

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1287**      June 2014

重量コンクリートの港湾構造物への適用に関する実験的検討

川端雄一郎  
加藤 絵万  
河村 直哉  
山路 徹  
岩波 光保

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. 緒言 .....	4
2. 実験方法 .....	4
2.1 使用材料および配合 .....	4
2.2 重量コンクリートの力学特性に関する試験 .....	5
2.3 重量コンクリートの耐久性に関する試験 .....	6
2.4 重量コンクリートを用いたRCはりの構造性能に関する載荷試験 .....	6
3. 重量コンクリートの力学特性と改善方策 .....	8
3.1 重量コンクリートの力学特性 .....	8
3.2 短繊維混入による重晶石を用いたコンクリートの力学特性改善効果 .....	9
4. 重量コンクリートの海洋環境における耐久性 .....	10
4.1 重量コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数 .....	10
4.2 コンクリート内部の鉄筋腐食性状 .....	12
4.3 重量コンクリートの劣化性状 .....	13
5. 重量コンクリートを用いたRCはりの構造性能 .....	13
5.1 曲げ耐荷性状 .....	14
5.2 せん断耐荷性状 .....	15
5.3 短繊維混入によるRCはりのせん断耐力改善効果 .....	16
6. 重量コンクリートの港湾構造物への適用性に関する考察 .....	17
7. 結言 .....	17
謝辞 .....	18
参考文献 .....	18

# An Experimental Study on Applicability of Heavy Weight Concrete to Port Structures

**Yuichiro KAWABATA \***  
**Ema KATO \*\***  
**Naoya KAWAMURA \*\*\***  
**Toru YAMAJI \*\*\*\***  
**Mitsuyasu IWANAMI \*\*\*\*\***

## Synopsis

This paper presents the applicability of heavy weight concrete (HWC) to port structures, especially to gravity-type concrete structures as caisson. Breakwater, one of the gravity-type concrete structures, needs to be heavy enough to resist external forces by their own weight. Use of filling materials with high density is a general way to increase the weight of the caisson. Another possible way is to apply HWC to the structures. In recent years, new types of concretes using barite and/or artificial heavy weight aggregate (AHWA) have been developed. In this paper, mechanical properties and durability of these new types of HWCs were investigated. Structural performance of RC beams using HWCs was also evaluated through loading tests. One interesting result showed that the fracture energy of concrete using barite (HWC3.4) is approximately 60 % lower than that of normal concrete. The mechanical properties of HWC3.4 can be improved by incorporating short fiber. AHWA contains a certain amount of metallic iron so that rust stain due to corrosion of the aggregate appeared on the surface of concrete using AHWA (HWC3.8) when HWC3.8 was exposed to seawater splashing zone. On the contrary, HWC3.8 showed small corrosion content of AHWA when exposed in tidal zone. This result indicates one possibility that HWC3.8 can be applied to the structures serviced in tidal or submerged zone. Loading test results showed that the flexural load capacity of RC beam using HWC can be almost the same as that using normal concrete. RC beam using HWC3.8 showed similar shear carrying capacity to that using normal concrete while that using HWC3.4 was 60 -70 % of normal concrete. Incorporating short fiber to HWC3.4 is a promising way to improve the shear carrying capacity of the RC beam.

**Key Words:** heavy weight concrete, mechanical properties, durability, structural performance

---

\* Senior Researcher, Structural Mechanics Group  
\*\* Head, Structural Mechanics Group  
\*\*\* Researcher, Pavement Group  
\*\*\*\* Director, Structural Engineering Division  
\*\*\*\*\* Visiting Senior Researcher, LCM Research Center for Coastal Infrastructures  
(Professor, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology)  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail: kawabata-y@pari.go.jp

# 重量コンクリートの港湾構造物への適用に関する実験的検討

川端 雄一郎\*・加藤 絵万\*\*・河村 直哉\*\*\*・山路 徹\*\*\*\*・岩波 光保\*\*\*\*\*

## 要 旨

防波堤の設計では、波力に対して堤体が滑動もしくは転倒しないような質量が求められる。しかしながら、施工条件によっては、ケーソンの堤体幅を十分に確保できない場合もあり、堤体質量を増加させる方策の一つとして、高密度骨材を用いたコンクリート（以下、重量コンクリート）を適用することが考えられる。近年では、従来重量コンクリート用骨材として使用されてきた磁鉄鉱や赤鉄鉱などの鉄鉱石が需給逼迫や価格高騰などの問題から現在では入手困難な状況となっており、重晶石や人工重量骨材である金属スラグ系骨材や酸化鉄粉といった新規の高密度骨材を用いた重量コンクリートが開発されつつある。そこで本研究では、重晶石や人工重量骨材を用いた重量コンクリートの力学特性および耐久性を把握するとともに、重量コンクリートを用いた RC 部材の曲げ耐力性状およびせん断耐力性状について検討を行った。その結果、重晶石を用いたコンクリートにおいて破壊エネルギーが普通コンクリートの 60%に低下すること、また短繊維を混入することで破壊エネルギーの改善が可能であることを示した。人工重量骨材には金属鉄が含まれるため、酸素の供給が多い飛沫帯環境では骨材腐食による錆汁がコンクリート表面に発生するが、干満帯環境においては錆汁の発生が少なくなることから、干満帯や海中部に位置する構造物や部材には適用できる可能性があることを示唆した。さらに、RC はりの載荷試験から、重晶石を用いたコンクリートにおいて、RC はりの斜めひび割れ発生荷重が普通コンクリートの約 60～70%であり、せん断耐力の改善方策として短繊維を混入することが有効であることを示した。

キーワード：重量コンクリート，力学特性，耐久性，構造性能

---

\* 構造研究チーム主任研究官

\*\* 構造研究チームリーダー

\*\*\* 空港舗装研究チーム研究官

\*\*\*\* 構造研究領域長

\*\*\*\*\* ライフサイクルマネジメント支援センター 客員研究官（東京工業大学大学院理工学研究科教授）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail: kawabata-y@pari.go.jp

## 1. 緒言

港湾における代表的な構造物の一つとして防波堤が挙げられる。防波堤は港湾内の水域の静穏を維持するために建設され、船舶の安全な航行、停泊または係留、貨物の円滑な荷役に寄与している。また、国土が外洋に囲まれる我が国において、防波堤は国土保全の観点からも重要な役割を果たしている。

防波堤の設計では、波力に対して堤体が滑動もしくは転倒しないような質量が求められる。一方、施工条件によっては、ケーソンの堤体幅を十分に確保できない場合もある。現状の対策として、中詰め材料の質量を増加させることが一般的である。その他に、堤体質量を増加させる方策の一つとして、高密度骨材を用いたコンクリート（以下、重量コンクリート）を適用することで堤体質量を確保する場合がある。

一般的に、コンクリートの単位体積質量は約  $2.3 \text{ t/m}^3$  であるとされる。これに対して、重量コンクリートは約  $4.0 \text{ t/m}^3$  程度まで単位体積質量を増加させることができる。重量コンクリートはこれまで原子力施設や医療用施設などの遮蔽用コンクリートとして主に用いられ、近年では構造物の浮力対策のウェイト材として使用されるケースも増えている。しかしながら、従来重量コンクリート用骨材として使用されてきた磁鉄鉱や赤鉄鉱などの鉄鉱石が需給逼迫や価格高騰などの問題から現在では入手困難な状況となっている。

このような情勢の中、近年では、重晶石や人工重量骨材である金属スラグ系骨材や酸化鉄粉といった新規の高密度骨材を用いた重量コンクリートが開発されつつある。重晶石は硫酸バリウム ( $\text{BaSO}_4$ ) を主成分とする高密度の天然骨材である。また、金属スラグ系骨材は鉄分を多く含むダストと還元スラグを特殊な酸素バーナで混合熔融した後、破碎および粒度調整を行って製造されている人工骨材である。また、酸化鉄粉を細骨材として用いることでコンクリートの質量をさらに増加させることができる。以降、本研究における重量コンクリートは、重晶石や人工重量骨材（金属スラグ系骨材や酸化鉄粉）を用いた重量コンクリートを指す。

重晶石や人工重量骨材を用いた重量コンクリートに関する研究は緒についたばかりであるが、幾つかの研究事例がある。例えば、重晶石を用いたコンクリートの破壊エネルギーが普通コンクリートのそれよりも小さいこと<sup>1)</sup>、重量コンクリートの鉄筋との付着性状は普通コンクリートと同等であること<sup>2)</sup>、が示されている。また、収縮特性に着目すると、人工重量骨材を用いたコンクリ

ートの自由収縮ひずみは普通コンクリートよりも約 40% 小さいこと、乾燥収縮ひび割れ試験 (JIS A 1151) における重晶石を用いた重量コンクリートのひび割れ発生時の乾燥日数は普通コンクリートよりも短いことなどが確認されている<sup>3)</sup>。さらには、重量コンクリートの有利な特性の一つである X 線の遮蔽効果などに着目した事例<sup>4)</sup>もある。これまでの研究から、重晶石を用いたコンクリートにおいては、力学特性が若干劣る結果が得られているが、その本質的原因については明らかにされていない。また、重量コンクリートの防波堤ケーソンなどを対象として、海洋環境における重量コンクリートの耐久性等について検討された事例は現在のところ報告されていない。

重量コンクリートの防波堤ケーソン等の実構造物への適用を踏まえると、鉄筋コンクリート (RC) 部材としての構造性能の把握が不可欠である。しかし、現在のところ検討事例は報告されておらず、重量コンクリートを用いた RC 部材の構造性能に関する基礎的なデータの蓄積が必要である。

