

超軽量コンクリートを用いた浮体構造物の施工試験と費用改善効果の検討

Preliminary Execution Test and Cost Estimation on Floating Structure with Super-light Weight Concrete

伊藤理*・真壁知大*

ITOU, Osamu * and MAKABE, Tomoo *

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 研究員

Hybrid type floating structure with super-light weight concrete and steel is investigated focusing on the execution efficiency, cost improvement and material characteristics. Based on the trial design, it is revealed that the total cost introducing super-light weight concrete will be saved although the material cost of the super-light weight concrete is more expensive than the conventional concrete.

Key Words : super-light weight concrete , floating structure , model test , cost improvement

1. はじめに

国土が狭く四方を海で囲まれている我が国は、社会経済活動の拡大に伴って豊富な沿岸域を有効に活用してきた。また、今後も我が国の社会経済活動の場として重要な役割を担うと考えられている。その沿岸域について、現在までは比較的容易に確保できる場所を有効活用してきた。しかしながら、今後はそれらの場所を確保することが難しくなると考えられ、大水深・軟弱地盤など、自然条件のより厳しい海域へと発展していくことが予想されている。また、近年の環境への意識の高まりによって環境保全のより一層の配慮も必要とされている。

このような背景のもと、水深や海底地盤の影響が少なく、かつ、海水交換性に優れた浮体構造物を活用していくことが期待されている。現在の浮体構造物は、主に船舶の係船用栈橋として積み荷の搬出入や乗客の乗り降り等に利用が限られているが、今後はその用途が拡大すると予想されている。そのため、現在の浮体構造物よりも耐食性に優れ、かつ、経済性に富んだ浮体構造物の開発が求められている。

そこで、(財)沿岸開発技術研究センターでは、超軽量コンクリートと鋼のハイブリッドによる浮体構造物の軽量化技術の確立と経済性を追求するための研究を行うこととした。本論文は、その成果の一部として、超軽量コンクリートの充填性や物性試験等を検証するためのモデルの施工試験結果と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について紹介したものである。

2. 施工試験及び費用改善効果の概略検討

2.1 軽量骨材及び超軽量骨材の現状調査

(1) 従来の軽量骨材

従来の軽量骨材は、火山礫を粉砕し粒度調整した天然人工軽量骨材、特定の鉱物を高温焼成して製造される人

工軽量骨材、産業廃棄物から製造される副産軽量骨材等がある。これらは、構造用軽量コンクリート骨材としてJISA5002に規定されているものである。なお、表-1に代表的な軽量骨材の種類、品質を示す。

表-1 従来の軽量骨材とその種類

銘 柄	種 類	絶乾比重	吸水率 (%)	実績率 (%)
A社	細骨材	1.60~1.70	7~13	52~55
	粗骨材	1.24~1.34	7~10	60~65
B社	細骨材	1.64~1.74	8~10	53~54
	粗骨材	1.20~1.30	8~10	62~64

(2) 超軽量骨材

近年、従来型の人工軽量骨材に比べて、更に比重の小さい骨材が開発されている。表-2に超軽量骨材の品質を示し、例として、超軽量コンクリートと普通コンクリートの性状を表-3に示す。表-2に示すように、超軽量コンクリートは従来の軽量骨材に比べ吸水率や実績率は殆ど変わらないものの、絶乾比重は約6割~7割程度であり、また、表-3に示すようにヤング率は普通コンクリートに比較するとかなり小さいという特徴がある。

表-2 超軽量骨材とその品質

銘 柄	種 類	原 料	絶乾比重	吸水率 (%)	実績率 (%)
C社	粗骨材	膨張頁岩	0.7~0.9	5以下	約60
D社	粗骨材	真珠岩	0.85~0.95	10~12	約60
E社	細骨材	石灰炭	0.6~0.9*	8~9	約60

*) 粒度により異なる

表-3 超軽量コンクリートと普通コンクリートの性状比較

種 類	比 重	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	使用軽量骨材
超軽量コンクリート	1.27	35	12	D社
〃	1.51	35	15*	C社
普通コンクリート	2.32	35	30	(天然砕石)

