

高波浪下における水中トンネルの動揺および流体力特性 (その2)

国栖 広志* ・ 水野 晋** ・ 水野 雄三***
山下 俊彦**** ・ 佐伯 浩****

1. はじめに

本研究は、水中に水平に緊張係留された大断面の浮体式円筒構造物の波浪時の波力、および動揺特性について検討したものである。前報(国栖ら, 1993; 水中トンネル研究調査会, 1992 および 1993)では規則波および不規則波を作用させた実験から、水中トンネルの基本的特性について明らかにした。これらの結果から、水中トンネルに作用する波力は、ポテンシャル理論を用いた境界要素法(Birdら, 1982)または流体力係数を適当に設定することによりモリソン式を用いて算定できることを明らかにした。また、係留索に働く最大張力および最小張力は周期を一定とすると、波高の増加にともなって線形に増加または減少する。また、最小張力がゼロ近傍になると係留索の「たるみ」に伴って急激な張力の増加が認められトンネルが不安定となる現象が観測された。水中トンネルが不安定となる原因としてはトンネルの係留方法とトンネルの比重が重要であることが判った。一方、不規則波の実験から最大波高(H_{max})がトンネルに作用したときに急激な張力の増加が認められ、設計における係留索の安定性には最大波高に相当する規則波を用いて検討しておけば良いことなども明らかとなった。

本研究では前報に引き続き、比較的小直径の水中トンネルを対象として実験を行いK.C.数が異なる条件における流体力特性および係留索に働く張力特性などについて検討を行った。


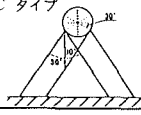
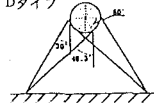
2. 実験内容

実験縮尺は、フルード相似則を適用して1/62.16とした。実験における自然条件は前報と同様、水深(h)100m, 構造物天端水深(d)30m, 設計波周期($T_{1/3}$)13.0s, 設計波高(H_{max})18.6mとした。

構造条件は表-1に示すように係留方法、トンネル直径、比重を変化させ、自由振動実験と規則波および不規則波を用いた波力実験を行った。

計測項目は水位(沖側一様水深とトンネル直上)、加速度(トンネル中心部のX, Y, Zの3成分)、波圧(トンネル周囲45°間隔に8点)、トンネル変位(6成分超音波変位計)および係留索張力(トンネル固定部の全係留索)について同時計測を行った。

表-1 実験項目

係留タイプ	トンネル口径	実験項目	トンネル比重
Aタイプ 	11.4m	自由振動	0.70
	23.0m		
Cタイプ 	11.4m	自由振動	0.70
	23.0m	自由振動 波力実験	
Dタイプ 	11.4m	自由振動	0.70
	23.0m	波力実験 自由振動	0.81 0.70

3. 実験結果

(1) 固有周期と減衰定数

橋梁構造などでは固有周期や減衰定数が自由振動試験における初期変位によって変化すると報告もあり、これを「振幅依存性」と呼んでいる。通常、構造物の減衰は(伊藤ら, 1965), 材料自身の減衰と構造系の減衰とから構成されていると考えられている。前者は粘性摩擦(内部減衰), ヒステリシス減衰などと呼ばれ、後者は継ぎ手や接触面などのエネルギー消散による減衰と、構造系から空気・水などへのエネルギー逸散による減衰に大別される。

そこで、水中トンネルについても初期変位を調整し、トンネルの初期変位に対する固有周期(T_n)および減衰定数について、A, C, Dの3係留タイプについて検討した。トンネルの初期変位は図-1に示すように直径で除した無次元量で整理した。図に示すように初期変位は、Aタイプではトンネルの直径の30%まで大きく変化さ

* 正会員 五洋建設(株)技術研究所
** 正会員 工修 西松建設(株)技術研究所
*** 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所
**** 正会員 工博 北海道大学工学部土木工学科