本研究では、重晶石や人工重量骨材を用いた重量コンクリートの力学特性を把握するとともに、重晶石を用いたコンクリートの力学特性が普通コンクリートよりも劣る原因について岩石学的な検討を行った。また、暴露試験によって海洋環境における重量コンクリートの耐久性について検討した。さらには、重量コンクリートを用いた RC 部材の載荷試験を行い、部材の曲げ耐荷性状およびせん断耐荷性状を把握するとともに、重晶石を用いた重量コンクリートに対して短繊維を混入した場合の RC はりのせん断耐力の改善効果について検討を行った。

## 2. 実験方法

重晶石や人工重量骨材といった新規の高密度骨材を用いた重量コンクリートについて、力学特性および耐久性に関する実験的な検討を行った。また、重量コンクリートを用いた RC はりを作製し、載荷試験の実施により RC はりの曲げ耐荷性状およびせん断耐荷性状を把握した。実験方法について以下に示す。

### 2.1 使用材料および配合

表-2.1 にコンクリートの使用材料を示す。重量コンクリートに用いる粗骨材には重晶石もしくは金属スラグ系骨材を、細骨材には重晶石もしくは酸化鉄粉を使用した。金属スラグ系骨材は鉄分を多く含むダストと還元スラグを特殊な酸素バーナで混合熔融した後、破碎および粒度

調整を行って製造されている人工骨材である。短繊維には、ポリビニルアルコール (PVA) 繊維, ポリプロピレン (PP) 繊維, ポリエチレン (PE) 繊維の3種類を用いた。また比較のため、普通コンクリートも作製した。

表-2.2 にコンクリートの示方配合を示す。コンクリートの配合は、水セメント比を 50 %とした。コンクリートの練混ぜは温度 20±3 °C, 相対湿度 60 %以上の恒温室内にて実施した。表中の記号は、(コンクリートの種類) - (短繊維の種類) で表している。

コンクリートの基本配合は、普通コンクリート (N2.3), 重晶石を用いたコンクリート (HWC3.4), 金属スラグ系骨材および酸化鉄粉を用いたコンクリート (HWC3.8) の3種類とした。HWC3.4 については、RC はりのせん断耐力改善を目的として、3 種類の短繊維をコンクリート体積の外割で混入した。この時、短繊維混入によるスラ

ンプ低下や材料分離を考慮し、単位水量と細骨材率を増加させた。短繊維混入率について、PVA 短繊維, PP 短繊維では 1.00 %, PE 短繊維では 0.10 %とした。以降では、それぞれのコンクリートの配合を表-2.2 に示す記号にしたがって記載する。表-2.3 に試験体作製時のコンクリートのフレッシュ性状を示す。

コンクリートは打設後 3 日で脱型し、所定の材齢まで温度 20 °C, 相対湿度 60 %以上の恒温室内にて湿布養生を行った。表-2.4 に鉄筋の物理的性質を示す。

## 2.2 重量コンクリートの力学特性に関する試験

### (1) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

作製した φ100×200 mm の円柱供試体を圧縮強度試験および静弾性係数試験に供した。圧縮強度試験は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。

表-2.1 コンクリートの使用材料

使用材料	記号	備考	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率
水	W	水道水	1.00	-	-
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.14	-	-
細骨材	S1	山砂	2.58 (表乾)	2.22	2.64
	S2	重晶石	4.03 (表乾)	1.41	3.13
	S3	酸化鉄粉	4.95 (表乾)	1.87	2.94
粗骨材	G1	砕石 2005	2.64 (表乾)	0.62	6.59
	G2	重晶石 20-05	4.12 (表乾)	0.54	6.65
	G3	金属スラグ系骨材	4.27 (表乾)	0.45	6.52
混和剤	Ad1	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤	-	-	-
	Ad2	ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤	-	-	-
	Ad3	消泡剤	-	-	-
短繊維	PVA	ポリビニルアルコール繊維, 直径 0.66mm, 繊維長 30mm	1.30	-	-
	PP	ポリプロピレン繊維, 直径 1.0mm, 繊維長 30.5mm	0.91	-	-
	PE	ポリエチレン繊維, 直径 12μm, 繊維長 12mm	1.00	-	-

表-2.2 コンクリートの示方配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	短繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								混和剤 (C×%)			
				W	C	細骨材			粗骨材			Ad1	Ad2	Ad3	
						S1	S2	S3	G1	G2	G3				
N2.3	50.0	45.0	-	165	330	818	-	-	1027	-	-	1.0	-	-	
HWC3.4		44.0	-	165	330	-	1259	-	-	1638	-	-	0.80	-	
HWC3.4-PVA		48.0	1.00	180	360	-	1326	-	-	1468	-	-	-	0.90	-
HWC3.4-PP		48.0	1.00			-		-	-		-	0.90	-		
HWC3.4-PE		48.0	0.10			-		-	-		-	0.92	-		
HWC3.8		48.0	-	155	310	-	-	1725	-	-	1612	1.0	-	0.060	

また、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠し、静弾性係数を求めた。試験は材齢 10 日に実施し、供試体数は 3 体とした。

#### (2) 破壊エネルギー試験

作製した 100×100×400 mm の角柱供試体を破壊エネルギー試験に供した。繊維無混入のコンクリートについては JCI-S-001「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」、また繊維を混入したコンクリートについては JCI-S-002「切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」に準拠し、試験を行った。試験は材齢 10 日に実施し、供試体数はいずれも 4 体とした。

また、試験終了後、コンクリートの破断面を観察した。破断面において、粗骨材自身が割れた箇所の面積と、粗骨材がモルタルと剥離した箇所の面積に分類し、粗骨材の破壊性状を評価した。

#### (3) 骨材の薄片観察

重晶石の粗骨材について、厚さ 15 μm 程度の岩石薄片を作製した。岩石薄片について、偏光顕微鏡を用いて岩石組織および構成鉱物を観察し、重晶石の岩石学的特徴について記載した。

## 2.3 重量コンクリートの耐久性に関する試験

### (1) 試験体

φ 100×200 mm のコンクリート供試体と 100×100×400 mm の鉄筋コンクリート試験体を作製し、暴露試験に供した。鉄筋コンクリート試験体について、D10 鉄筋を 100×400 mm 断面の中心に配置した。また、鉄筋コンクリート試験体については、打設側面 100×400 mm 断面 1 面以外をエポキシ樹脂によりコーティングした。材齢 28 日まで湿布養生とした。

### (2) 暴露環境

暴露試験は、独立行政法人港湾空港技術研究所の所有する海水シャワー暴露場、海水循環水槽、劣化促進水槽の 3 箇所とした。海水シャワー暴露場は 1 日に 2 回 3 時間久里浜湾から採取した自然海水が霧状に散布される環境であり、海水の飛沫環境を模擬した施設である。また、海水循環水槽は 1 日に 2 回海水位が変動する水槽であり、このうちコンクリートを干満の影響を受ける箇所に暴露した。海水シャワー暴露場、海水循環水槽ともに温度管理はなされておらず、外気温と同等である。劣化促進水槽は 3.5 日 60 °C の海水浸漬、3.5 日室温乾燥を 1 サイクルとした乾湿繰返しがなされる促進環境である。

暴露試験は材齢 10 日より開始し、2012 年 3 月から 2013 年 10 月までの約 1.5 年間実施した。

表-2.3 コンクリートのフレッシュ性状

	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
N2.3	7.0	2.2	21.5
HWC3.4	9.0	2.2	21.5
HWC3.4-PVA	7.5	1.5	22.0
HWC3.4-PP	8.0	1.3	22.0
HWC3.4-PE	9.0	2.4	23.0
HWC3.8	6.5	2.7	21.5

### (3) 計測項目

暴露試験終了後、鉄筋をはつり出し、鉄筋表面の腐食面積率を求めた。また試験体のうちエポキシ樹脂を塗布していない暴露面から深さ方向に切断し、それぞれの深さにおいて塩化物イオン濃度を求め、得られた結果からコンクリートの深さ方向の塩化物イオン濃度分布を計算した。

また、コンクリートの表面性状を観察した結果、HWC3.8 の表面に骨材の腐食に起因すると思われるひび割れが認められた。このひび割れの発生状況とひび割れの発生領域を評価するため、コンクリート表層部付近の断面観察を行った。具体的な方法として、コンクリートに蛍光塗料を含んだ低粘度エポキシ樹脂を含浸し、硬化後にコンクリートを 8 等分に切断した。切断後のコンクリート断面を蛍光顕微鏡で観察した。

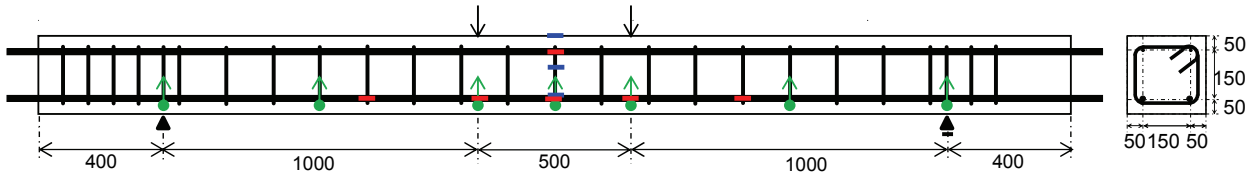
## 2.4 重量コンクリートを用いた RC はりの構造性能に関する載荷試験

### (1) RC はりの諸元

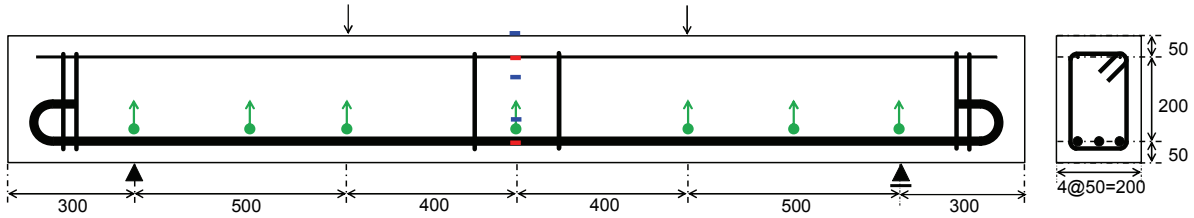
図-2.1 に示す RC はりを作製した。曲げ破壊型 RC はりは 250×250×3300 mm の試験体とし、引張鉄筋に D19 (SD345)、圧縮鉄筋に D6 (SD295) を使用した。また、はりのせん断破壊を防ぐため、150 mm ピッチで D10 (SD345) のせん断補強鉄筋を配置した。せん断破壊型 RC はりは 200×300×2400 mm の試験体とし、引張鉄筋に D22 (SD345)、圧縮鉄筋に D6 (SD295) を使用した。せん断破壊型 RC はりではせん断スパン内にせん断補強鉄筋を配置しないこととし、載荷点および支点付近に組立筋として D10 (SD345) を配置した。試験は材齢 10 日に実施した。

