

波浪作用下の水中トンネルの挙動に関する実験的研究 The Study of Submerged floating tunnel characteristic under the wave conditions

国栖広志*・藤井利侑**・水野雄三***・佐伯 浩****
Hiroshi . Kunisu , Toshiyuki . Fujii , Yuzo . Mizuno , Hiroshi . Saeki

A large Submerged floating tunnel is studied at the many projects in the world. But there are many problems for the construction at the real sites. In Japan, investigation on the development of the Submerged floating tunnel technology has been started from 1990. This paper deals with the wave force characteristic to the tunnel with experiments(2-D channel) and numerical calculation by means of boundaly element method. From obtained results , the most important thing is snap force control under the large wave height. And numerical calculation of the wave force to the tunnel is good agreement with the experimental results.

Keywords : submerged tunnel , experiments, snap force , numerical calculation

1.はじめに

水中トンネルは、海峡横断の新たな手段として世界各地で構想が挙げられ、それぞれの分野で鋭意研究が進められているが^{1) 2) 3)}、未だに実施例もなく多くの検討課題が存在するものと考えられる。

水中トンネル研究調査会では実現化を目指して分科会方式による研究を1990年より開始した。研究ではまず水中トンネルの構造規模の把握と検討課題の抽出を行うことを目的に試設計⁴⁾を実施し、トンネル口径が11.4mの道路トンネルおよび23.0mの道路鉄道併用トンネルの2案を基本形状とした。さらに、トンネルの固定は緊張係留方式とし、3つの係留タイプ(Aタイプ,Bタイプ,Cタイプ)を提案した。このとき、トンネルに作用する流体力は波浪、潮流、津波荷重を対象として算定した結果、波浪荷重に最も影響されることが判明した。また、大口径の水中トンネル周辺部での水理現象としては、背後域に渦が発生しトンネルの動揺に非線形な挙動が現れることも考えられる。そこで、本研究では2次元造波水槽を用いた水理実験と数値計算を実施し、波浪に対するトンネルの基本的な動揺および係留索の張力特性を明らかにするとともに、最適な係留方式を見いだすことを主要な検討項目とした。

2.現地条件

水中トンネルの検討に用いた現地自然条件は100mの大水深における外洋性波浪場における適用性を検討することから、表-1に示す波高と周期の条件を基本として行った。構造物諸元は、構造設計から表に示す道路専用トンネルと道路鉄道併用トンネルの2形式を基本形状として検討した。なお、天端水深は波浪の影響を軽減することおよび船舶の航行の安全性を考慮して-30mに設定した。

表-1 現地条件

a)自然条件		b)構造条件	
項目	自然条件	項目	道路専用トンネル 道路鉄道併用トンネル
水深 h	100 m	直径	11.4m 23.0m
有義波高 H1/3	9.3m	内径	10.2m 21.0m
最高波高 Hmax	18.6m	重量	6,338 tf/93.2m 26,842 tf/93.2m
周期 T1/3	13.0sec	浮力	9,693 tf/93.2m 39,890 tf/93.2m
構造物天端水深 d	30.0m	比重	0.75 0.75
		比重(自重)	0.70 0.70
		係留方式	A,B,C A,B,C
		バネ定数	37,000tf/m 37,000tf/m

3.実験条件

実験縮尺は水中トンネルの寸法および実験施設の規模を考慮してFroude相似則を適用して1/62.16とした。実験は不規則波造波機付きの大規模2次元造波水槽(85m^L×1.6m^B×3.0m^H)を用い、既設の海底勾配上に水平床を設置するとともに、造波機側端部から68.8mの位置に水中トンネル模型を設置し、規則波を用いて行った。

水中トンネルの模型は、基本形状の外径寸法を縮尺した既成の亚克力円筒管を防水加工を施して製作した。係留索とトンネルの固定はピン結合とし、図-1に示すA,B,C3タイプの係留方式について検討した。重量調整はトンネルの重心位置が中央になるように調整し、模型内部に円筒状の鋼製重錘を挿入することにより行っ