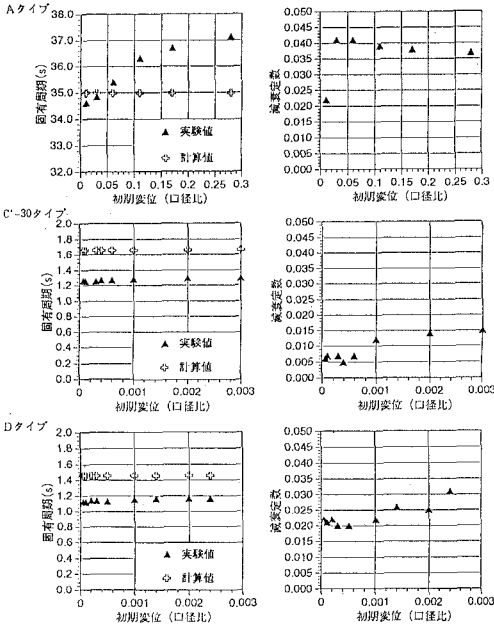


図-1 固有周期と減衰定数 (口径 23.0 m, 比重 0.70)

せたのに対して、CおよびDタイプでは水平方向のバネで拘束されていることからトンネル直径の0.3%までと小さい。図から、Aタイプの固有周期は、初期変位が大きくなるに連れて増加する傾向を示す。ただし、初期変位が5%近傍までは計算値とほぼ一致した。減衰定数は1%の初期変位のとき0.022程度であるが、3%以上の初期変位では0.035から0.040とほぼ一定値を示す。

CおよびDタイプの固有周期は初期変位を変化させても、その変位量が小さいこともあって一定値を示した。ただし、計算値とは若干のずれが発生している。この原因としては、実験値と計算値の比がほぼ一定であることや実験における初期変位が小さいことから推測すると、計算値に用いた慣性力係数 C_m の評価、または模型に用いた係留索のバネ定数の誤差などが考えられる。一方、減衰定数は両タイプとも初期変位が大きくなるにつれて大きくなり若干の振幅依存性が確認された。

(2) トンネルの動揺特性

トンネルの波浪に対する動揺特性は前報で報告した係留方法の内で比較的安定と判断されたDタイプを用いて行った。前報で用いたトンネルは直径が23.0 m, 比重0.7の条件であるが、今回の実験では、直径を11.4 m, 比重を0.81の条件で行った。

図-2は周期が12.9 sと14.9 sに対する、水中トンネルの水平加速度と波高の関係を示している。トンネルの加速度は波高の増加に伴い大きくなる傾向が認められる。特に周期が14.9 sの実験ケースでは、波高が10 m以

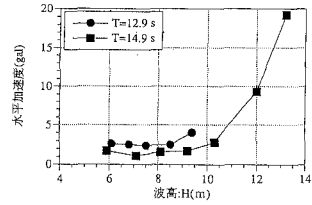


図-2 加速度と波高の関係 (口径 11.4 m, Dタイプ)

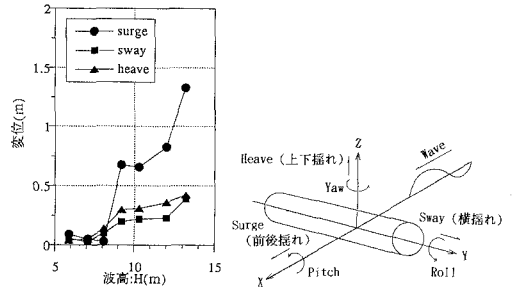


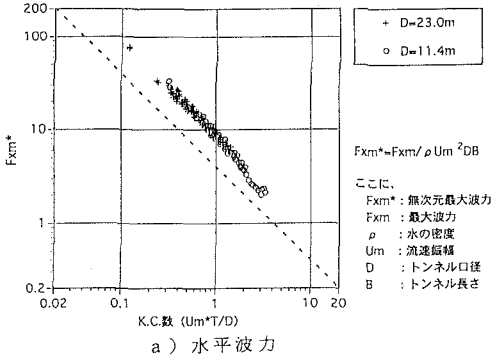
図-3 トンネル変位と波高の関係 (口径 11.4 m, Dタイプ)