### (2) 載荷条件

曲げ破壊型 RC はりでは、曲げスパン 2500 mm、等曲げ区間 500 mm とした。せん断破壊型 RC はりでは、はりの有効高さ (d) に対するせん断スパン (a) の比 (a/d) を 3.4 として曲げスパン 2000 mm、等曲げ区間 300 mm としたケース、また a/d を 2.0 として、曲げスパン 1800 mm、等曲げ



(a) 曲げ破壊型 RC はり



(b) せん断破壊型 RC はり (载荷点, 支点の位置は  $a/d=2.0$  を記載)

図-2.1 RC はりの諸元 (単位: mm)

区間800 mmとしたケースの2種類とした。

なお、短繊維を混入したRCはりについては $a/d$ が3.4のケースのみとした。不陸調整のため载荷点および支点と鋼板(幅100 mm)をモルタルにて接着し、水平方向の変位を拘束しないよう鋼板の間にテフロンシートを挟んだ。

(3) 計測項目

図-2.1にRCはりの計測箇所を示す。緑色の矢印(↑)は変位の測定箇所、赤色の線は鉄筋ひずみの計測箇所、青色の線はコンクリートひずみの計測箇所を示している。曲げ破壊型RCはりでは、スパン中央の引張鉄筋および圧縮鉄筋、スパン中央より支点側に250 mm, 600 mmの距離の箇所の引張鉄筋で鉄筋ひずみを計測した。せん断破壊型RCはりでは、スパン中央の引張鉄筋および圧縮鉄筋で鉄筋ひずみを計測した。コンクリートの表面ひずみは、全てのRCはりにおいて、スパン中央の試験体上面、上面より100および200 mmの箇所で計測を行った。変位は支点、载荷点、スパン中央、せん断スパン中央にて計測した。

試験終了後、 $a/d=3.4$ のRCはりをはり軸方向に切断した。切断面について、せん断ひび割れ近傍における粗骨材の損傷状況を観察した。具体的には、せん断ひび割れをデジタル画像において位置標定し、このひび割れから上下方向に5 mmの範囲内に存在する粗骨材の損傷状態を割れ、界面剥離、健全の3種類に分類した。観察方法の模式図を図-2.2に示す。なお、粗骨材であっても切断面において粒径が5 mm以下で観察される場合は細骨材と判断される可能性があるが、本研究においては切断面から判断される粒径のみを基に粗骨材と細骨材の分類を行った。

表-2.4 鉄筋の物理的性質

	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D6	291	495	186
D10	405	566	194
D19	380	552	195
D22	399	594	193

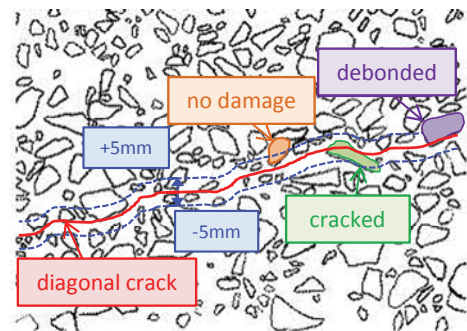


図-2.2 ひび割れ近傍における粗骨材観察の模式図

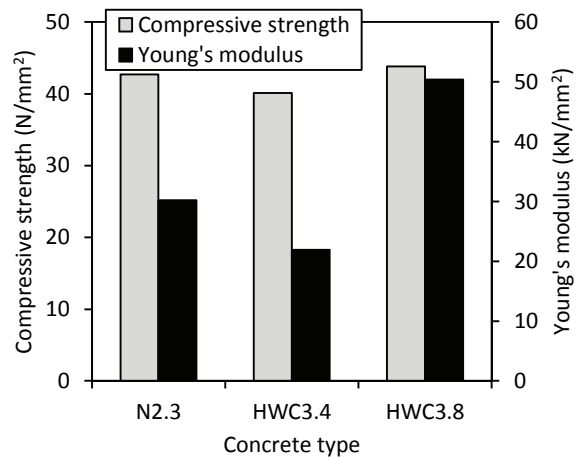


図-3.1 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数



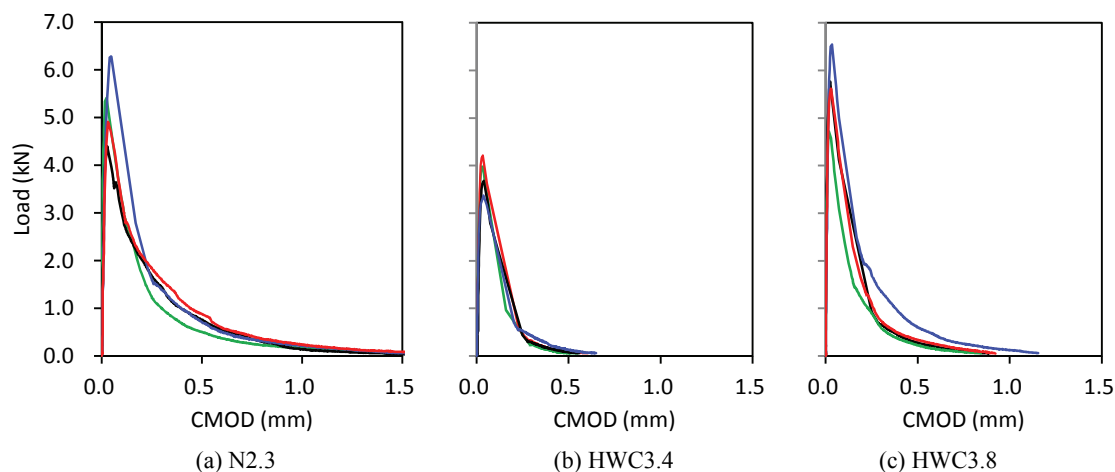


図-3.2 コンクリートの荷重-ひび割れ開口変位 (CMOD) 曲線

### 3. 重量コンクリートの力学特性と改善方策

本章では、重量コンクリートの力学特性について記載するとともに、重晶石を用いたコンクリートの力学特性が普通コンクリートよりも劣る原因について岩石学的な検討を行った結果を示す。また、短繊維混入による重晶石を用いたコンクリートの力学特性の改善効果を示す。

#### 3.1 重量コンクリートの力学特性

##### (1) 圧縮強度および静弾性係数

図-3.1 に材齢 10 日におけるコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を示す。HWC3.8 は N2.3 と同等以上の圧縮強度および静弾性係数を示した。一方、HWC3.4 の圧縮強度は N2.3 よりも若干が低く、また静弾性係数については約 30%低かった。保坂らは材齢 7, 28 日における圧縮強度および静弾性係数を求めており、材齢 7 日においては HWC3.4 の圧縮強度は N2.3 よりも大きい、材齢 28 日においては N2.3 の圧縮強度が HWC3.4 よりも大きくなることを報告している<sup>1)</sup>。保坂らの研究では普通ポルトランドセメント、本論では早強ポルトランドセメントをそれぞれ用いているが、材齢 7 日における早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度が材齢 28 日における普通ポルトランドセメントの圧縮強度とほぼ等しいことを考えると、本論において得られた結果は保坂らと同様の傾向であると考えられる。

##### (2) 破壊エネルギー

図-3.2 に切欠きを有するコンクリートの曲げ荷重-ひび割れ開口変位 (CMOD) 関係を示す。なお、それぞれのデータは供試体 4 体の試験結果である。N2.3 は 4.5~6.2 kN を最大荷重として軟化が進行し、CMOD が約 1.5~2.0 mm の時点で荷重がゼロとなった。一方、HWC3.4

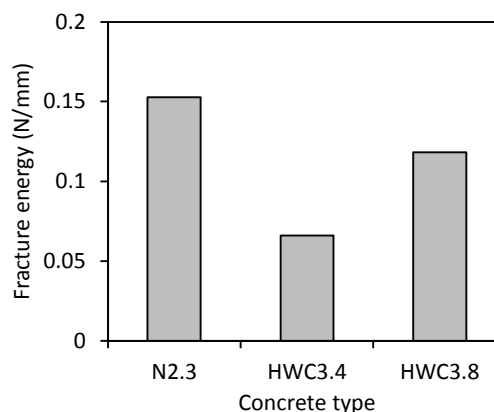


図-3.3 コンクリートの破壊エネルギー

の最大荷重は 3.3~4.2kN と N2.3 より約 20%小さかった。また CMOD が 0.5 mm の時点で荷重がほぼゼロになった。また、HWC3.8 の最大荷重は N2.3 とほぼ同等の値となった。しかしながら、引張軟化後においては、HWC3.8 の CMOD に対する荷重の低下割合が N2.3 のそれよりも大きく、CMOD が約 1.0 mm で荷重がゼロになった。

得られた荷重-CMOD 曲線を基に、式(1)および(2)から、破壊エネルギーを算出した。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_C \quad (2)$$

ここに、

$G_F$ : 破壊エネルギー(N/mm)

$W_0$ : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積 (Nmm)