*) 推定値を示す

浮体構造物の経済性を追求する方法として、浮体重量を低減させることで吃水を小さくし、物量低減効果と係留外力の抑制による係留装置の簡素化効果を期待することがあげられる。この観点から考えると、超軽量骨材は浮体構造物の経済性には適していると言える。しかし、浮体構造物の要求性能の一つとして水密性があげられるが、超軽量骨材を用いたコンクリートは、浮体構造物の機能を十分に発揮・維持できるだけの強度等を有しているのかを検証する必要がある。そのため、今回は超軽量コンクリートの浮体構造物への適用性の評価を行うための基礎的な施工試験を行った。

2.2 施工試験

今回の施工試験は、壁厚が 140mm と薄い壁部材（浮体構造物の側壁を想定）の充填性及構造体内部強度等を確認するために行った。

(1) 使用材料

コンクリートは軽量コンクリート（JIS 規格品）と超軽量高流動コンクリート（JIS 規格外品）の 2 種類とし、目標とする仕様を表-4 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-4 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-5 のようになった。その際に使用した材料とその物性を表-6 に示す。

表-4 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-5 コンクリートの配合

ケース	W/C (%)	Air (%)	粉体量 (C+S) (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)									単位容 積質量 (kg/m ³)
				W	C	S1	S2	S3	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 S1: 細骨材（微粉末） G: 粗骨材（25%含水品）
Air: 空気量 S2: 細骨材（荒目） Ad1: 高性能AE減水剤
W: 水 S3: 細骨材（細目） Ad2: AE減水剤
C: セメント SL: 石灰岩砕砂

表-6 使用材料及び物性

材 料	種 類	絶乾比重	吸水率 (%)
セメント	高炉B種	(3.04)	—
粗骨材	膨張頁岩系人工軽量骨材	1.29	8～10
細骨材 (超軽量)	粗 目	0.65	5～10
	細 目	0.82	4～9
	微粉末	0.74	2～3
普通細骨材	石灰岩砕砂	2.59	1.44
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	—
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物	—

(2) 施工及び試験項目

試験は、図-1 に示すように浮体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、硬化コンクリートの物性試験、凍結融解試験を行った。なお、具体的な試験内容を表-7 に示す。

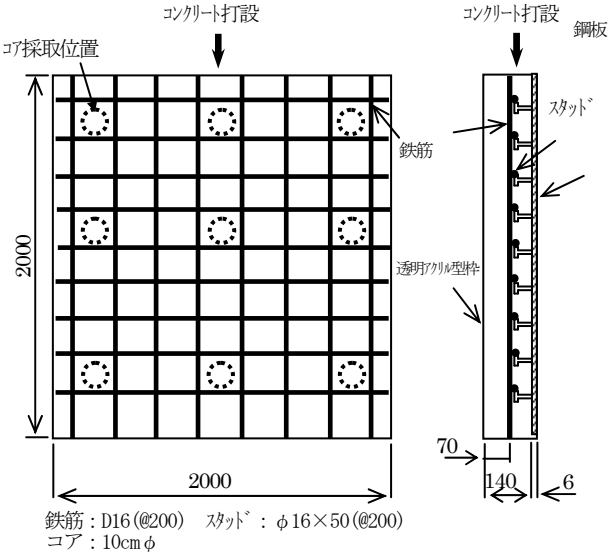


図-1 試験模型図

表-7 試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
コンクリートの受け入れ	スランプまたはスランプフロー試験 空気量試験 Vロート流下試験（ケースULのみ）
コンクリートの打設（充填）	目視確認 コアの表面観察
コンクリートの物性試験	圧縮強度 サイズ : 10cm φ × 20cm 試験材令 : 7, 28, 56, 91 日（各 3 本）
	引張強度 サイズ : 10cm φ × 20cm 試験材令 : 7, 28 日（各 3 本）
	曲げ強度 サイズ : 10cm × 10cm × 40cm 試験材令 : 28 日（3 本）
	せん断強度 サイズ : 10cm × 10cm × 40cm 試験材令 : 28 日（3 本）
凍結融解	温度変化 : 約 -18℃ ～ +4℃ 1 サイクル : 約 4 時間 サイズ : 10cm × 10cm × 40cm 試験 : 水中急速凍結融解試験（3 本） 気中急速凍結融解試験（3 本）

2.3 施工試験結果

(1) 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-8 に示す。ケースULのスランプフローは目標値 60±5cm に対して大きな値となったものの、材料分離等は全く見られなかった。