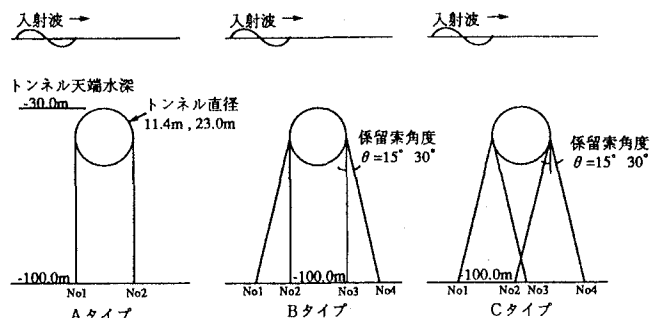


図-1 水中トンネルの係留方式

* 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒140 東京都品川区東大井1-11-25)
** 正会員 西松建設株式会社 土木設計部
*** 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 水工部
**** 正会員 北海道大学 工学部 土木工学科

た。なお、実験に用いた係留索のバネ定数は表-1に示す目標値に対して15%の範囲に設定した。

計測は入射波高、通過波高、係留索張力、波圧、トンネル加速度について同時計測を行った。このうち、トンネルの動揺に伴う加速度はトンネルの中央に加速度計を設置し水平方向(X)、軸方向(Y)、鉛直方向(Z)の3成分を計測するとともに、数値積分して速度および変位を算出した。係留索張力の測定は非線形な張力の発生が観測されたこと、および係留索の初期張力がトンネルのバランスや係留索の変動張力に大きな影響を及ぼすことから、フルスケール150kgの張力計を全ての係留索に設置して行った。トンネルに作用する波圧については、上下および左右の4点に小型波圧計を設置して波作用時に計測を行った。

4.実験ケース

水中トンネルの実験は表-2に示すように、構造条件としてトンネル直径(道路専用トンネル、道路鉄道併用トンネル)、係留方式(A,B,Cタイプ)、比重(トンネル比重は0.71を基本とし、後述の理由により本実験条件において最適係留と判断されるCタイプについては0.51~0.76の範囲で変化させた)、および波浪条件として波の周期、波高を変化させて合計204ケースについて検討した。なお、BおよびCタイプの斜の係留索角度は15° および30° を採用した。

表-2 実験ケース

係留タイプ	トンネル比重	トンネル径(m)	周期(sec)	波高(m)
A	0.76, 0.71	23.0	9.0, 11.0, 13.0, 15.0	6.2, 9.3, 12.4, 15.5, 18.6
B-15°	0.71	〃	〃	6.2
B-30°	0.76	〃	9.0, 11.0	〃
	0.71	11.4, 23.0	9.0, 11.0, 13.0, 15.0	6.2, 9.3
	0.51	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4
C-15°	0.71	23.0	〃	6.2
C-30°	0.76, 0.71	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4
	0.66	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4, 15.5
	0.61, 0.56	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4, 15.5, 18.6
	0.51	11.4, 23.0	〃	〃

5.実験結果

5.1固有周期および減衰定数

水中トンネルの固有周期が波の周期と一致すると、共振によりトンネルには過大な動揺が生じ、トンネル自体の安定性に重大な影響を及ぼすことから、各係留方式の固有周期を正確に把握する必要がある。実験模型の固有周期(Td)および減衰定数(ζ)はトンネル模型に強制的に微小変位を与え、復元時の自由振動波形を模型に取り付けた加速度計により検出し、5波の平均より式(1)、式(2)を用いて算出した。ただし、Tnは実測されたトンネルの固有周期、xiは自由振動の振幅である。

各係留方式の固有周期および減衰定数の結果を表-3に示す。Aタイプの固有周期は水平方向の拘束がな

表-3 固有周期と減衰定数

RUN	構造条件			計算結果			実験結果	
	係留タイプ	口径m	比重	水平バネ定数Kxx(t f/m)	鉛直バネ定数Kyy(t f/m)	固有周期水平(sec)	固有周期	減衰定数
1	A	23	0.76			30.97	40.66	0.032
2	A	23	0.71	62	39		36.64	0.023
3	B-15	23	0.71	5,344	148,533		5.12	0.073
4	B-30	23	0.76			2.52	3.86	0.040
5	B-30	23	0.71	18,925	128,878		3.47	0.036
6	C-15	23	0.71	10,563	105,591		1.97	0.040
7	C-30	23	0.76			1.97	1.97	0.044
8	C-30	23	0.71	37,725	76,107		1.73	0.039
9	C-30	23	0.61				1.50	0.028

$$T_d = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\delta^2}{(2\pi)^2 + \delta^2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = \log_e \left(\frac{x_{i-1}}{x_i} \right)$$

