

水中トンネルの係留索の疲労設計法

Fatigue Design Procedure of Taut Mooring Line for Submerged Floating Tunnels

前田直寛*、森川正夫**、石川邦照***、角田興史雄****

* 技術士 NKK 橋梁建設部 次長 (〒230横浜市鶴見区末広町2-1)

** NKK エンジニアリング研究所 主任研究員 (〒514-03三重県津市雲出鋼管町1番地)

*** 工博 NKK 船舶・海洋技術部 統括スタッフ (〒514-03三重県津市雲出鋼管町1番地)

**** 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060札幌市北区北13条西8丁目)

ABSTRACT : The submerged floating tunnels become more attractive for crossing straits where the span exceeds the economical limit for a suspension bridge. The design method for mooring lines of the submerged floating tunnels must be established. Especially, an evaluation method of fatigue strength is very important item for a design stage. This paper presents the fatigue design method of taut mooring lines for submerged floating tunnels. Fatigue strength analyses are performed for mooring line.

1. 概要

水中トンネルは、渡海手段としての吊橋や海底トンネルと比較した場合、海域、海象条件等によっては経済性が優位になる可能性がある。そのため、国内外で水中トンネルの実現に向けて精力的な研究が進められている¹⁾。水中トンネルの支持方式の1つである緊張係留方式においては、係留索の設計法の確立が課題の1つである。特に、波浪等の変動外力による係留索の疲労設計法は、水中トンネル設計の基本思想に関連しており、重要な課題である。

本論文では、緊張係留方式の水中トンネルの係留索に着目し、一般の海洋構造物の疲労設計法を基本にして、以下の水中トンネル固有の問題を取り上げ、疲労設計法の考え方を提案した。

1. 海象条件の評価法
2. 構造特性
3. 構造応答特性
4. 強度評価法

次にこの提案をもとにして、水中トンネルの疲労設計法の概要を説明し、具体的な計算例を示した。最後に係留索の疲労設計の成果を受け、緊張係留方式の水中トンネルの係留索取り付け部の構造の提案例を紹介した。なお、本研究は、(社)水中トンネル研究調査会の構造研究小委員会での検討業務の一環として行われ、その成果の一部を紹介するものである。

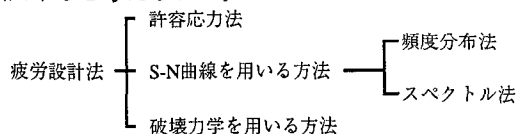
2. 水中トンネルの疲労設計の特徴と課題

2.1 海洋構造物の疲労設計の現状

緊張係留方式水中トンネルの類似構造物には、Tension Leg Platform (以下、TLP) がある。ここでは、特にTLPを意識せずに、海洋構造物の疲労設計法の動向について概観する。

海洋構造物は、セミサブリグ等の浮遊式構造物から、海洋プラットフォームや海底パイプライン等の固定式構造物までその範囲は広い。また、海洋構造物の使われ方、歴史的背景も様々であり、実際に行われている疲労設計

法も様々である。疲労設計法を分類すると、以下の様に分類出来ると考えられる。



許容応力法は、通常の船舶の設計法における場合と同様に、構造物が体験するであろう最大の外力に対して発生応力を計算し、これと、許容応力を比較して設計しようとするものである。この手法を取るには、多くの実験データが必要であり、比較的歴史の浅い海洋構造物では疲労強度に関して適用可能な基準は少ない。

破壊力学による方法は、一部の基準で記述されているがその適用範囲は、単純な溶接継手に限られており、実際の設計に適用されるのは、許容欠陥の規定等、まだ限定されていると言えよう。

現在の設計で最も多く用いられている手法は、S-N曲線を用いる手法である。S-N曲線を用いる手法には2つの手法があり、1つ目は頻度分布法で、2つ目はスペクトル法である。2つの手法は応力振幅の長期予測を行う手法が違っている。

頻度分布法は、波の個数を応力変動の繰返し数とし、波の周期や波高ごとの波の数(頻度分布)を海象条件から直接求めて検討を行う方法である。

スペクトル法は、線形重ね合わせの法則が成立つとして、構造系の伝達関数を求め、これと波のスペクトルを用いて検討を行う方法である。

ここで述べた頻度分布法は決定論的な方法であり、スペクトル法は確率論的な方法と言える。頻度分布法は必要に応じて各種非線形性を考慮する事ができ、また直感的に理解しやすい利点を有するが、波の不規則性に関して近似的な取扱いをしないでなければならない。一方、スペクトル法は波の不規則性を考慮する事が出来るが、各種非線形性を線形化しなくてはならない事、設計者にとってなじみの少ない手法である等の欠点がある。

緊張係留方式水中トンネルの疲労設計に適用する場合

に、頻度分布法かスペクトル法のどちらを採用するかについては、次章で解説する。

疲労設計法の手順については上記の通りであるが、実際の構造物に適用する場合は、一連の解析精度は、以下に示すような各種要因により影響を受けることが知られている。

- (1) 海象条件の設定法
- (2) 構造物のモデル化
- (3) 部材応答の計算法
- (4) 使用するS-N曲線
- (5) 累積被害則の妥当性
- (6) 疲労破壊の判定条件（安全水準の設定）

これらの要因はいずれも難しい問題を含んでおり、確かな解析手法は未だ確立されているとは言いがたい、またある種の変数については、その誤差が、計算結果に大きく影響するのも特徴であり、工学的判断による部分が多々あるのが海洋構造物の疲労設計法の現状と考えられる。

また、緊張係留方式水中トンネルの係留策の疲労設計においては、以下の項目に対する検討が重要であると考えられる。次節でその取扱いについて提案する。

- (1) 海象条件の評価
- (2) 構造特性
- (3) 構造応答特性
- (4) 強度評価法

2.2 水中トンネルの構造特性と疲労設計

1) 海象条件

海洋波は、厳密には2次元方向スペクトルとして表現すべきであるが、通常、便宜的に一次元波スペクトルと波エネルギーの方向分布関数に分離して表現している（後述の(2)式参照）。水中トンネルはその使用目的から、外洋の真ん中に設置されることはなく、一般に湾の入口部などに設置される可能性が高い。したがって、水中トンネルの波エネルギーの方向分布関数は、通常の船舶、海洋構造物等で使用されているような構造物の全方向に関する関数ではなく、湾外部に向けた180°面内での評価を行う必要があると考えられる。