上になると水平加速度の増加率が著しく、波高が13.2 mでは約20 galの加速度が確認される。これは、前報の直径23.0 mのとき観測された加速度の約2倍である。

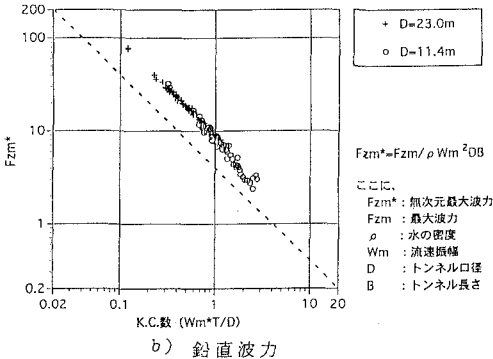
図-3は周期が14.9 sに対する、水中トンネルの変位と波高の関係を示している。図から判るようにトンネルの変位は加速度の傾向と一致することが判る。前報の報告では波高を16 mまで作用させても大口径の水中トンネルは安定を保ち、スナップ荷重は発生しないことが報告されている(国栖ら, 1993)。しかし、小口径トンネルの実験から比重が0.81と大きい場合には波高の増加に伴ってスナップ荷重が発生し、トンネルの変位や加速度が急激に増加することが判った。

(3) トンネルに作用する波力

トンネルに作用する波力は図-4に示すように、縦軸に水中トンネルに作用する波の進行方向および鉛直方向の無次元最大波力、横軸にKeulegan-Carpenter数 ($U_m \cdot T/D$, $W_m \cdot T/D$: 以下にK.C.数と略記)を用いて整理した(岩田ら, 1989)。この結果より、対象とした実験の範囲では、無次元最大波力はトンネルの口径にかかわらずK.C.数の増加に伴って-1乗で単調に減少することが判る。このことは、水中トンネルに作用する波力が流速すなわち波高に比例していることを示唆しており、トンネルに作用する波力は抗力より慣性力が卓越していることを示している。そこで、実験結果から慣性力と抗力の比を横軸にK.C.数をとって整理した結果を図-5に示す。この図からも慣性力が抗力の4倍程度と大きいことがわ

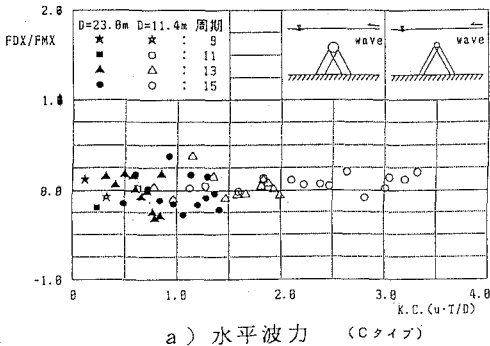


a) 水平波力

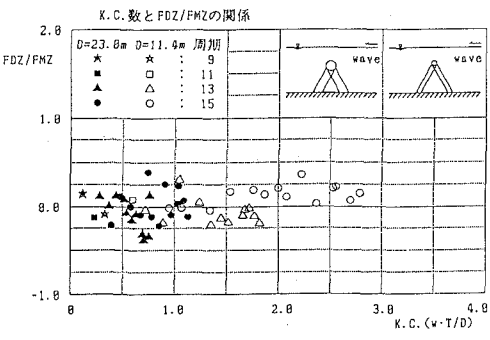


b) 鉛直波力

図-4 無次元波力と K. C. 数の関係



a) 水平波力 (Cタイプ)



b) 鉛直波力 (Cタイプ)

