

波浪作用を受ける水中トンネルの動的挙動について DYNAMIC RESPONSES OF SUBMERGED TUBE TUNNELS INDUCED BY 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 tube 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 tube tunnels were computed through a numerical analysis method for a two-dimensional model based on the potential theory. In order to investigate their suitable shapes, various arrangements of tension legs were taken into consideration as well as many combinations of tube buoyancy and water depth. Consequently, the fundamental characteristics of submerged tube tunnels could be realized.

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

1. まえがき

世界的規模で進む情報化時代を迎え、広範な高速輸送ネットワーク作りの必要性が各所で唱えられている折、元来土地面積が希少なうえに、一部都市を中心に過密化が進んだ我国においては、陸海空を含めた抜本的かつ総合的な交通輸送体系の見直しと整備が要求されている。水中トンネルは、こうした状況を背景に、将来的な物流交通システム的一端を担うものとして期待される、新しい大水深海峡・航路の横断手段である。

本報告で紹介する水中トンネルとは、浮力を有するトンネルチューブと、それを海中に引き込み安定化させる係留索等により構成される構造物で、これまでジブラルタル海峡、メッシナ海峡等でコンセプトが提案されているものの、実現には至っていない。また、長年にわたり研究を続けているノルウェーの水中トンネル計画は、大水深ではあるものの波浪や地震に対する自然条件が比較的穏やかなフィヨルドの横断を目的としており、水中トンネル全般にわたる普遍的な技術の確立には十分といたい面がある。我国では昨年、北海道大学並びに北海道開発局を中心に、産官学共同の研究組織である（社）水中トンネル研究調査会（会長：堂垣内 尚弘 （財）北海道地域総合振興機構顧問、技術委員長：芳村 仁 北海道大学工学部教授）が発足し、その実現化を目指して本格的な研究を開始したところである。

* 正会員 大成建設株 技術本部技術開発部

** 正会員 大成建設株 土木本部土木設計部

*** 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 北海道大学教授 工学部土木工学科

本報告は、水中トンネル研究調査会7分科会の内の1分科会である構造研究分科会（主査：角田 與史雄 北海道大学工学部教授、委員：北海道開発局、2大学、参加13社）が、5か年計画の初年度研究として平成2年度に行った研究成果の一部を紹介するものである。水中トンネルの実現に向けては、数多くの課題が山積しており今後の研究によるところが大きい。初年度の研究として、まず基本的な構造形状を有するトンネル構造体が、設計上支配荷重のひとつと考えられる波浪により、どのような挙動を示すかについて解析検討し、その基本動特性の把握を試みた。解析に当たっては、ポテンシャル理論に基づくトンネル軸直角方向の二次元解析プログラムを用い、「トンネル構造体の比重」、「テンションレグの断面配置形状」、「設置水深」、「海底面深さ」の変化が動的挙動に与える影響について検討した。

2. 研究の目的

水中トンネルの実現に当たっては、その断面形状、設置水深、テンションレグの形状と配置間隔等、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、今後の検討を待たなければならないことは明かである。しかし、本研究は水中トンネル研究の内の初年度研究として、まず水中トンネルの動揺特性を初めとする構造的な特徴の概略把握と、今後の各分科会活動を推進していく上での、検討課題の抽出を目的としている。このため、たとえばトンネル断面の形状や具備すべき機能条件ならびにその配置などについては、とりあえず暫定的に定めることとし、ここで採用した構造条件が必ずしも最適であることを保証するものではない。

3. 構造概要

本検討ケースの場合は、トンネルの用途を鉄道・道路併用案と道路専用案に絞り検討を行った（本報告では断面径の大きい鉄道・道路併用案についてのみ記述）。断面形状は、今後の検討への汎用性も考慮して、最も一般的と思われるコンクリート製円形断面を標準とした（図－1）。一方、テンションレグは、TLP等での使用実績を基に、直径70～100 cm程度の中空高張力鋼材を想定している。また、その断面配置形状は、動的応答特性への影響を比較検討する目的で相異なる3タイプを取り上げ、トンネル軸方向に50 mピッチで配置するものと仮定した（図－2）。以下に水中トンネルの概略構造図（標準型）を示す。