実際の海洋波は、不規則な性質を有している。これを規則波の合成された状態とみなし、規則波に基づく外力、各種応答を推定し、確率論的に不規則波中の外力、応答を評価する方法がよく用いられている。この際に用いられる波理論としては、一般の船舶、海洋構造物の場合には、微小振幅波理論が使用されることが多いが、水中トンネルの場合には、比較的水深が浅いところに設置されるため、有限振幅波理論を適用する必要があると考えられる。

2) 構造特性

水中トンネルの係留索は、水中線状構造物²⁾の一種であり、以下のような特徴を持っている。

- (1) 構造物の直径が小さく、渦による抗力、揚力が支配的である。
- (2) 横方向の剛性が小さく、波、渦の周波数領域と、構造の固有周波数との分離が困難で、動的応答、流力弾性応答が有意になる。
- (3) 張力の存在による幾何剛性が、弾性剛性より大きくなる。
- (4) 大変形が生じて、荷重、材料、幾何学的非線形性の影響が大きくなる。

したがって、設計段階の構造安全性の保証を、従来の構造物の考え方を援用して実施することが困難な場合があり、多くの研究が行われている。また、これらは、TLPのテンドンと同様な特徴である。

水中トンネルの係留索の構造応答解析では、先に示した非線形性のために、一般的な理論解析解を求めるのは不可能であり、数値解析法にて処理する必要がある。また、モデル化の方法には、連続系モデルと離散化モデルとがあるが、任意の外力を考慮した厳密解を得るために、一般には後者が用いられる。離散化モデルの解法には、差分法、ランプドマス法、有限要素法などによる方法があるが、本論文では、境界条件、外力条件、材料特性などの取り扱いに汎用性のある、有限要素法に則った解析手法を採用している^{3), 4), 5), 6)}。

この種の構造では、一般的に大変形、小歪の仮定が成り立つと期待できる。すなわち、構造の長さに対して、断面が小さいために、構造変位が大きいが、そこに生じる歪は小さくなり、取り扱いが簡略化できる。そこで、特徴的な幾何学的非線形問題を取り扱う際に、Up-dated Lagrangian を用いる。これは、構造が変位した状態からの変位増分で変形を記述する方法であり、増分毎に剛性を更新する、増分解法が用いられている。

動的解析では、流体力、大変形などの非線形性を考慮するために時系列解析を行う。長期予測などの統計処理、疲労強度検討の初期段階で線形化した解析を行うこともある⁷⁾。

係留索に関しては、上記のようにTLPのテンドンと同様な考え方で構造特性を把握することができると考えられる。しかし、水中トンネルの係留索に加わる荷重としては、トンネル本体の動揺による動的挙動も考慮する必要があり、これに関しては、TLPのハルの挙動を含めたテンドン挙動の考え方とは、大きく異なっている。つまり、TLPの場合には、ハルを剛体と仮定して構造物の挙動を評価することができたが、水中トンネルのような細長い構造物になるとトンネル本体も弾性挙動をするとして全体評価を行う必要があると考えられる。

構造応答解析に関しては、モデル化の妥当性が検証されれば、ほぼ、現状の技術で予測が可能となっている。しかし、構造減衰の値、海底地盤と構造の相互干渉のモデル化、自然環境のモデル化の妥当性、また、とくに、設計時に行うモデル化の妥当性など、検討すべき項目は多いので、実設計の場合には模型実験などにより確認する必要がある。

3) 応力特性

係留索の応力特性は、係留索の配置方法によって大きく異なる。一般に、垂直係留の場合には、水平方向への変位は大きくなるが、変動張力成分は小さく軸応力も小さくなる。一方、斜め係留の場合には、水平変位は小さいが変動張力が大きくなる。この場合、初期張力にだけに着目していると軸応力との合計が許容応力を越えてしまう可能性がある。つまり、構造強度の観点から見た場合には垂直係留が適しているが、水中トンネルの機能上の観点からは斜め係留が適しているといえる⁸⁾。

係留索の上下端での拘束条件によっても、係留索に発生する応力が大きく異なる。垂直係留の上下端を固定条件にした場合、端部に大きな曲げ応力が発生する。しかし、斜め係留の場合には、上下端を固定にした場合でも発生する曲げ応力は十分小さくなる。したがって、斜め係留の場合には、上下端に回転を自由にするための機構

を取り付ける必要はないが、垂直係留の場合には、上下端を必ず自由にする必要がある⁸⁾。

4) 強度特性

水中トンネルの疲労設計を行う場合の考え方を、許容破壊確率の観点から考察してみる。

疲労設計を行う上での安全水準の考え方として、以下の3点に段階的に考察する必要があると考えられる。

- (1) システム全体としての安全水準
- (2) 主要破損モードに対する安全水準
- (3) 個々の部材の破損に対する安全水準

(1)について参考になるのは、CIRIA⁹⁾で示された考え方である。そこでは社会的な基準を満足するものとして、構造物の許容破壊確率 (P_{fa}) を次式で提案している。

$$P_{fa} = 10^{-4} K_s T/n_r \quad \cdots(1)$$

ここで、 K_s : 社会的基準係数

(公共の建物で0.005、事務所家屋で0.05、橋で0.5、海洋構造物で5.0)

T : 耐用年数

n_r : 破壊発生時に被災する平均的な人数

水中トンネルの場合には、海洋構造物と同程度に考えることは、その公共性から問題があり、橋梁と同程度以上とみなすべきであると考えられる。社会的基準係数だけを取り出しても、海洋構造物と橋では1桁の差があり、構造システムとして安全性を極力向上させる必要がある。