いたため35秒~40秒となり3タイプの中で最も長く、水平方向に拘束のあるBおよびCタイプではそれぞれ3秒~5秒、1.5秒~2秒と極端に短くなる。また、これらの値は計算値とほぼ一致した結果となった。一方、実験から得られた減衰定数は0.023~0.073の範囲にばらついている。今回の結果から、水中トンネルの固有周期はいづれの係留方式に対しても、通常の風波周期である10秒から16秒程度の範囲から大きく外れており共振への影響は小さいものと考えられる。

5.2加速度および変位

水中トンネルの動揺時の加速度は、その大きさによっては供用時に交通の障害やトンネル構造そのものに悪影響を与える恐れがある。また、変位が過大になるとトンネルの平衡が保たれなかったり、トンネルの係留索や固定部、およびトンネルの接続箇所などの構造自体に重大な影響を及ぼすものと考えられる。

波高が6.2mと一定のときの、3タイプの係留方式(比重0.71,トンネル直径23m)に対する波の周期と加速

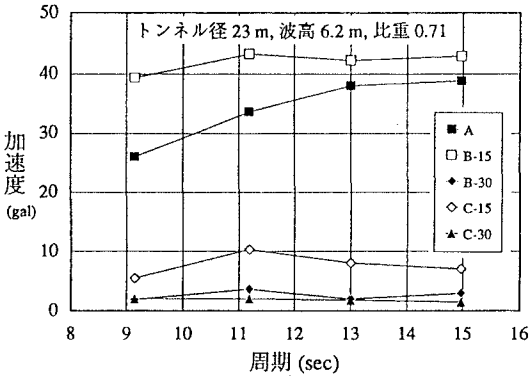


図-2 周期と加速度の関係

度の関係を図-2に示す。水平方向に拘束力が無いAタイプや拘束力の小さいB-15°タイプでは周期が長くなるにつれて加速度も増加し40galに達している。これに比較してC-15°タイプでは10galと前者に比べ約1/4、さらにB-30°タイプおよびC-30°タイプでは2galとAタイプに比べて約1/20となる。

次に、周期を一定として波高を増加させると、加速度はいずれの係留方式においても直線的に増加する傾向を示す。Aタイプでは波高13mの時80galに達するのにに対しC-30°タイプでは15gal程度と小さい。

また、各係留方式に対するトンネルの変位特性も加速度特性と同様の傾向を示した。すなわち、13mの波高を例にとると、Aタイプの水平変位は±4.5mと大きな動揺量を示すのに対し、C-30°タイプでは±0.2m程度と非常に小さい。

一方、作業、歩行、交通上の支障が現れる加速度の基準を考えると、加速度の大きさに対する体感度合や、居住施設の什器類の挙動に関する研究例^{5) 6) 7)}を参考にすると10gal以上と考えられる。居住施設と交通施設の違いはあるものの、この基準値より判断すると本実験の範囲においては、C-30°タイプが最も安定性のよい係留方式といえる。

波浪に対して安定の良いC-30°タイプの波高と水平変位の関係についてトンネル比重をパラメータに整理したものが図-3である。図から水平変位と波高の関係は比例する。しかし、比重0.76に示されるように波高が10mを越えた時点で過大な変位が急激に発生する。これは波力に対してトンネル浮力が不十分なために係留索がスラック（たるみ）状態になるためである。波作用時にトンネル周辺の流れの状態を調べるために染料を投入して目視観察を行ったが、トンネルの側壁およびトンネルの前・背後域での渦の発生は観測されなかった。このことから、係留索のスラックの発生原因は渦など流れの乱れによって発生するのではなく、トンネルに作用する流体力と係留索の横方向拘束力との力学的釣合が主要な要因と考えられる。