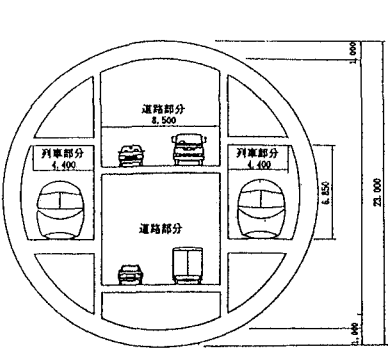


図-1 標準断面図

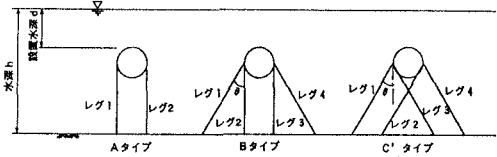


図-2 テンションレグ断面配置形状図

表-1 概略構造諸元

直 径 (m)	23.0	タイプ	固有周期(sec)
重 量 (tf/m)	288.0	A	31.1
浮 力 (tf/m)	428.0	B	2.5
構造体比重	0.67	C	2.0

4. 検討条件および検討方法

4.1 検討条件

本研究における各種条件は、特記なき限り、以下の数値（表－2）を用いるものとする。

表-2 検討条件			
自然条件			
海底面位置		-100.0 m	
波	波 高	$H_{max} = 18.6 \text{ m}$	
波	周 期	$T_{1/3} = 13.0 \text{ sec}$	
材料条件			
材 料	コンクリート	テンションレグ材	
強 度 (kgf/cm ²)	300	5800	
弾性係数 (kgf/cm ²)	2.8×10^6	2.1×10^7	

* : コンクリートは設計基準強度、テンションレグ材は降伏強度

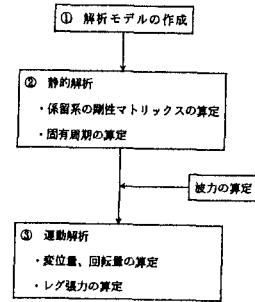


図-3 検討フロー図

4.2 解析手法

波浪によるトンネル構造体の数値解析は、図－3に示すフローに従って行った。本構造の場合、トンネルの復元力特性は、構造物の変位に依存する非線形性を有するため、静的な変位を徐々に与えながら、そのときの復元力を検証した。また、運動解析にあたっては、トンネル軸直角方向の二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解析プログラムで解析を行った。

4.3 検討項目

(a) 復元力特性の検討

水中トンネルの復元力特性は、①テンションレグ材の伸びに伴う張力増加に起因する成分と、②トンネル構造体の変位がもたらすレグ材の幾何学的傾角の増加に起因する成分により構成される。①は、レグ材の弾性係数が線形である限り線形の復元力となるが、②は元来非線形性の復元力である。したがって、全体としての復元力マトリックスを作成する場合には、②の影響が卓越するか否かを検証する必要がある。本研究では、まず静的な解析に基づく復元力特性の把握を行った。

(b) 「レグのたるみ」に対する検討

トンネル構造体の動揺量の増大につれて、テンションレグにたるみが発生するようになる（スラック状態）と、それまでの復元力特性が大きく変化する上、再度変位が回復したとき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も損なうため、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確認する必要があるが、本報告では負の張力発生時を「たるみ」発生 の定義として以降の検討を行った。

(c) パラメータスタディー

水中トンネルの動的特性を決める因子にはきわめて多くの要素があるが、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行い、動揺特性への影響評価を試みた。検討対象項目としては、「海底面位置」、「トンネル設置水深」、及び「斜レグ角度」である。

5. 検討結果

5.1 復元力特性の検討

3タイプのテンションレグ断面配置形状について、その復元力特性を検討したところ、最も非線形性が高いAタイプの場合でも、水平変位量が20 m程度まではほぼ線形に近い挙動を示し、その水平方向復元力は下式で評価できることが判明した。タイプB、Cの場合には、Aに比べて大幅に復元力が大きく、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。

$$K_{xx} = 2 P_v / L_v \quad (1)$$

ここに、

P_v : テンションレグの初期張力(tf)

L_v : テンションレグの長さ (m)