図-5 抗力と慣性力の比率

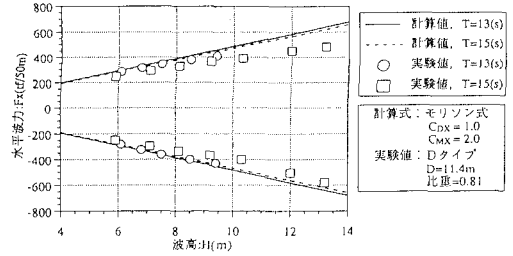


図-6 作用波力と波高の関係

かる。

一方、図-4における実験条件の上限である K. C. 数が 3 付近では、上述の -1 乗の直線から若干のズレが認められる。球の抗力は K. C. 数が 5 ~ 7 以上で卓越し最大無次元波力は一定値を示すことが示されている (岩田ら, 1989)。このことを参考にすると、水中トンネルにおいても K. C. 数が 3 ~ 5 以上の領域では抗力が卓越する遷移領域と考えられる。

次にトンネルに作用する波力と波高の関係について示す。図-6はDタイプの小口径トンネル (直径 11.4 m, 比重 0.81) の水平方向波力の結果である。図中にはモリソン式 ($C_D=1.0$, $C_M=2.0$) から求めた計算波力も示した。また、図中の実線および破線は周期 12.9 s と 14.9 s の計算波力である。

実験より得られた波力と波高の関係は、線形性が非常に高いことが確認される。さらに、実験波力と計算波力を比較すれば、実験波力の方がモリソン式から求めた計算波力より若干小さい値を示している。しかしながら、実験波力と計算波力の整合性は高いことが明らかとなった。

(4) 係留索に働く張力特性

周期 14.9 s で波高が 9.2 m ~ 13.2 m に変化させたときの、トンネル直径 11.4 m, 比重 0.81 で D タイプの No. 4 係留索に働く張力の時刻歴波形を図-7 に示す。この張力波形から波高が 9.2 m と 10.3 m のケースでは規則的な波形であり乱れは認められない。一方、波高が 12.0 m に達するとノコギリ型の波形が観測され、この状態では係留索の「たるみ」が観測された。さらに 13.2 m の波高が作用すると、張力は短周期の鋭い尖った波形となり、これを一般的に「スナップ荷重」と称している。

係留索に働くスナップ荷重は理論的には係留索の最小張力がゼロに達して係留索の「たるみ」によって発生する現象である (吉田ら, 1978)。そこで、C-30, 直径 23.0 m, 周期 13.0 s の条件における最小張力の初期張力に対する比 (T_{mn}/T_0) で再整理した結果を図-8a) に示す。図中の記号は前報 (国栖ら, 1993) で示したように係留

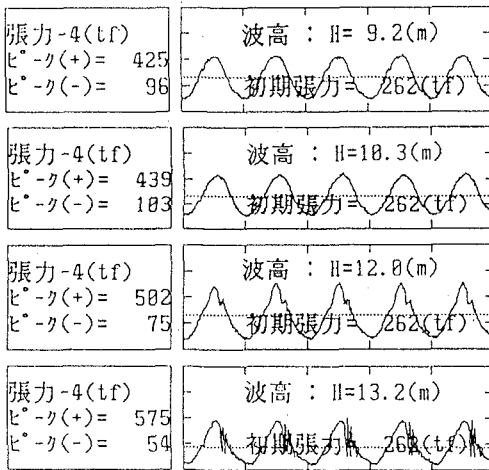
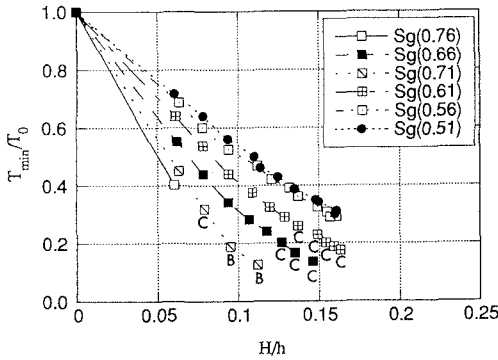
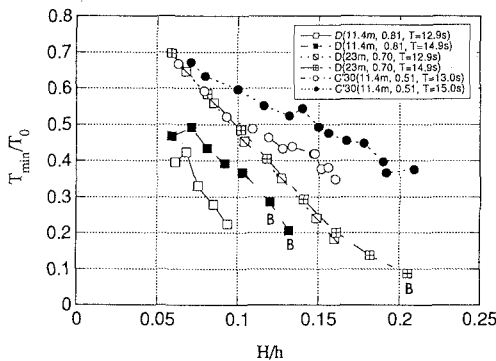


