

水中浮遊式トンネルの地震動揺特性について

Dynamic Response of Submerged Floating Tunnels under Earthquake

蟹江 俊仁*・葦澤 憲吉**・三上 隆**・角田 與史雄**

Shunji Kanie, Noriyoshi Nirasawa, Takashi Mikami and Yoshio Kakuta

Although actual submerged floating tunnels have not yet been constructed, they are seen as one of the most promising structures for strait crossings. The authors proposed a suitable model for a super-long submerged floating tunnel using the modified Morison's equation even if the phase delay by propagation of earthquake wave should be taken into consideration. As a result of this study, a super-long tunnel of 2 km in length were analyzed, and the fundamental characteristics of the response due to earthquakes were obtained.

Key Words : Submerged Floating Tunnel, Dynamic Response, Earthquake, Tension Leg, Morison's equation

1. 序 論

水中浮遊式トンネルは、浮力を有するチューブ形状の構造体を、テンションレグ等の係留索により海中に引き込み、安定化させた新規渡海構造物である。これまで、ノルウェーのフィヨルド横断やメッシナ・ジブラルタル両海峡の横断計画などで適用提案がなされてきたが、未だ実現には至っていない。筆者らは、これまでに波浪に対する動揺特性の研究¹を行ってきたが、本研究はわが国沿岸域での適用を念頭に、地震時の動揺特性について検討を加えたものである。

地震作用を受ける水中トンネルは、長大な線状構造物であるため、地震の伝播に伴う位相差の影響評価が重要となる。伝播位相差を考慮した動揺解析としては、長大橋梁を対象にした研究があるが、橋梁の場合は橋脚部あるいは主塔部など地震波の入力点が比較的限られているのに対し、水中トンネルの場合はトンネル軸方向に沿って多数存在する入力点（テンションレグ取付点）から地震波が入力されることになる。本研究では、水中トンネルを剛体一バネモデルにモデル化し、地震波を順次入力して時系列的に解析を行うことで地震位相差の影響を評価した。周辺流体から受ける流体力の影響は、モリソン式により評価している。この方法は、長大線状構造物である水中浮遊式トンネルを解析するために実用的な方法であり、波浪作用時、地震作用時ともに適用できる長所がある。

2. 水中浮遊式トンネルの構造概要

水中浮遊式トンネルの構造概念図は、図-1に示す通りである。トンネル上部のクリアランスは、航行船舶の吃水など利用条件によって任意に設定が可能であり、海面上に浮いている場合には浮橋となる。また、トンネル下部と海底面とのクリアランスもある程度必要であり、あまり小さい場合には、着底構造あるいは支持架台などによる支持構造の方が経済的に有利となる。本論文では、トンネルチューブが完全に没水していること、また、トンネル下部のクリアランスが少なくともトンネル径の2倍程度はあることを前提に検討を行っている。

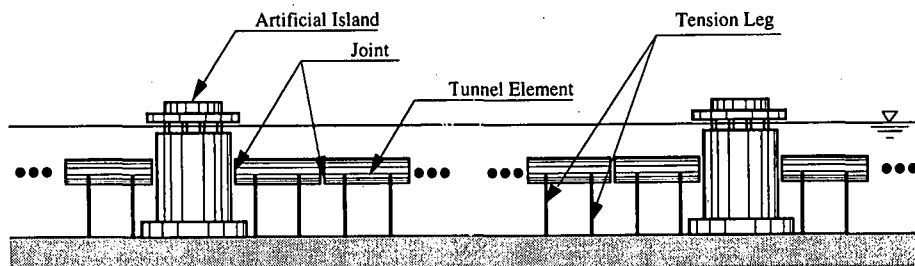


図-1. 水中トンネル側面図

* 正会員 大成建設株式会社エンジニアリング本部エネルギー部 (163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

** 正会員 北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

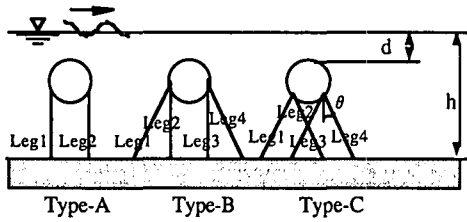


図-2 係留索配置

水中浮遊式トンネルの係留方法ならびに係留索配置はすべての動揺特性に関連する極めて重要な基本条件である。ここでは、テンションレグ方式を採用するものとし、そのトンネル軸直角方向断面内配置については、図-2に示す代表的係留索配置の中から、大きく動揺特性の異なるAとCのタイプを主に取り上げた。トンネル軸方向については、各々の係留索配置が、一定の間隔で繰り返されるものとする。

3. 運動方程式

水中浮遊式トンネルに作用する流体力は、動的問題に拡張した修正モリソン式により評価される。この場合の流体力は、水粒子と構造物との相対速度を用いて、以下のように表現される²⁾。

$$f = C_M A_I (\dot{w} - \dot{u}) + A_I \ddot{u} + C_D A_D |\dot{w} - \dot{u}| (\dot{w} - \dot{u}) \quad (1)$$

ここに、

A_I : 構造物の排水質量	A_D : 構造物の投影面積
C_M : 慣性係数	C_A : 付加質量係数
C_D : 抗力係数	$C_{D'}$: 静水中で構造物が振動する時の抗力係数
w : 水粒子の変位	u : 構造物の変位

水中浮遊式トンネルの運動を解析するため、上式(1)を一般的な運動方程式に当てはめて、マトリックス表現する。静水圧は、水面上に浮いている構造物の場合、運動によって時間的に変化する要素だが、水中浮遊式トンネルの場合は構造物が完全没水しているため一定値となり、運動方程式上省略可能である。したがって、

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = C_M A_I (\dot{w} - \dot{u}) + A_I \ddot{u} + C_D A_D |\dot{w} - \dot{u}| (\dot{w} - \dot{u}) \quad (2)$$

ここに、

M : 構造物の質量マトリックス	C : 構造物の構造減衰マトリックス
K : 復元力マトリックス	f : 流体力ベクトル (式(1)に基づく)

上式の相対速度に関する非線形項については等価線形化法の考え方を導入し、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} で定義し直すこととする。この C_{DR} については、後述するように実験的に求めることとする。従って、

$$\{M + (C_M - 1)A_I\}\ddot{u} + (C + C_{DR}A_D)\dot{u} + Ku = C_M A_I \dot{w} + C_{DR} A_D \dot{w} \quad (3)$$

地震の位相差を評価する場合は、各地震入力点毎の運動とそれに伴う流体の運動を関連づける必要がある。ここでは、地盤の水平方向の運動に対しては、流体のせん断抵抗が無視しうることから、流体は運動しないものとし、地盤の鉛直方向の運動に対しては、流体を非圧縮性として、地盤と同じ運動を流体もするものと仮定した。

4. 解析条件と構造特性

4.1 解析条件

トンネルの比重は0.7、断面諸元は表-1に示す通りである。また、コンクリート及びテンションレグの材料特性は表-2に示した。また、解析に先だって設定しなければならない係数として、付加質量係数 C_M 、構造減衰係数 C および等価線形化の概念により導入した減衰係数 C_{DR} がある。設定に当たっては、Mizuno ら³⁾による二次元の波浪動揺実験結果を用いることとした。諸係数値は以下の通りである。

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

表-1 断面諸元

Item	Unit	Specification
Weight	N/m	2.82*10 ⁶
Buoyancy	N/m	4.19*10 ⁶
Sectional Area of concrete	m ²	115.0
Moment of Inertia of Section	m ⁴	5000
Sectional Area of Leg	m ²	
Type A		0.12
Type B		0.12
Type C		0.09

表-2 材料条件

Material	Unit	Concrete	Tension Leg
Unit Weight	N/m ³	2.45*10 ⁴	7.69*10 ⁴
Strength	N/m ²	2.94*10 ⁷	5.49*10 ⁸ (fy)
Modulus of Elasticity	N/m ²	2.74*10 ¹⁰	2.06*10 ¹¹

4.2 解析モデル

解析にあたり、その全体座標系を図-3のように規定し、以下のような条件を設定した。

- ①トンネル全長は2000 mとし、軸方向に断面径の約4倍 (=100 m) の長さを有する剛体 (エレメント) 20 函の連続体と仮定する。
- ②係留索のトンネル軸方向間隔は、1エレメント長に等しい100 mとした。
- ③各エレメントの自由度は、エレメント重心まわりの回転慣性モーメントも含めて6自由度とする。
- ④エレメント間には、トンネルの剛性に等価な線形バネを配置する。

