

超軽量コンクリートを用いた浮体構造物の研究

Study on the Floating Structure Composed of Super-light-weight Concrete

古田大介¹・山谷弘幸²・奥村耕之³・松浦正己⁴・田村一美⁵・木原一禎⁶
 Daisuke FURUTA, Hiroyuki YAMAYA, Yasuyuki OKUMURA, Masami MATSUURA,
 Kazumi TAMURA and Kazuyoshi KIHARA

¹正会員 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

² (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (現中部国際空港 (株) 建設部)

³工修 (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (現宇宙開発事業団 宇宙環境利用システム本部)

⁴工修 三菱重工業 (株) 長崎研究所 船舶・海洋研究推進室 (〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)

⁵正会員 工博 三菱重工業 (株) 広島研究所 鉄構・土木研究室 (〒730-8642 広島市中区江波沖町5-1)

⁶正会員 工修 三菱重工業 (株) 広島製作所 鉄構装置技術課 (〒730-8642 広島市中区江波沖町5-1)

For the development of a hybrid floating structure with super-light-weight concrete and steel, durability and a structural member resistance tests have been conducted. Wave basin experiments have been also conducted to investigate the performance of a yoke-mooring system.

Key Words : Super-light-weight concrete , floating structure , durability , mooring

1. はじめに

浮体構造物は、海水交換性があり環境への影響が小さく、地震に強いことから、浮桟橋等に採用されている。近年、公共投資の効率的運用が求められている中、海洋環境下で耐食性に優れて管理の容易な、かつ、経済的に優れた構造物の開発が重要な課題となっている。

(財)沿岸開発技術研究センターでは、耐久性に優れた鋼・コンクリートのハイブリッド製浮体構造物に、超軽量コンクリートを用いることによる軽量化技術の確立と、浮体の持つ移動性を考慮した係留方式を提案する研究を、平成12年度から2カ年計画で実施した。本論文はその成果として、超軽量コンクリートの耐久性と耐荷力に関する試験、施工試験、係留装置として提案したヨーク係留装置の検討および工費の検討結果について紹介するものである。

2. 耐久性と耐荷力に関する試験

(1) 使用材料、配合及び各種試験結果

a) コンクリートの目標仕様と使用材料

超軽量コンクリートの目標仕様を以下のように設定し、表-1に示す材料を使用した。

比重 1.5 圧縮強度 30N/mm²以上
 スランプ 18cm

表-1 使用材料

材 料		絶乾密度(kg/l)
セメント	高炉セメントB種	3.04
粗骨材	軽量粗骨材	1.29
細骨材1	軽量細骨材	1.7
細骨材2	硬質パーライト	1.26
混和剤	高性能AE減水剤	-

b) 配合

試験練りを行い、上記の仕様を満足する超軽量コンクリート (AP) の配合を決定した (表-2)。なお、比較のための普通コンクリート (N) の配合も示す。

超軽量コンクリートの粗骨材、細骨材は全て絶乾状態にして練り混ぜたものである。従って、粗骨材、細骨材の練り混ぜ時の吸水率 (各々約5%) を用いて換算すると、実質的な水セメント比は約35%である。

表-2 超軽量コンクリートの配合

ケース	W/C (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	S1	S2	SL	G	Ad
AP	45.0	5.0	190	422	266	131	-	465	4.2
N	56.5	4.5	175	310	-	-	831	965	3.2

注) W/C:水セメント比 Air:空気量 C:セメント W:水

G:粗骨材 S1:細骨材1 S2:細骨材2 SL:石灰岩砕砂

Ad:高性能AE減水剤 (AP) Ad:AE減水剤 (N)

c) コンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を表-3に、硬化コンクリートの性状を表-4に示す。圧縮強度はいずれ

も目標値(30N/mm²)以上を満足している。また、超軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ引張、曲げ引張、せん断強度及びヤング率は小さい。

表-3 フレッシュコンクリートの性状

ケース	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	気乾単位容積質量 (注) (kg/m ³)	備考
AP	19.0	4.6	1530	1490	超軽量コンクリート
N	16.5	4.3	2320	2240	普通コンクリート

注) 28日間水中養生後に取り出し、2週間室内に静置後計測。

表-4 硬化コンクリートの性状

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング率 (x10 ⁴ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
	7日	28日	28日	28日	28日	28日
AP	27	36	1.51	2.8 (1/12.9)	4.4 (1/8.2)	4.7 (1/7.7)
N	24	34	2.62	3.4 (1/10.0)	7.2 (1/4.7)	6.9 (1/4.9)

