

高波浪下における水中トンネルの動揺および流体力特性

国 栖 広 志* ・ 水 野 晋** ・ 水 野 雄 三***
山 下 俊 彦**** ・ 佐 伯 浩*****

1. は じ め に

近年、大水深域の海峡横断のための構造物として、水中に緊張係留された大断面の浮体式円筒構造物（水中トンネル）が提案されている（芳村ら、1992；Hakkaart ら、1990）。

従来、水中に没水した海底パイプラインのような小型円筒構造物の研究は広範囲な検討がなされ、抗力係数や慣性力係数が Re 数や $K.C$ 数によって整理できることを報告している（Sarpkaya, 1992）。また、底面付近に設置された球体に作用する波力はモリソン式で算定可能であることが示された（岩田ら、1989）。一方、大断面でしかも海中に係留された構造物の研究は、海峡横断構造物を目的として実験および解析的な検討がなされている（Hakkaart ら、1990；Dahle ら、1990；Tveit, 1990）。

しかし、本研究のように、外洋に面した大水深域で、しかも高波浪下での水中トンネルの動揺特性および係留索の張力特性について検討した例は少ない（国栖ら、1992；蟹江ら、1992）。そこで、本研究では 2 次元造波水路を用いた水理実験を行い、高波浪下における水中トンネルの作用波力、動揺、および係留索張力等の基本的特性について検討を行った。

2. 実 験 内 容

実験縮尺は、水中トンネルの寸法および実験施設の規模を考慮して 1/62.16 とした。実験における自然条件は表-1 に示すように水深を 100 m、設計波高として有義波高 9.2 m、有義波周期 13.0 s を設定した。また、構造条件としては表-2 に示すように、トンネル天端水深を -30 m とし、直径 23 m の大断面トンネルを設定した。

水理実験は、大型造波水路（ $L85\text{ m} \times B1.6\text{ m} \times H3.0\text{ m}$ ）を用いて実施した。造波機はピストン型不規則波発生装置（最大波高 50 cm、周期 0.5～7.0 s）である。実験水路の一部には、既設の海底勾配（1/8.5、1/100）上に 1/

10 勾配とそれに続く水平床を設置した複合勾配を用いて行った。水理実験は、図-1 に示す計測機器を用いて、以下に示す項目について測定した。

①水位：トンネル模型上（W1, W2）と沖側の一様水深部（W3, W4）に各 2 本の波高計。②加速度：トンネル模型の中心部に 3 成分（X, Y, Z 軸）の加速時計。③波圧：トンネル模型外周部に 45 度の間隔で 8 個の波圧計（P1～P8）。④トンネル変位：水中トンネル本体に超音波式変位計（精度 0.2 mm）。⑤張力：張力計を水中トンネルの固定部側の全係留索に設置。

水中トンネルの係留タイプは図-2 に示すような A, B, C', C'' および D の 5 タイプとした。波浪は規則波および不規則波を用いた。不規則波は、修正プレットシュナイダー・光型型の周波数スペクトルを採用し、各 200 波を目標として作用させた。実験は表-3 に示すように、係留タイプ、口径、比重および波高を変化させて行った。

表-1 自然条件

	現地条件
水深： h	100 m
構造物天端水深： Z	30 m
設計周期： $T_{1/3}$	13.0 s
設計波高： H_{max}	18.6 m

表-2 構造物諸元

	現地条件
直 径	23.0 m
内 径	21.0 m
重 量	26,842 t/93.2 m
浮 力	39,890 t/93.2 m
比 重	0.75
比重（自重）	0.70
パネ定数	37,000 t/m

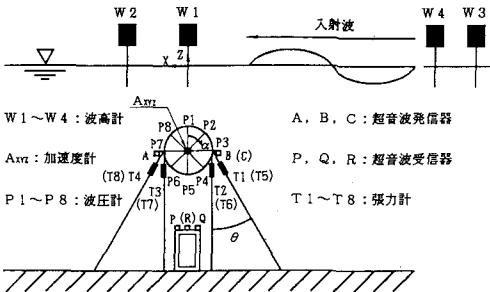


図-1 計測機器設置状況

* 正会員 五洋建設(株)技術研究所第一研究開発室課長
** 正会員 工 修 西松建設(株)技術研究所海洋技術課
*** 正会員 工 博 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室室長
**** 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