なお、エレメント間に設けられた線形バネ (Equivalent Spring to Tunnel-Element Rigidity) は、各エレメントの軸方向剛性、曲げモーメント剛性、せん断剛性に等価でなければならない。これらのバネ値は、表-3のように設定した。

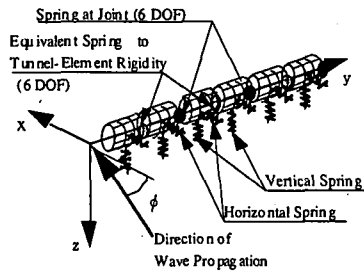


図-3 全体座標系

表-3 エレメント間の線形バネ

Direction of Spring	Spring Coeff.	Unit	Equation
Shear along x and z	1.01 * 10 ⁷	N/m	=GA/kL, k=1.5
Rotation in x-y and y-z plane	1.30 * 10 ⁹	Nm/rad	=EI/L
Longitude along y	3.57 * 10 ⁷	N/m	=EA/L

4.3 固有値解析

トンネルの15次モードまでの固有振動数および周期は表-4および表-5に示す通りである。

AタイプとCタイプを比較した場合、鉛直方向の固有周期については大きな違いがないものの、水平方向の固有周期は、Aタイプの1次モードで30秒を超える程長いものに対して、Cタイプの場合は1次モードでも2.85秒と鉛直方向のそれに近い。しかし、9~10次以上の高次モードでは、共に2秒以下となっている。また、Aタイプの水平方向を除いて、低次モードでの固有周期が近いことも水中浮遊式トンネルの特徴である。

表-4 Aタイプの固有振動数と周期

Mode	Horizontal (x-y Plane)		Vertical (y-z Plane)	
	Freq.(Hz)	Period(sec)	Freq.(Hz)	Period(sec)
1	0.031	32.482	0.533	1.877
2	0.042	24.088	0.533	1.877
3	0.066	15.260	0.534	1.872
4	0.102	9.805	0.538	1.858
5	0.150	6.671	0.547	1.827
6	0.209	4.784	0.564	1.774
7	0.280	3.577	0.590	1.694
8	0.362	2.763	0.630	1.588
9	0.457	2.189	0.685	1.461
10	0.565	1.769	0.757	1.322
11	0.688	1.453	0.847	1.181
12	0.827	1.210	0.957	1.044
13	0.982	1.018	1.089	0.919
14	1.157	0.865	1.242	0.805
15	1.350	0.741	1.417	0.706

表-5 Cタイプの固有振動数と周期

Mode	Horizontal (x-y Plane)		Vertical (y-z Plane)	
	Freq.(Hz)	Period(sec)	Freq.(Hz)	Period(sec)
1	0.351	2.850	0.607	1.646
2	0.352	2.845	0.608	1.646
3	0.354	2.822	0.608	1.644
4	0.362	2.763	0.611	1.636
5	0.377	2.653	0.619	1.616
6	0.402	2.485	0.633	1.581
7	0.441	2.266	0.656	1.526
8	0.496	2.018	0.690	1.449
9	0.567	1.765	0.739	1.352
10	0.655	1.527	0.805	1.242
11	0.761	1.314	0.889	1.124
12	0.886	1.129	0.993	1.007
13	1.030	0.971	1.119	0.894
14	1.194	0.837	1.266	0.790
15	1.379	0.725	1.436	0.696

5. 正弦パルス波による応答解析

本解析の目的は、実際の地震波の入力に先立ち、周期の異なる正弦パルス波をA、C両タイプ的水中浮遊式トンネルに入射し、その動揺特性を検証することである。解析は、正弦波の周期を0.2~3.0 secまでの7ケース、伝播速度を200 m/sec、400 m/sec、800 m/sec、Infinity（同時加震）の4ケースに変化させて行った。

トンネル軸方向に沿った場所毎に、応答変位の最大値を示したのが、図-4および図-5である。いずれもCタイプを水平方向に加震した場合である。図-4のように、構造物の卓越周期よりも低い入射波周期0.2秒では、当然低い応答を示す上、伝播位相差の影響もほとんど出ない。しかし、図-5のように、入射波周期が1.5秒程度になると、応答値が高くなるとともに伝播速度の違いによる影響が顕著に出てくる。たとえば、伝播速度が200m/secの場合は伝播時間が10秒と長く、Cタイプの卓越周期の数倍になるため、減衰と周囲函体の拘束効果によりあまり応答値が大きくなる。