図-7 張力波形と波高の関係

索の張力の状態を示す。ここに、再記すると、A:張力波形記録からスナッフ荷重が認められる。B:係留索は「たるみ」状態にあり、張力波形にやや乱れが認められる。C:目視観察から係留索の「たるみ」は観察されるが、張力波形の乱れは認められない。D:係留索の「たるみ」は



a) C-30, D=23.0 m, T=13.0 s, No. 4



b) D and C-30, D=11.4 m, No. 4

図-8 最小張力と波高の関係

認められない。この図から T_{min}/T_0 が 0.2 以下になると、係留索は B または C レベルの状態を示す。また、実験の数は少ないものの、直径が 11.4 m、および D タイプの係留方法に対する同様の方法で整理した結果を図-8b) に示す。この図からも係留索が B レベルの状態になるのは T_{min}/T_0 が 0.2 以下のときである。このように T_{min}/T_0 がゼロのときでなく、0.2 以下で不安定となる原因は明確ではないが、実験に用いた係留索の検定結果から判断すれば、係留索に非線形な硬化バネの特性を有するものを用いたことも一因として考えられる。すなわち、最小張力が減少すると、係留索のバネ定数も減少するため、岸側と沖側のバネ定数が非対称となることなどが考えられる。

一方、パラメータとしてトンネル比重 (S_g) を用いて整理すると、波高水深比 (H/h) が増加するに従って減少傾向を示す。また、比重が小さくなるに従って最小張力の値は H/h が同一の条件では順次大きくなり、スナッフ荷重が発生しにくいことがわかる。この傾向はトンネル直径が小さい条件でも同様の傾向を示す。