$W_1$ : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)

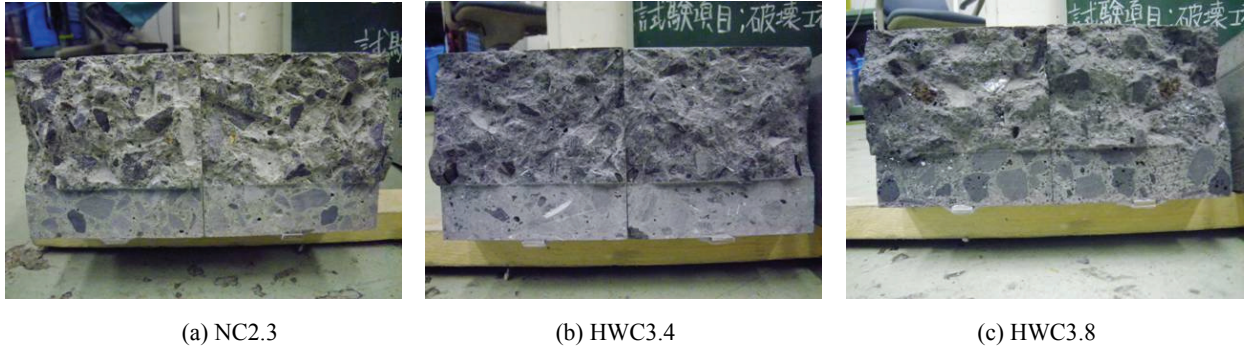


図-3.4 コンクリート破断面

$A_{lig}$  : リガメントの面積 ( $\text{mm}^2$ )  
 $m_1$  : 供試体の質量(kg)  
 $S$  : 載荷スパン (mm)  
 $L$  : 供試体の全長 (mm)  
 $m_2$  : 試験機に取り付けられておらず、破断するまでに供試体に乗っている治具の質量 (kg)  
 $g$  : 重力加速度 ( $9.807 \text{ m/s}^2$ )  
 $CMOD_c$  : 破断時のひび割れ開口変位 (mm)

図-3.3 にコンクリートの破壊エネルギーを示す。なお、図中の値は4体の平均値を示している。図より、普通コンクリートのN2.3と比較して、重量コンクリートの破壊エネルギーは小さいことがわかる。保坂らは、本論と同様に破壊エネルギー試験を行っており、その結果、普通コンクリートと比較して、重晶石を用いたコンクリートは52%、金属スラグ系骨材および酸化鉄粉を用いたコンクリートは86%となっている<sup>1)</sup>。本論では、N2.3の破壊エネルギーに対して、HWC3.4は約43%、HWC3.8は約77%となっており、保坂らと同等の値を示した。

図-3.4 に破壊エネルギー試験が終了した供試体の破断面を示す。破断面の観察の結果、骨材の損傷形態に違いが確認された。そこで、試験終了後の供試体破断面について、粗骨材自身が割れた箇所の面積と、粗骨材がモルタルから剥離した箇所の面積をそれぞれ求めた。図-3.5 にコンクリート破断面における粗骨材の破壊形態を示す。なお、いずれのコンクリートにおいても破断面に対する粗骨材の面積割合は30~36%であった。図より、HWC3.4における粗骨材の破壊形態は「割れ」が多かった。HWC3.8における粗骨材の破壊形態はN2.3とほぼ同様であった。また、「割れ」の面積率が高いほどコンクリートの破壊エネルギーが小さかった。

(3) 岩石学的観察に基づくHWC3.4の破壊エネルギー低下機構

図-3.6 に重晶石の偏光顕微鏡像を示す。図より、重晶石(Bar)の結晶粒界には隙間が多い(黄色矢印)。また、

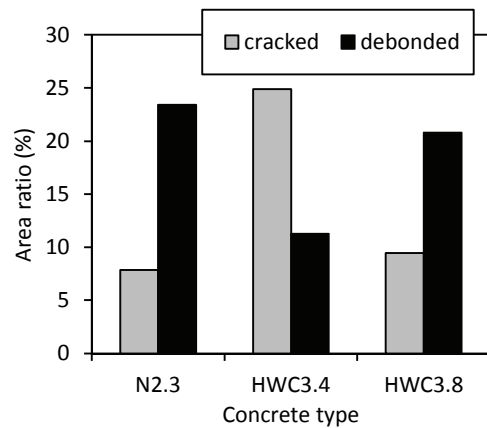


図-3.5 コンクリート破断面における粗骨材の破壊形態

薄片作製時において脱落した部分(V)も多々認められる。これらの結果から、重晶石は結晶粒子間の結合が比較的弱いものと考えられる。また、重晶石の結晶粒子内には劈開(赤色矢印)が発達している。

これらの観察の結果から、重晶石の岩石学的特徴として、劈開の存在や粒子間結合の脆弱さが挙げられる。したがって、上述した重晶石の劈開等が破壊エネルギー試験におけるコンクリート破断面の粗骨材の割れ、ひいてはHWC3.4の破壊エネルギーが低い原因となっているものと考えられる。

したがって、ひび割れ進展過程で形成される破壊進行領域において、重晶石による骨材架橋効果は普通骨材より期待することはできない。このような劈開が発達した骨材に対しては、力学特性の改善が必要と考えられる。

### 3.2 短繊維混入による重晶石を用いたコンクリートの力学特性改善効果

#### (1) 圧縮強度および静弾性係数

図-3.7 に短繊維を混入したHWC3.4の圧縮強度および静弾性係数を示す。なお、図中には無混入の場合のHWC3.4の圧縮強度(点線)および静弾性係数(一点鎖線)をあわせて示す。図より、いずれの短繊維を混入し

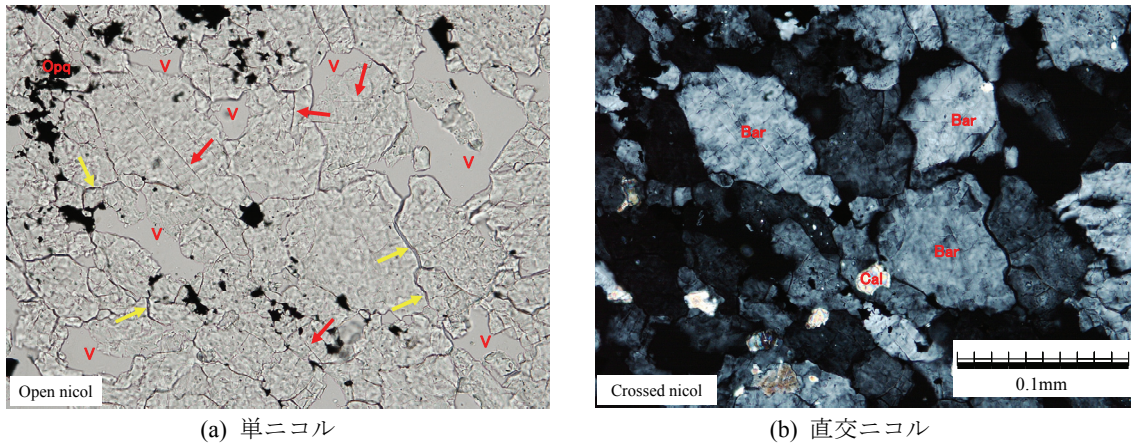


図-3.6 重晶石の偏光顕微鏡像

た場合も圧縮強度および静弾性係数はほぼ同等であった。

(2) 破壊エネルギー

図-3.8 に短繊維を混入した HWC3.4 の荷重-CMOD 曲線を示す。図より、短繊維無混入 (図-3.2) と比較して最大荷重および最大荷重以降の挙動が明らかに異なった。

HWC3.4-PVA では、全ての供試体で最大荷重が 4.8kN 程度であり、短繊維を混入したケースの中で最も大きかった。また、ポストピークにおいては最大荷重以降急激に荷重が低下するが、CMOD が 0.2 mm を超えると、短繊維の架橋効果によって荷重が増加した。CMOD が約 2.0 mm よりも大きくなると荷重が再度低下したが、CMOD 4.0 mm においても 1.2~2.4 kN の荷重が保持されており、靱性の大幅な改善が認められた。HWC3.4-PP では最大荷重が 4.2~4.6 kN であり、最大荷重もわずかに大きくなった。また、ポストピークにおいては、最大荷重以降急激に荷重が低下するが、CMOD が 0.2 mm よりも大きくなると、荷重が増加傾向になった。CMOD が 4.0 mm の時点の荷重は HWC3.4-PVA よりも大きな値を示した。HWC3.4-PE では、最大荷重 4.0~4.9 kN と、他の短繊維と同様、HWC3.4 よりも大きな傾向を示した。最大荷重以降は急激に荷重が低下したものの、HWC3.4 よりもポストピークにおいて荷重を保持し、CMOD が約 3.0 mm の時点で荷重がゼロとなった。

図-3.9 に短繊維を混入した HWC3.4 の破壊エネルギーを示す。なお、破壊エネルギーの計算にあたっては CMOD が 4.0 mm までの面積を求め、式(1)、(2)を用いて計算した。また、図中には普通コンクリート (N2.3) の破壊エネルギーをあわせて示している。

図より、短繊維を混入したコンクリートの破壊エネルギーはいずれも普通コンクリートのそれよりも大きくなった。HWC3.4 の破壊エネルギーと比較すると、HWC3.4-PVA で 21 倍、HWC3.4-PP で 19 倍、HWC3.4-PE

