイヤによりトンネル模型を係留させ, ワイヤを介した重りにより鉛直方向の強制変位を与

表-2 模型およびベッセルの諸元

水中トンネル模型	ϕ 318 mm \times 1 = 780 mm 天端水深 415 mm
ベッセル (水槽)	w2700 mm \times D 800 mm (内寸) 水深 1383 mm

表-3 実験ケース

ケース	トンネル比重	係留索のパネ定数*
1-1	0.50	3.81 kgf/mm
1-2	0.50	2.11 kgf/mm
2-1	0.69	3.81 kgf/mm
2-2	0.69	2.11 kgf/mm

* 気中載荷試験による係留索 1 本あたりの値

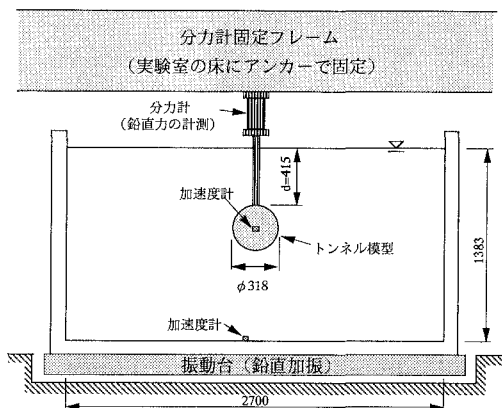


図-1 流体力試験概要図

え, ワイヤを切断することによって自由動揺させる (図-2). 模型内部に取り付けた加速度計の減衰波形により系の固有振動数・パネ定数・構造減衰定数を求め, これらの値を用い方法 a, b の解析を行った. なお, 自由動揺試験は (3) 加振試験の直前と直後に行い, 系の特性を精密に捕らえるよう努めた.

(3) 加振試験

ベッセル内にトンネル模型を係留し, 振動台により鉛直方向に加振する (図-3). 加振は正弦波および模擬地震波で行い, ベッセル底に取り付けた加速度計を入力加速度, トンネル内部の加速度計をトンネル加速度, 係留索下部に取り付けた張力計を係留索張力として計測した. (2) (3) の係留実験 (図-2, 3) では係留索が V 型となっているが, 想定した実機は並列型の係留系である. 実験を V 型とした理由は模型設置の際, 4 本の係留索の初期張力を合わせる事が困難なためであり, V 型の下部で計測する張力は鉛直方向であるため問題はない. また模型とベッセルのクリアランスは 10 mm と少なく衝突の危険性があり, またロール, ピッチ等の動揺を抑えるため水平方向にワイヤを取り付け模型を拘束した. 水平ワイヤには弱パネを取り付けているため鉛直方向には拘束していない.