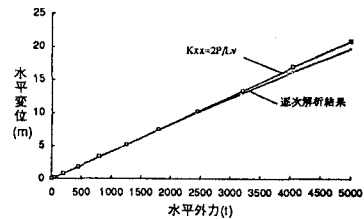


図4 水平外力と水平変位の関係

5.2 「たるみ」に対する検討

タイプAの場合は、水平方向力に対してテンションレグ形状が静定構造のため「たるみ」が発生しないが、鉛直方向下方に荷重作用を受けたときには、荷重の大きさによりたるみが発生する。このため、トンネル構造体の比重を 0.7 に仮定して動揺解析を行い、鉛直方向力によるテンションレグの張力を検証したが、たるみの発生は見られなかった。もし、鉛直方向力によるたわみだけに着目すれば、構造体の比重は 0.8 程度まであげることが可能である。なお、波浪によるトンネル軸周りのモーメントはきわめて小さいため、この効果によるテンションレグ張力への影響も小さく、本検討ではこの効果を無視している。

一方、タイプB、Cは構造系が不静定構造であるため、4本のテンションレグに作用する浮力による初期張力のバランスを任意に設定できる。そこで本検討では、タイプBに対して斜レグの角度を変化($\theta=15^\circ \sim 45^\circ$)させながら、初期状態での張力配分比と波浪による動揺時の発生レグ張力の関係を検討した。図5～6に計算結果の一例を示す。図中のTs、Tvは各々斜レグ、鉛直レグの初期張力を示している。この結果、標準とした構造体比重 0.7 の条件では、レグの初期張力配分比および斜レグの角度に関わらず、負の張力が発生したるみが生じることになる。

そこでタイプBについて、たるみが発生しない構造体比重の検討を行った。この時の条件としては、斜レグの角度 30° 、初期張力配分比($T_s \cdot \cos \theta / T_v = 1.0$)とした。計算結果図7より明かなように、構造体比重を現況の約60%である0.40程度にまで下げなければならないことが判明した。

これに対してタイプCは、トンネルに回転方向外力が作用しない限り、動揺による張力の増減分は4本のレグとも等しくなる。このため、初期張力は全てのテンションレグに同量かかるよう設定し、斜レグの角度による影響を検証した。解析結果を図8に示す。この場合には、斜レグ角度を 28° 以上に設定することにより、たるみの発生を防止できることがわかる。

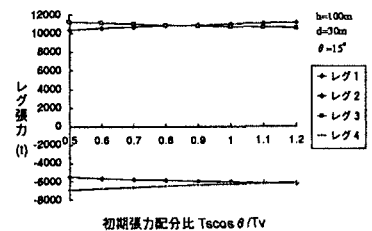


図5 初期張力比とレグ張力の関係 ($\theta=15^\circ$)

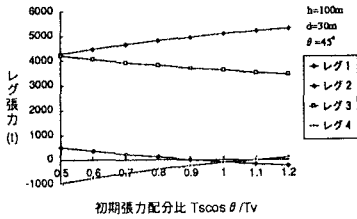


図-6 初期張力とLEG張力の関係 ($\theta = 45^\circ$)

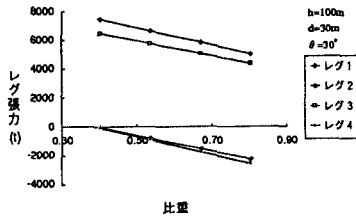


図-7 比重とLEG張力の関係

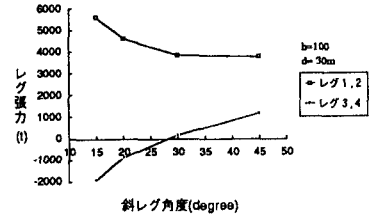


図-8 斜LEG角度とLEG張力の関係

5.3 パラメータスタディー

上述の検討に加え、「海底面位置」、「トンネル設置水深」ならびに「斜LEG角度」が、水中トンネルの動的挙動に与える影響を評価した。

(a) 海底面位置の影響

タイプAは、タイプB、Cに比べて固有周期が長く、波浪の周期 13.0secの2倍以上である。このため、海底面位置が浅くなるに従い、固有周期が波浪の周期に近づき、その結果として水平変位量、応答倍率共に増加する傾向がある。しかしながら、最大水平変位発生時には鉛直方向への沈み込みも発生するため、張力の増加はそれほど大きくないのが特徴である。(図9、10)

これに対し、タイプBの場合は海底面位置が浅くなるにつれて、固有周期はますます波浪周期から離れると同時に、復元力の向上とあいまって大幅に変位が減少する。(図11)