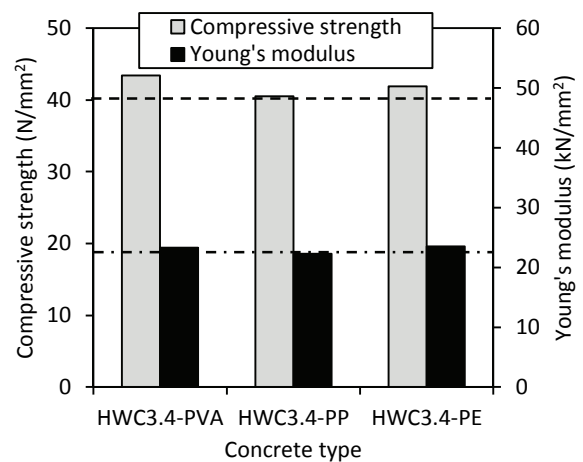


図-3.7 短繊維を混入した HWC3.4 の圧縮強度および静弾性係数

で 3 倍の破壊エネルギーの改善効果が認められた。

HWC3.4-PE の改善効果が他短繊維よりも低い理由として、PE 繊維の繊維長が短いこと、また繊維混入率が小さいことが挙げられる。これらの結果から、ひび割れ面における骨材架橋効果の小さな骨材、すなわち重晶石のように内部に劈開や隙間を有する骨材を用いたコンクリートに対して短繊維を混入することで、破壊エネルギーを大幅に改善できることが明らかとなった。

#### 4. 重量コンクリートの海洋環境における耐久性

本章では、重量コンクリートの海洋環境における耐久性について、暴露試験の結果を基に記載する。

##### 4.1 重量コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数

図-4.1 に劣化促進水槽におけるコンクリートの塩化物

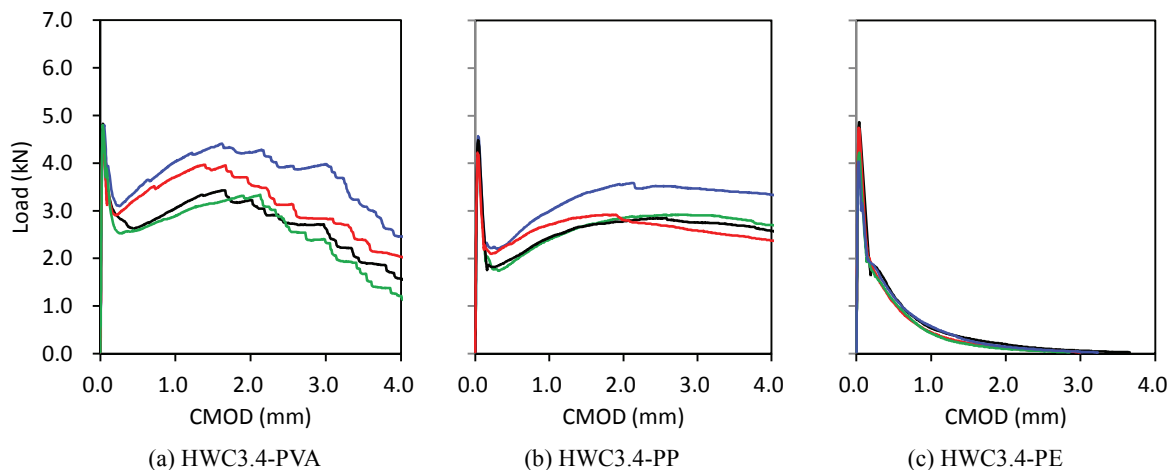


図-3.8 短繊維を混入した HWC3.4 の荷重-CMOD 曲線

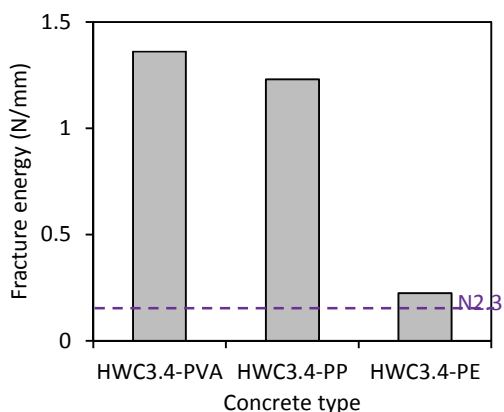


図-3.9 短繊維を混入した HWC3.4 の破壊エネルギー

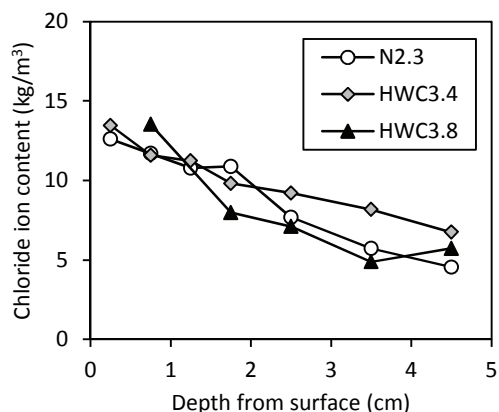


図-4.1 塩化物イオン濃度分布 (劣化促進水槽)

イオン濃度分布を示す。いずれの配合においても類似した塩化物イオン濃度分布を示していることがわかる。鉄筋位置に最も近いコンクリート表面からの深さ45 mmの塩化物イオン濃度に着目すると、N2.3が最も小さく、次いでHWC3.8、HWC3.4の順となっている。なお、いずれの配合も「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示される鉄筋腐食発生限界濃度 $C_{lim} = 2.0 \text{ kg/m}^3$ よりも大きい。

図-4.2に海水シャワー暴露場における塩化物イオン濃度分布を示す。海水シャワー暴露場においても、いずれの配合も同様の塩化物イオン濃度分布を示しているが、コンクリート表面からの深さ4.5 cmの塩化物イオン濃度はN2.3が最も小さく、次いでHWC3.4、HWC3.8である。HWC3.4およびHWC3.8は鉄筋位置における塩化物イオン濃度が $C_{lim} = 2.0 \text{ kg/m}^3$ よりも大きくなった。

表-4.1にコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の算出結果を示す。ここで、本研究ではセメントに早強ポルトランドセメントを用いているが、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの拡散係数を予測する式は提案されていない。しかし、早強ポルトランドセ

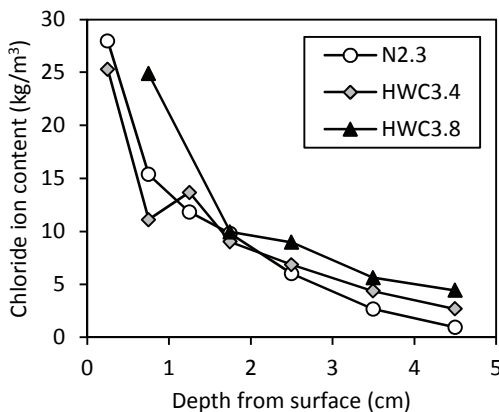


図-4.2 塩化物イオン濃度分布 (海水シャワー暴露場)

表-4.1 塩化物イオンに対する拡散係数 (単位:  $\text{cm}^2/\text{年}$ )

	劣化促進水槽	海水シャワー暴露場
N2.3	7.25	1.01
HWC3.4	14.92	1.67
HWC3.8	5.68	1.83

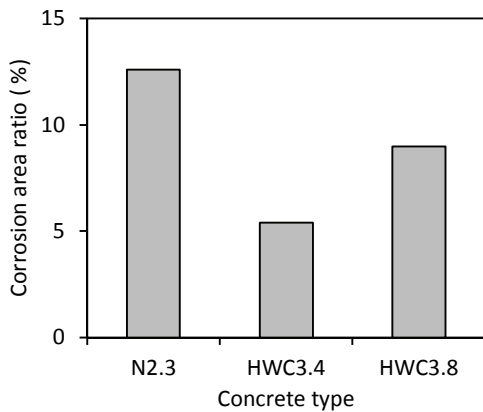


図-4.3 コンクリートに埋設した鉄筋の腐食面積率

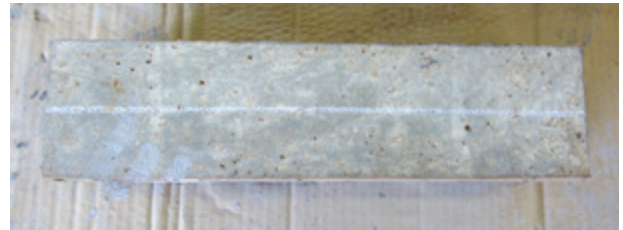
メントと普通ポルトランドセメントでは、塩分浸透深さに大差がないことが報告されている<sup>5)</sup>。そこで、参考のため、土木学会コンクリート標準示方書【設計編】を参考に、普通ポルトランドセメントを用いたW/C=50%のコンクリートの拡散係数を計算したところ、 $0.5 \text{ cm}^2/\text{年}$ であった。海水シャワー暴露場における拡散係数を比較すると、いずれの配合も計算値よりも大きな値となっている。また、劣化促進水槽では計算値の10倍以上大きくなった。

各配合における拡散係数の違いに着目すると、HWC3.4の拡散係数はN2.3のそれよりも1.6~2倍程度大きかった。HWC3.8の拡散係数は劣化促進水槽においてはN2.3よりも小さかったが、海水シャワー暴露場においてはN2.3の約1.8倍であった。HWC3.8とN2.3における拡散係数の大小について、暴露環境の違いによって変化する理由については十分に言及できないが、後述するように、劣化促進水槽ではHWC3.8のコンクリート表面に錆汁やひび割れが認められたことが影響している可能性も考えられる。

実環境である海水シャワー暴露場の結果から考察すると、重量コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数は普通コンクリートの2倍弱を見込むことが必要と判断できる。ただし、本研究で得られた結果は1.5年という比較的短期間の暴露試験から得られたものである。コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数は時間の経過とともに小さくなることが知られている<sup>6)</sup>。また、HWC3.8の場合、長期間の暴露ではコンクリート表面の劣化が拡散係数に及ぼす影響も変化する可能性もある。重量コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数について、今後も継続的な調査を行う予定である。