正弦波加振の加振周波数は $f=3\sim 20$ Hz の範囲で行い加振加速度は 50 gal を基本とし, 変動張力が初期張力

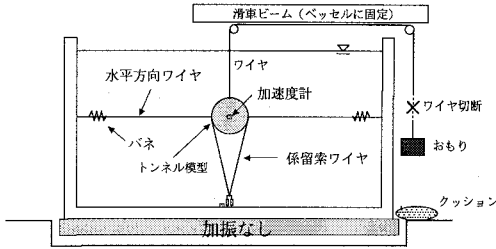


図-2 自由動揺試験概要図

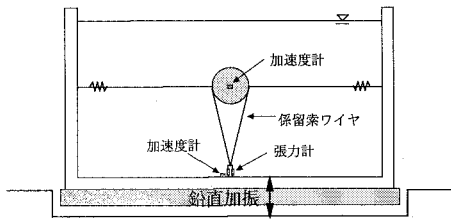


図-3 加振試験概要図

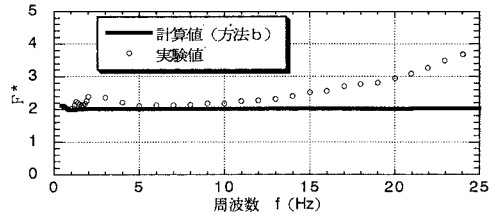


図-4 流体力試験結果

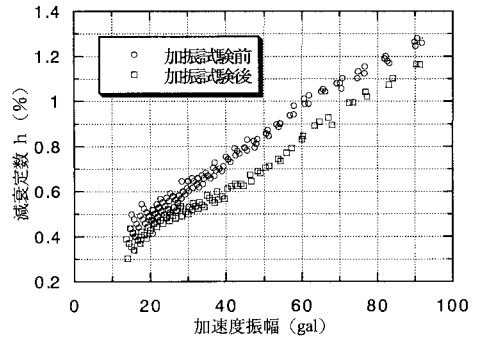


図-5 減衰定数と加速度振幅

を上回るスナップ荷重が発生しないようトンネル模型の共振点付近では10~20 gal程度に加振加速度レベルを落とした。これにより測定された加速度および張力の周波数応答関数の実験値と方法a, bによる計算値の比較を行うことにより流体運動考慮の必要性を検討した。

模擬地震波はフルード則に従い、時間スケールを1/8.5にした最大加速度66.8 gal, 継続時間3.2 sの鉛直方向地震波で加振を行った。得られたトンネル加速度および張力の時刻歴実験値と、方法bによる周波数応答関数を用いた時刻歴計算値とを比較し、方法bの妥当性を検討した。

4. 実験結果

(1) 加振力項 F_b

流体力試験の分力計により得られた結果を図-4に示す。図の F^* は以下に示す方法で無次元化してあり、表-1中の $C_M Z_T$ に相当する。

$$F^* = \frac{F_z}{\rho A l \dot{W}_B} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

- F_z : 鉛直方向流体力 (kgf)
- l : トンネル模型長 (780 mm)

図中の実線は方法bによる $C_M Z_T$ の計算値である。実験値は10 Hz以上になると徐々に増加しているが、これは模型~固定フレームおよびベッセルの固有振動(50 Hz付近)による影響と思われる。

(2) 構造減衰定数および固有振動数

自由動揺試験で得られる加速度減衰波形 $\ddot{u}(t)$ のピー

ク振幅を $\ddot{u}_m (m=0, 1, 2, \dots)$ とすれば、減衰定数 h は対数減衰率 δ を用い、2つのピーク振幅 $\ddot{u}_m, \ddot{u}_{m+n}$ により次の式で求まる。

$$\delta = \ln\left(\frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_{m+n}}\right) = \frac{1}{n} \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \dots\dots\dots (5)$$

実験では微小なロール、ピッチ等の影響により減衰波形が多少乱されていたため、 $n=10$ とした場合の結果を図-5に示した。なお、横軸の加速度振幅 \ddot{u} は次式による平均値である。

$$\ddot{u} = (\ddot{u}_m + \ddot{u}_{m+n})/2 \dots\dots\dots (6)$$

これにより、減衰定数は加速度振幅に比例していることが判る。また加振を行うことによって系の特性も変化している。

(3) 加速度および張力周波数応答

正弦波加振時の入力加速度 \dot{W}_B とトンネル加速度 \ddot{u} の時刻歴を $\dot{W}_B(t), \ddot{u}(t)$ とし、そのフーリエ変換を $\dot{W}_B(\omega), \ddot{u}(\omega)$ とすると、 $\dot{W}_B(\omega)$ のピーク周波数 ω_m が加振周波数であり、トンネル加速度の周波数応答関数 $F(\omega)$ は、

$$F(\omega_m) = \ddot{u}(\omega_m) / \dot{W}_B(\omega_m) \dots\dots\dots (7)$$

により求まり、同様にして係留索張力の周波数応答関数 $G(\omega)$ は張力時刻歴 $T(t)$ のフーリエ変換を $T(\omega)$ とすれば次式にて求まる。

$$G(\omega_m) = T(\omega_m) / \dot{W}_B(\omega_m) \dots\dots\dots (8)$$

図-6, 7には加速度および張力周波数応答関数の実験結果を示した。図中の破線および実線はそれぞれ方法a,

bによる計算値であり、流体運動を考慮しない方法aではトンネル共振点付近で過大な応答値を与えており合理的でない。一方、方法bは実験値と良く一致する。

(4) 模擬地震波応答

模擬地震波加振では、

$$\ddot{u}(\omega) = F(\omega) \cdot \dot{W}_b(\omega) \dots\dots\dots (9)$$

$$T(\omega) = G(\omega) \cdot \dot{W}_b(\omega) \dots\dots\dots (10)$$

より、 $F(\omega)$ および $G(\omega)$ の方法bによる計算値を用いて $\ddot{u}(\omega)$, $T(\omega)$ を求め、逆フーリエ変換により時刻歴 $\ddot{u}(t)$, $T(t)$ の計算値を算出した。なお、この場合の $\dot{W}_b(\omega)$ は入力地震波加速度時刻歴のフーリエ変換である。

