

I-57

水中浮遊式円筒構造物のスナップ荷重

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 佐藤 太裕

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆

1. はじめに

海峡を横断する水中トンネルなど、浮力を利用して緊張係留される構造物に関して発生する可能性がある現象の1つとしてスナップ荷重がある。スナップ荷重とは係留索（テンションレグ）の変動張力振幅が初期張力範囲を超える場合、係留索に弛緩（スラック）状態が生じ、その後外力の作用により次の緊張状態に入るときに生じる準衝撃的な荷重である²⁾。

本論文では、規則波を受ける係留索で支持された水中の円筒構造物の動的応答を、スラック状態を考慮に入れて解析することにより、索に作用する変動張力やスナップ荷重の特性について検討する。

2. 解析モデルと仮定

本論文で解析対象としたのは、図-1に示す断面2次元モデルであり、係留索配置については Type-1、2の2種類が現実的な配置として考えられるが、本論文では TYPE-1 を TYPE-2 の傾角0度の特殊な場合として扱った。解析に関しては、以下の条件を仮定した。

- (1) 円筒部分は剛体である。
- (2) 波は規則波で常にトンネル軸に垂直に入射する。
- (3) 係留索は、質量、付加質量、減衰力、浮力を無視し、一定の軸剛性を有するバネである。
- (4) 係留索による復元力は、変位の1次の項までを考慮し、非線形項は無視する。

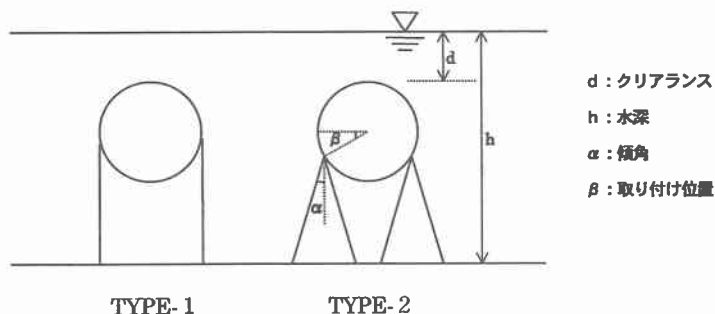


図-1 解析モデル

3. 解析方法と解析条件

3.1 スナップ荷重の時刻歴応答解析

まず外力として水中で運動する円筒構造物に作用する流体力には、静止状態の物体に作用する流体力の算定に広く用いられているモリソン式を動的問題に拡張した修正モリソン式を用いることとする。これは通常のモリソン式に構造物の運動による効果を取り込んだもので、水粒子と構造物との相対速度に置き換えて表現すると、次の式になる。

Snap Loads in Submerged Floating Cylindrical Structures

by Motohiro SATO and Takashi MIKAMI

$$f = C_M A_I (\ddot{w} - \ddot{u}) + A_I \ddot{u} + C_D A_D |\dot{w} - \dot{u}| (\dot{w} - \dot{u})$$

ここで、 C_M ：慣性係数 C_D ：抗力係数 A_I ：構造物の排水質量 A_D ：構造物の投影面積
 w ：水粒子の変位 u ：構造物の変位

上式は、相対速度に関する非線形項を含んでいるため、相対速度の一次線形で表現できるような係数を含んだ新たな抗力係数 C_{DR} で定義しなおすと、解析する全体の運動方程式は以下のように表される⁴⁾。

$$\{M - (C_M - I)A_I\}\ddot{u} + (C + C_{DR}A_D)\dot{u} + Ku = C_M A_I \ddot{w} + C_{DR} A_D \dot{w}$$

ここで、 M ：構造物の質量マトリックス C ：構造物の減衰マトリックス

K ：係留索の剛性マトリックス

解析に先立って設定しなければならない各係数値は、それぞれ以下の値を用いる⁴⁾。

$$C_M = 2.0 \quad C_{DR} = 1.0 \quad C = 6\%$$

係留索のスラック状態を含んだ時刻歴応答は、まず最初の静平衡状態を初期状態とし、各索の張力変動を時間刻みごとに追跡し、スラック状態になる索の張力は0として次の時刻からは引張り状態にある索の剛性のみを考慮した運動方程式を解く。索に引張り力が戻ればまた剛性を考慮する。このように変動張力によるスラック状態への移行及びスラック状態からの回復を判定しながら、状態に応じて変化していく線形の運動方程式を時間接続していくことにより行うこととした。