#### 4.2 コンクリート内部の鉄筋腐食性状

図-4.3に劣化促進水槽におけるコンクリートの内部に埋設した鉄筋の腐食面積率を示す。図より、鉄筋の腐食



(a) NC2.3, 劣化促進水槽



(b) HWC3.4, 劣化促進水槽



(c) HWC3.8, 劣化促進水槽



(d) HWC3.8, 海水シャワー暴露場



(e) HWC3.8, 海水循環水槽

図-4.4 コンクリートの表面状態

面積率について、3配合間において腐食面積率が5~13%程度と大差は認められなかった。このうち、HWC3.4が最も小さく、次いでHWC3.8、N2.3の順であった。

一方、海水シャワー暴露場に暴露したコンクリートについて、HWC3.4およびHWC3.8では埋設した鉄筋に腐食は確認されなかった。

これらの結果から、HWC3.4は塩化物イオンの拡散係数が普通コンクリートよりも1.6~2倍程度大きいにもかかわらず

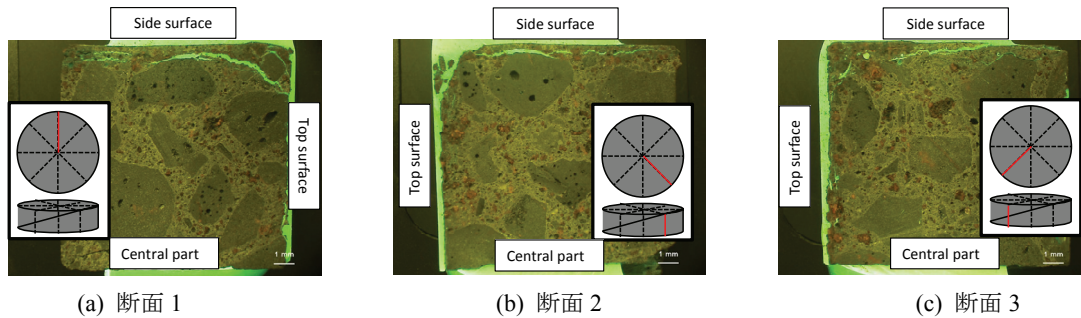


図-4.5 コンクリート円柱供試体の微細ひび割れ発生状況（HWC3.8，海水シャワー暴露場）

ならず、鉄筋腐食に対する抵抗性は比較的高いといえる。本論では、このメカニズムを明らかにすることはできなかったが、今後調査を継続的に進める予定である。HWC3.8について、普通コンクリートであるN2.3よりも鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が高いにも関わらず普通コンクリートよりも腐食面積率が小さかった。この理由として、人工重量骨材に起因する防食効果の可能性を指摘できる。例えば、鋼繊維補強コンクリートに関する既往の研究<sup>7)</sup>によれば、鋼繊維が犠牲陽極の役割を果たし、内部鉄筋の腐食が抑制されることが報告されている。したがって、多くの金属鉄を含有するHWC3.8においても、同様の現象が生じた可能性がある。

#### 4.3 重量コンクリートの劣化性状

図-4.4に暴露試験終了後のコンクリートの表面性状を示す。図より、N2.3およびHWC3.4のコンクリート表面にひび割れや析出物などは認められなかった。一方、HWC3.8については、コンクリート表面に錆汁が確認された。この錆汁はHWC3.8に含まれる人工重量骨材の腐食に起因するものと考えられる。後述するように、これらの人工重量骨材からの錆汁の生成はコンクリート表面の微細ひび割れ発生と関連している。

HWC3.8のコンクリート表面性状について、暴露試験条件の違いに着目すると、劣化促進水槽における発錆が顕著であり、人工重量骨材の腐食が促進されたものと推察される。また、海水シャワー暴露場では点状の錆汁が発生しているものの、海水循環水槽においては海水シャワー暴露場よりも錆汁が少ないのがわかる。この理由として、干満帯において酸素の供給量が少ないことが考えられる。

図-4.5に海水シャワー暴露場に暴露したHWC3.8における微細ひび割れの発生状況の代表的な事例を示す。なお、2章にて記載した通り、コンクリートの円柱供試体に蛍光塗料を含んだ低粘度エポキシ樹脂を含浸しているため、微細ひび割れ部とコンクリート周辺のエポキシ樹脂

が蛍光を示している。また切断面の錆汁（赤錆）は切断および保管の際に発生したものである。N2.3およびHWC3.4について、いずれの暴露試験条件においても、ひび割れは確認されなかった。図より、HWC3.8の供試体上面と側面表面付近において微細ひび割れが認められ、特に角部においてひび割れが多く発生している。暴露試験が1.5年経過した段階において、1～2 mm程度まで微細ひび割れが確認されたが、粗骨材である金属スラグ系骨材にひび割れが確認できないことから、コンクリートの微細ひび割れの発生原因は細骨材である酸化鉄粉の腐食であると判断できる。なお、海水循環水槽の干満環境に暴露したHWC3.8においては表面に微細ひび割れは発生していないが、酸化鉄粉の腐食が極めて表層で確認された。

以上より、暴露試験1.5年の結果に基づくと、重晶石を用いたコンクリート（HWC3.4）は普通コンクリート（N2.3）と同様、海洋環境に対して同程度の材料安定性を有していると考えられる。一方、人工重量骨材を用いたコンクリート（HWC3.8）は飛沫帯や飛来塩分の影響を受ける環境において人工重量骨材に起因する腐食の発生が懸念されるが、酸素供給量の少ない環境、すなわち干満帯や海中部においては適用できる可能性が考えられる。また、本研究の結果から、粗骨材である金属スラグ系骨材には腐食が確認されなかった。したがって、骨材腐食に伴うコンクリートの劣化を抑制するためには、コンクリートの単位容積質量は $3.4\text{t/m}^3$ 程度に低下するものの、細骨材に酸化鉄粉を使用せずに普通骨材を使用することも一つの方策である。ただし、本研究は1.5年間の暴露試験に基づいた結果であり、今後海洋環境における重量コンクリートの長期耐久性に関するデータを蓄積する予定である。

#### 5. 重量コンクリートを用いたRCはりの構造性能

本章では、重量コンクリートを用いたRCはりの構造性能について、載荷試験の結果を基に記載する。また、重

晶石を用いたコンクリートについて、短繊維補強によるRCはりのせん断耐力の改善効果を示す。

### 5.1 曲げ耐荷性状

#### (1) 荷重-変位およびひずみ関係

図-5.1 に荷重とスパン中央の変位の関係を示す。N2.3 では荷重 23 kN にてひび割れが発生し、剛性が低下した。その後、荷重 84 kN にて鉄筋が降伏し、荷重の伸びが緩やかになった。最終的には変位約 43 mm で最大荷重 93.8 kN を迎えて等曲げ区間の RC はりの上端においてコンクリートが圧壊して荷重が低下した。圧壊時のコンクリートひずみは 3315  $\mu$  であった。HWC3.4 では、荷重 13kN にてひび割れが発生した。また、ひび割れ発生前後の曲げ剛性はともに N2.3 よりも若干小さかった。その後荷重 80kN にて鉄筋が降伏し、荷重の伸びが緩やかになった。最終的には変位約 36 mm で最大荷重 88.9 kN を迎え、等曲げ区間の RC はりの上端においてコンクリートが圧壊して荷重が低下した。圧壊時のコンクリートひずみは 2748  $\mu$  であった。HWC3.8 では、荷重 21 kN にてひび割れが発生した。ひび割れ発生前後の曲げ剛性は N2.3 とほ

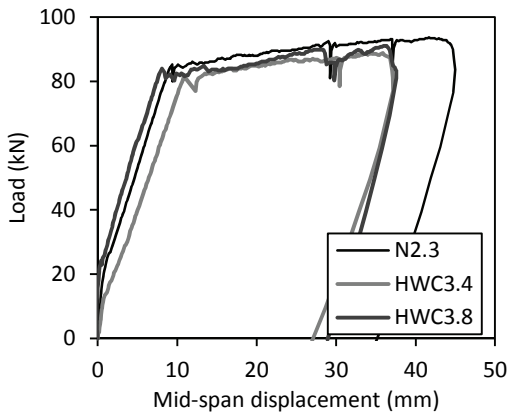


図-5.1 荷重-中央変位関係 (曲げ破壊型)

ぼ同等であった。その後荷重 84 kN にて鉄筋が降伏し、荷重の伸びが緩やかになった。最終的には変位約 27 mm において等曲げ区間の RC はりの上端においてコンクリートが圧壊して荷重が低下した。最大荷重は 89.8 kN であり、圧壊時のコンクリートひずみは 2589  $\mu$  であった。

本研究で対象とした RC はりの曲げ耐力について計算した結果、計算値は 79.6~79.7 kN であり、実験値はほぼ同じ値を示した。このことから、重量コンクリートの曲げ耐力についても、普通コンクリートと同様の手法で計算できるといえる。また、重量コンクリートを使用したコンクリートでは、最大荷重時の変位が小さくなる傾向が認められた。

#### (2) ひび割れ発生状況

図-5.2 に荷重試験終了後における曲げ破壊型 RC はりのひび割れ発生状況を示す。N2.3 に着目すると、最も曲げモーメントの大きな等曲げ区間において多数のひび割れが発生し、またせん断スパン中央付近までひび割れが発生している状況が確認できる。HWC3.4 のひび割れ状況も N2.3 と同様の傾向を示した。HWC3.8 のひび割れ本

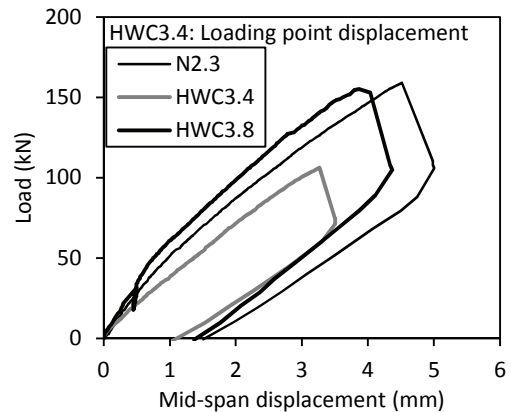


図-5.3 荷重-中央変位関係 (せん断破壊型, a/d=3.4)