注) 括弧内は、圧縮強度(材令28日)に対する比率を示す。

(2) 耐久性試験結果

a) 中性化試験

促進中性化試験を行った。試験は促進試験槽(温度20℃、炭酸ガス濃度5%)内に試験体(10cmφ×20cm)を保存し、3カ月経過後、割裂して試験体を半割れにして直ちに中性化深さを計測した(表-5)。普通コンクリートと比較して、超軽量コンクリートの中性化深さは非常に小さい。これは、普通コンクリートの水セメント比(56.5%)と比較して、超軽量コンクリートの水セメント比(実質水セメント比約35%)が小さく、セメントマトリクスが非常に緻密なためと考えられる。

表-5 促進中性化試験結果

ケース	中性化深さ(mm)
AP(超軽量コンクリート)	1以下
N(普通コンクリート)	14.2

b) 塩化物浸透試験

電気泳動法による促進透過性試験を行った。試験は、拡散セル(容量1リットル、正極側:0.3NのNaOH溶液、負極側:3%のNaCl溶液)の中央に配置した試験体(10cmφ×3cm厚のコンクリート)に直流電圧を負荷し、負極側から正極側へ移動した塩化物イオン濃度を原則として1日おきに2週間程度計測した(図-1)。超軽量コンクリート(AP)の方が普通コンクリート(N)と比較して、塩化物イオン濃度が非常に小さくなった。これは前述のとおり水セメント比の違いによるものと考えられ、文献1)に示された結果からも、このことが裏付けられるものと考えられる。

水セメント比が異なるため単純な比較はできないが、強度を同程度に確保すれば超軽量コンクリートも普通コンクリートと同等以上の性能を確保できると考えられる。

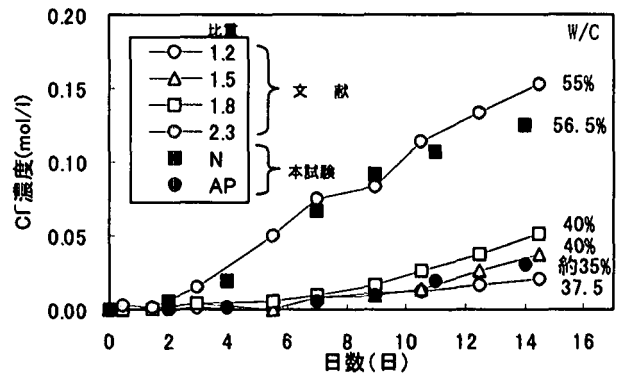


図-1 塩化物イオン濃度計測結果

c) 透水試験

窒素ガスを用いた加圧透水試験機を用いて促進試験を行った。試験体は15cmφ×30cmとし、圧力容器内に設置して加圧水を作用させた。加圧水の圧力は1.5MPaとして48時間作用させた後、試験体を取り出し、直ちに割裂して水の浸透深さから透水係数を算出した(表-6)。透水係数も他の試験結果と同様に、水セメント比の小さい超軽量コンクリート(AP)が普通コンクリート(N)と比較して非常に小さくなった。

表-6 透水試験結果

ケース	平均浸透深さ(cm)	透水係数 (x10 ⁻⁴ cm/s)	備考
AP	1.2	9.6	W/C=約35%
N	3.6	46.3	W/C=56.5%

(3) ハイブリッド梁の載荷試験

a) 試験概要

超軽量コンクリートを使用した鋼・コンクリートハイブリッド(RCH)梁の載荷試験を行い、耐力の確認を行った。模型は浮橋の側壁及び底版を想定し、部分的に取り出した実物大梁模型とした。模型の概要を図-2に示す。模型1と2は軸方向の鉄筋量を変えている。

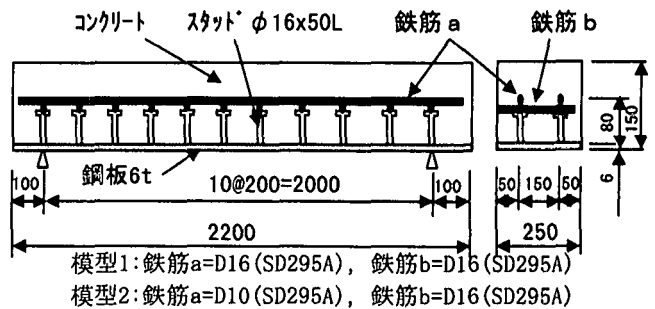


図-2 試験模型(単位:mm)

b) 試験ケース

試験ケースは模型の種類、載荷方向の組み合わせにより表-7の5ケースとした。なお、載荷方向は浮体側壁の一般部及び内部補剛材部をそれぞれ想定したものである。

- 一般部 : 正曲げ載荷(鋼板引張), 図-3(a)
- 補剛材部 : 負曲げ載荷(鋼板圧縮), 図-3(b)

各模型とも両端単純支持の2点荷重(4点曲げ)とし、荷重は漸増荷重とした。

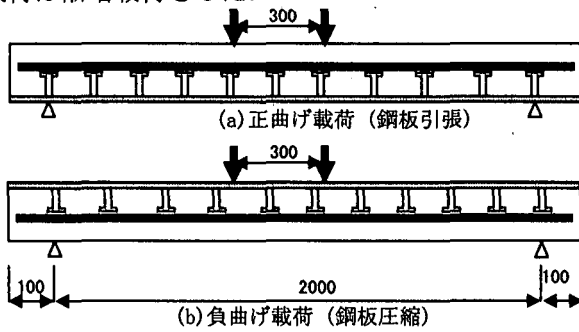


図-3 試験模型 (単位: mm)

表-7 荷重試験ケース

ケース	模型の種類	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (x10 ⁴ N/mm ²)	材令 (日)	
正曲げシリーズ*	AP-T1	模型 1	36.6	1.51	42
	N-T1	模型 1	35.2	2.63	45
負曲げシリーズ*	AP-C1	模型 1	36.6	1.51	42
	N-C1	模型 1	35.2	2.63	45
	AP-C2	模型 2	36.6	1.51	42

c) 荷重試験結果概要

表-8 に最大荷重、破壊形態を図-4、図-5 に各シリーズの荷重と変位の関係を示す。ひび割れの発生経過は正曲げシリーズ、負曲げシリーズともほぼ同様で、まず、スパン中央付近に曲げひび割れが生じ、荷重を増大していくにつれ、ひび割れが進展あるいはほぼスタッド位置に新たなひび割れを生じ、最終的にせん断破壊を生じた。また、超軽量コンクリートを使用したRCH梁(AP)は、普通コンクリートを使用したRCH梁(N)と同等以上の性能を有することが確認できた。

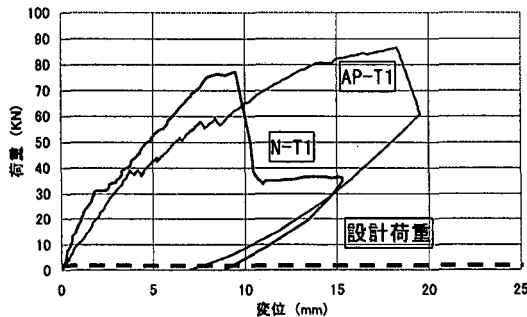


図-4 荷重と変位の関係 (正曲げシリーズ)

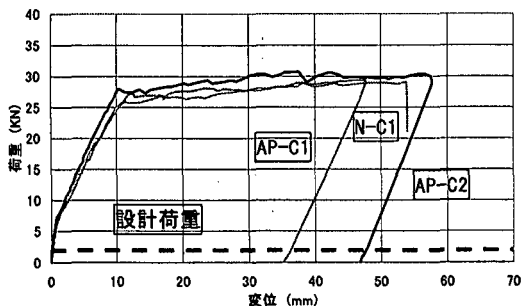


図-5 荷重と変位の関係 (負曲げシリーズ)

表-8 各ケースの最大荷重、破壊の状況

ケース	荷重方向	ひび割れ荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態
AP-T1	正曲げ	42	87	引張鉄筋降伏前にせん断破壊
N-T1	正曲げ	35	77	せん断破壊
AP-C1	負曲げ	3	30	引張鉄筋降伏後、せん断破壊
N-C1	負曲げ	11	29	引張鉄筋降伏後、せん断破壊
AP-C2	負曲げ	16	31	引張鉄筋降伏後、せん断破壊