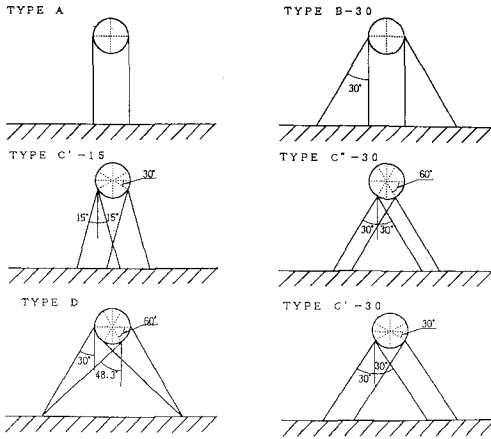


図-2 水中トンネルの係留タイプ

表-3 実験ケース

係留タイプ	トンネル比重	トンネル径 (m)	周期 (s)	波高 (m)
A	0.76, 0.71	23.0	9.0, 11.0, 13.0, 15.0	6.2, 9.3, 12.4, 15.5, 18.6
B 15°	0.71	〃	〃	6.2
B-30°	0.76	〃	9.0, 11.0	〃
	0.71	11.4, 23.0	9.0, 11.0, 13.0, 15.0	6.2, 9.3
	0.51	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4
C-15°	0.71	23.0	〃	6.2
C-30°	0.76, 0.71	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4
	0.66	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4, 15.5
	0.61, 0.56	〃	〃	6.2, 9.3, 12.4, 15.5, 18.6
	0.51	11.4, 23.0	〃	〃
D	0.71	23.0	13.0, 15.0	6.2, 8.3, 10.3, 12.4, 15.5, 18.6, 20.5

3. 実験結果

(1) 固有周期および減衰定数

模型実験での固有周期 (T_d) および減衰定数 (ξ) は、トンネル模型に対して強制的に微小変位を与え、復元時の自由振動波形を加速度計により検出し、5波の平均より算出した。

Aタイプの固有周期は29~46sとなり5タイプの中で最も長い。一方、B、C、C'、Dタイプの固有周期は1.6~4.7sとなり波の周期より短い。これは式(1)を用いた計算値とほぼ一致することが分かった。

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{C_m M}{K}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 T_n :固有周期、 C_m :付加質量係数(2.0)、 M :

トンネル質量、 K :係留索バネ定数である。

Aタイプの減衰定数は0.025~0.070となった。これに対し、Aタイプ以外の減衰定数は0.01~0.04の範囲にあり、平均すると約0.025である。

(2) 規則波実験

規則波実験で計測した波力を用い、式(2)に示すモリソン式の抗力係数(C_d)と慣性力係数(C_m)を最小2乗法を適用して求めた。

$$F/l = (1/2)C_d \rho u |u| + (\pi/4)C_m \rho D^2 (du/dt) \dots (2)$$

ここに、 F :水中トンネルに作用する全波力、 l :水中トンネルの長さ、 ρ :水の密度、 D :水中トンネルの直径、 u :波の水平水粒子速度、 du/dt :波の水粒子加速度、 C_d :抗力係数、 C_m :慣性力係数である。

水平成分に対する抗力係数(C_{dx})と慣性力係数(C_{mx})を図-3 a), b)に示す。抗力係数の値は0~1の範囲内にあるもののばらつきが大きい。一方、慣性力係数は1.2~2.1の範囲で比較的真ままっている。

K.C.数2~4の範囲では、抗力係数は0.2程度、慣性力係数は1.9~2.1程度と報告されている(Sarpkaya, 1992)。これを実験結果と比較すると慣性力係数は比較的良好一致を示すのに対し、抗力係数は実験値の下限値を示している。本実験のようにK.C.数が3程度の小さい領域での波力は、慣性力が支配的であり、抗力は全波力の10~20%程度と小さい。このため、波力の測定値から算出した抗力係数は、計測時の外乱等の影響をうけるため、ばらつきが生じたものと考えられる。

次に、トンネルに作用する波力の結果を図-4に示す。波力は $f = F_{max}/w_0 \cdot (H/2)$ (F_{max} :最大波力、 H :入射波高、 w_0 :水の単位体積重量)を用いて整理した。図には、実験値と境界要素法(Birdら, 1982)およびモリソン式で $C_d=1.0$ 、 $C_m=2.0$ を適用した計算結果を示した。波力の計算値は実験値と良好一致を示しており、いずれの計算手法を用いてもトンネルに作用する波力を、精度よく評価することが出来る。

トンネルに作用する波力と波高との関係を図-5に示す。図は、周期 $T=13.0$ sと15.0sの実験値と計算値を示している。波力は、波高の増加に対して線形関係にあることが分かったとともに、式(2)のモリソン式による

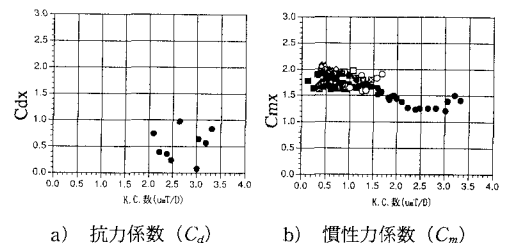


図-3 モリソン式の流体力係数

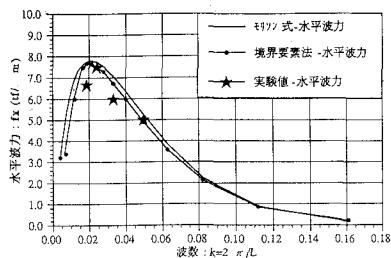
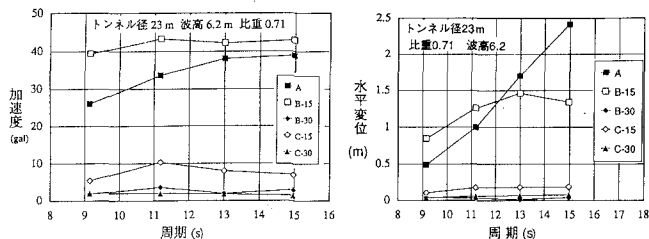


図-4 水平トンネル作用波力(水平方向)



a) 加速度

b) 変位

図-6 水平方向加速度および変位と周期の関係

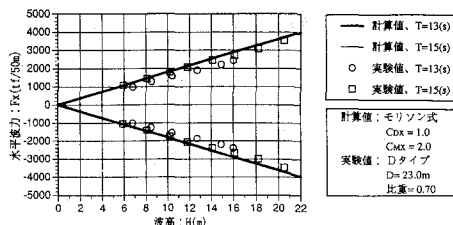


図-5 波高と水平波力の関係(Dタイプ, 比重0.70)

波力の計算値が実験値と一致することが確認された。

つぎに、トンネル動揺時の加速度および変位の特性について述べる。図-6 a), b) は、波高 6.2 m, トンネル比重 0.71 のときの、周期とトンネルの水平加速度および変位の関係である。図から、A タイプや B タイプの加速度および変位は、波の周期の増加とともに大きくなり、波に対して動揺しやすい構造形式であることが分かる。一方、C タイプの変位量は 1 m 以下であり、動揺の少ない安定した構造形式である。ただし、C タイプのように、横方向の変位を拘束する係留タイプは、図-7 の波高と張力の関係に示すように、ある波高レベル以上の波が作用すると、係留索には急激な張力の増加がみられ不安定となる。緊張係留浮体において、係留索の張力は、波高が小さいときはほぼ正弦波的な変動を示すが、波高が大きくなるに従って鋭く尖ったノコギリ型の波形を示すとともに、最小張力がゼロとなって係留索は弛緩(スラック)状態となる(吉田ら, 1978)。その直後、トンネルの浮力による急激な復原力が上向きに働き、係留索は瞬時に緊張されてスナック荷重が発生する。一方、係留索に作用する張力の状態は、実験から以下に示す A~D の 4 つのレベルに分類できる。

A レベル：張力波形記録から準衝撃(スナック)荷重が認められる。

B レベル：係留索が弛緩(スラック)状態であり、張力波形にやや乱れが観測される。

C レベル：目視観察から係留索のスラック状態は認められるが、張力波形には乱れはない。

D レベル：目視観察および張力波形ともに係留索のスラ

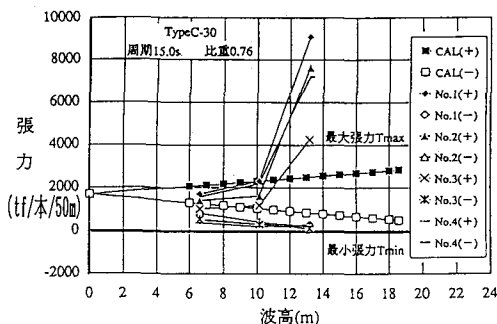


図-7 波高と張力の関係

(C-30 タイプ, 周期 15.0 s, 比重 0.76)

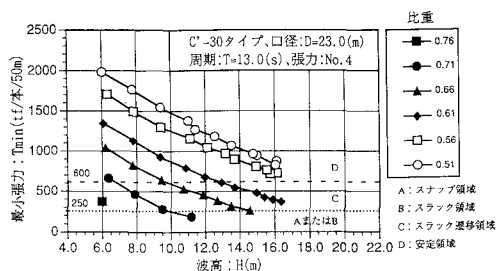


図-8 トンネル比重と最小張力の関係

(C-30 タイプ, 周期 13.0 s, 張力 No. 4)

ック状態は認められない。

ここで、波高と最小張力の関係について、トンネル比重をパラメーターに整理したのが図-8 である。図は周期 $T=13.0$ s の結果で、トンネル比重を 0.51 から 0.76 まで変化させている。係留索の最小張力は波高の増加とともに減少することが分かる。また、最小張力が小さくなるに従い、係留状態が D レベルから C レベル、A レベルまたは B レベルと移行している。また、図には示されていないが、D タイプは最小張力が減少してゼロに近い値となってもスラック状態になりにくい構造であった。

(3) 不規則波実験

実験に用いた不規則波は、ひずみ度が 0.03~0.25, 尖

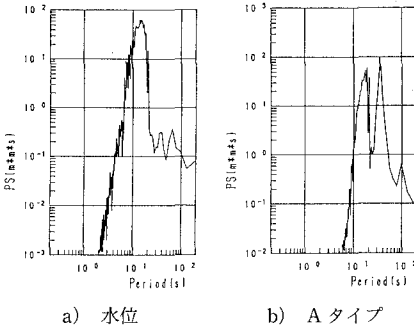


図-9 水位および水平変位スペクトル ($T_{1/3}=13.0$, 比重 0.70)

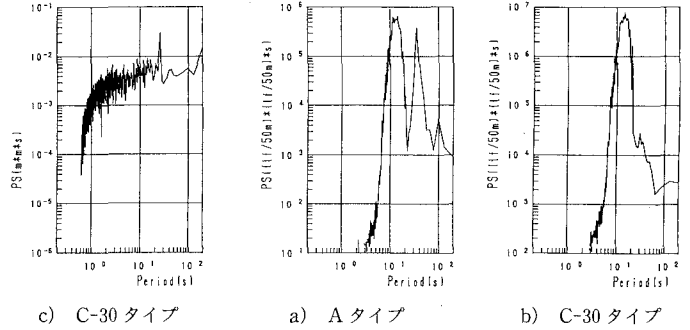


図-11 波力スペクトル (周期 13.0 s, 比重 0.70)

鋭度が 2.59~3.31 の範囲内にあり、非線形性の小さい波浪である。

不規則波の実験は、A タイプと C-30 について、トンネル口径 23.0 m, 比重 0.70 で有義波周期が 13.0 s の条件で行った。実験から、A タイプのトンネル変位の波形は、規則波実験とは異なり、波の周期より長い周期で変動することが確認された。そこで、図-9 に示すように、トンネル直上の水位波形と両係留タイプの水平変位に対するスペクトル解析を行った。図から、A タイプでは 2 つのピークが存在することがわかる。これは、波のピーク周期 ($T_{1/3}=13$ s) とトンネルの固有周期 ($T_d=36$ s) に対応している。すなわち、A タイプのトンネル変位は上記 2 つの周期が連成した挙動を示している。一方、C-30 タイプの水平変位スペクトルは、有義波周期 ($T_{1/3}=13.2$ s) および固有周期 ($T_d=1.73$ s) 近傍のエネルギーの卓越は認められない。なお、25 s 付近のピークが存在するが、これは波の周期の約 2 倍に対応しており、係留系の非線形な分数調波振動などが原因として考えられる。

つぎに、波別解析法と同様の手法を用いて解析した変位の統計量(最大変位, 1/10 最大変位, 1/3 最大変位)と有義波高の関係を図-10 a), b) に示す。A タイプのトンネル変位は、有義波高の増加に伴い、規則波と同様、線形的に増加する。ただし、この係留タイプの水平変位は比較的大きく、回転と連成した挙動を示す。このため、トンネル軸回りの回転は有義波高の増加に伴い、大きく

なる傾向を示す。特に、波浪条件が $T_{1/3}=15.0$ s, $H_{1/3}=10.3$ m の時のトンネル軸回転は 2.24° に達しており、この回転量は口径 23.0 m のトンネル外周の位置で 0.45 m に相当する大きな変位量である。一方、C-30 タイプの変位は、有義波高の増加に関係なくほぼ一定である。ただし、ある波高以上になると係留索はスラック状態となり、変位量が急激に増大する。このため、係留索にはスナッチ荷重が発生して、トンネルは不安定となる。

つぎに、水平方向の波力について示したのが図-11 である。A タイプに作用する波力は、トンネルの変位スペクトルと同様、2 山のピークが存在する。固有周期 ($T_d=36$ s) の近傍で波力が増大するのは、トンネル動揺によるラディエーション波力と考えられる。このことから、A タイプの波力はトンネルの動揺との連成を考慮して算定する必要があるものと思われる。一方、C-30 タイプの波力は、波と同じ周期でピークを示し、水中に固定された構造物として、波力を求めることができるものと考えられる。ここで、C-30 タイプを対象としてトンネル直上における水位波形と水平波力の伝達関数、位相、コヒーレンスについて解析した一例を図-12 に示す。図から伝達関数の値は約 300 で一定値を示す。また、波高を変化させた場合の伝達関数もほぼ同じ値となり、水位と波力は線形の関係にあることが分かった。また、水位に対する位相差は水平方向波力で約 90°, 加速度で約 0°, 張力で約 100° であった。

C-30 タイプは波浪に対して変位も小さく比較的安定した構造形式である。ただし、規則波実験と同様、不規則波実験においても図-13 に示すように、最高波高がトンネル直上を通過したとき、スナッチ荷重が発生した。このときの波浪条件は有義波高 $H_{1/3}=10.0$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=15.0$ s である。スナッチ荷重が発生した前後の 40 秒間のデータを抽出したのが図-14 である。図から、係留索の張力はトンネル直上の水位が最高のときゼロとなり、この時点でスラックの状態となる。この状態が約 4 秒続き、水位が最低に達した時、トンネルの浮力によ

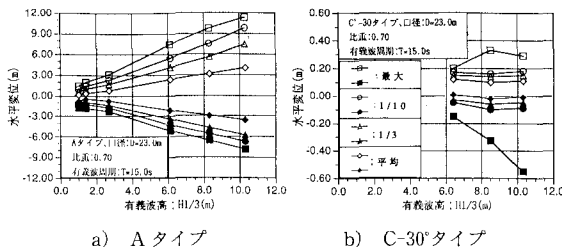


図-10 波高と水平変位の関係
(周期 15.0 s, 比重 0.70)

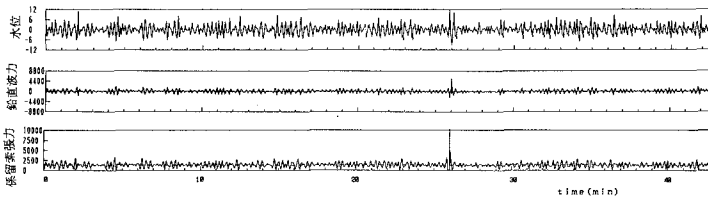


図-13 スナップ不規則波形 (水位, 鉛直波力, 係留索張力)