なお解析には Newmark- β 法 ($\beta=0.25$, $\Delta t=0.01\text{sec}$) を用いた。

3. 2 解析条件

以下特に断りのない部分については次の構造条件と波浪条件で解析を行った。

(構造条件)

レグのヤング係数: 2.06×10^{11} (N/m²)

構造物本体の半径: 23(m)

断面積: 0.09(m²)

比重: 0.7

(波浪条件)

波長: 259(m)

周期: 13.0(sec)

4. 解析結果と考察

(1) スラック状態に至る限界波高について

まず図-2は傾角の変化による水平方向の固有周期を示したものである。水深やクリアランスによって差はあるものの、ともに傾角をある程度つけることにより波が卓越したエネルギーをもつ周期帯(およそ8~20秒)に固有周期が入ることになる。

図-3は波周期 13 秒の外力を与えたときの傾角の変化による限界波高を示したものである。それぞれの場合について共振による限界波高の低下が明らかに見られる。この図からもわかるように水深に応じた適切な傾角の選択が必要である。またクリアランスをとることによりスラックを回避する傾角の幅が広がることも読みとることができる。

(2) 傾角と波高による影響

次に実際に傾角と波高が変動張力に及ぼす影響を時刻歴応答解析の結果により考察する(水深100m、クリアランス30m)。

図-4は傾角15度で波高を変化させた結果である。波高が高くなるにつれスラック状態になってはいるが、変動張力が大きく発達

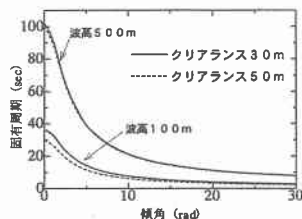


図-2 固有周期

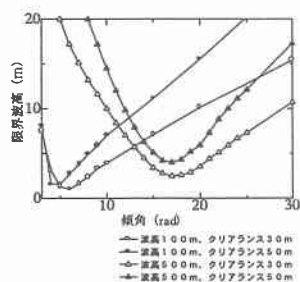
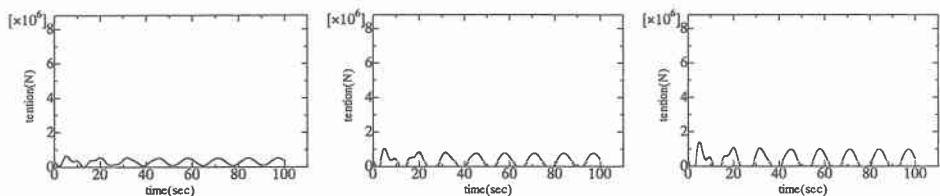


図-3 限界波高曲線

してはいない。一方、図-5は波周期に近い固有周期をもつ傾角5度における変動張力だが、波高の増大に伴い典型的なスナップ荷重が発生し、波高に対する非線形性が強くなる。

図-6は傾角0度でTYPE-1と見ることができるレグの配置だが、この状態では大波高に対してもスラック状態にはならずスナップ荷重を回避できる構造形式であることが確認できる。

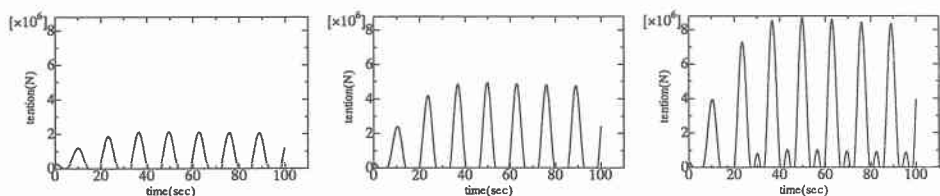


(a) 波高 5.0m

(b) 波高 10.0m

(c) 波高 15.0m

図-4 波高の違いによる変動張力の変化 (TYPE-2、傾角15度)

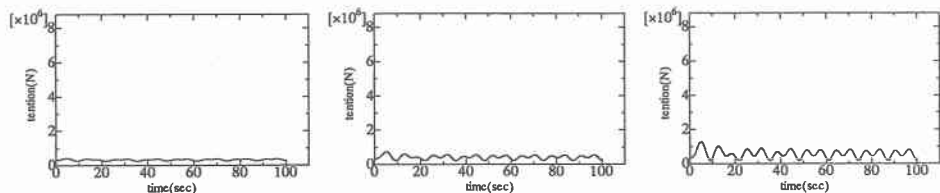


(a) 波高 5.0m

(b) 波高 10.0m

(c) 波高 15.0m

図-5 波高の違いによる変動張力の変化 (TYPE-2、傾角5度)