この算式は、システム全体としての水準の設定に関わるものであり、係留索の疲労強度の安全水準を直接に定めるものではない。個別の疲労設計を行ううえでは、(2)、(3)の主要破損モードに対する水準、個々の部材の破損に対する水準を明確に規定していく必要がある。すなわち、水中トンネルのような構造の場合、個々の係留システムのリダンダンシーが構造物全体のリダンダンシーに関わってきており、係留索一本が破壊したときの全体構造に及ぼす影響を考慮して構造全体のリダンダンシーをどのような形で持たせるかが問題である。

ノルウェーの建築物では、破損形態と破損の事態の深刻さで許容破損確率を表1のように設定している¹⁰⁾。破壊モードIは歪み硬化により耐力を保つ破壊モード、破壊モードIIは耐力を保たない破壊モード、破壊モードIIIは脆性破壊および不安定な破壊モードと定義している。

表1 一年許容破損確率 (目標信頼性指標)

破壊の結果 (重大さ)	破壊モード		
	I	II	III
重大でない	$10^{-3}(\beta=3.09)$	$10^{-4}(\beta=3.71)$	$10^{-5}(\beta=4.26)$
重大	$10^{-4}(\beta=3.71)$	$10^{-5}(\beta=4.26)$	$10^{-6}(\beta=4.75)$
大変に重大	$10^{-5}(\beta=4.26)$	$10^{-6}(\beta=4.75)$	$10^{-7}(\beta=5.20)$

水中トンネルの係留索部分は、一般には明確な破損の予兆を見つけることが困難な場合が多いと考えられる。したがって、構造全体をメンテナンスの容易な構造様式、またはシステムにすべきであるとする。また、水中トンネルのような新形式の構造物に対しては、構造物全体としてリダンダンシーのある構造様式を採用することが必要である。

3. 水中トンネル係留索の疲労設計法

3.1 疲労設計手順

水中トンネルの係留索のような水中線状構造物では、応答が非線形である可能性が高いために、一般の海洋構造物の設計手法を援用して設計することが困難な場合が多い。とくに、係留索を深海に適用する場合には、準静的手法を用いるのではなく、詳細な動的解析を行う必要がある。設計基準、規則においても、DNV¹¹⁾、NMD¹²⁾、API¹³⁾などに動的影響を考慮する必要性の記述がある。

水中トンネルの係留索に生じる変動応力は、前述のように海象、トンネル本体の動揺、係留索の応力応答などにより大きな影響を受ける。これらの要因が、すべて線形の応答をすると考えられるなら、比較的簡易な方法によって疲労強度解析を行うことができるが、非線形な応答特性が強い場合には、シミュレーション解析による方法を採用しなければならない。すなわち、その海域での代表的ないくつかの短期海象の波を非線形応答計算に入力し、係留索の応力の時系列応答を十分に長い時間計算する。この結果をもとに応力振幅を計算し、各々の短期海象が生じる確率をかけて応力の長期頻度分布を求める手法である。しかし、この方法には膨大な計算時間が必要であり、精密であるが、現実的な手法とは言い難い。

一方、疲労強度を検討する際に最も重要となる海象は、発現頻度の大きい比較的静穏な海象であり、そこでは波高が高くないことから係留索の応力応答は線形であると仮定しても、大きな誤差が生じないと予測することができる。すなわち、応力応答が波に対して線形であると仮定することによって、周波数応答関数を得ることができ、通常の船舶や海洋構造物で使われている、統計的予測法による応力の長期頻度分布を求めることができる。

図1に、疲労強度解析手法の一つであるスペクトル法の概略流れ図を示す。スペクトル法は、線形重ね合わせにより、不規則波中での応答を統計的に取り扱う方法である。この手法は、Pierson-Moskowitz型スペクトル(以下、P-M型スペクトル)や、Bretshneider-光易型などの波スペクトルを定め、これと、応力の応答関数とから応力応答のスペクトルを求める。この計算を全ての波浪データ ($H1/3-T1/3$ 、または、 $H1/3-T$ [平均波周期] の組合せ) について実施し、応力振幅の頻度分布を求める手法である。スペクトル法における疲労解析は、次の二段階に分けて実施される。

- 1. 構造物の耐用期間中に生じる変動応力の大きさと頻度(変動応力の長期頻度分布)を求める。
- 2. 応力の長期頻度分布とS-N線図より、累積疲労被害度を求める。

3.2 応力の統計的予測法

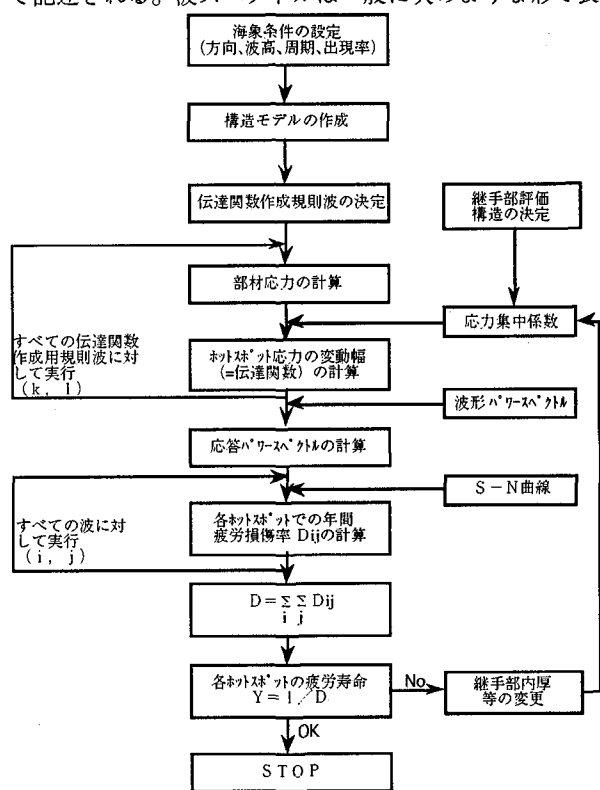
構造物の波浪中の応答が線形であると仮定して、水中トンネルの不規則波浪中での応力応答を推定し、波スペクトルと周波数応答関数を線形重ね合わせることにより、応答スペクトルを求める。推定方法には、短期予測法と長期予測法があり、前者では最も厳しい短期海象を仮定することにより、応力の極大値を推定するものである。後者は、長期波浪データをもとに各応力レベルの発現頻度を求めるものである。

