

II-391

水中トンネルに作用する波力特性

西松建設㈱ ○正会員 水野 晋 五洋建設㈱ 正会員 国栖広志
 北海道開発局 開発土木研究所 正会員 水野雄三
 北海道大学 正会員 山下俊彦 北海道大学 正会員 佐伯 浩

1. まえがき; 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。しかし, 未だに実施例がなく, 多くの研究課題が残されているものと思われる。我が国では, (社) 水中トンネル研究調査会において水中トンネルの建設技術に関する研究が行われている。特に, 水理模型実験に先だって実施された試設計においては, 噴火湾地区における波浪や流れなどに対する水中トンネルの挙動や流体力が線形理論によって数値計算されている¹⁾。本報では, 大波浪条件下の水中トンネルに作用する波力特性を明らかにするため, 2次元造波水路を用いた水理模型実験を行ったのでその概要並びに得られた結果について報告する。

2. 実験の概要; 水理模型実験は, 北海道開発局開発土木研究所第4実験棟の大型造波水路(85m²×1.6m²×3.0m²)を用いて実施した。実験縮尺は, 水中トンネル寸法および実験設備施設の規模を考慮して1/62.16とした。なお, 相似則は歪なしのフルード則を採用した。水中トンネルの検討に用いた現地自然条件は, 表-1に示すような100mの大水深における外洋性の大波浪条件である。水中トンネルの構造諸元および係留タイプをそれぞれ, 表-2および図-1に示す。次に, 実験で使用した計測機器を図-2に示す。4本の波高計(W1~W4)によって波浪に伴う水位変動を計測した。トンネル模型中心部にはX, YおよびZ軸方向の加速度計(A_{X,Y,Z})を取り付け, トンネル模型の動揺加速度を計測した。トンネル模型外周部には, 45度の間隔で8個の波圧計(P1~P8)を取り付けて波圧の計測も行った。また, トンネル模型側面部および水路床上の架台には超音波変位計を取り付け, トンネル模型の6成分変位量を計測した。さらに, 全ての係留索に張力計(T1~T8)を設置し, トンネル模型の動揺に伴う係留索の張力変動も計測した。

3. 解析方法; 実験より得られた時刻歴データに対し, ゼロアップクロス法により波別解析を行い, 得られた結果より周期, 波高, +PEAK値および-PEAK値を5波平均によって求めた。一方, トンネルに作用する波力を計測データから算定する方法としては, 以下の直接法および間接法が考えられる。

①波圧計によって波力を直接的に算定する方法

模型回りの波圧を模型表面で積分することによって直接的に波力を求める。水平方向波力F_xは以下の式を用いて求めた。

$$F_x = \int_0^{2\pi} P(i) \cdot D \cdot \pi / (2\pi) \sin \alpha \cdot d\alpha \quad (i=1 \sim 8) \quad (1)$$

ここに, P(i)はトンネル外周部に取り付けた波圧計位置で

表-1 自然条件

項目	現地条件	1/62.16模型
水深:h	100m	160.9cm
天端水深:Z	30m	48.3cm
設計周期:T1/3	13.0s	1.65s
最大波高:H _{max}	18.6m	30.0cm

表-2 構造諸元

項目	現地条件	1/62.16模型
直径	23.0m	37.0cm
内径	21.0m	33.8cm
重量	28,842tf/93.2m	111.8kgf/1.5m
浮力	39,890tf/93.2m	166.1kgf/1.5m
比重	0.75	0.75
比重(自重)	0.70	0.70
バネ定数	37,000tf/m	9.58kgf/mm

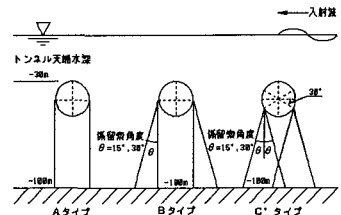


図-1 係留タイプ

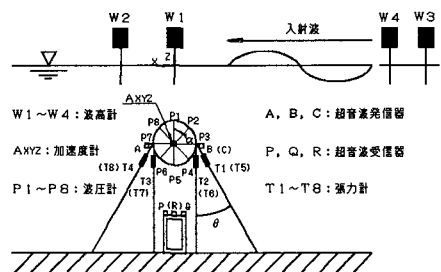


図-2 計測機器

の波圧の値であり、 i は波圧計の番号1から8を示している。また、 α はトンネル頂上からの角度、 D はトンネル直径である。

②張力計によって波力を間接的に算定する方法

張力計の変動張力をX成分とZ成分に分け、それぞれの和より間接的に波力を求める。水平方向波力 F_x は以下の式で求めた。なお、係留タイプによって式が異なるので、ここでは一例としてB係留の場合のみを示す。

$$F_x = (T_1' - T_4') \cdot \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 T' は張力 T の変動張力成分である。