表-8 検査結果

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

写真-1 スランブ試験
(ケースL)写真-2 スランブフロー試験
(ケースUL)

(2) 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-3 及び写真-4 でわかるように試験体の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-5 及び写真-6 に示す硬化後に採取したコアの骨材分布状況を見ると、ケース L、ケース UL ともに骨材の偏りは認められていないことから、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-3 充填状況(ケースL)



写真-4 充填状況(ケースUL)

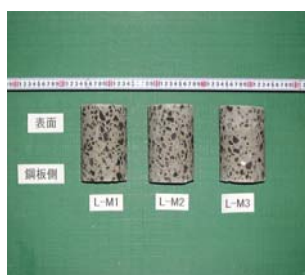


写真-5 コア試験(ケースL)

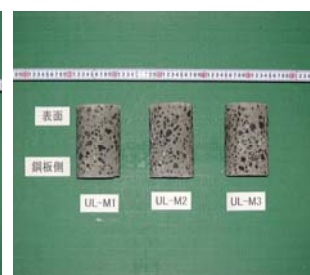


写真-6 コア試験(ケースUL)

(3) 硬化コンクリートの物性試験結果

打設したコンクリートの強度試験結果（標準養生）を表-9 に示す。圧縮強度は目標の 35N/mm²（材令 28 日）を

満足しているものの、引張強度、曲げ引張強度及びせん断強度は普通コンクリートと比較すると小さく、圧縮強度に対する各強度の比率が小さいものとなった。これは、軽量骨材の強度が小さいためと考えられる。

表-9 強度試験結果

	材齢 (日)	ケース L (N/mm ²)	ケース UL (N/mm ²)	(参考) 普通コンクリート の場合
圧縮強度	7	31.8	29.8	—
	28	46.8	36.7	
引張強度	7	2.7(1/12)	2.5(1/12)	(1/10)
	28	3.7(1/13)	2.9(1/12)	
曲げ引張強度	28	4.6(1/10)	3.1(1/12)	(1/5~1/7)
せん断強度	28	5.3(1/9)	3.6(1/10)	(1/5~1/7)

注) 括弧内は、圧縮強度に対する比率を示す。

(4) 凍結融解試験結果

凍結融解サイクル数と質量減少率を図-2 に示し、凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-3 に示す。

(W及びDはそれぞれ水中急速凍結融解試験と気中急速凍結融解試験を示し、添字(1~3)は試験体の番号を示す)

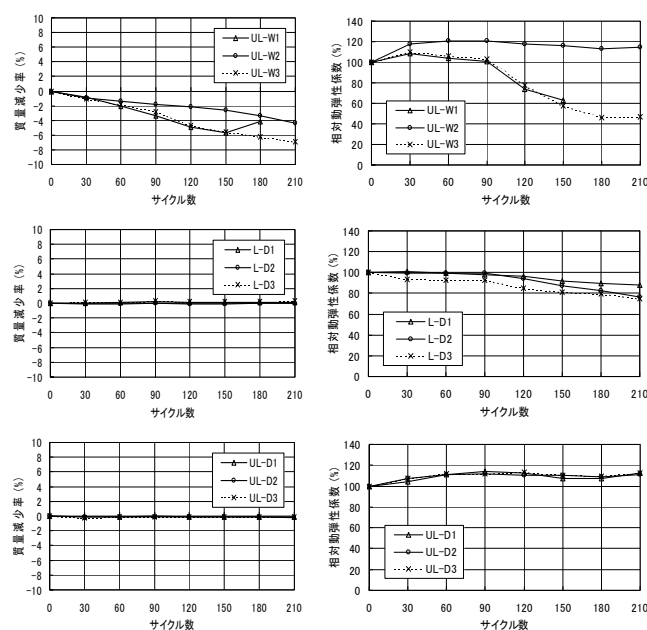


図-2 サイクル数と質量減少率の関係 図-3 サイクル数と相対動弾性係数の関係

試験の結果、水中急速凍結融解試験において、ケース L は、グラフとして載せていないが 30 サイクルまでに亀裂が生じた。ケース L は通常の JIS に従ったため、軽量骨材を強制的に含水させ、また、普通の AE 減水剤を使用していた。そのため、単位水量が多くなり早期に亀裂が生じたものと考えられる。一方、ケース UL は JIS ではないため、極力単位水量を抑えるように配合するとともに、高性能 AE 剤を採用した結果、120 サイクル経過した時点で亀裂が生じ始める結果となった。

一方、構造物のおかれる自然条件により近い気中急速

凍結融解試験では2ケースとも外見上の損傷は認められなかった。また、相対動弾性係数についてはケースLの場合は徐々に減少しているものの、ケースULは質量・相対動弾性係数の減少は見られず良好な結果となった。

2.4 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。比較の対象は普通コンクリートとした。なお、浮体長さや乾舷は一定とし、幅を10m, 15m, 20mと変えた場合で、コンクリート比重の違いによる検討を行った。試設計の設計条件を表-10に示す。

その結果、図-3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、普通コンクリートに比べると軽量コンクリートは、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係留外力低減による係留装置の費用削減の効果が大きかったためである。

表-10 試設計条件

浮体長さ(m)	30.0								
浮体乾舷(m)	1.1								
浮体幅(m)	10			15			20		
コンクリート比重(kN/m³)	23	15	12	23	15	12	23	15	12
吃水(m)	1.45	1.13	1.0	1.40	1.10	0.95	1.30	1.00	0.90
設計条件	波高	$H_{1/3} = 0.5 \text{ m}$							
	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。

3. まとめ

3.1 施工試験結果

(1) 充填性

軽量コンクリート及び超軽量コンクリートともに良好な充填性を有していることを確認した。また、超軽量骨材は比重が小さいため、一般には打設して締め固める時に軽量骨材が浮き上がる現象が見られるが、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かったことがわかった。

(2) コンクリートの強度

圧縮強度は目標の35N/mm²（材令28日）を満足していることを確認した。一方、軽量コンクリートの引張、曲げ引張及びせん断強度は、総じて小さく、比較的版厚の小さい浮体構造物には、必要に応じて鉄筋等による補強対策が必要であると考えられる。

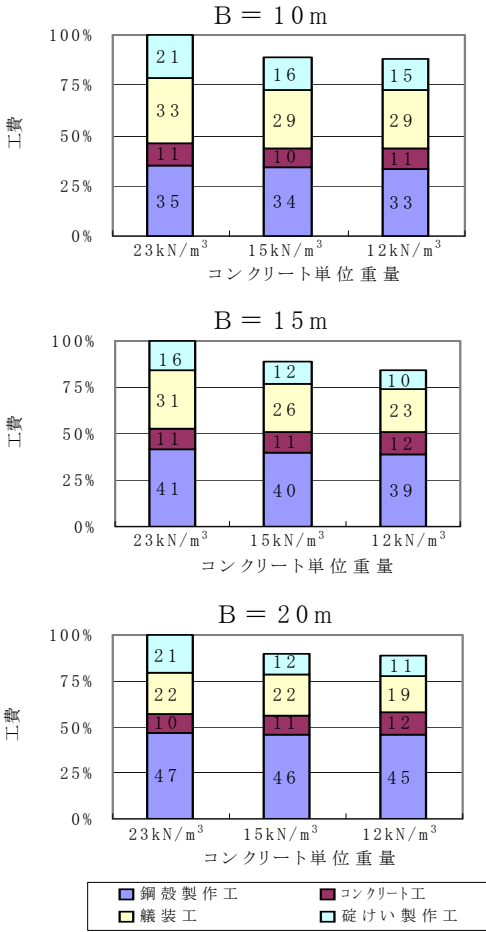


図-3 概略工費の比較

(3) 凍結融解

水中急速凍結融解試験は亀裂が生じる結果となったものの、自然条件により近い気中急速凍結融解試験では良好な結果となった。なお、軽量コンクリートの耐凍結融解性（耐凍害性）は、絶乾状態の軽量骨材を使用すれば水中急速融解試験でも優れた耐久性を示すとの報告があることから、凍結融解試験については、より確かなものとするために更なる検証を行ってきたい。

3.2 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。

4. おわりに

本研究は日本財団の助成を受けて調査を行っている「超軽量コンクリート等による浮体構造物の研究」の成果の一部をとりまとめたものである。今後は、今回の成果をより確かなものにするため、耐久性試験（中性化、塩化物浸透、水密性等）や載荷試験等の検討を行う予定である。