水中トンネルを実際に計画する場合には、設置海域の海象データを長年にわたって蓄積する必要があるのはいうまでもないが、ここでは、水中トンネルの応力の統計的予測法の一般的な解析手法について述べる。

1) 短期予測

1-1) 短期海象

個々の短期海象は波スペクトルを仮定することによって記述される。波スペクトルは一般に次のような形で表



注)
 i : 波の方向を示す番号
 j : 外力としての波番号
 k : 伝達関数作成の波の方向を示す番号
 l : 伝達関数作成の波番号

図1 スペクトル法による設計フロー図

される。

$$S^*(\omega, \chi) = S(\omega) \cdot G(\alpha) \quad \dots(2)$$

ここで、 $S^*(\omega, \chi)$; 波スペクトル (2次元)
 $S(\omega)$; 1次元波スペクトル
 $G(\alpha)$; 方向分布関数
 α ; 波の主方向と成分波の進行方向のなす角度
 χ ; $\theta + \alpha$
 θ ; 波の主方向

(2)式に関しては多くの式が提案されているが、完全発達波に対してP-M型スペクトル、有限吹送距離における風波に対してはJONSWAP型スペクトルなどが挙げられる。以下の式は、多くの海洋構造物の解析に用いられている、ISSC-1979のP-M型スペクトルである。

$$S(\omega) = 0.11 H_{1/3}^2 \left(\frac{2\pi}{T_{01}} \right)^{-1} \left(\frac{\omega T_{01}}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \cdot \left(\frac{\omega T_{01}}{2\pi} \right)^4 \right\} \quad \dots(3)$$

ここで、 $H_{1/3}^2 = 4\sqrt{m_0} = H_s$

$$T_{01} = 2\pi m_0 / m_1$$

$$m_n = \int_0^\infty S(\omega) \cdot \omega^n d\omega$$

また、一般の海洋構造物に対する波の方向分布関数としては、次式を用いることが多い。

$$G(\alpha) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^n \alpha & |\alpha| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & |\alpha| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \dots(4)$$

$n=2$ または 4

しかし、前述のように、水中トンネルの設置海域としては、湾入口部という特殊な海域である可能性が高いため、方向分布関数を違った形で定義する必要がある場合がある。

1-2) 応力の短期予測

規則波中の応力解析により、周波数応答関数 [TR] は、波周波数 $[\omega]$ と波向 $[\chi]$ の関数として求められる。この周波数応答関数と(2)式の波スペクトルを線形に重ね合わせるにより、応力応答スペクトルが得られる。すなわち、

$$S_{\sigma\sigma}(\omega, \chi) = \{TR(\omega, \chi)\}^2 S(\omega) \quad \dots(5)$$

$$S_{\sigma\sigma}^*(\omega, \chi) = S_{\sigma\sigma}(\omega, \chi) G(\alpha) \quad \dots(6)$$

ここで、 $S_{\sigma\sigma}$; 応力応答の1次元スペクトル

χ ; 波向 ($\chi = \theta + \alpha$)

$S_{\sigma\sigma}^*$; 応力応答スペクトル (2次元)

短期海象における応答の標準偏差 R は応答スペクトルを積分することにより得られる。すなわち、

$$R_L^2(\chi) = \int_0^\infty S_{\sigma\sigma}(\omega, \chi) d\omega \quad \dots(7)$$

$$R_S^2(\chi) = \int_{-\pi}^\pi \int_0^\infty S_{\sigma\sigma}^*(\omega, \theta + \alpha) d\omega d\alpha \quad \dots(8)$$

ここで、 R_L ; 長波頂波に対する応答の標準偏差

R_S ; 短波頂波に対する応答の標準偏差

(7)、(8)式の積分はTRの計算値を用いて数値計算によって求められる。たとえば、

$$R_L^2(\chi) = \sum_i \{TR(\omega_i, \chi_j)\}^2 S(\omega_i) \Delta\omega_i \quad \dots(9)$$

$$R^2(\theta_k) = \sum_i \sum_j \{TR(\omega_i, \theta_k + \alpha_j)\}^2 S(\omega_i) G(\alpha_j) \Delta\omega_i \Delta\alpha_j \quad \dots(10)$$

ここで、 $\chi_j = \theta_k + \alpha_j$

以上の結果を用いて応答の最大期待値の推定が行われる。短期海象における応力応答の極値の確率分布をレーレー分布に仮定する。すなわち、

$$F_s(\sigma_s \leq \sigma) = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^2 \right\} \quad \dots(11)$$

ここで、 F_s ; 極値 σ_a が σ を越えない確率 (累積確率)

R ; (6)、(7) 式の R_L または R_S

また、この場合の極値の平均値、 $1/n$ 最大期待値は次式で計算できる。

平均値	=	1.25 R
1/3 最大期待値	=	2.00 R
1/100	〃	= 3.20 R
1/200	〃	= 3.42 R
1/500	〃	= 3.70 R
1/1000	〃	= 3.88 R
1/10000	〃	= 4.48 R

2) 長期予測法

構造物が設置される海域における長年にわたる波浪データ (短期海象の発現頻度) を用いて、応力応答の極大

値のみでなく、各レベルの応力の発現頻度分布を求めようとするものである。この方法は、比較的低いレベルの応力の繰返しが問題となる疲労強度評価に対して特に有効な方法である。

2-1) 長期波浪データ

1つの波スペクトルで表わすことができる短期海象の継続時間は短く、数十分から2～3時間程度である。したがって、構造物の寿命に匹敵する長時間にわたる海象を表現するためには、長年にわたる短期海象自体の発現確率を表わす長期波浪データが必要となる。長期波浪データは、一般に目視観測波高 H_v と目視観測平均波周期 T_v の結合頻度分布表として与えられる。