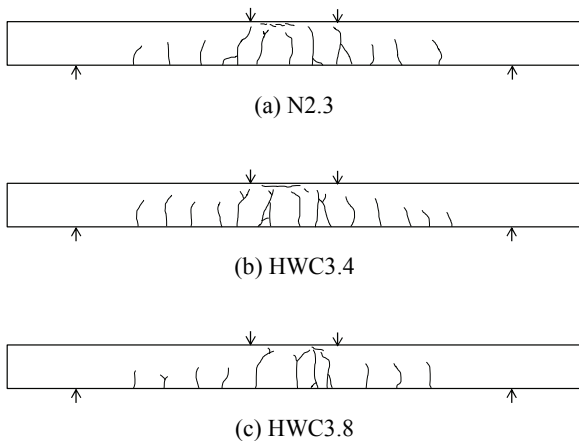


図-5.2 ひび割れ図 (曲げ破壊型)

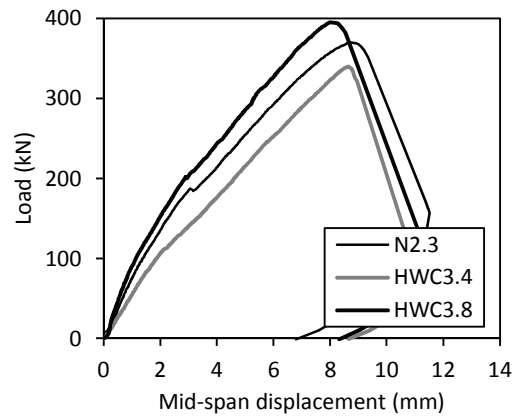


図-5.4 荷重-鉄筋ひずみ関係 (せん断破壊型, a/d=2.0)

数は N2.3 よりも若干少なかったものの、ひび割れ分散性に大きな差異はないと判断された。早川らの検討<sup>3)</sup>においても、重量コンクリートの付着性状は普通コンクリートとほぼ同等との報告がある。また、本論ではデータを示していないが、配合間における載荷試験中の鉄筋ひずみ発生挙動の差はほぼ同様の傾向を示した。

これらの結果から、重量コンクリートひび割れ分散性や付着性状は普通コンクリートとほぼ同等と考えられる。

## 5.2 せん断耐荷性状

### (1) 荷重-変位関係

図-5.3 に  $a/d=3.4$  のせん断破壊型 RC はりの荷重-スパン中央変位関係を示す。なお、HWC3.4 の中央変位は変位計の誤作動により適切に計測できていなかったため、載荷点変位を用いている。N2.3 では荷重 159kN、中央変位 4.5 mm にて斜めひび割れが発生し、その後急激に荷重が低下した。破壊形態は斜め引張破壊であった。HWC3.4 では荷重 106 kN、載荷点変位 3.3 mm で斜めひび割れが発生し、急激に荷重が低下した。破壊形態は N2.3 と同様であった。HWC3.8 では荷重 155 kN、中央変位 3.9 mm にて斜めひび割れの発生とともに急激に荷重が低下し、破壊形態は N2.3 と同様であった。いずれの試験体も、引張鉄筋、圧縮鉄筋ともに降伏していなかった。

図-5.4 に  $a/d=2.0$  のせん断破壊型 RC はりの荷重-中央変位関係を示す。N2.3 では、荷重 185 kN、中央変位 3.0 mm にて斜めひび割れが発生した。しかし、荷重の低下は認められず、その後も荷重が増加した。最大荷重は 370 kN であり、その時の中央変位は 8.7 mm であった。HWC3.4 では、荷重 113 kN、中央変位 2.2 mm にて斜めひび割れが発生したが、HWC3.4 においても斜めひび割れ発生後の荷重の低下は認められず、その後も荷重が増加した。最大荷重は 340 kN であり、最大荷重時の中央変位は 8.6 mm であった。HWC3.8 では、荷重 195 kN、中央変位 2.8 mm にて斜めひび割れが発生した。最大荷重は 395 kN、最大荷重時の中央変位は 8.0 mm であった。いずれの試験体においても引張鉄筋、圧縮鉄筋ともに降伏していなかった。また、 $a/d=3.4$  の場合と比較して配合間における最大荷重の差は小さかったが、HWC3.4 のせん断ひび割れ発生荷重は N2.3 および HWC3.8 よりも約 60% 小さかった。

### (2) ひび割れ発生状況

図-5.5 に載荷試験終了後におけるせん断破壊型 RC はりのひび割れ発生状況を示す。図より、載荷点から支点を結ぶようにせん断ひび割れが発生している状況が確認される。それぞれの  $a/d$  において、配合の違いによって

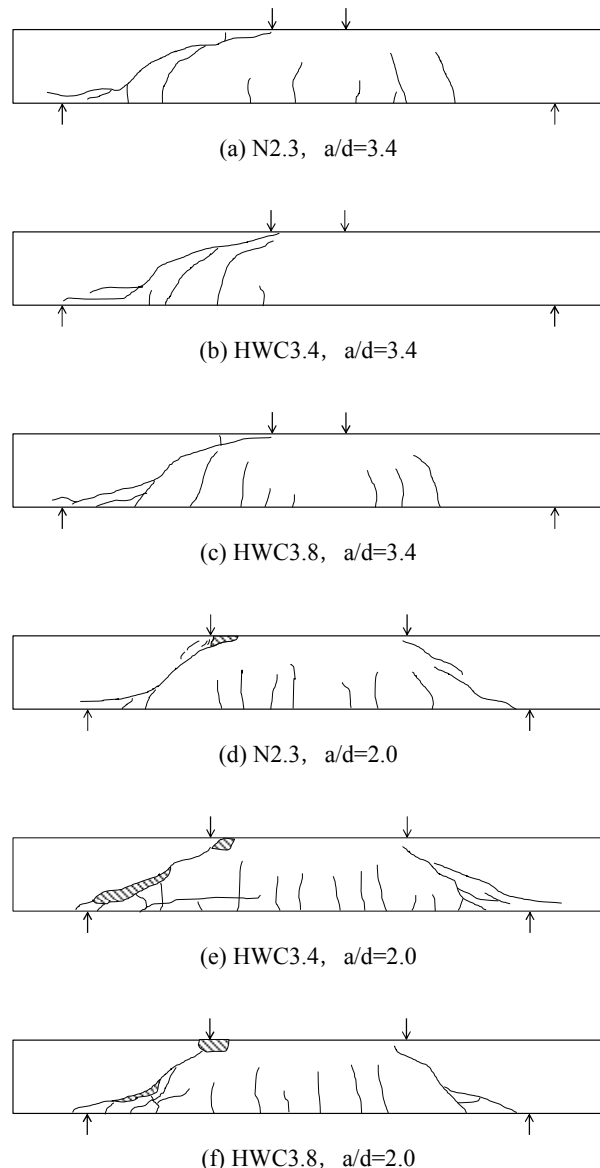


図-5.5 ひび割れ図（せん断破壊型）

表-5.1 最大荷重の実験値と計算値（せん断破壊型）

配合	a/d	計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/計算値
N2.3	3.4	156	159	1.02
HWC3.4		153	106	0.69
HWC3.8		161	155	0.96
N2.3	2.0	364	370	1.02
HWC3.4		351	340	0.97
HWC3.8		387	395	1.02

RC に発生したひび割れ本数の違いは若干認められるものの、せん断ひび割れの形状についてはほぼ同様であることがわかる。また、 $a/d=2.0$  では、載荷板付近においてコンクリートの剥離が生じた。



(3) 実験値と計算値の比較

表-5.1 に実験値と計算値の比較結果を示す。なお、せん断耐力の計算にあたっては、 $a/d=3.4$  の場合には式(1)<sup>8)</sup> を、 $a/d=2.0$  の場合には式(2)<sup>9)</sup> を用い、材料物性については表-2.4、図-3.1 の値を用いた。

$$V_c = 0.20f'_c{}^{1/3}p_w{}^{1/3}d^{-1/4}\left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right)b_wd \quad (1)$$

$$V_c = \frac{0.24f'_c{}^{2/3}(1+\sqrt{100p_w})\cdot\left(1+\frac{3.33r}{a}\right)b_wd}{\left(1+\left(\frac{a}{d}\right)^2\right)} \quad (2)$$

ここに、

$p_w$  : 引張鉄筋比

$d$  : 有効高さ (mm)

$b_w$  : はりの幅 (mm)

$r$  : 載荷板の幅 (mm)

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$b_w$  : 試験体の幅 (mm)

注目すべき点として、 $a/d=3.4$  における HWC3.4 の実験値が計算値の 69% となっており、HWC3.4 のせん断耐力の低下は  $a/d$  が大きい場合に顕著である。また、上述した通り、HWC3.4 のせん断ひび割れ発生荷重は N2.3 および HWC3.8 よりも約 60% 小さかった。これらの原因として、3 章で示した通り、重晶石中の劈開の存在や粒子間結合の脆弱さに伴う破壊エネルギーの低下が考えられる。ひび割れ進展過程で形成される破壊進行領域において、重晶石による骨材架橋効果は普通骨材よりも期待することができないと考えられる。