(a) 波高 5.0m

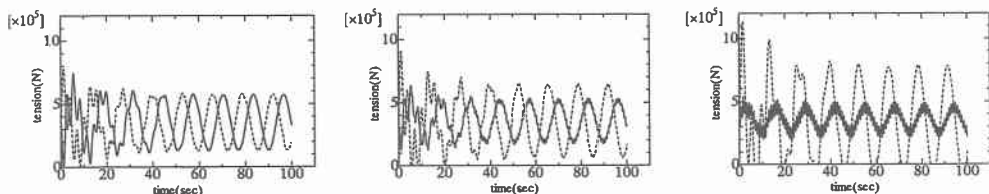
(b) 波高 10.0m

(c) 波高 15.0m

図-6 波高の違いによる変動張力の変化 (TYPE-2、傾角0度)

(3) 取り付け位置による影響

波高10m、傾角30度の時の取り付け位置の違いによる変動張力の比較を図-7に示す。0度以外の場合は回転が発生するので、取り付け位置をしたにするほど内側と外側のレグで変動張力振幅が変わり、内側のレグがよりスラック状態に至りやすくなることがわかる。



(a) 取り付け位置0度

(b) 取り付け位置30度

(c) 取り付け位置60度

図-7 取り付け位置の違いによる変動張力の変化

(TYPE-2、実線：外側のレグ、破線：内側のレグ)

(5) 半径による影響

波高 7 m、傾角 15 度で、半径のみを変えた場合の比較を図-8 に示す。変動張力振幅は大きく変わるものの、傾角など他の構造条件が同じ場合、半径はスラック状態に移行する限界波高に対してはほとんど影響を与えないことがわかる。

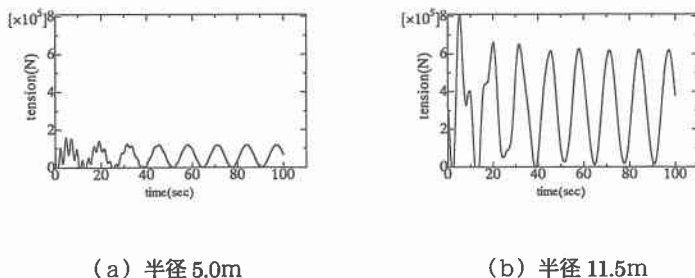


図-8 半径の違いによる変動張力の変化 (TYPE-2)

4. まとめ

水中浮遊式構造物の変動張力振幅に影響を与えられると考えられるパラメータはいろいろなものがあるが、本論文では傾角と波高の関係を中心に解析した。これらをまとめると以下の通りである。

(1) 水深やクリアランスの違いによる傾角を変化させた場合のスラック状態に関する限界波高曲線を求めた。同じ傾角でも水深の違いによりその構造物の特性は大きく異なるため、傾角の水深やクリアランスに応じた適切な選択がスラック状態の回避、スナップ荷重発生の回避に不可欠である。またクリアランスの増加はスラック状態回避という面で有効であることがいえる。

(2) 波高の増大や共振現象の発生により係留索の張力が 0 (スラック状態) になり、条件によっては発生が予想されるスナップ荷重を伴う応答を各状態の線形の運動方程式を時間接続していくことにより求めた。

今後の課題としては、係留索の張力や流体力の非線形性により発生する可能性が考えられる倍数調波共振や分数調波共振についての検討が必要であると思われる。

【参考文献】

- 1) 榎木亨：波と漂砂と構造物、技報堂出版、1991.5.
- 2) 吉田宏一郎、米家卓也、岡徳昭：緊張係留プラットフォームのスナップ荷重、日本造船学会論文集 第144号、pp.205-213、昭和53年11月
- 3) 吉田宏一郎、米家卓也、岡徳昭：緊張係留プラットフォームの動的応答特性、日本造船学会論文集 第146号、pp.195-205、昭和54年11月
- 4) 蟹江俊仁：水中浮遊式トンネルの解析手法と動揺特性に関する研究、学位論文、1997年2月
- 5) 社団法人 水中トンネル研究調査会：水中トンネル 第Ⅰ編 計画から設計施工まで、平成7年5月
- 6) 社団法人 水中トンネル研究調査会：水中トンネル 第Ⅱ編 ケーススタディー、平成7年5月