各区分の波高、波周期の代表値を H_{vi} 、 T_{vj} とすると、 (H_{vi}, T_{vj}) で表わされる短期海象の発現確率は次のように求まる。

$$P(H_{vi}, T_{vj}) \Delta H_{vi} \Delta T_{vj} = \frac{n(H_{vi}, T_{vj})}{\sum_i \sum_j n(H_{vi}, T_{vj})} \quad \cdots(13)$$

ここで、 n ; 表中に示された個数

さて、上記の目視観測波高 H_v 、目視観測平均波周期 T_v は、それぞれ有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波周期 T_{01} に対応するものであるが、それらは厳密には一致しない。両者の関係は、いくつか提案されているが、海域によって異なる。例えば、Norden-stromは北海に対し、次の関係式を提案している。

$$H_{1/3} = 1.68 \cdot H_v^{0.75} \quad \cdots(14)$$

$$T_{01} = 2.83 \cdot T_v^{0.44} \quad \cdots(15)$$

2-2) 応力の長期分布

長期波浪データによってその発現確率が与えられている各短期海象における応力振幅の確率分布は(16)式のようにレーレー分布で近似する。

$$Fs(\sigma_a \leq \sigma) = 1 - \exp\{-\frac{1}{2} (\frac{\sigma}{R})^2\} \quad \cdots(16)$$

ここで、 R は短期海象における応力応答の標準偏差で短期予測の場合と同様に(2)～(10)式により求めることができる。ただし、 R は長期波浪データにおけるすべての海象 (H_{Si}, T_{Zj}) について計算される。すなわち、

$$R^2_{S^2}(\theta_k; H^2_S, T^2_Z) = \sum_m \sum_n \{TR(\omega_m, \theta_k + \alpha_n)\}^2 S(\omega_m; H^2_S, T^2_Z) G(\alpha_n) \Delta \omega_m \Delta \alpha_n \quad \cdots(17)$$

ただし、ここでは短波頂波のみを考慮するものとする。短期海象における応力振幅の確率分布を、その海象の発現確率を考慮して足し合わせることで、応力振幅の長期分布が得られる。すなわち、

$$Fk(\sigma_a < \sigma; \theta_k) = 1 - \sum_i \sum_j \exp\{-\frac{\sigma^2}{2R^2_{S^2}(\theta_k; H^2_{Si}, T^2_{Zj})}\} Ps(H^2_{Si}, T^2_{Zj}) \Delta H^2_{Si} \Delta T^2_{Zj} \quad \cdots(18)$$

$$Ps(H^2_{Si}, T^2_{Zj}) \Delta H^2_{Si} \Delta T^2_{Zj} = P(H^2_{vi}, T^2_{vj}) \Delta H^2_{vi} \Delta T^2_{vj} \quad \cdots(19)$$

(18)式は波の主方向を常に θ_k とした時の長期分布であるが、実際には波の主方向は全方向に分布している。その確率密度を $\rho(\theta)$ とすると、応力振幅の長期分布は次のようになる。

$$F(\sigma_a < \sigma) = 1 - \sum_k \rho(\theta_k) F(\sigma_a < \sigma; \theta_k) \Delta \theta_k \quad \cdots(20)$$

4. 水中トンネル係留索の疲労強度の試解析

4.1 解析条件

(社)水中トンネル研究調査会では、北海道の内浦湾を

水中トンネルの設置海域として想定して検討が実施されている¹⁴⁾。前章で示した方法に則って、この水中トンネルの係留索の疲労強度の試解析を実施した。図2に水中トンネルの想定位置図を、図3および表2に水中トンネルの諸元を示す。試解析を実施した係留索の配置 (B-TYPE係留) を図4に示す。

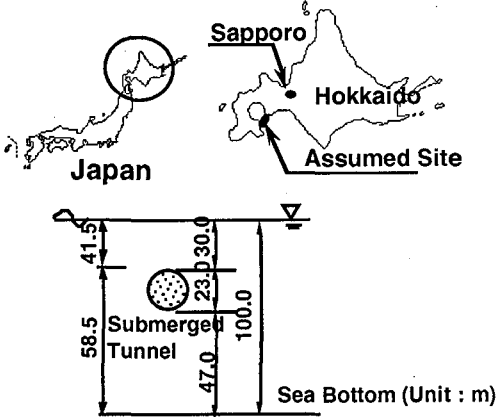


図2 水中トンネル想定位置

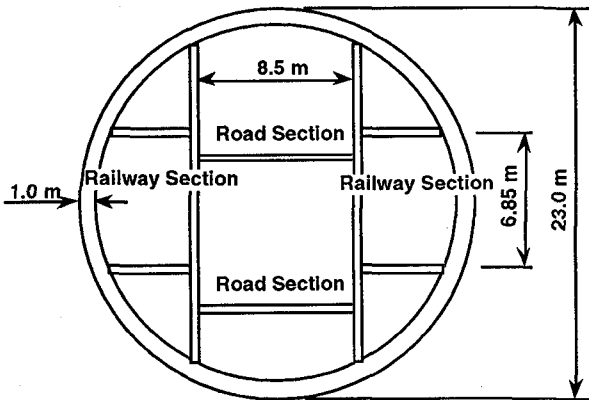


図3 水中トンネル概略形状

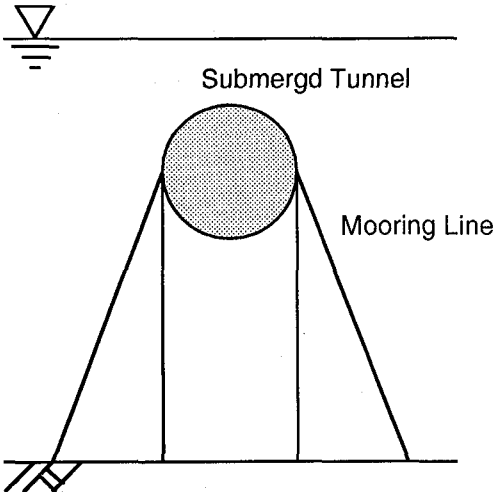


図4 B-Type係留

表2 水中トンネル諸元

Classification	Item	Particulars
Water Depth		100 m
Tunnel Installation Depth		30 m (at Tunnel Top)
Tunnel Cross Section	Outside Diameter	23 m
	Wall Thickness	1 m
	Material	Concrete
	Weight in Air	288 tf/m
	Buoyancy	425 tf/m
	Drag Coeff.	1.0
	Mass Force Coeff.	1.0
Mooring Line	Added Mass Coeff.	1.0
	Outside Diameter	1100 mm
	Wall Thickness	40 mm
	Material	Steel
	Cross Section Area	$1.332 \times 10^5 \text{ mm}^2$
	Section Modulus	$3.406 \times 10^7 \text{ mm}^3$
	Drag Coeff.	1.0
Wave	Mass Force Coeff.	1.0
	Added Mass Coeff.	1.0
Wave	Wave Height	18.6 m
	Wave Period	13.0 sec.
Current	Current Velocity	0.6 m/sec.