①、②に示す二通りの方法から算定されたトンネルへの作用波力を、ここでは便宜上それぞれ波圧積分波力および張力合力波力と呼ぶことにする。

4. 実験結果と考察； 波圧積分水平波力と張力合力水平波力の関係を図-3に示す。ここに、プロットされたデータはBおよびC'係留タイプの実験結果である。トンネルへの作用波力を算定する上で、トンネルの変位が微小であれば、②の方法でも①とほぼ同程度の値が得られることが明らかとなった。次に、波高と水平波力の関係を図-4に示す。図中の●および▲の記号は、それぞれ周期 $T=13$ (s)および周期 $T=15$ (s)の実験値（波圧積分水平波力）である。同図中には実験からの算定波力とともに、計算で求めた波力も示した。実線および破線がそれぞれ周期 $T=13$ (s)および周期 $T=15$ (s)の計算波力である。計算の手法としては以下に示すモリソン式を用いた。

$$F = F_D + F_M \quad (\text{モリソン式}) \quad (3)$$

$$F_D = \omega_0 / 2g \cdot C_D \cdot A_n \cdot u \cdot |u|, \quad F_M = \omega_0 / g \cdot C_M \cdot V_B \cdot du/dt$$

ここに、 F 、 F_D および F_M はそれぞれ波力、抗力および慣性力である。また、抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M の値としては、それぞれ $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ を用いた。 A_n は波進行方向への物体の投影面積、 V_B は物体の体積である。なお、水粒子速度 u は、微小振幅波理論を用いてトンネル中心位置で算出した値である。

波高と算定波力の関係は、図-4より線形性が高いことが確認される。また、(3)式による計算値は実験値との整合性も高いことが明らかとなった。若干、計算値は実験値よりも大きな値になる場合もあるが、設計上は安全側にあるので問題とならない。一方、境界要素法を用いた波力の数値計算でも、計算値は実験値と良く一致しており、計算方法の妥当性が確認されている²⁾。

5. あとがき； 以上のように、水理模型実験に基づき水中トンネルに作用する波力特性を明らかにすることができた。この他に、トンネル動揺加速度、変位、係留索の変動張力およびトンネル係留索に発生するスナップ荷重等についても検討を加えているので、別途報告する予定である。

なお、本研究を進めるに当たっては(社)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研究小委員会参加各社のご協力、ご指導のもとに行われた。ここに、紙面を借りてお礼申し上げる。

<参考文献>

- 1) 蟹江俊仁，堀越研一，尾高義夫，三上 隆，角田興史雄；波浪作用下の水中トンネルの解析的研究，海洋開発論文集，pp.481～486，1992。
- 2) 国栖広志，藤井利侑，水野雄三，佐伯 浩；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，pp.487～492，1992。

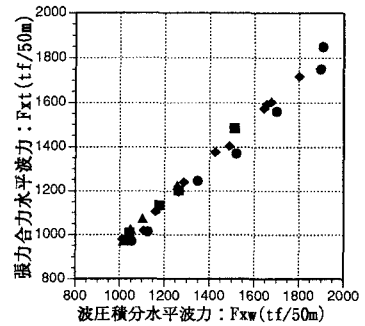


図-3 波圧積分水平波力と張力合力水平波力の関係

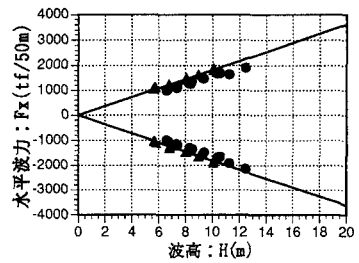


図-4 波高と水平波力の関係