5.3係留索張力

係留索に働く張力(T)は初期張力(T₀)と波力による変動張力(T')の合力として式（3）で示すことができる。

$$T = T_0 + T' \quad \dots\dots\dots (3)$$

初期張力はトンネルの浮力が静荷重として係留索に作用するものである。一方、変動張力は波による流体力が作用し、初期張力の値を中心に正負の動荷重として作用する。本報告では張力の最大値と最小値を最大張力(T_{max})および最小張力(T_{min})と呼び、変動張力のそれを最大変動張力(T'_{max})および最小変動張力(T'_{min})と呼ぶこととする。

波高6.2mのときの変動張力と周期の関係（C-30タイプ、トンネル比重0.71）を図-4に示す。また、波の周期15.0secのときの変動張力と波高の関係（C-30タイプ、トンネル比重0.71）を図-5に示す。両者の図から周期の変化に伴う変動張力の違いは約10%程度であるのに対して、波高の変化に対する変動張力の違いは約50%程度にも達しており、変動張力が波高の影響を強く受けることが分かる。

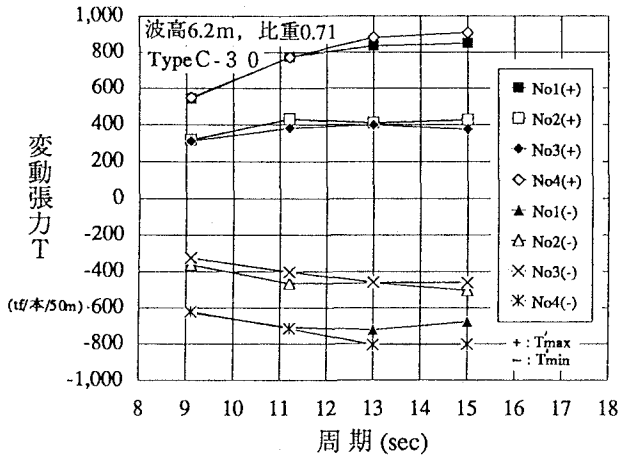


図-4 変動張力と周期の関係

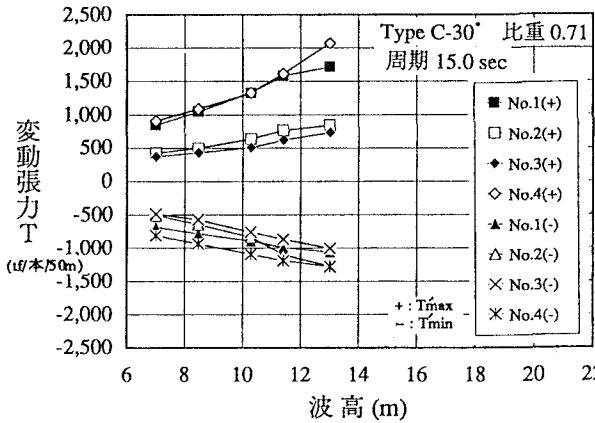


図-5 変動張力と波高の関係

図-6は、C-30タイプについて周期(15.0sec)と比重(0.76)を一定としたときの最大張力および最小張力を示したものである。図中には、ポテンシャル理論を用いて計算されたT_{max}およびT_{min}の結果も示されている。

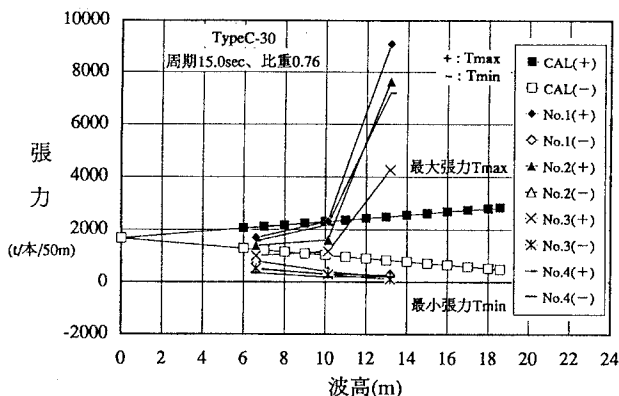


図-6 最大張力および最小張力

これより、係留索張力は計算から比較的よく推定することができるものと考えられる。図-7はトンネル比重を0.51～0.71に変化したときの最大張力および最小張力について示したものである。図から張力は比重の増加とともに減少することが分かる。