本論文では、全ての現象についての解析を実施しているわけではないことから、種々の仮定をもうけた。係留索の疲労強度試験解析の基本条件、仮定を以下に示す。

基本条件：

1. 耐用年数：道路構造物として、100年を想定。
2. 照査箇所：B-TYPE係留の外側の係留索一般部。
その他の検討部位としては下記が考えられるが、今回の検討からは除外した。
 - ・係留索同志の継手部（ネジまたは溶接）
 - ・トンネルおよびアンカーとの取合い部
 - ・係留索取付部構造詳細部

3. 係留索：鋼管製

外径1000mm 板厚40mm (材質API X-80)

4. その他：(社)水中トンネル研究調査会の設定諸元¹⁴⁾

仮定：

- 1) 応力は軸応力のみが生じると仮定。
局部荷重によって生じる曲げ応力については、現状で解析されていないことから、ここでは小さいとして無視した。
- 2) 応力応答は線形であると仮定。
トンネル部に働く質量力が軸応力を生じさせる主たる荷重。
- 3) 波は、ISSCスペクトルで表現できると仮定。
湾内の波スペクトルがISSCのスペクトルで表現できる保証はなく、越智-Hubble、Bredshneider-光易のスペクトル等の方が適切かも知れないが、ここでは、疲労強度の試算という観点から、海洋構造物で多用されているISSCスペクトルを使用した。
- 4) 波の方向は考慮しないと仮定。
応力の応答関数が2次元解析結果を用いたことから、波方向の影響が考慮できない。ここでは、いつもトンネルの軸方向に直行方向からのみ波が来るとして解析を実施した。この仮定は、応力を大きい

方向に推定する事になる。

5) 疲労限は無いものと仮定。

ランダム荷重のもとでの疲労限についてはまだ定説はなく、一定荷重下の疲労限よりかなり低下することが知られている。ここでは、安全側の算定を行うために、疲労限は無いものと仮定して解析を実施した。

4.2 波浪データ

日本近海の通年の気象データは、日本造船研究協会でもとめられた“北太平洋の風と波の統計図表”(SR163)に詳しい。この図表は、日本気象庁、アメリカNOAAに保存されている海洋気象観測データを基にしている

図5に日本近海の海区を示す。本論文では、水中トンネルの設置場所として北海道の内浦湾を想定しているため、北海道近海として海区[E03S]を選択した。

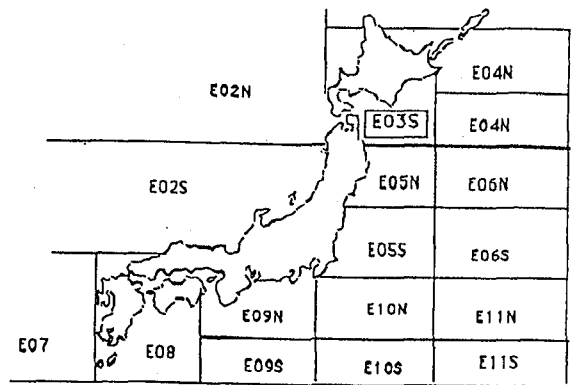


図5 日本近海の海区

表3にE03S海域の波浪の頻度分布（目視波高、目視周期の結合確率分布）を示す。

表3 E03S海域の波浪頻度分布表

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Total
	~5	6~7	8~9	10~11	12~13	14~	Calm	
0~0.75	541	110	89	5		3	26	774
~1.75	930	645	264	91	11	8		1949
~2.75	248	231	112	14	12	12		629
~3.75	60	61	55	8	7	5		196
~4.75	22	18	27	7	4	2		80
~5.75	1	7	3		1	1		13
~6.75	1	3	2		2			8
~7.75		7	4		2	1		14
~8.75	1	1		1				3
~9.75	1				1			2
~10.75		1				1		2
~11.75								0
~12.75				1				1
~13.75								0
Calm							13	13
Total	1805	1084	556	127	40	33	39	3684

4.3 係留索に生じる応力（応力応答関数）

設計波高10mの時の周期別の係留索の応力応答関数を、2次元解析を実施して求めた。係留索の応答関数を図6に示す。

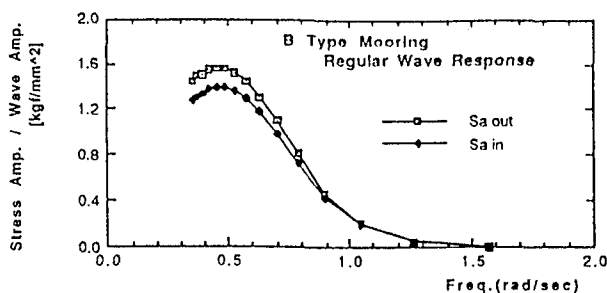


図6 係留索に生じる応力の応答関数

4.4 S-N線図

疲労強度の照査を行う上で、S-N線図は最も基本的なデータとなる。海洋構造物の設計用のS-N線図として代表的なものに、AWS、DNV等の設計線図が有り、多くの海洋構造物の疲労設計に用いられている。また、最近では、JSSCで疲労設計線図が提示されており、今後、日本における構造物の設計線図として利用されることが考えられる。