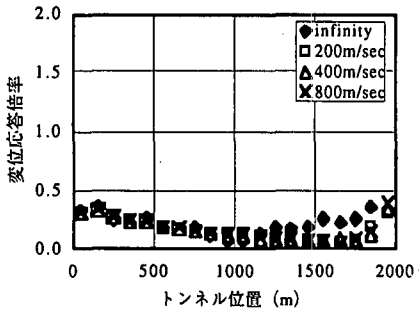


図-4 水平変位応答の分布 (Type-C、周期0.2sec)

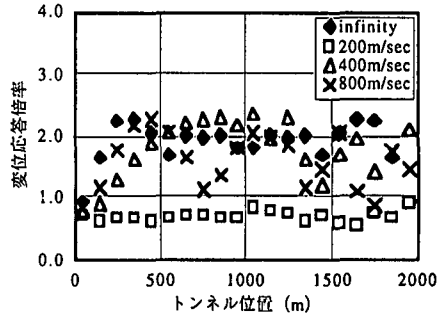


図-5 水平変位応答の分布 (Type-C、周期1.5sec)

次に、入射波の振動数と応答倍率の影響を見るため、水中浮遊式トンネルの中央部付近の函体の運動に着目して、入射波の振動数と応答倍率の関係をプロットした。これを、図-6~図-9に示す。

水平方向固有周期が非常に長いAタイプ（図-6）では、入射波振動数の低下（周期の増加）に伴って、応答倍率が徐々に増加していくのが分かる。今回の計算では地震波を想定しているため、周期で3.0秒、振動数で0.33Hzまでしか計算を行っていないため、Aタイプの低次モード固有周期に近い入射波に対する計算結果はない。しかし、構造物の固有周期に対応するところまで、応答は上昇していくものと予想される。一方、Cタイプの場合は、水平方向の1次モード固有周期が2.85秒のため、図-7に示すように、入射波周期3.0秒（振動数0.33Hz）でほぼピークを見せるような形となる。鉛直方向の場合も、Aタイプ（図-8）、Cタイプ（図-9）共、各々の卓越固有周期付近でピークを生じている。

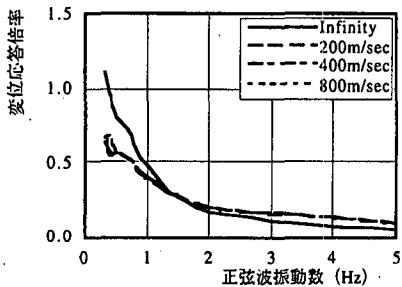


図-6 水平加震時中央部函体の応答変位 (Type-A)

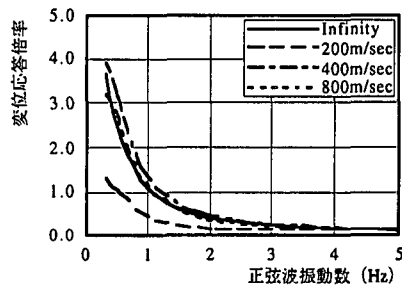


図-7 水平加震時中央部函体の応答変位 (Type-C)

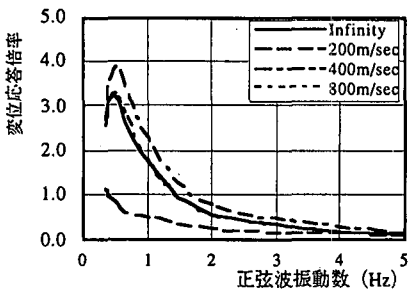


図-8 鉛直加震時中央部函体の応答変位 (Type-A)

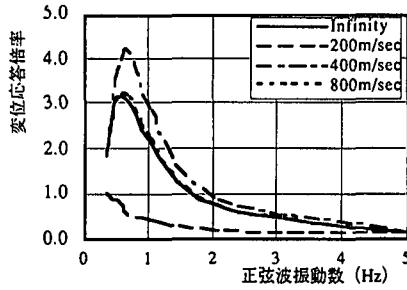


図-9 鉛直加震時中央部函体の応答変位 (Type-C)

次に伝播速度の影響だが、固有周期の長いAタイプの水平方向とその他の場合とで、大きく様相が異なっている。Aタイプの水平方向加震時では、図-6のように、同時加震（伝播速度： ∞ 、図中の表記でInfinity）の場合に最も大きな応答を示しているものの、伝播速度を考慮しても、今回設定した伝播速度の範囲では、大きな応答変位の差が見られない。これに対し、Aの鉛直方向、Cタイプの水平、鉛直両方向とも、伝播速度の違いによる応答の差が見られ、特に伝播速度が200m/secの場合には、安定して小さな応答を示している。これは、伝播速度200m/secの時の伝播時間が10秒と長く、Aタイプの水平方向以外では、構造物の固有周期を大きく上回るためと思われる。すなわち、順次変位は伝わっていくものの、伝播速度が遅いため、周辺函体の拘束と減衰の影響を受けて応答が大きくなりえないものと考えられる。このように、構造物の固有周期と伝播速度の関係により、異なった応答を示すことになり、伝播速度を考慮に入れることが重要であると言える。

6. 地震波入力による応答解析

6.1 入力地震波

解析に用いた地震の継続時間は、水平、鉛直方向共に、20.48秒であり、最大変位および最大加速度は表-6の通りである。図-10に水平方向の地震波形を、また、図-11に水平方向地震波の変位スペクトルを示す。

表-6 地震波の諸元

加震方向	最大変位	最大加速度
水平	8.8 cm	245 gal
鉛直	2.1 cm	52 gal

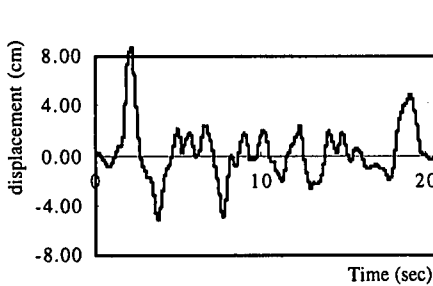


図-10 地震変位波形（水平方向）

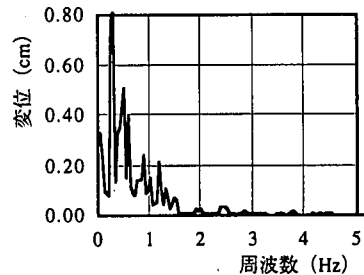


図-11 地震波の変位スペクトル（水平方向）

6.2 応答変位の検討

地震波を入力した際の応答変位を見るため、図-12～図-13にトンネル軸に沿った各地点での最大応答変位を表した。図から明らかなように、Aタイプの水平方向動揺は伝播速度に関わらず、1.0以下の応答変位となっている。これはAタイプの水平方向卓越周期が地震波の周期に比べて相当に長いため、あまり応答しないことを示している。しかし、図-13に示したCタイプの鉛直方向のように、構造物の固有周期が地震波の卓越周期に近い場合は、当然応答変位は大きくなるが、伝播速度がきわめて遅い（200m/sec）と応答もかなり小さいことが分かる。この傾向は、正弦パルス波を入射した場合と同じであり、地震波の卓越周期成分を代表するパルス波を用いて計算することで、伝播速度の影響も含めた応答の傾向も把握できるものと考えられる。

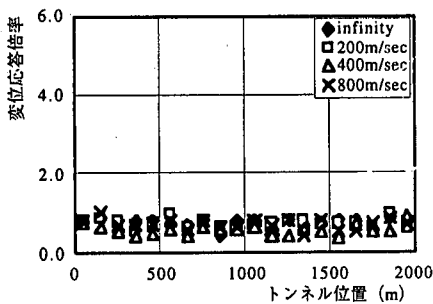


図-12 水平変位応答の分布（Type-A）

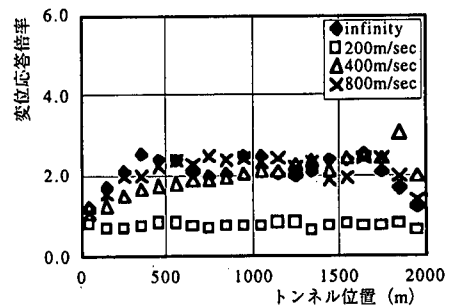


図-13 鉛直変位応答の分布（Type-C）

6.3 曲げモーメントの検討

次に、トンネル函体間のジョイント部に作用する曲げモーメントについても、応答変位と同様、各地点毎の最大値をプロットした。これを図-14～図-15に示す。

Aタイプの場合は、伝播速度の違いによるバラツキが応答変位の場合よりも大きくなる傾向にあるが、同時加震したケースについて検討しておけば、概ね発生曲げモーメントの推定ができると言えよう。これに対しCタイプの場合は、伝播速度の影響が400m/secの時に大きな曲げモーメントを発生し、同時加震のケースだけでは過小評価することが分かる。本ケースの場合、地震の卓越周期と伝播速度の組合せにより、トンネルの4～5次モードでの振動が励起されており、その固有周期が地震の卓越周期に近いことが原因と思われる。

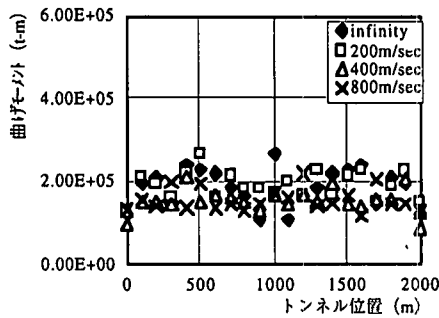


図-14 水平方向加震時の曲げモーメント分布 (Type-A)

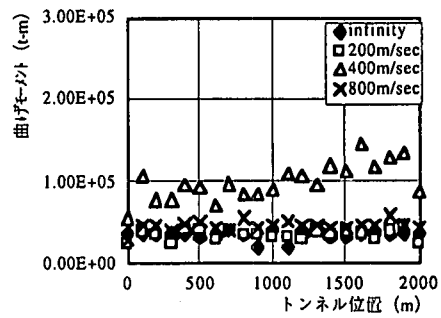


図-15 鉛直方向加震時の曲げモーメント分布 (Type-C)

7. まとめ

構造物の固有周期と地震の卓越周期の関係は、地震時の運動特性を大きく左右する要素であるが、水中浮遊式トンネルの場合は、係留索配置の選択によりかなり大きな選択の幅を有しており、それが地震時応答にも大きな差異を生じる結果となる。特に今回検討したAタイプの水平方向の固有周期は、地震の卓越周期に比べて非常に長いため、同じAタイプの鉛直方向やCタイプの水平、鉛直両方向の運動とは大きく動揺特性が異なった。ここでは、Aタイプの水平方向運動のように、地震の卓越周期に比べて長い固有周期を有するものを「長周期型構造」、構造物の周期と地震の卓越周期が比較的近いAタイプの鉛直やCタイプについては「中周期型構造」と呼ぶこととして、本研究で明らかになった事項を整理する。

- ①長周期型構造の場合は、同時加震のケースに対して検討を行えば、応答変位や函体間ジョイントに発生する曲げモーメントをある程度の確に把握できる。
- ②一方、中周期型構造の場合は、伝播速度の違いによる応答の差がでるため、同時加震のケースだけでは、過小評価する可能性がある。
- ③特に、曲げモーメントなど発生断面力の検討を行う場合には、伝播速度の影響が大きく生じるため、支配的となる伝播速度について十分検討する必要がある。その際、本研究で行ったような正弦パルス波によるパラメトリックな検討の結果が、実際の地震波を入力した際の応答についても適切な予見を与えるものであることが判明した。

なお、本検討では、トンネル延長全体に渡って水深が一定と仮定し、また、係留索配置についても同一のものを採用したが、現実問題を考えた場合、水深の変化やそれに伴う複数の係留索配置を採用せざるを得ないことも予想される。今後こうした問題についても考慮した研究が必要と思われる。

参考文献

- ¹ 蟹江 俊仁・三上 隆・角田 與史雄：水中浮遊式トンネルの波浪動揺特性について、土木学会論文誌 No.556/I-38, pp.159-168, 1997.1
- ² Chakrabarti, S.K. 1987. Hydrodynamics of Offshore Structures: Computational Mechanics Publications, Boston, USA, Penzien
- ³ Mizuno, S. et al. Experimental Study on Characteristics of Submerged Floating Tunnels under Regular Waves: The 3rd Symposium on Strait Crossings, Alesund, Norway 1994.