3. 施工試験

壁厚が140mmと薄い壁部材(浮棧橋の側壁を想定)への充填性を確認するために、施工試験を実施した。

(1) 使用材料

軽量コンクリート(ケースL)と超軽量高流動コンクリート(ケースUL)の2種類のコンクリートについて、目標とする仕様を表-9のように設定した。なお、超軽量骨材はコンクリートの締め固め時に骨材が浮き上がる可能性があるため、締め固めを行わなくても良い高流動コンクリートを採用した。表-9に示す仕様を満足するように試験練りを行った結果、コンクリートの配合は表-10のようになった。

表-9 コンクリートの仕様

ケース	スランプ (cm)	空気量 (%)	比重	配合強度 (N/mm ²)	備考
L	18±2.5	3~6	1.8 ±0.1	35	軽量コンクリート
UL	60±5 (70~)	3~6	1.4 ±0.1	35	超軽量高流動コンクリート

表-10 コンクリートの配合

ケース	W/C (%)	Air (%)	粉体量 (C+S1) (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)								単位容積質量 (kg/m ³)	
				W	C	SA	SB	SC	SL	G	Ad1		Ad2
L	48	5	-	191	398	-	-	-	768	528	-	4.3	1885
UL	35	5	550	175	500	50	151	51	0	434	5.5	-	1361

注) W/C:水セメント比 Air:空気量 W:水 C:セメント SL:石灰岩砕砂 SA, AB, SC:フライアッシュ系超軽量骨材 (SA:微粉, SB:荒目, SC:細目) G:粗骨材(25%含水品) Ad1:高性能AE減水剤 Ad2:AE減水剤

(2) 施工及び試験項目

試験は、図-6に示すように浮棧橋の側壁の一部を取り出した実物大の部分模型とし、前面型枠は透明なアクリル板を使用して、充填状況を目視確認した。試験は、コンクリートの受け入れ検査、コンクリートの打設(充填)試験を行った。

(3) 施工試験結果

a) コンクリートの受け入れ検査結果

コンクリートの受け入れ検査結果を表-11に示す。ケースULのスランプリューは目標値60±5cmに対して大きかったものの、材料分離等は見られなかった。

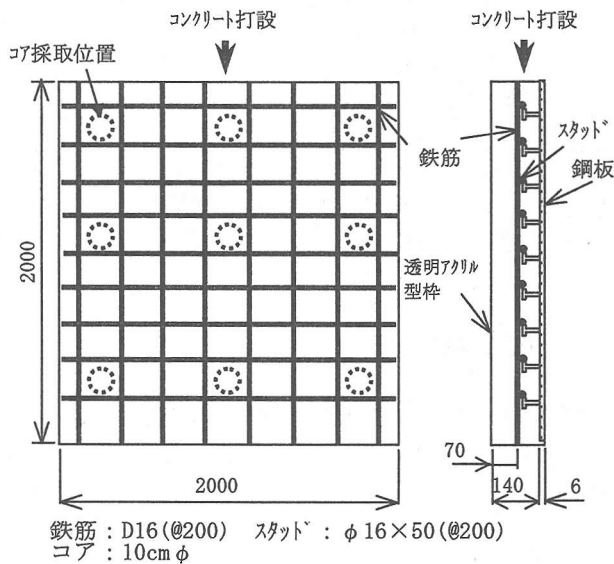


図-6 試験模型図

表-11 受入れ検査結果

	ケースL	ケースUL
スランプ (cm)	20.5	—
スランプフロー (cm)	—	73×73
空気量 (%)	4.0	4.6
Vロート流下時間 (s)	—	6.6

b) コンクリートの打設（充填）試験結果

打設にはコンクリートホッパーを使用し、ケースLはバイブレーターによる締め固め、ケースULは落とし込みだけとした。写真-1でわかるように充填状況は良好であり、幅140mmの側壁への打設も問題ないことが確認された。さらに、写真-2に示す硬化後に採取したコアの骨材分布状況を見ると、骨材の偏りは認められなかったことから、材料分離を生じることなく良好な充填性を有していると考えられる。

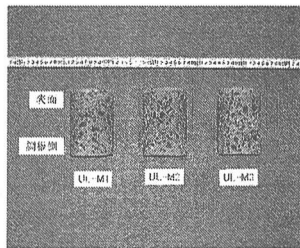
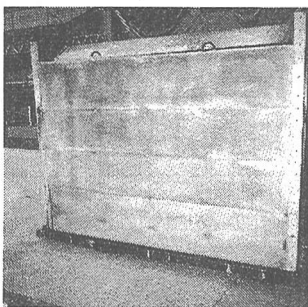