これらの設計線図は、溶接継手をその形態毎に数種類のランク分けを行ない、それぞれのランク毎の線図を提示している。一方、TLPのテンドン用鋼管の溶接部の疲労強度に関する研究、実験も行われており、これらの実験データを用いた設計線図を作成することも考えられる。

本論文では、海洋構造物の鋼管継手を対象にし、応力はホットスポット部の応力を算定したときに使用することが出来るDNVのT線図¹⁹⁾を用いた。図7にDNVのT線図を示す。設計線図としては、通常は2倍の標準偏差分下げた線(97.7%残存確率線)を用いるが、本論文では中央線(50%残存確率線)と設計線図の2種類の線について解析を行った。

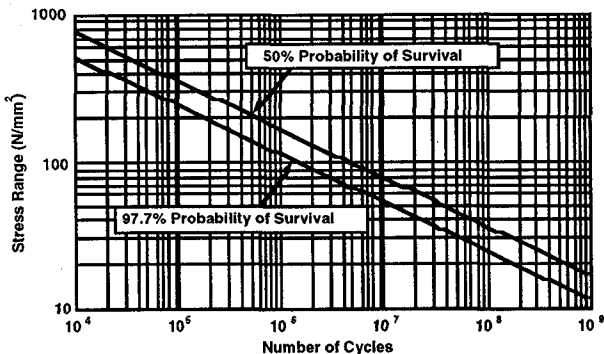


図7 DNVのT線図

4.5 累積疲労損傷度計算

前述した方法に則って応力の長期頻度分布を求め、DNVのT線図を用い、マイナー則により累積疲労被害度を計算した。以下に水中トンネル係留索の疲労強度試験解析結果を示す。

1) 応力の長期分布

軸応力振幅の長期分布の解析結果を図8に示す。図中縦軸は、係留索に生じる軸応力の変動振幅を、横軸は超過確率を示す。

応力分布の形は、応力の低い部分で凹、高い部分で凸になり、多少複雑な形状をしている。この線が直線なら

対数正規分布となる。また、単純に凹、凸のみならばワイブル分布に近い分布になるが、多少複雑な形状をしている。

疲労被害度に最も寄与するのは、比較的応力の低い繰返し回数の多い部分である。そこで、ワイブル分布にこの線をあてはめてみた。その結果を図9に示す。

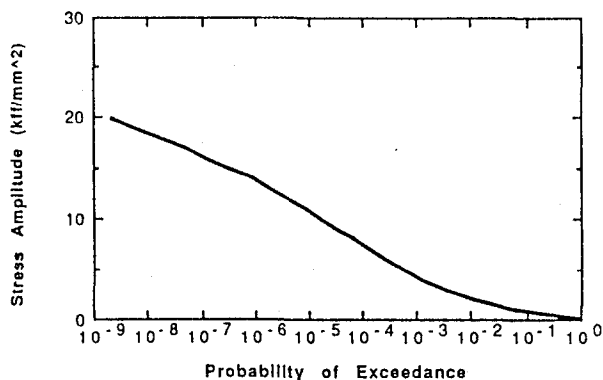


図8 係留索に生じる軸応力振幅の長期予測結果

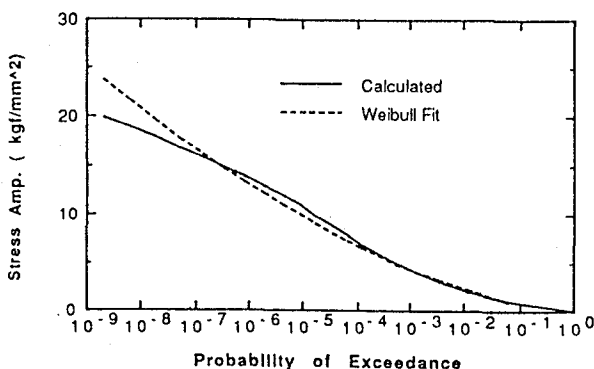


図9 解析結果とワイブル分布近似結果との比較

2) 繰返し回数

海区E03Sの海象条件をもとに平均波周期を算定すると、6.09秒となり、これから、100年間の繰返し数を算定すると、 5.178×10^8 回となる。

3) 累積疲労被害度

累積疲労被害度の結果を表4に示す。

表4 100年間の累積疲労被害度

基準S-N線図	累積疲労被害度
50%残存確率線図	0.534
97.7%残存確率線図	1.680

解析結果は、設計線図(97.7%残存確率線)を用いると、100年間で1を越える結果となっている。海洋構造物の通常の構造要素の疲労設計では、設計線図を利用して、耐用年数で1以下にすることになっている。これに較べると多少疲労強度が低いという結果になっている。ただし、全ての波方向について、横波の応力応答関数(大きい値)を想定していることから、必ずしも強度不足とは断言できない。

また、疲労に対しては十分な検査システムによる早期の亀裂発見および亀裂発生から全断面の破断までの余寿命を長くする構造システムの設計によることも可能である。今後、これらを考慮して疲労強度設計法を整理する必要があると考えられる。

5. 緊張係留方式水中トンネルの係留策部の構造

緊張係留方式水中トンネルの係留策部の疲労設計において、係留策の供用寿命に対する疲労設計寿命は、一般には寿命中の作用外力の不確実性、S-N曲線のデータのばらつきや累積被害則の調整等を考慮して決めることになる。しかし、疲労設計寿命をより短く設定するには、係留策部の点検要領、クラック検出精度、および係留策の取替え方法等を事前に確立する必要がある。また、応力の集中する係留策取付部を腐食環境の厳しい海中から隔離する事が、疲労解析の信頼性向上につながる。このような観点から、以下に緊張係留方式水中トンネルの係留策部の構造様式の提案を行う。検討対象となる水中トンネルは、疲労解析例に示した(社)水中トンネル研究調査会で設定した諸元を用いた。