一方、図-6に示す様に波高が13.2mの時点で係留索はスラック状態となるとともに、張力は急激に上昇し、いわゆるスナップ荷重の発生が観測される。ここで、係留索張力の時刻歴の測定結果の代表例を図-8を示す。実験条件はC-30°、比重0.76、周期15.0secにおいて波高が6.6m、10.1m、13.2mと変化させた時の張力波形である。これらの波形記録から、吉田ら(1978)⁸⁾が指摘したように、波高が小さいとき張力はほぼ正弦波的な変動を示すが、波高が大きくなるに従って鋭く尖ったノコギリ型の波形を示すとともに最小張力がゼロとなり係留索はスラック状態となる。その直後、トンネルの浮力による急激な復原力によって係留索は瞬時に緊張されることになり、スナップ荷重が発生する。実験からスナップ荷重は係留索の初期張力が小さいほど、また波高が大きいくほど係留索がたるみやすくなるために発生し易くなることが分かった。各係留方式に対するスナップ荷重の発生状況の特性をまとめると以下に示す通りである。

Aタイプ：いづれの波浪条件に対しても認められなかった。B-15°タイプ：比重0.71、周期9.1sec、波高6.17mと比較的低い波高でスナップ荷重が発生した。B-30°タイプ：比重0.71、周期14.9sec、波高10.1mのときに発生し、B-15°タイプに比べてやや大きな波高に対しても安定である。C-30°タイプ：比重0.71、周期14.9sec、波高11.4mのときに発生するが、他の係留方式と比べスラックが発生しにくい形式である。

以上の結果からスナップ荷重の最も発生しにくいC-30°タイプに対して比重を変化させたときのスナップ荷重の発生状況について整理したものを図-9に示す。このとき以下に示す基準を適用した。A：張力波形記録からスナップ荷重が認められる。B：係留索はスラック状態にあり、張力波形にやや乱れが認められる。C：目視観測からスラックは認められるが、張力波形からの乱れは認められない。D：目視観測および張力波形からもスラックは認められない。この図からC-30°タイプ係留の設計波高に対する安定性はトンネルの比重を0.51とすることにより得られることが確認された。

5.4トンネルに作用する流体力

水中トンネルの単位幅当たりの水平方向流体力(Fx)は一般的にMorison式を用いて式(4)から求めることができる。ここにuは流速、Dは構造物の直径を示す。

$$F_x = \frac{\rho}{2} C_{Dx} D u |u| + \frac{\rho}{4} C_{Mx} \pi D^2 \left(\frac{du}{dt} \right) \dots \dots (4)$$