上記の機構を検証するため、載荷試験終了後の RC はりの切断面において「割れ」を示した粗骨材の割合を図-5.6 に示す。図より、HWC3.4 の粗骨材には割れが多く認められ、N2.3 や HWC3.8 の約 3 倍である。これらの結果は、破壊エネルギー試験終了後のコンクリートにおいて、HWC3.4 の骨材損傷状態として「割れ」が卓越した結果(図-3.5)と整合している。したがって、HWC3.4 を用いた RC はりでは、重晶石の岩石学的特徴である劈開の存在や粒子間結合の脆弱さに起因して破壊エネルギーが低下し、それに伴って RC はりのせん断ひび割れ発生荷重が低下したといえる。また、その傾向は、 $a/d$  が大きな範囲において顕著になったと考えられる。

5.3 短繊維混入による RC はりのせん断耐力改善効果

図-5.7 に短繊維を混入した HWC3.4 の荷重-スパン中央変位関係を示す。HWC3.4-PVA では最大荷重が 175kN となり、短繊維無混入の HWC3.4 の約 1.6 倍のせん断耐力の向上効果が得られた。また、最大荷重後においても急激に耐荷力が低下することなく、徐々にせん断ひび割

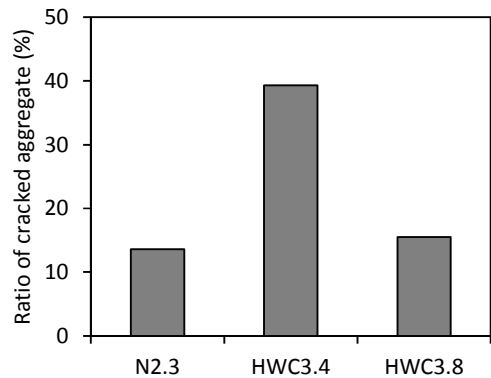


図-5.6 ひび割れ近傍の粗骨材のひび割れ割合

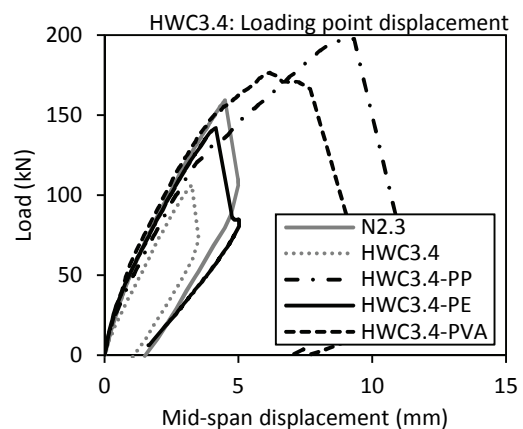


図-5.7 荷重-中央変位関係 (せん断破壊型,  $a/d=3.4$ )

れが開口し、中央変位約 7 mm で荷重が低下した。HWC3.4-PP では最大荷重 196 kN を示し、短繊維を混入した重量コンクリートの中で最も高い値となった。HWC3.4-PP の破壊エネルギーは HWC3.4-PVA のそれよりも若干小さい(図-3.9)が、図-3.8 で示した通り、PP 短繊維の方が PVA 短繊維よりもピーク以降の荷重低下が小さい。このような短繊維の架橋効果の差が RC はりのせん断耐力改善効果に影響したものと思われる。HWC3.4-PE では最大荷重 142 kN であり、短繊維を混入した系の中では最も荷重が小さいものの、HWC3.4 よりも高い荷重を示した。ただし、普通コンクリートよりも高いせん断耐力は得られなかった。この原因として、PE 繊維の繊維長が短いこと、また繊維混入率が小さいことが挙げられる。

$a/d=3.4$  において、PP 短繊維や PVA 短繊維を混入した HWC3.4 のせん断耐力は無混入の計算値よりも高い値を示した。これらの結果から、ひび割れ面における骨材架橋効果の弱い骨材、すなわち重晶石のように内部に劈開や隙間を有する骨材を用いたコンクリートに対して PP

短繊維やPVA短繊維を混入することで、せん断耐力を普通コンクリートと同等以上のレベルにまで改善できることが示された。

## 6. 重量コンクリートの港湾構造物への適用性に関する考察

これまでの結果から、重量コンクリートを港湾構造物に適用する上で、幾つかの検討課題が得られた。

一つ目は、海洋環境において材料安定性の高い重晶石を用いたコンクリートでは力学特性を改善する必要があることである。重晶石を用いたコンクリートにおいて力学特性が改善できれば、港湾構造物への適用性は高いものと思われる。本研究において短繊維を混入することによって力学特性の改善が可能であることを示したが、短繊維混入は施工性および経済性の観点から不利となる場合がある。したがって、重晶石を用いたコンクリートを適用する上では、十分な力学特性を確保しつつ、経済性および施工性の観点から短繊維の適正混入率を明らかにする必要がある。また、力学特性を改善せずに重晶石を用いたコンクリートを適用する場合、作用せん断力が小さい部材に対して適用することが望ましい。

二つ目は、人工重量骨材を用いたコンクリートの海洋環境における耐久性の問題である。人工重量骨材を用いたコンクリートの力学特性は普通コンクリートと同等であるものの、人工重量骨材には金属鉄などが含まれ、酸化鉄粉の腐食がコンクリート表面に微細ひび割れなどを発生させる。したがって、コンクリートの表面が徐々に脆弱化することとなる。また、コンクリート内部において微細ひび割れが発生することにより、コンクリートの物質透過性も高まる可能性が指摘できる。これらの対策として、上述した通り、コンクリートの単位容積質量が3.4 t/m<sup>3</sup>程度に低下するものの、細骨材に酸化鉄粉を使用せずに普通骨材を使用することも考えられる。また、酸化鉄粉を用いた場合であっても、鉄筋および酸化鉄粉の腐食が緩慢な海中部や干満帯に位置する構造物もしくは部材、例えば根固めブロックなどには適用可能性が高いと推察される。また、鉄筋腐食に関しては、金属鉄が犠牲陽極の役割を果たす可能性が示唆されたため、このような効果を積極的に活用することが望まれる。この点について、今後も継続的な検討を進める予定である。

## 7. 結言

本論は、新規の高密度骨材である重晶石や人工重量骨材を用いた重量コンクリートを作製し、その力学特性および耐久性について検討を行った。また、重量コンクリートを用いたRCはりの載荷試験から、重量コンクリートを用いたRCはりの構造性能について検討を行った。以下に本論により得られた知見を示す。

- (1) 人工重量骨材を用いたコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は普通コンクリートと同等以上であり、破壊エネルギーは20%強小さい。また、重晶石を用いたコンクリートの圧縮強度は普通コンクリートとほぼ同等であり、破壊エネルギーは60%弱小さくなる。
- (2) 海洋環境への1.5年間の暴露試験の結果、重量コンクリートは普通コンクリートの2倍弱の塩化物イオンの拡散係数を有する。また、促進試験の結果、重量コンクリート中の鉄筋腐食面積率は普通コンクリートよりも小さい。
- (3) 飛沫帯環境において、金属鉄を多く含む人工重量骨材を用いたコンクリートは酸化鉄粉の腐食により表面劣化が生じる。ただし、酸素供給量の小さい干満環境においては、表面の錆汁が減少する。
- (4) 重量コンクリートの曲げ耐力は普通コンクリートとほぼ同等であり、普通コンクリートと同様の手法で曲げ耐力を計算できる。また、重量コンクリートを用いたRCはりのひび割れ分散性は普通コンクリートと同等であるが、最大荷重時の変位は普通コンクリートのそれよりも小さくなる。
- (5) 人工重量骨材を用いたコンクリートのRCはりのせん断耐力は普通コンクリートとほぼ同等である。一方、重晶石を用いたコンクリートのRCはりのせん断ひび割れ発生荷重は普通コンクリートの60~70%である。
- (6) 重晶石のように内部に劈開や隙間を有する骨材では、その岩石学的特徴に起因して、破壊進行領域において骨材の架橋効果が低下し、コンクリートの破壊エネルギーが低下する。また、破壊エネルギーの低下に伴い、RCはりのせん断ひび割れ発生荷重が普通コンクリートのそれよりも小さくなる。
- (7) 重晶石を用いたコンクリートに対してPP短繊維やPVA短繊維を混入することで、重晶石を用いたコンクリートの破壊エネルギーやRCはりのせん断耐力を普通コンクリートと同等以上のレベルにまで改善できる。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（課題番号 24686052）の助成を受けて行ったものである。また、コンクリートの蛍光顕微鏡観察には、九州大学大学院建設材料システム工学研究室の機器を使用し、観察にあたっては山本大介技官にご協力をいただいた。ここに付記し、深く御礼申し上げる。

(2014年1月15日受付)

## 参考文献

- 1) 保坂綱鎮, 杉山彰徳, 肥後康秀, 高木亮一: 鉄鋼二次製品および重晶石を用いた重量コンクリートの破壊力学特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会 V 部門, pp. 843-844, 2012
- 2) 肥後康秀, 早川隆之, 高木亮一, 田中敏嗣: 重量コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験, 土木学会第 67 回年次学術講演会 V 部門, pp. 841-842, 2012
- 3) 早川隆之, 肥後康秀, 杉山彰徳: 重量コンクリートにおける鉄筋とコンクリートの付着性状に関する実験的検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会 V 部門, pp. 839-840, 2012
- 4) 橋高義典, 横室隆, 小川洋二, 井川秀樹: X 線透過デジタル画像によるコンクリートの X 線遮蔽性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1507-1512, 2013
- 5) 上村祐一郎, 小川彰一, 山田一夫, 小早川真: 鉱物組成の異なるセメントを用いたコンクリートの塩素浸透に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp. 825-830, 2002
- 6) Tang Luping & Joost Gulikers: On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete, Cement and concrete Research, Vol. 37, No. 4, pp.589-595, 2007
- 7) 松元淳一, 丸屋剛: 鋼繊維を用いた鉄筋コンクリートの塩害環境における耐久性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1013-1018, 2010
- 8) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, Vol. 372/V-5, pp. 167-176, 1986
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 2012

港湾空港技術研究所資料 No.1287

2014.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2014) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています