

波浪作用下の水中トンネルの解析的研究

Analytical Study on Submerged Floating Tunnels under Wave Forces

蟹江俊仁*、堀越研一*、尾高義夫*、三上隆**、角田與史雄***

Shunji Kanie, Kenichi Horikoshi, Yoshio Odaka, Takashi Mikami, Yoshio Kakuta

Submerged floating tunnels, which consist of buoyant tubes and tension legs, have been expected as one of the most prospective structures for deep-water crossings in the future. In this paper, their dynamic responses due to wave forces were reported. The dynamic motions of submerged floating tunnels were analyzed by a two-dimensional model based on the potential theory. In order to realize their fundamental characteristics, various arrangements of tension legs were taken into consideration as well as the tube weights and water depths. Consequently, the wave forces and displacements were generalized with the natural frequencies.

Key words: submerged floating tunnel, tension leg, dynamic response, deep-water crossing

1. まえがき

水中トンネルの実現に向けては、その断面形状、設置水深、レグの配置形状と配置間隔等、各種の構造上の因子はもちろん、偶発災害に対する全体の安全システムや非常災害時の避難方法に至るまで、数多くの検討課題が山積している。本研究は、水中トンネル研究の初年度研究としてまず基本構造を仮定し、波浪を中心とする外力に対しての基本動揺特性の把握と、今後の研究課題の抽出を目的に実施された。検討成果は、引続き行われた流体力研究小委員会の予備実験にデータを提供するとともに、実験結果との比較等を通じて妥当性が検討された。

2. 構造概要

トンネルの断面形状は、鉄筋コンクリート製の円形断面とし、浮力に抵抗する複数本の中空鋼管製テンションレグにより海中に固定されている。テンションレグの配置形状は、動的応答特性への影響を評価する目的で相異なる3タイプを想定し、いずれも断面奥行き方向には50mのピッチで配置されているものと仮定する。

図-1に、鉄道・道路併用案での標準断面構造を、図-2にはテンションレグの配置形状3タイプを示した。本検討では、海底面位置(h)や設置水深(d)、斜レグの角度(θ)等を変化させて、その動揺特性への影響を評価したが、標準構造としては $h=100\text{m}$ 、 $d=30\text{m}$ 、 $\theta=30^\circ$ を採用し、特記なき限りはこれを標準としている。概略構造諸元と、標準構造での水平方向動揺時の固有周期は表-1に示す通りである。

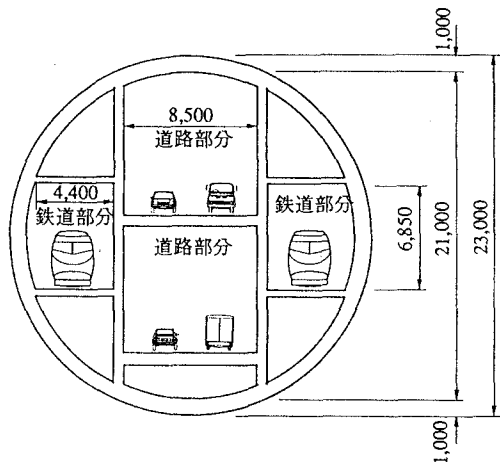


図-1 標準断面構造図

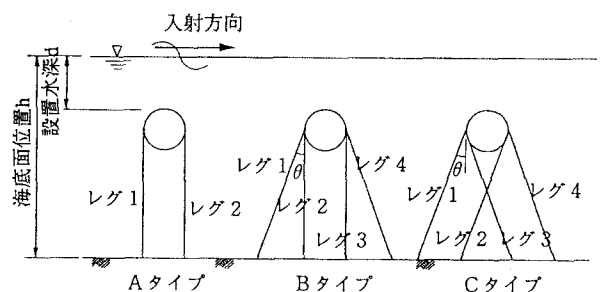


図-2 テンションレグ配置形状図

* 正会員 大成建設(株) 技術開発部 (169 東京都新宿区百人町3-25-1 サンケンビル)
 ** 正会員 北海道大学 工学部 土木工学科 助教授
 *** 正会員 北海道大学 工学部 土木工学科 教授

3. 検討条件および検討方法

3.1 検討条件

本検討で用いた自然条件ならびに材料条件は表-2に示す通りである。

3.2 検討方法

本検討条件の場合、トンネル構造体に作用する波力は、慣性力項により支配される(図-3)。このため、運動解析は、トンネル軸直角方向の2次元モデルについて、ポテンシャル理論に基づく周波数領域プログラムで行うこととし、抗力成分は考慮していない。

トンネルの水平方向復元力特性は、次のように設定した。すなわち、テンションレグによる水平方向復元力は、図-4に示すように、以下の2成分からなる。

- ① レグの伸びに起因する、張力増加による成分
- ② レグの傾角増加がもたらす、水平方向分力の増加による成分

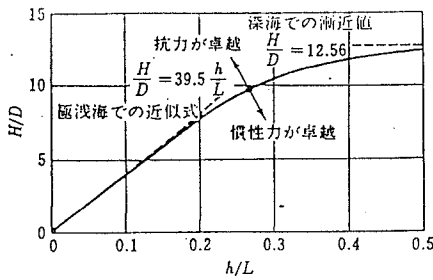
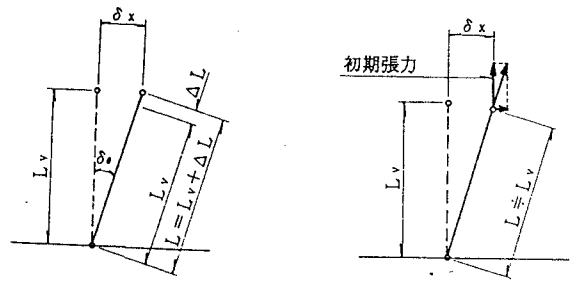


図-3 抗力および慣性力の卓越領域 (R. G. Deanによる)



①張力増加による成分 ②水平方向分力増加による成分
図-4 鉛直レグの水平方向復元力

ここで、鉛直に張られたテンションレグの水平方向復元力 (K_{xx}) を定式化すると下式のようなになる。

$$K_{xx} = \underbrace{\frac{2EA}{L_v} (1 - \cos \delta \theta)}_{\text{①の成分}} + \underbrace{\frac{2P_v}{L_v}}_{\text{②の成分}} \quad \dots (1)$$

E:レグの弾性係数、A:レグの断面積、 L_v :レグの長さ、 P_v :レグの初期張力、 $\delta \theta$:レグの傾角増分
両者の成分のいずれが支配的になるかは、レグの弾性係数と断面積、ならびに初期張力のバランスによって変化することになる。そこでテンションレグタイプAに対し、水平方向力を静的に徐々に増加させながら、水平・鉛直両方向変位を検証した。この結果得られた変位と水平方向力の関係は図-5に示す通りである。これに式(1)の第二項の②成分をプロットすると、水平方向変位が10m程度までの間両者がよく一致することが分かる。すなわち、Aタイプの場合はレグの伸びよりも傾角の変化による効果が顕著であり、後述するようにAタイプの水平方向変位量は各種のパラメーターを変化させても10m以内であることから、復元力は式(1)の第二項で疑似線形化して評価することが可能である。なお、図-6には、この時のレグ張力と水平変位の関係を示してある。

一方、テンションレグタイプBおよびCの場合は、斜レグによる水平方向運動の拘束度が高いため、②よりも①成分が卓越する。従って、トンネル構造体の左右に取り付けられた2組4本のテンションレグは、各々が1対のトラス構造をなし、微小変形理論に基づく線形復元力マトリックスが適用可能である。

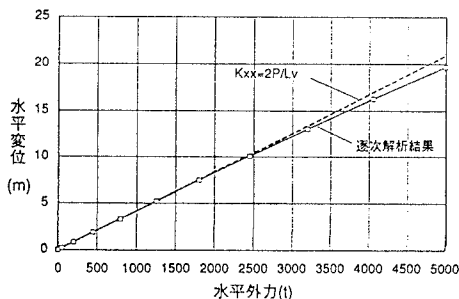


図-5 水平外力と水平変位 (Aタイプ)

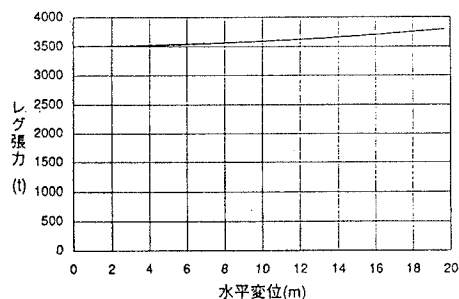


図-6 レグ張力と水平変位 (Aタイプ)

4. 検討結果

4. 1 標準構造での一般的特徴

標準構造での動揺解析結果を、表-3に示す。解析結果のうちレグ張力は、トンネルが図-2において最も右側に変位した時の各レグの発生張力を示している。本解析では、規則波以外の周期外力や潮流力等の定常外力を見込んでいないため、B、Cタイプにおけるレグ1と4、ならびにレグ2と3は、位相が180度ずれた場合の発生張力を表している。また、レグ張力比は、初期張力に対する変動張力振幅の比であり、これが1を上回るとレグにたるみ（スラック）が発生すると考えられる。

表-3 動揺解析結果（標準構造:h=100m, d=30m）

タイプ	波力 (tf/m)		水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	レグ張力 (tf)				レグ張力比
	水平方向	鉛直方向				レグ1	レグ2	レグ3	レグ4	
A	22.6	65.8	5.058	0.038	0.000	5145	5145	-	-	0.47
B	73.8	66.3	0.336	0.022	0.007	5844	-1516	5068	-1760	1.88
C	72.7	66.4	0.131	0.034	0.000	3862	3862	183	183	0.91

表から明かなように、テンションレグタイプによって、作用波力や変位、レグの発生張力等に大きな差があることが分かる。例えばAタイプの場合、水平方向固定度（復元力）が他に比べて格段に小さいため、水平変位は大きい水平方向波力は非常に小さい。また、図-6にも示した通り、水平方向変位が増してもレグの張力増加は小さく抑えられる上、水平方向力に対しレグ配置形状が静定構造のため、構造的にレグのたるみが発生しないという特徴を有している。これに対しB、Cタイプの場合、変位量は非常に小さいかわり作用波力が大きく、特にBタイプではレグの張力に圧縮（負の値）が生じることが分かる。

レグのたるみ（スラック状態）は、それまでの復元力特性が大きく変化するばかりでなく、再度変位が回復した時に、スナップと呼ばれる衝撃的な緊張力がレグに作用することとなる。この現象は、構造強度に与える影響が大きいだけでなく、トンネルの供用性を損ない、利用者の危険を招くため確実に防止する必要がある。「スナップ」、「スラック」の発生については、実験等で十分に確認する必要があるが、仮にスラックの発生を「レグの圧縮力作用時」と定義すれば、Cタイプのレグ張力もかなり小さく、B、Cタイプ共にスラック防止に対する対策が必要と考えられる。

4. 2 各種パラメータの影響評価

水中トンネルの動揺特性を決める因子はきわめて多いが、本検討では基本計画や基本構造諸元に大きく関わる条件を取り上げてパラメータスタディーを実施し、動揺特性への影響評価を試みた。検討結果は以下の通りである。

(a)海底面位置、設置水深の影響評価

海底面位置ならびに設置水深の変化は、トンネルの固有周期が変わることによる応答特性への影響と、作用外力自身の変化をもたらす。テンションレグタイプAは、水平方向の固有周期が波浪の周期13.0secの2倍以上だが、海底面位置が上がる（浅くなる）につれて波浪の周期に近づき、結果として水平変位量は増加する（図-7）。これに対しタイプBは、海底面位置が浅くなるにつれてますます固有周期が小さくなるため、復元力の向上とあいまって大幅に変位が減少する（図-8）。しかし、レグに発生する変動張力は図-9に示すように大きくなり、結果としてスナップ発生の危険性は増すこととなる。

次に、海底面位置を-100mに固定したまま、トンネルの設置水深を下げる（深くする）と、固有周期については海底面位置の変化と同様の効果があるが、作用波力も小さくなるため、変位の応答倍率が増加するタイプAでも、水平方向変位は減少する。タイプBの場合は、固有周期、波力の両面からの低減効果が効き、海底面位置が浅くなるよりも大幅に水平方向変位が低下することとなる（図-10、11）。この時のタイプBの発生変動張力は、設置水深の低下に伴って徐々に小さくなる（図-12）。

(b)レグ傾角の影響評価

タイプB、Cの場合、レグ傾角の増加は水平方向復元力を増し、鉛直方向の復元力を低下させる。また、トンネル構造体の重量が同じであれば、傾角の増加につれてレグの初期張力は高められることとなる。

レグ傾角を変化させた時の水平方向変位と、レグ張力の関係を図-13～図-16に示したが、レグ傾角の増加は変位、張力の低下に著しい効果を与えることが分かる。特に θ が 15° と 45° の場合では、最大水平変位量が $1/5 \sim 1/7$ にまで低減し、変位および張力の抑制には効果的である。

4. 3 波力と変位量の評価

水中トンネルが完全に固定されていることを仮定すれば、現検討条件下でのモリソン式の適用性は満たされる。このため、トンネル構造体に作用する動揺時の波力を、取扱の簡単なモリソン式で一般化することを考える。すなわち、海底面位置や設置水深、レグ傾角を変えて行った上記各種のパラメータスタディーの結果を、モリソン式($C_M=2.0$)による固定部材波力で無次元化して、プロットした(図-17)。横軸は構造物の固有周期を、波浪周期でやはり無次元化したものである。同様に水平方向変位についても、トンネルが無い場合を仮定したトンネル断面中心位置での水粒子の水平方向運動振幅が無次元化してプロットした。これを図-18に示す。

各々の図中に示された破線は、海底面位置(h)を100m、設置水深(d)を30m、鉛直方向復元力をタイプAのケースに固定したまま、水平方向復元力の変化によって固有周期を変化させたときの波力と水平変位を示している。鉛直方向復元力を固定したのは、水平方向の運動との連成効果があまり大きくないため、各種のパラメータを変化させて、水平・鉛直両方向の運動特性を変えても、プロットした点の破線からのズレはわずかである。すなわち、現検討条件下でのトンネル構造体に作用する波力は、構造物の水平方向固有周期が波浪周期の $1/3$ 程度以下であればほぼ一定で、モリソン式により推定した概略波力とほぼ等しい。また、タイプAのように固有周期が波浪周期の2倍以上離れていれば、作用波力はモリソン式による算定値の40%程度以下となることが分かる。

一方、変位については、固有周期が波浪周期よりも小さい領域で、かなり小さな値を示す。しかし、変位が小さくても復元力バネ値が大きい場合、レグに作用する変動張力は、固有周期が長く変位が大きい場合よりも大きくなる。

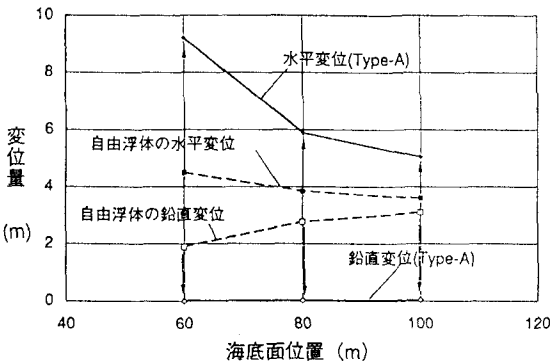


図-7 海底面位置と変位の関係 (Aタイプ)

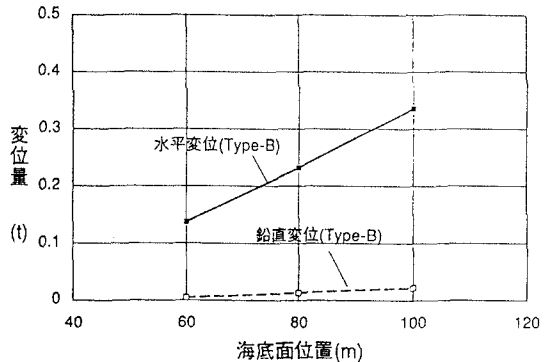


図-8 海底面位置と変位の関係 (Bタイプ)

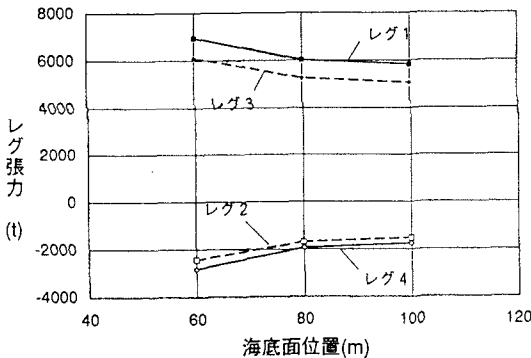


図-9 海底面位置とレグ張力の関係 (Bタイプ)

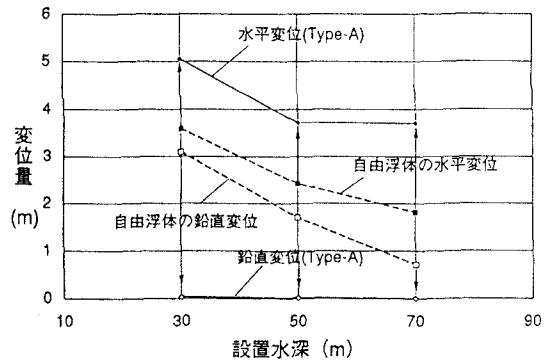


図-10 設置水深と変位の関係 (Aタイプ)

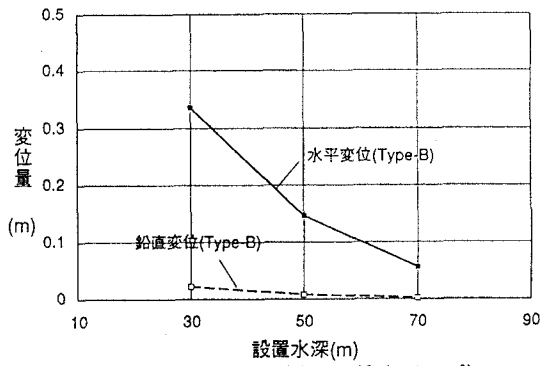


図-1 1 設置水深と変位の関係 (Bタイプ)

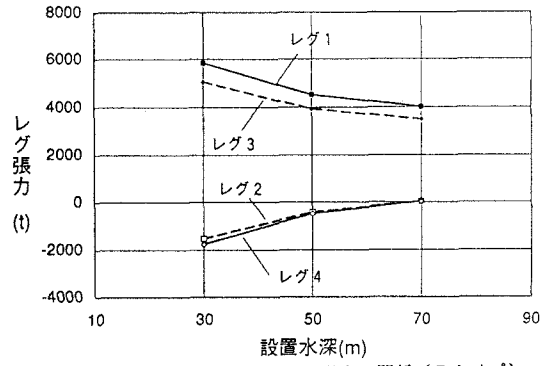


図-1 2 設置水深とレグ張力の関係 (Bタイプ)

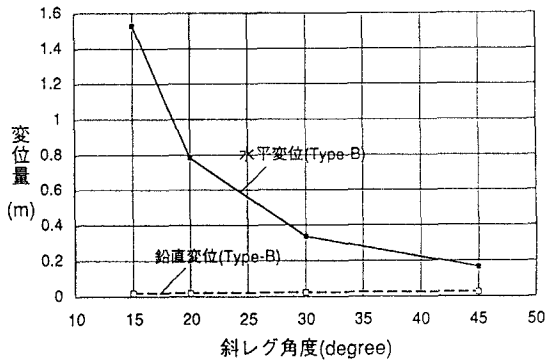


図-1 3 斜レグ角度と変位の関係 (Bタイプ)

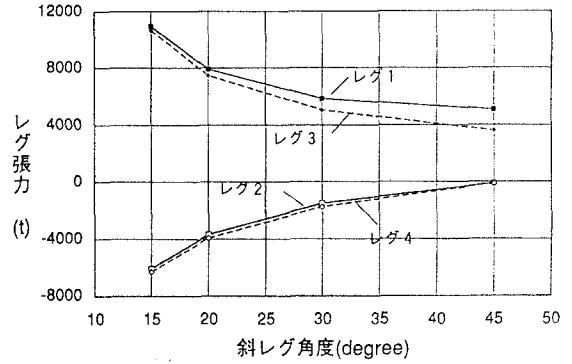


図-1 4 斜レグ角度とレグ張力の関係 (Bタイプ)

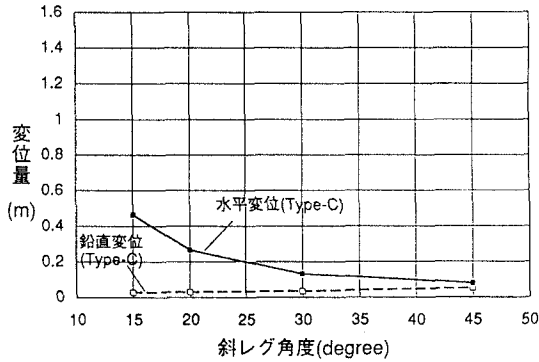


図-1 5 斜レグ角度と変位の関係 (Cタイプ)

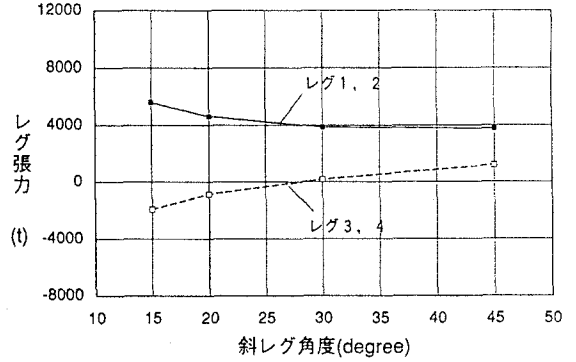


図-1 8 斜レグ角度とレグ張力の関係 (Cタイプ)

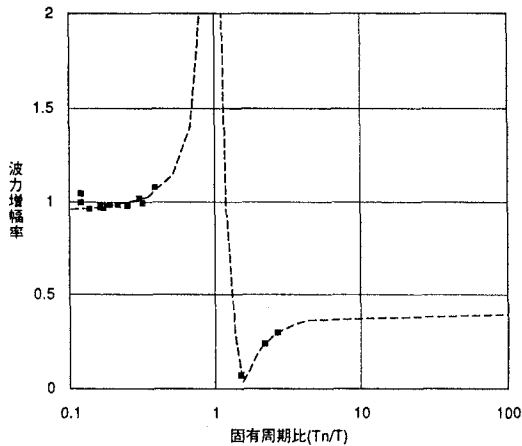


図-1 7 固有周期と波力増幅率

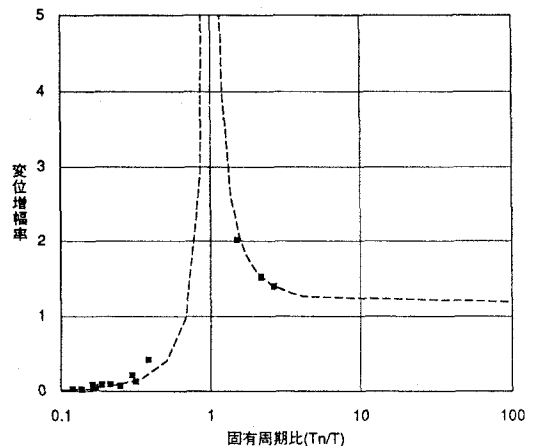


図-1 8 固有周期と変位増幅率

5. 結 論

水中トンネルの変位やレグ発生張力は、各種因子の設定により大きく変化する。従って、その最適形状を論じるためには、許容変位量や加速度等の供用条件の設定や、工費・工期、さらには施工性等も含めた多角的な検討が必要であり、現時点ですぐさま論じられるものではない。しかし、本研究により、水中トンネルの基本的な動揺特性が明らかになった。これを整理して示すと次のようになる。

① Aタイプ

- ・Aタイプは水平方向変位量が大きいものの、その復元力特性は初期張力に比例するバネ係数で疑似線形化して評価できる。
- ・水平方向変位量は、海底面位置、設置水深により大きく変化する。
- ・しかし、レグに発生する張力は、水平方向変位が増しても安定的に小さい。
- ・また、水平方向力によるスラックは発生しない。
- ・水平方向の固有周期は波浪の周期にくらべて長いので、トンネルに作用する波力はモリソン式による算定値の40%以下になる。

② Bタイプ

- ・水平方向の変位量は、Aタイプに比べて格段に小さい。
- ・しかし、張力の変動振幅が大きく、標準構造 ($h=100\text{m}$, $d=30\text{m}$, $\theta=30^\circ$) において、スラックの発生が見込まれる。
- ・海底面位置や設置水深、斜レグの傾角の変化によって、水平方向変位および発生張力は改善されるが、今回検討した範囲内ではスラックの発生を防止できない。
- ・レグによる水平方向の固定度が高く、その固有周期は波浪の周期の1/3以下である。このため、現検討条件下でトンネルに作用する波力は、モリソン式による算定値にほぼ等しい。

③ Cタイプ

- ・水平方向の変位量は、Bタイプよりも小さい。
- ・張力の変動振幅はBタイプ同様大きいですが、標準構造 ($h=100\text{m}$, $d=30\text{m}$, $\theta=30^\circ$) において、スラックの発生は辛うじて免れる。
- ・海底面位置や設置水深、斜レグの傾角の変化によって、水平方向変位および発生張力は大幅に改善される。特に、斜レグの傾角増加は影響が大きく、スラック防止には効果的である。
- ・Bタイプと同様に、レグによる水平方向の固定度が高く、トンネルに作用する波力はモリソン式による算定値にほぼ等しい。

6. 謝 辞

本研究は、(社)水中トンネル研究調査会事務局をはじめ、北海道大学、室蘭工業大学、北海道開発局委員並びに参加各社会員のご指導、ご理解のもと遂行された。ここに感謝の意を述べさせて戴くとともに、構造研究小委員会参加15社を以下に紹介する。

大成建設、日本鋼管(以上幹事会員)。岩倉建設、オリエンタルコンサルタンツ、熊谷組、鴻池組、五洋建設、地崎工業、飛鳥建設、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)。

7. 参考文献

- 1) Loken, A.E. et al: Comparison between Hydrodynamic Numerical Methods and Results from Model Tests for Submerged Floating Tube Bridge, Symposium on Strait Crossings, pp.427 ~434, 1990
- 2) Grant, A.B.: A Submerged Floating Tunnel Solution to a Crossing for the Strait of Messina, Symposium on Strait Crossings, pp.353~365, 1986
- 3) Tanaka, Y. et al: Numerical Generation of Gravity Waves and Open Boundary Scheme, The 10th Offshore Mechanics and Arctic Engineering, pp.229~235, 1991
- 4) Dean, R.G. et al: Interaction of Structure and Waves, Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, 1966