写真-1 充填状況(ケースUL) 写真-2 コア試験(ケースUL)

4. ヨーク係留装置の検討

(1) 概要

浮体式石油生産設備等の一点係留システムとして実用されているヨーク係留装置を、浮棧橋の係留方式として採用する場合の実用性を水槽実験で検討した。

ヨーク係留装置は係留ブイと船体とが、ヨーク(Yoke, くびき)と呼ばれる三角形(A字型)の平面トラス構造によって連結されているもので、概念図を図-7に示す。本係留方式は浅水深での係留に適していると考えられ、浮体軽量化が係留力低減に寄与することが期待された。

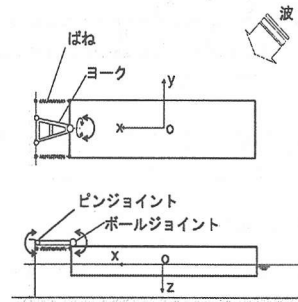


図-7 ヨーク係留概念図

(2) 水槽実験による実用性検証

実験は規則波及び不規則波を各波方向(0°, 45°, 90°)で浮体に作用させ、浮体の運動、加速度、ヨーク及びばねの係留力等を計測した。実験水槽は三菱重工業(株)長崎研究所の浅水域水槽(L×B=40m×17.5m)を使用し、供試模型の縮率は水槽の造波能力及び計測精度等を考慮して1/20とした。

a) 浮体模型

コンクリート比重(γ)の異なる3つのケースを想定し、表-12に示す浮体要目を設定した。γ=15kN/m³(Case2)を代表状態とする。Case1, 3については喫水影響について調査するため、一部の条件下での実験とした。

表-12 浮体模型の主要目

(模型縮率 1/S=1/20, √S= 4.472)

	Case1		Case2		Case3		
	γ=23kN/m³		γ=15kN/m³		γ=12kN/m³		
	実機	模型	実機	模型	実機	模型	
長さ L (m)	35.0	1.75	35.0	1.75	35.0	1.75	
幅 B (m)	10.0	0.5	10.0	0.5	10.0	0.5	
喫水 d (m or mm)	1.4	70.0	1.1	55.0	0.9	45.0	
排水量 Δ (ton or kg)	502	61.2	395	48.2	323	39.4	
重心高 KG (m or mm)	1.19	59.5	1.23	61.5	1.37	68.5	
メタセンタ高 GM (m or mm)	5.46	273	6.90	345	8.34	417	
慣動半径	Kxx/B	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35	0.35
	Kyy/L	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Kzz/L	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

注) d, KG, GMの単位は実機：m, 模型：mm.

Δの単位は実機：ton, 模型：kg.

b) 係留装置模型

係留装置としてのヨーク装置及び係留ばね装置は、想定実機としていくつかの形態が考えられる。ここでは、ばね特性はスプリングで模型化し、その基本

的特性が直接模擬できるようにした。

① ヨーク係留装置

- ・係留連結点の自由度
陸側；ピンジョイント：Pitch方向回転自由
浮体側；ボールジョイント：3軸回転自由
- ・軸間長さ15m (模型寸法0.75m)
- ・ヨーク部重量 6ton (模型重量0.73kg)

② ばね係留装置

- ・ばね定数 100kN/m (模型 0.25N/mm)
- ・初期張力 100kN (模型 12.5N)

c) 実験条件

規則波中及び不規則波中での実験を行った。規則波は基本性能を把握するため常時対応の波高0.5mとし、不規則波は異常時対応の有義波高1.0mとした。不規則波のスペクトルはBretschneider-光易型を用いた。波方向の影響を調べるため、図-8に示す波方向 μ を0, 45, 90°として実験を行った。

岸壁無しの状態を基本としたが、岸壁がある場合についても一部実験を行い、岸壁影響によって運動、係留力が変動する影響を調査した。岸壁の反射率の実測値はほぼ0.8である。