トンネル本体の断面が円形の場合、水中トンネル本体から出入り可能で、ドライな空間を持つチャンバー室をトンネル外部に設け、このドライチャンバー室内に係留策とトンネル本体との連結部が格納される構造が考えられる¹²⁾。図10に構造案の概略図を示す。チャンバー内に海水が流入しないようにエアロック装置が備えられている。建設からトンネル供用中の点検作業まで、全てドライの状態での作業とするため、ウィンチ等の装置類はあらかじめ装備されている。また、係留策の取替えが発生しても作業が可能な様に計画されている。トンネル本体からの出入りのための減圧室や、ドライチャンバー内の気圧変動に対する圧力調整装置も計画されている。また、ドライチャンバーの最小規模と形状検討のため、設備の配置計画及び建設時及び係留策取替え時の作業のシミュレーションを実施し、問題の無いことを確認している。

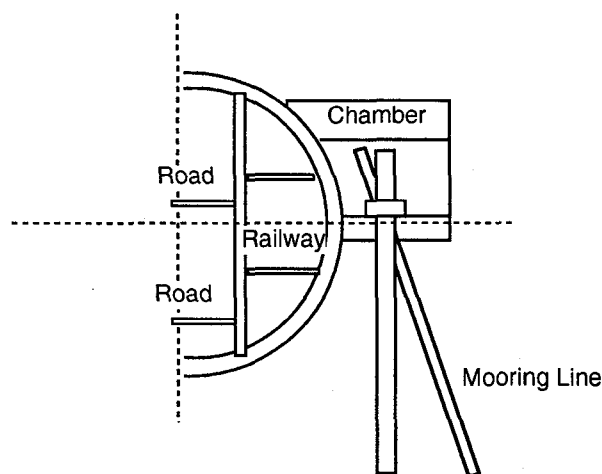


図8 チャンバー外付け案

一方、以下のような利点から、トンネル本体を楕円断面にしてチャンバー室とトンネルを一体化する構造を考案した¹²⁾。チャンバートンネル一体化の構造案の概略図を図11に示す。

- (1) トンネル断面内の有効活用が可能
- (2) 係留索とトンネル本体の干渉が少なく索の合理的な配置が可能

チャンバー案は、単に疲労設計上の利点以外に、水中トンネルの安全性、信頼性を高める上でも利点であり、水中トンネルの実現化に大きな意味を持つものと確信する。

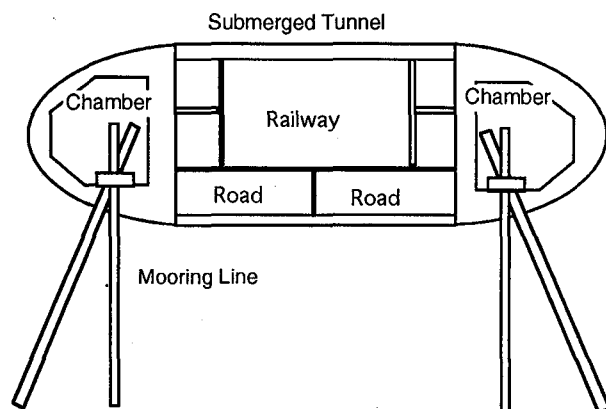


図11 チャンバー室・トンネル一体化案

6. あとがき

緊張係留策方式水中トンネルの係留索構造の疲労設計法の課題と解決のための提案を行った。その結果、幾つかの水中トンネル固有の問題がある事が明らかになった。具体的には、(1)海象条件、(2)構造特性、(3)構造応答特性、(4)強度評価法の4項目である。

この内(1)~(3)については、主に解析精度を基本にした解析上のテクニックの問題であり、本論文で提案した考え方以外の工学的判断があると思われる。しかし、本論文では、現状の設計技術レベルを基に解析法を提案し、具体的な解析例を示した。

(4)の強度評価は、水中トンネルの設計の基本にかかわる問題であり、ここで提案した考え方は、今後、水中トンネルの安全水準は如何にすべきかの議論の第一歩であると考えられる。今後の多くの議論を期待したい。この議論は、新しい構造物が認知されるための第一ステップと考える。また、この議論は具体的な構造のイメージ無くしては、論ぜられないと考えられるため、その意味でも本論文で提案した構造を議論に加えて頂きたい。

参考文献

- 1) Strait Crossings 94 : J. Krokeborg, A.A.Balkema, 1994.
- 2) Larsen, C. M. et al.; "Report of Committee V.7 Slender Marine Structures", Proc. of 11th International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC), Vol.2, 1991.
- 3) 吉田宏一郎、米家卓也、飯田国広;"有限要素法による水中線状構造の解析"、日本造船学会論文集、第144号、1978.
- 4) 鈴木英之;"水中線状構造の応答と制御"、東京大学博士論文、1986.

- 5) Webster, R.L.; "Nonlinear Static and Dynamic Response of Underwater Cable Structures using the Finite Element Method", OTC, 2322, 1975.
- 6) McNamara, J.F. et al.; "Nonlinear Analysis of Flexible Risers using Hybrid Finite Elements", OMAE 86, Vol.3, 1986.
- 7) Spanos, P.D. et al.; "Frequency-domain Analysis of Marine Risers with Time Domain Tension", Applied Ocean Research, Vol.12, No.4, 1990.
- 8) Maeda, N., et al. ; "Study on Structural Characteristics of Support Systems for Submerged Floating Tunnel", Strait Crossings 94, A.A.Balkema, 1994.
- 9) Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) ; Rationalisation of Safty and Serviceability Factors in Structural Codes, Report 63, 1977.
- 10) Nordic Committee on Building Regulations ; Recommendation for Loading and Safety Regulations for Structural Design, NKB-Report No.36, Nov. 1978.
- 11) Det Norske Veritas; "Rules for Classification of Mobile Offshore Units, Part 6 Chap. 2", 1989.
- 12) Norwegian Maritime Directorate; "Guidelines on Standard Calculation Method, Safety Factors, etc., for Anchoring Arrangements for Mobile Offshore Drilling Units", 1989
- 13) American Petroleum Institute; "Draft API Recommended Practice for Design, Analysis and Maintenance of Mooring for Floating Production Systems", 1989.
- 14) (社)水中トンネル研究調査会構造研究小委員会調査報告書 ; (社)水中トンネル研究調査会、1994.
- 15) Det Norske Veritas; "Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units, Note No.30.2,1984.

(1994年9月14日受付)