(5) 不規則波の波力および張力特性

規則波の実験から水中トンネルに作用する波力は、主に慣性力であることが明らかとなった。不規則波では一

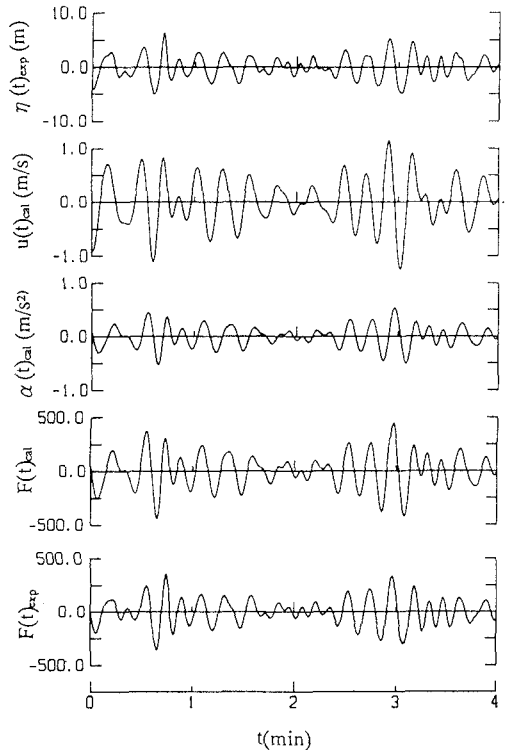


図-9 水位データから計算した波力 ($F(t)_{cal}$) と計測波力 ($F(t)_{exp}$) の比較

般に、波高の出現確率は狭帯域の周波数帯を仮定すると Rayleigh 分布に従い、波力の出現確率は慣性力が支配的であれば、波高と同じように Rayleigh 分布に従う (Borgman, 1965; 岩田ら, 1986)。すなわち、波力の出現確率は波高の出現確率と相似になる。いま、計測した水位波形から式 (1) を用いて流速および加速度を計算し、モリソン式に代入して求めた波力の時刻歴波形と実験で計測した波力を比較したのが図-9 である。図から、水平波力の計算値は実験値と良く一致することがわかる。このことからトンネルに作用する波力が水位分布と相似形であることが理解されるとともに、不規則波に於いてもモリソン式を適用して水中トンネルに作用する流体力を精度良く算定可能であることがわかる。ただし、計算で用いた流体力係数は $C_d=1.0$, $C_m=1.6$ とした。規則波の実験では $C_m=2.0$ を適用したが、慣性力係数は周波数にも影響されることから (元良ら, 1982) 不規則波の条件では規則波よりも小さくなったものと考えられる。計算に用いた式を示せば、以下のとおりである。

$$F(t) = K_d u(t) |u(t)| + K_a \alpha(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$K_d = \frac{1}{2} \rho D C_d, \quad K_a = \rho (\pi D^2 / 4) C_m$$

$$u(t) = H_u(f) \eta(t), \quad \alpha(t) = H_a(f) \eta(t)$$

$$H_u(f) = 2\pi f \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kh)}$$

$$H_a(f) = -i 4\pi^2 f^2 \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kh)}$$

ここに、 $F(t)$: 波力、 K_d : 抗力項、 K_a : 慣性力項、 $u(t)$: 流速、 $\alpha(t)$: 加速度、 ρ : 流体の密度、 D : トンネル口径、 C_d : 抗力係数、 C_m : 慣性力係数、 $H_u(f)$: 流速の伝達関数、 $H_a(f)$: 慣性力の伝達関数、 $\eta(t)$: 水位、 i : 虚数であ

る。

4. あとがき

本研究は (社) 水中トンネル研究調査会事務局および会員各位のご指導のもとに実施したものである。とくに実験のとりまとめに当たっては西松建設 (株) 多田彰秀氏の協力をいただきました。感謝の意を表します。

参考文献

- 岩田好一郎, 水谷法美, 葛西信三 (1986): 没水球体に作用する不規則波の特性, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 476-480.
- 岩田好一郎, 水谷法美, 川角伸彦 (1989): 没水球体に作用する鉛直波力に及ぼす Boundary Proximity の効果, 土木学会論文集, 第 417 号 pp. 219-228.
- 伊藤 学, 片山恒雄 (1993): 架橋構造の振動減衰, 土木学会論文集, 第 117 号, pp. 12-15.
- 国栖広志, 藤井利侑, 水野雄三, 佐伯 浩 (1992): 波浪作用下の水中トンネルの挙動に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 487-492.
- 国栖広志, 水野雄三, 山下俊彦, 水野雄三, 佐伯 浩 (1993): 高波浪下における水中トンネルの動揺および流体力特性, 海岸工学論文集第 40 巻, pp. 881-885.
- 水中トンネル研究調査会流体力研究分科会 (1992): 平成 4 年度予備実験報告書.
- 水野 晋, 国栖広志, 水野雄三, 山下俊彦, 佐伯 浩 (1993): 水中トンネルに作用する波力特性, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演集, 第 2 部, pp. 878-879.
- 元良誠三監修 (1982): 船体と海洋構造物の運動学, pp. 142.
- 吉田宏一郎他 (1978): 緊張係留プラットフォームのスナップ荷重, 日本造船学会論文集, 第 144 号, pp. 205-213.
- Borbman, L. E. (1965): Wave forces on piling for narrow band spectra, Vol. 91, WW3, pp. 65-90.
- H. William Kidman Bird & Robin Shepherd (1982): Wave Interaction with Large Submerged Structures, ASCE, Vol. 108, WW2, pp. 146-162.