実施した実験のケースを表-13に示す。また、実験結果に対して以下の解析を行い、データ整理を行った。

- ・規則波実験：振幅・位相解析により、規則波応答の振幅を算出。
- ・不規則波実験：スペクトル解析により、不規則波応答の有義値を算出。

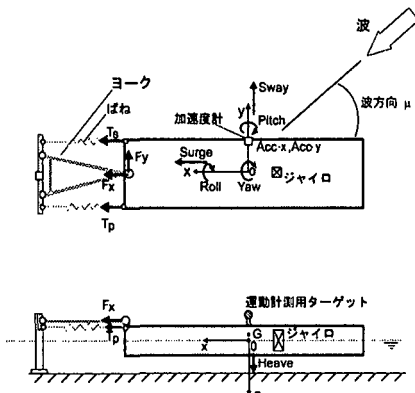


図-8 模型配置と波方向の関係
表-13 実験ケース

水深	岸壁	浮体状態		
		Case1 ($\gamma=23\text{kN/m}^3$)	Case2 ($\gamma=15\text{kN/m}^3$)	Case3 ($\gamma=12\text{kN/m}^3$)
10m	なし	波方向 0°, 90°	波方向 0, 45, 90°	波方向0°
	浮体縦付 距離15m	—	波方向 0°, 45°	—
	浮体横付 距離2m, 5m	—	波方向90°	—

d) 実験結果

実験結果は波高で正規化した応答を波周期ベースの図に表し、各パラメータ影響を比較した。

不規則波中における結果の一例として、図-9に波方向90°における喫水の影響を、図-10に波方向45°における岸壁の影響をそれぞれ計算値と比較して示す。実験結果をまとめて以下に示す。

- ① 実験において、特に大きな非線形現象は観察されなかった。
- ② 実験値と計算値を比較した結果、理論計算は実設計に十分使用できる推定精度を有することが確認できた。また、岸壁の干渉影響も理論計算は比較的精度良く推定できることが確認できた。
- ③ ヨーク・ばね係留方式はSurge, Sway方向には拘束度の強い係留方式になっており、このような係留に対しては浮体軽量化が係留力低減に有効である。
- ④ 本研究の実験ケースでは、ヨークに作用する最大係留力は波方向45°，設計波条件の有義波周期8s，有義波高1mで変動力有義値は約70kNと、比較的小さな荷重に抑えられている。

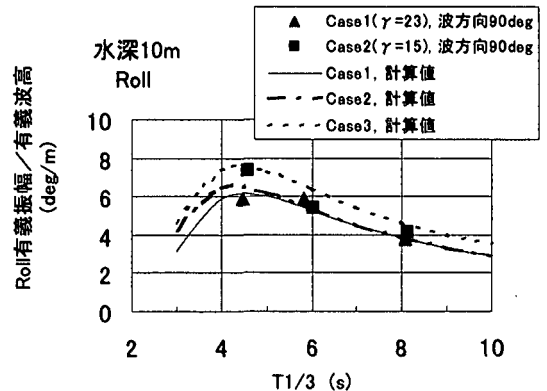


図-9(a) 波方向90°における喫水の影響 (Roll)

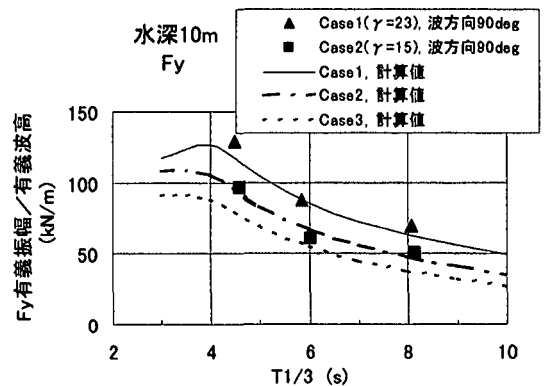


図-9(b) 波方向90°における喫水の影響 (Fy)

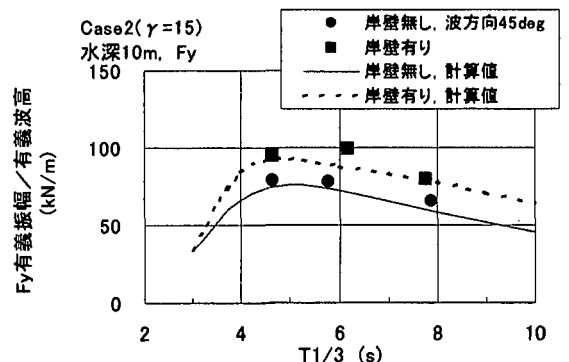


図-10 波方向45°における岸壁の影響

超軽量コンクリートを用いることにより喫水が小さくなり、周期4秒では作用外力として30%程度低減できるが、一方でRoll角は25%程度大きくなる($\gamma=12$ の場合)。しかし、動揺については、別途開発しているフィンなどの動揺制御装置を設けることにより低減可能である。

5. 費用改善効果の概略検討

超軽量コンクリートを浮体に適用した場合、どの程度の費用改善効果が期待できるかを把握するために、試設計を行った。構造形式は鋼・コンクリートのハイブリッド構造とし、普通コンクリートを用いた場合と超軽量コンクリートを用いた場合の比較とした。ここで、浮体長さ、幅、乾舷を一定とした場合の、コンクリート単位重量の違いによる検討を行った。試設計の設計条件を表-14に示す。

その結果、図-11に示すように軽量コンクリートを使用した方が総工費で10%程度の費用改善が期待できることが判った。これは、超軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて単価が高く、かつ、引張強度を向上させるための鉄筋量が増加するものの、軽量化による物量低減効果や、喫水が小さくなることによって係留外力が低減でき、係留装置等の定けい製作工削減による効果が大きいことが確認できた。

表-14 試設計条件

浮体長	30.0 m			
浮体乾舷	1.1 m			
浮体幅	10.0 m			
コンクリート単位重量 (kN/m ³)	23	18	15	12
喫水 (m)	1.45	1.25	1.13	1.0
設計条件	波高	$H_{1/3} = 0.5$ m		
	水深	10.0 m		
	風速	16 m/s		
	潮位	H. W. L. = 2.1 m		L. W. L. = 0.0 m

※係留外力は合田式を使用した。

※構造形式はRCハイブリッドとした。

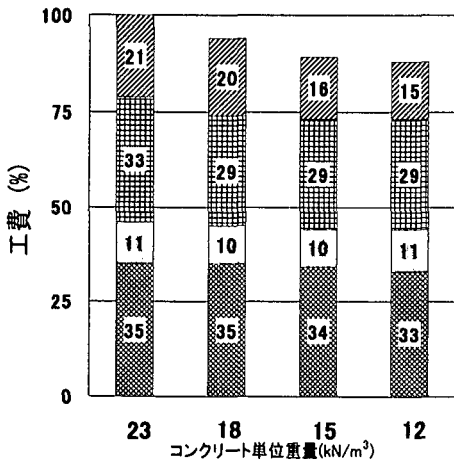


図-11 工費の比較

6. まとめ

(1) 耐久性と耐荷力に関する試験

比重1.5程度、圧縮強度35N/mm²程度の超軽量コンクリートの中性化、透水性及び塩化物浸透性の特性は、ほぼ同程度の強度を有する普通コンクリートと比較して、非常に高い抵抗性を示した。超軽量コンクリートでは、骨材の弱さをカバーするために水セメント比を小さくしてセメントマトリクスの強度を上げており、組織が緻密になったためと考えられる。

また、超軽量コンクリートを使用したRCH梁は、同等の圧縮強度を有する普通コンクリートを使用した場合と比較して、同等以上の性能を示した。

(2) 施工試験結果

浮体橋の側壁を想定した薄い壁体への充填性は良好であり、かつ、採取したコア表面の軽量骨材の分布には偏りが見られないことから材料分離を起こさないことが確認できた。

(3) ヨーク係留装置の検討

ヨーク係留装置による係留は、実験において、特に大きな非線形現象は観察されなかった。

実験値と計算値を比較した結果、理論計算は実設計に十分使用できる推定精度を有し、岸壁の干渉影響も理論計算は比較的精度良く推定できることが確認できた。

(4) 費用改善効果

軽量コンクリートの単価は高いものの、軽量化による物量減の効果や係留外力の低減による係留装置の費用削減により、超軽量コンクリートを用いた浮体構造物の費用改善効果が期待できることが判った。

7. おわりに

本研究は日本財団の助成を受けて2年間研究を行った「超軽量コンクリート等による浮体構造物の研究」の成果をとりまとめたものである。本研究のまとめとして「超軽量コンクリートを使用したRCハイブリッド浮体構造物の設計・施工マニュアル」を作成しており、詳細はこちらを参照していただくとともに、本研究成果が浮体構造物の検討に際しての一助となれば幸いである。

謝辞：研究に際しては「超軽量コンクリート等による浮体構造物の研究委員会（委員長：早稲田大学清宮 理教授）」によるご指導・ご助言を頂いた。関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 横田 弘他：高性能軽量コンクリートによる港湾構造物建造に関する考察，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp. 153-158，2000. 8.