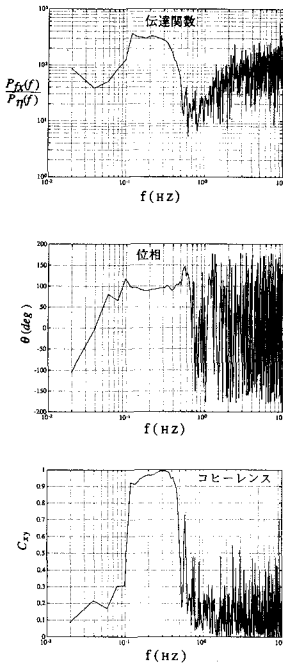


図-12 水位と水平波力の伝達関数, 位相, コヒーレンス

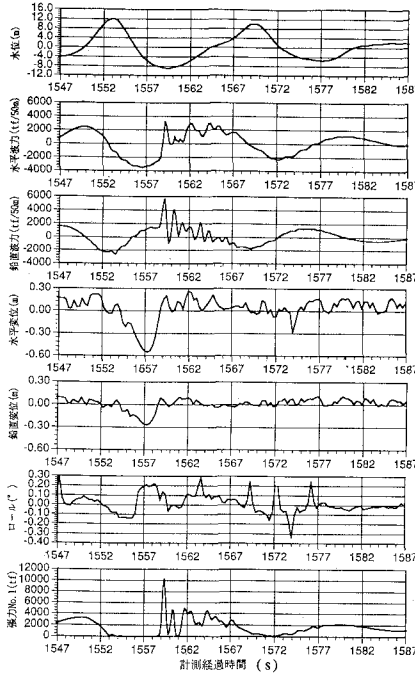


図-14 スナップ荷重発生時波形

る復元力が上向きに働くため, 係留索にスナップ荷重が発生することが分かる。

4. おわりに

規則波実験から, 水中トンネルに作用する波力は, モリソン式または境界要素法による算定法で, 精度よく求めることができることを示した。

また, 係留タイプではAタイプは, 波浪に対してトンネルの加速度や変位も大きく, 動揺の制御が今後の課題である。これに対して, Cタイプはトンネル加速度や変位も小さく, 波浪に対して比較的安定した構造形式といえる。ただし, このタイプは水平方向の変位を強制的に拘束することから, ある波高レベル以上になると, 係留索がスラック状態になり, 水中トンネルは不安定な挙動を示した。

ここでは簡単に述べるに止めたが, Dタイプは設計波高以上の波を作用してもスラック状態にならず, 比較的安定した構造形式であった。

本研究は(社)水中トンネル研究調査会事務局および会員各位の御指導のもとに実施した。ここに, 謝意を述べると共に流体力小委員会参加各社を以下に紹介する。五洋建設, 西松建設(以上幹事会社), 熊谷組, 日本国土開発, 間組, 北海道電力(以上会員, 五十音順)。

参考文献

- 岩田好一郎・水谷法美・川角伸彦 (1989): 没水球体に作用する鉛直方向波力に及ぼす Boundary Proximity の効果, 土木学会論文集, 第 417 号, pp. 219-228.
- 蟹江俊仁・堀越研一・尾高義夫・三上 隆・角田興史雄 (1982): 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, Vol. 8, pp. 481-486.
- 国栖広志・藤井利侑・水野雄三・佐伯 浩 (1992): 波浪作用下の水中トンネルの挙動に関する実験的研究, 第 17 回海洋開発シンポジウム, 土木学会.
- 水中トンネル研究調査会構造研究分科会編 試設計(その 1) (1992): 予備検討結果報告書.
- 水中トンネル研究調査会流体力研究分科会編 (1992): 平成 3 年度予備実験報告書. (社) 水中トンネル研究調査会編 (1992): 水中トンネルシンポジウム資料.
- 吉田宏一郎他 (1978): 緊張係留ブラットホームのスナップ荷重, 日本造船学会論文集, 第 144 号, pp. 205-213.
- 芳村 仁・高橋喜一・三上 隆 (1992): 水中トンネルの現状と課題, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 475-480.
- Ch. J. A. Hakkaart, A. Lancellotti, H. Ostlid, R. Marazza and K. A. H. Ostlid (1990): Development of the Norwegian submerged tube bridges, STRAIT CROSSING.
- Nyhus (1992): SUBMERGED FLOATING TUNNELS, I. T. A. H. William Kidman Bird & Robin Shepherd (1982): Wave Interaction with Large Submerged Structures, ASCE, WW2, pp. 146-162.
- L. A. Dahle, K. Reed & J. V. Aarsnes (1990): Model tests with submerged floating tube bridges, STRAIT CROSSING.
- Per Tveit (1990): Considerations for design of downward non-anchored submerged tube, STRAIT CROSSING.
- Sarpkaya (1992): WAVE FORCES ON CYLINDRICAL PILRES, THE SEA (Ocean Engineering Science), Vol. 9, Part A.