流体力試験結果でも述べたが、ベッセルの固有振動が 50 Hz 付近に存在するため、模擬地震波加振では実験対象を 30 Hz 以下とした。図-8 にこれらの実験結果を示すが入力地震波は 30 Hz 以下の成分のみとしている。また図中の (2) トンネル加速度 (実験値) も計算結果との比較のため、30 Hz 以上の周波数成分をカットして図化してある。なお、張力の周波数応答は高周波数領域ではゼロのため特に操作を行わず、生データの実験値を示した。

方法bによる計算値と実験値は良い一致を示しており方法bの解析方法の妥当性が確認された。なお、計算値が若干小さめの値となっているが、これは計算に用いた減衰定数の採用方法によるものと思われる。

5. 海水の圧縮性の影響

方法bによる解析では海水の圧縮性の影響を重複反射波理論により疑似的に評価したものであり、水中疎密波の共振現象を厳密に評価していない。疎密波の共振点は、

$$\cos\left(\frac{\omega}{C}h\right) = 0 \dots\dots\dots (11)$$

に従い出現し、その n 次の共振周波数 f_{Rn} は、

$$f_{Rn} = \frac{(2n-1)C}{4h} \quad (n=1, 2, 3, \dots\dots) \dots\dots (12)$$

であり、振動台実験では $f_{R1} = 268$ Hz となるため、方法b, cの比較は不可能である。

本章では実機レベルでの数値解析を行うことにより、方法b, cの比較検討を行う。表-4 に採用した条件を示す。

図-9 にはトンネル口径 23.0 m, 水深 100 m の場合のトンネル加速度の周波数応答を方法b, cについて示した。この場合、方法b, cは疎密波の共振点で若干の違いはあるものの、良く一致している。

図-10 にはトンネル口径 100 m, 水深 300 m の場合のトンネル加速度周波数応答を、方法b, cについて示した。この場合には方法b, c, による差異が現れ、モリソ