(b) トンネル設置水深の影響

トンネル設置水深が深くなり海底面に近づく、固有周期に関しては「(a) 海底面位置の影響」と同様のことが各タイプについて起こる。しかし、タイプAの場合は変位の応答倍率が上がるものの、作用水平波力の低減効果が大きいいため、発生変位量だけを見ると設置水深の増加にともなって減少していく。タイプAの場合の計算結果を図12に示す。

(c) 斜LEG角度の影響

斜LEG角度がテンションLEGの発生張力に与える影響は、5.2 節において紹介したが、そのときの変位の計算結果をタイプB、Cについて記述する。両タイプ共斜LEGの角度の増加による発生最大水平変位量の抑制効果はきわめて大きく、 θ が 15° と 45° の場合では、1/5から1/7の低減が図られる(図13、14)ことが判明した。

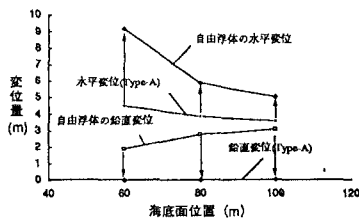


図-9 海底面位置と変位量の関係 (Aタイプ)

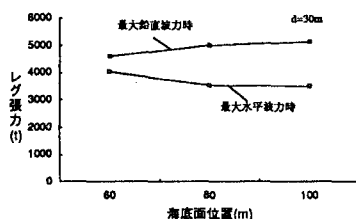


図-10 海底面位置とLEG張力の関係 (Aタイプ)

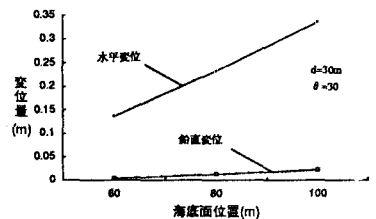


図-11 海底面位置と変位量の関係 (Bタイプ)

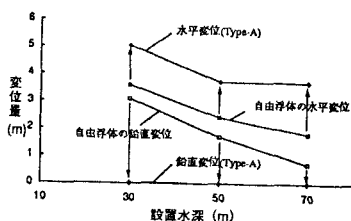


図-12 設置水深と変位の関係 (Aタイプ)

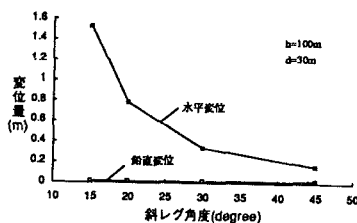


図-13 斜レグ角度と変位量の関係 (Bタイプ)

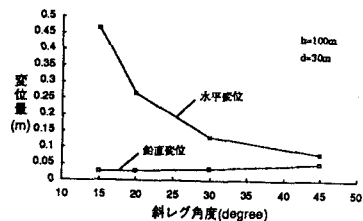


図-14 斜レグ角度と変位量の関係 (Cタイプ)

6. 結 論

既述したように、本格的な水中トンネル研究は始まったばかりであり、供用時の許容変位量や加速度などをなくして、構造形状等の適否をすぐさま論じられるわけではない。しかしながら本研究成果は、次のような水中トンネルの基本的な動揺特性を明らかにした。

- ・テンションレグを用いた係留系の場合、その復元力特性は疑似線形化して表現できる。
- ・静定構造の場合（タイプA）、波浪による水平変位量は大きいものの、レグのたるみは発生しない。一方不静定構造の場合、構造体比重の果たす役割は非常に大きく、タイプBは比重を大幅に低下させない限り、レグ角度や初期張力配分比に関わらず、たるみが発生する。タイプCは、レグ角度の調節により、たるみの発生を避けることが可能である。
- ・海底面位置、設置水深の変位量に与える影響は、タイプB、Cできわめて大きく、変位の抑制を図る場合の指針となろう。
- ・また、斜レグ角度は変位、レグ張力の両面に与える効果が大きく、施工方法や工費が許す限り、傾角を大きく取ることが望ましい。

尚、本研究成果は、水中トンネル研究調査会の他の分科会で検討を実施している水中実験や許容変位量等の検討結果とも照合し、今後更に詳細な研究を続けていく予定である。

7. 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いただくとともに、構造研究分科会参加13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、熊谷組、鴻池組、五洋建設、地崎工業、飛島建設、間組、北海道電力、北興工業、前田建設工業、横川橋梁（以上会員）。

8. 参考文献

- 1) Loken, A. E. et al: Comparison between Hydrodynamic Numerical Methods and Results from Model Tests for Submerged Floating Tube Bridges, 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