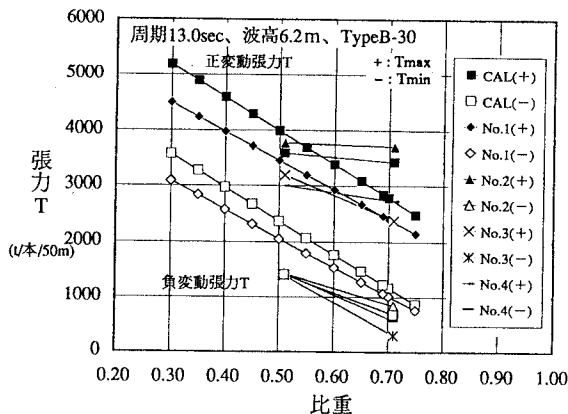


図-7 張力とトンネル比重の関係

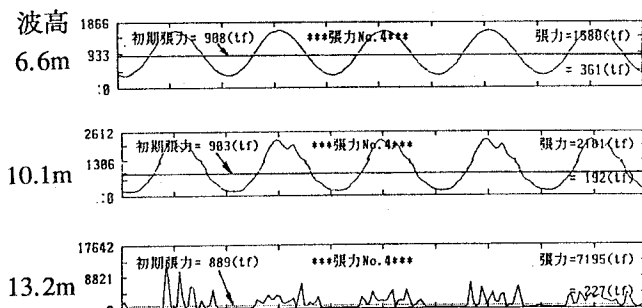


図-8 張力の時刻歴図

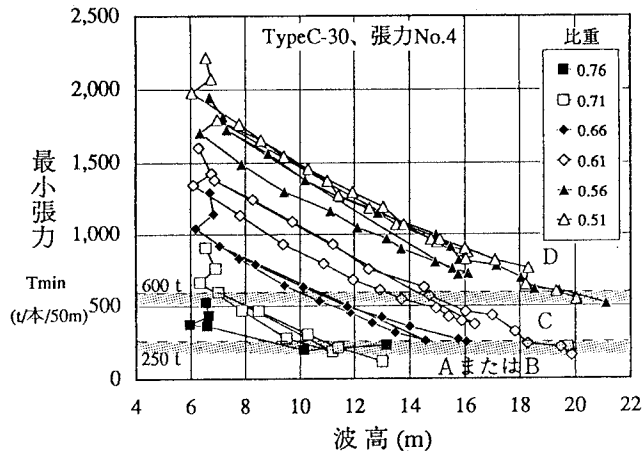


図-9 スナップ荷重の発生状況

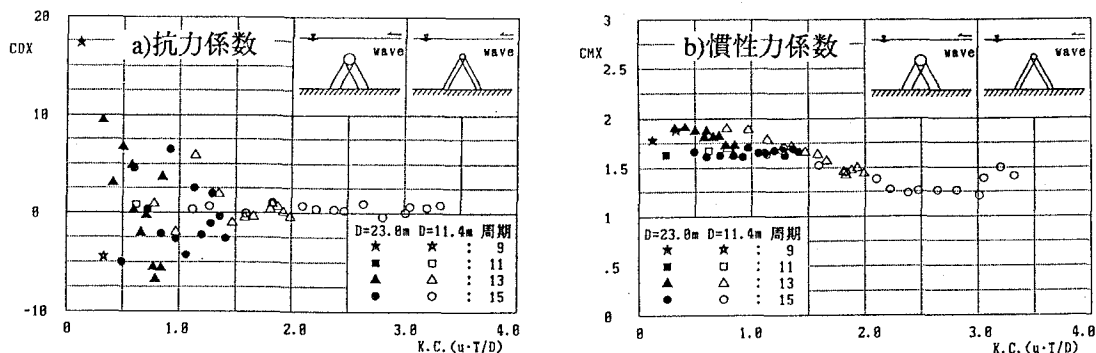


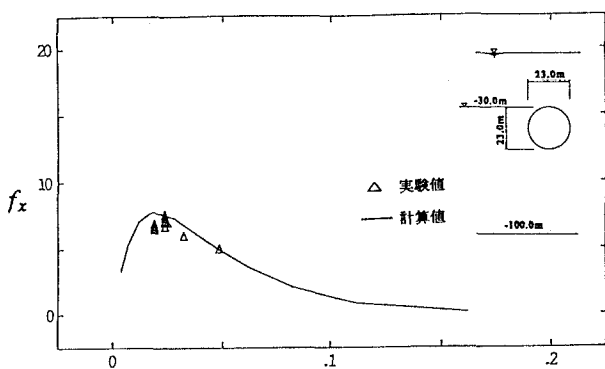
図-10 流体力係数実測結果

そこで、今回の実験から上式の抗力係数および慣性力係数の算出を試みた。水中トンネルに作用する波力は係留索に作用する張力を逆算することにより求めた。各係数の計算結果は図-10に示す通りである。これらから水平方向の抗力係数 C_{DX} は $K.C$ 数が0~2の範囲でばらつきが大きい。一方、慣性力係数 C_{MX} は1.5~2.0の範囲で比較的まとまった結果となった。抗力係数 C_{DX} がばらついた理由としては今回の実験範囲は抗力に比較して慣性力の卓越する領域にあり、小さな抗力から推定したため誤差が大きくなったものと考えられる。また、抗力の大きさは、慣性力の約2割の大きさであった。

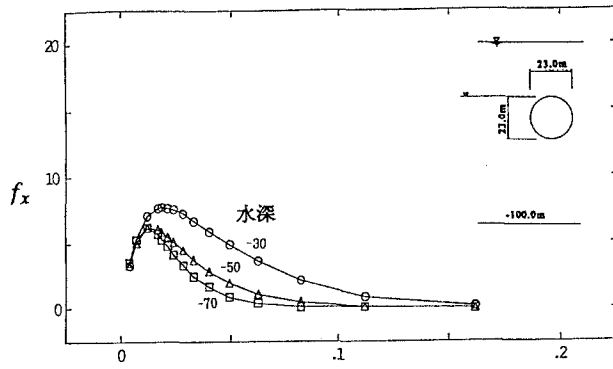
つぎに、H.William Kidman Bird⁹⁾と同様に境界要素法を用い、水中トンネルを固定浮体と仮定し Diffraction Problemとして計算を行った。流体力の計算結果と実験結果を比較すると図-11に示すように x 方向および z 方向に対する流体力は、実験値と良い一致を示し計算値の妥当性が確認された。。そこで、この算定法を用いて水中トンネルの天端設置水深を-30m、-50m、-70mと変化させたときの流体力の試算を行った。この結果は図-12に示すように天端水深が大きくなるにつれて流体力は低減すること、および流体力のピークが長周期側に移動することが分かった。このときの波力 (f_x, f_z) は式(5)及び(6)を用いて算定した。ここに、 F_{xmax}, F_{zmax} : x, z 方向最大波力(tf/m)、 H : 入射波高(m)、 w_0 : 水の単位体積重量(tf/m³)である。

$$f_x = F_{xmax} / w_0 (H / 2) \dots \dots \dots (5)$$

$$f_z = F_{zmax} / w_0 (H / 2) \dots \dots \dots (6)$$

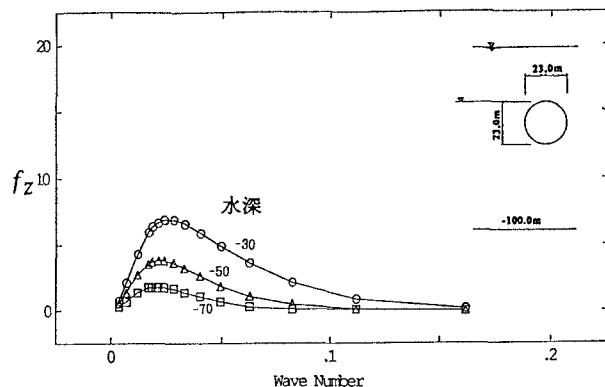


a)x方向



b)z方向

図-11 流体力の実験結果と計算値（境界要素法）の比較



b)z方向

図-12 水深と流体力の関係計算結果

さらに、楕円形状に対しても、天端水深を一定にして同様な波力の算定を試みた。その結果を示す図-13からは、円形断面に作用する流体力の方が楕円形状に比べて小さくなることが分かった。

6. まとめ

1) 係留特性

- ・**A係留**：水平変位は3タイプのなかで最も大きく、周期および波高が大きいほど増大傾向を示す。ただし、係留索のスナップ荷重は認められなかった。
- ・**B係留**：トンネルの水平変位は、斜の係留索によって拘束されるためAタイプの係留方式に比べて著しく小さいが、水平方向の変位を拘束するためスナップ荷重が発生しやすくなる。水平変位については横方向拘束力が大きいB-30°のほうが小さくなる。
- ・**C係留**：係留索の初期張力が小さい条件ではスナップ荷重の発生は認められるが、B係留と比較すると発生し難い係留方式である。高波浪時の条件におけるトンネルの安定性は3タイプのうちで最も安定した係留方式である。トンネル比重を0.5と小さくすることによって高波浪条件においてもスナップ荷重の発生を防止することができる。

2) 張力特性

- ・係留索に作用する変動張力は波高の増加とともに線形的に増加する。
- ・横方向拘束力のあるB,Cタイプではトンネル浮力が小さいと、係留索はスラック状態になり易く、このためスナップ荷重も発生し易くなる。

3) 流体力

- ・対象とした実験条件の範囲では、トンネルに作用する流体力は慣性による力が卓越する。流体力係数はK,C数によって変化する。すなわち、 C_{DX} はK,C数が0~2の範囲でばらつきが大きく、 C_{MX} は1.5~2.0の範囲で比較のまとまった結果となった。

- ・抗力の大きさは、慣性力に比較すると約2割の大きさである。
- ・境界要素法を用いた流体力の計算値は実験値と良い一致を示した。

7. 謝辞

流体力小委員会では今後、スナップ荷重の発生機構の解明、不規則波を用いた長周期波成分のトンネル変位への影響、3次元水理実験によるトンネルの平面的配置法などの検討を実施する予定である。

なお、本研究を進めるに当たっては水中トンネル研究調査会の事務局および会員各位をはじめ北海道開発局開発土木研究所、北海道大学委員並びに流体力参加各社のご協力、御指導のもとに行われた。ここに紙面を借りてあらためてお礼申し上げるとともに、流体力小委員会参加各社を以下に紹介する。北海道大学、北海道開発局開発土木研究所、五洋建設(株)、西松建設(株)(以上幹事会社)、(株)熊谷組、日本国土開発(株)、(株)間組、北海道電力(株)(以上会員)。

参考文献

- 1) Havard Ostlid (1990) : Development of the Norwegian submerged tube bridges , STRAIT CROSSINGS.
- 2) Per Tveit (1990) : Considerations for design of downward non-anchored submerged tubes , STRAIT CROSSINGS.
- 3) L.A.Dahle , K.Reed & J.V.Aarsnes (1990) : Model tests with submerged floating tube bridges , STRAIT CROSSINGS.
- 4) 水中トンネル研究調査会構造研究分科会 (1991) : 水中トンネル試設計 (その1) , 予備検討報告書.
- 5) ECOR日本委員会 (1986) : 構造物の振動問題に関する現状報告.
- 6) 小島・後藤・山田 (1974) : 超高層建築に生じる振動の居住者に及ぼす影響 (1) , 建築界Vol23, No8.
- 7) 登川幸生他 (1988) : 人体の心理的応答による海洋構造物の動揺環境評価に関する研究, 日本造船学会, 第8回海洋工学シンポジウム.
- 8) 吉田宏一郎・米家卓也・岡憲昭 (1978) : 緊張係留プラットフォームのスナップ荷重, 日本造船学会論文週, 第144号.
- 9) H.William Kidman Bird & Robin Shepherd (1982) : Wave Interaction with Large Submerged Structures , ASCE , WW2

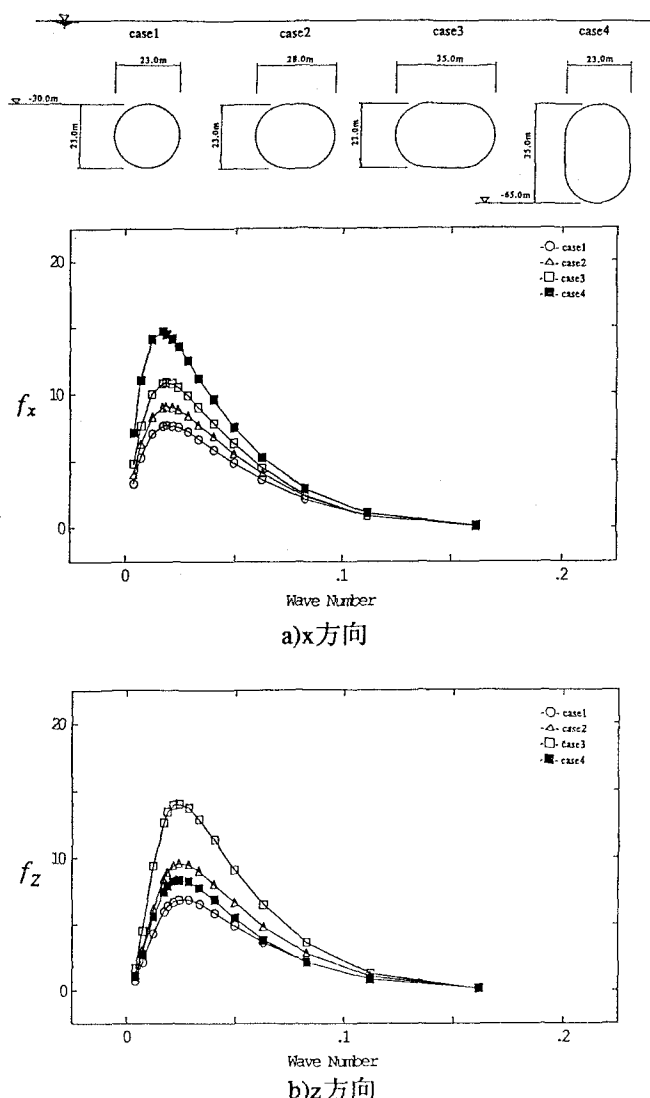


図-13 各種形状と流体力の関係計算結果