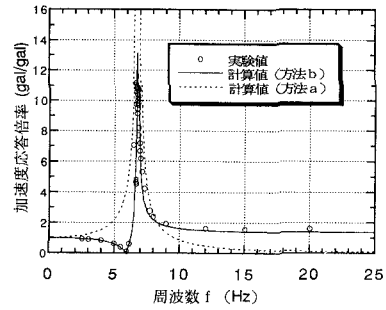


図-6 トンネル加速度周波数応答

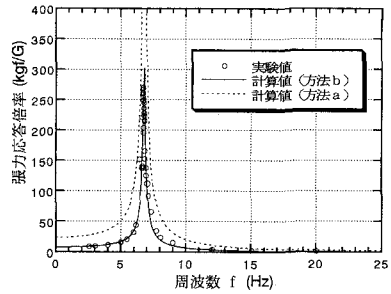


図-7 係留索張力周波数応答

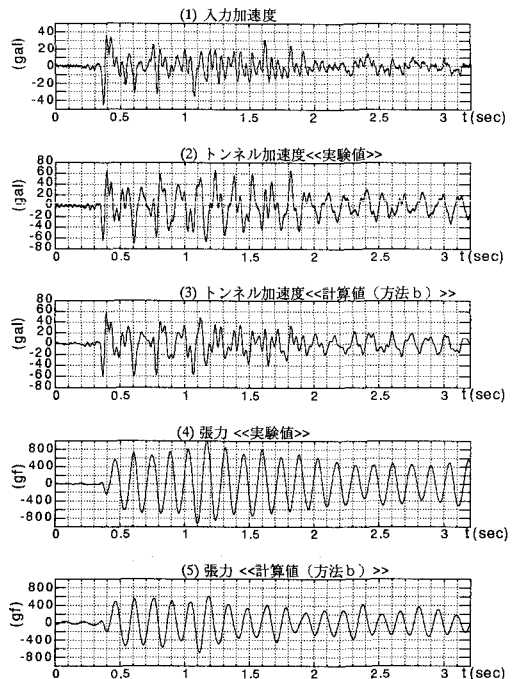


図-8 模擬地震波加振時刻歴

ン式流の取扱いでは対応できなくなるといえる。

方法cは表面重力波の解析方法と同様の考え方を仮定し、ポテンシャル理論により流体力係数を算定するもの

表-4 計算条件

トンネル口径(D)	: 23.0m, 100m の2種類
水深(h)	: 100m, 300m の2種類
〔以下固定条件〕	
天端水深	: 30m
トンネル比重	: 0.69
係留索	: 鋼管, (断面積0.12m ² /本)
構造減衰	: 2%

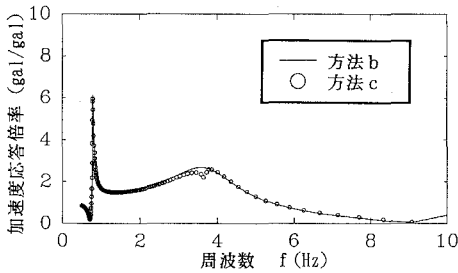


図-9 加速度周波数応答 (D=23 m, h=100 m)

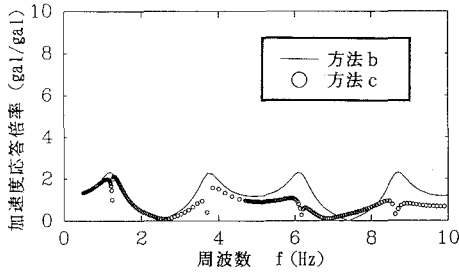


図-10 加速度周波数応答 (D=100 m, h=300 m)

であるが、表面重力波の理論によると物体の大きさが波長の1/5以下の場合には波浪場が物体から受ける影響度は小さく、この場合の流体力は一様な波浪場を仮定したモリソン波力式によって算定することができる。方法cはポテンシャル理論に基づいて圧縮性の流体場を構造物による影響を含めて考慮することのできる解析法であるが、トンネル口径23mの場合は水中疎密波の波長($f=5$ Hzで約300m)に比べて充分小さく、モリソン式流の扱いでも充分な精度が得られたものと思われる。そして図-10のように約3 Hz以上の周波数条件において、外

径が波長の1/5を上回る場合には方法b,cの算定結果には差異が現れ、モリソン式流の取扱いでは対応できなくなるといえる。

水中トンネルの耐震設計は外径・波長比が1/5以下となる条件下においては方法bによる応答計算手法によって実用的かつ合理的に行えるものと結論される。

6. ま と め

- ① 水中トンネルの加速度および係留索張力の周波数応答に関する実験結果は、流体運動を考慮した方法bの解析結果と良く一致した。水中トンネルなどの構造物の地震解析に際しては流体運動を考慮することが不可欠である。
- ② トンネル外径と水中疎密波の波長の比が1/5以下となる条件下では、修正モリソン式と水底～トンネル位置間の流体運動に関する影響関数とを組み合わせること(方法b)により、実用上充分な精度で流体の圧縮性を考慮した水中トンネルの応答解析を効率的に行うことができる。

7. 謝 辞

本実験は(社)水中トンネル研究調査会の研究の一環として行われ、特に流体力研究小委員会委員長北海道大学佐伯浩教授には貴重なお指導を戴いた。また、振動台は(財)電力中央研究所我孫子研究所の上下水平2軸振動台をご貸与戴き行ったもので、同研究所耐震部岩楯敏広部長(現東京都立大学)および構造部萩原豊主査研究員には終始にわたってご指導を戴いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

山崎晶・黒崎和保・山下俊彦・佐々木康彦・水野雄三(1993): 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, pp. 331-336.

G. S. Liou, J. Penzien and R. W. Yeung (1985): Response of tension-leg platforms to vertical seismic excitations, Report No. UCB/ERC-85/14, Univ. of California, Berkeley, 141p.

T. Kawanishi, O. Saijo and W. Kato (1986): Earthquake response of tension leg buoy, Proc. of 6th OMEE, pp. 671-678.