

論文 高性能軽量コンクリートの材料分離特性と海洋環境下における長期耐久性の評価

川端 雄一郎^{*1}・岩波 光保^{*2}・加藤 絵万^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨：本研究では、高性能軽量コンクリートの実施工レベルにおける材料分離特性および海洋環境下における長期耐久性に着目した検討を行った。高性能軽量コンクリートの材料分離特性は目標単位容積質量によって異なる傾向を示した。また、高性能軽量コンクリートの圧縮強度は打設高さに伴って変化する単位容積質量に応じて変化したものの、静弾性係数および塩化物イオンの見かけの拡散係数はほぼ一定の値を示した。長期曝露後の鉄筋コンクリート版試験体の曲げ載荷試験の結果、最大荷重はほとんど変わらないものの、最大荷重時における変位が短期材齢のものよりも小さくなっており変形性が低下することが明らかになった。

キーワード：高性能軽量コンクリート、材料分離、長期耐久性、海洋環境、構造性能

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年、過酷な自然環境や厳しい設計条件を克服するため、港湾コンクリート構造物の大型化が進み、複雑な設計・施工が強いられているケースが増えている。

コスト削減の方策の一つとして、軽量コンクリートの使用による自重低減による構造物全体の軽量化が挙げられる¹⁾。例えば、港湾コンクリート構造物の代表的な構造形式であるケーソンでは、一般に中詰め材料を含めて所定の重量を確保することで、構造物全体の安定性を確保している。しかしながら、近年の大型船の増加等に伴ってケーソン自体の大型化が進み、ケーソン自体の自重が大きくなり過ぎているという問題点があり、ケーソンヤード、フローティングドッグ、フローティングクレーン等の能力上の制限によって極めて複雑な施工手順を強いられる事例が増えつつある。他にも、栈橋上部工を軽量化することで地震時における慣性力を低減できるため、下部工構造のスリム化が可能となるなど、軽量コンクリートの適用は港湾コンクリート構造物の設計・施工の合理化に有効な手段の一つといえる^{2),3)}。

軽量コンクリートの材料となる軽量骨材に着目すると、近年では、骨材内部の空隙を独立気泡とした高性能人工軽量骨材が開発されている²⁾。この骨材は従来のものよりも密度が小さく、骨材強度が大きいだけでなく、骨材の吸水率が小さいため、優れた耐久性や施工性を可能にしている。

以上のような背景の下、筆者らはこれまでに、高性能人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート(以下、高性能軽量コンクリート)の港湾コンクリート構造物への適用に

ついて検討を行い、従来の軽量コンクリートにおける懸念事項を大幅に改善できることを実証し、港湾コンクリート構造物に十分適用可能であることを示している³⁾。

高性能軽量コンクリートに関する研究は、筆者ら以外にも様々な研究者によって行われており、多くの知見が蓄積されている。しかしながら、これらの研究のほとんどは室内試験レベルにおける検討であり、試験体寸法が小さいものがほとんどである。実構造物レベルのスケールでは、断面寸法が大きいため、材料分離が特に問題となる。しかしながら、実施工レベルにおける高性能軽量コンクリートの材料分離特性については十分な知見がない。

また、港湾構造物では、鋼材の腐食に関する塩化物イオンの浸透が多く、鉄筋コンクリートに対して過酷な環境である。今後、高性能軽量コンクリートについて確度の高い将来予測や性能評価を行うためには、海洋環境における長期性状を適切に評価する必要がある。

1.2 研究の目的

本研究では、後述する2点に着目した検討を行うこととする。1点目は、高性能軽量コンクリートの材料分離特性に着目し、実施工レベルで製作した試験体の材料分離特性の把握、また材料分離が軽量コンクリートの各種性能に及ぼす影響や鉄筋コンクリートとしての耐荷性能に及ぼす影響について評価することである。2点目は、港湾構造物への高性能軽量コンクリートの適用を念頭におき、長期間海洋環境に曝露した高性能軽量コンクリートの長期性状について評価することである。このとき、高性能軽量コンクリートの長期性状について、材料分離特性との関係性について考察することとした。

*1 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造・材料研究チーム 研究官 博士(工学) (正会員)

*2 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造・材料研究チームリーダー 博士(工学) (正会員)

*3 (独)港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 主任研究官 博士(工学) (正会員)

*4 (独)港湾空港技術研究所 研究主監, LCM 研究センター長 工博 (正会員)

2. 検討概要

2.1 高性能軽量コンクリート

(1) 使用材料および配合

本研究では、目標単位容積質量を 1.2, 1.5, 1.8t/m³ とした高性能軽量コンクリートを作製した。以下では、それぞれ MP1.2, MP1.5, MP1.8 と称する。表-1 に本研究で使用した高性能軽量コンクリートの示方配合を示す。いずれのコンクリートにおいても、粗骨材全量に軽量骨材を使用した。細骨材には、目標単位容積質量に応じ、天然山砂のみ、天然山砂と軽量骨材の混合、軽量骨材のみを使用した。事前に試験練りを行った結果、MP1.5 では、天然山砂と人工軽量細骨材の組合せにおいて細骨材全体としての粒度が粗くなり、コンクリートの流動性が低下する傾向が認められたため、細骨材の微粒分の補填を目的として石灰石微粉末を添加した。

人工軽量細骨材には、高性能人工軽量細骨材 S1(絶乾密度 0.92g/cm³, 24h 吸水率 6.2%)を使用した。また、MP1.2 には従来型人工軽量骨材 S2(絶乾密度 1.20g/cm³, 24h 吸水率 9.0%)、高強度中空セラミックス S3(絶乾密度 0.70g/cm³, 吸水性ほとんど無し)も使用した。さらに、天然骨材として山砂 S(絶乾密度 2.60g/cm³, 24h 吸水率 2.54%)を使用した。粗骨材には異なる 2 つの高性能人工軽量骨材 G1(絶乾密度 0.88g/cm³, 24h 吸水率 3.6%)および G2(絶乾密度 1.17g/cm³, 24h 吸水率 2.8%)を使用した。

(2) 試験体の諸元

本研究で使用した版試験体の寸法は、厚さ 0.7m×幅 1.5m×長さ 5.64m とした。試験体の形状寸法および配筋

を図-1 に示す。主鉄筋として D19 を圧縮側と引張側に各 14 本、100mm ピッチで配置した。主鉄筋比は 0.46%である。また、せん断補強鉄筋として D13 を 200mm ピッチで配置した。せん断補強鉄筋比は 0.084%である。なお、鉄筋のかぶりは 100mm とした。鉄筋には SD345 を使用した。表-2 に鋼材の力学特性を示す。

(3) 打設方法

MP1.5, MP1.8 については、ポンプ圧送によるフローロス を 50mm 程度と予想し、圧送前の目標スランプリューを 550mm と設定した。圧送には、ブーム地上高 30m, ピストン前面圧 6.25MPa, 輸送管径 150mm のコンクリートポンプ車を用いた。MP1.2 については、細骨材全量に軽量骨材を使用したためポンプ圧送は不可能であったので、バケットで打設した。

いずれの試験体も、1.5m 方向に 2 層に分けて打設した。各層の締固めは、MP1.5, MP1.8 では 500mm 間隔、約 10 秒/箇所、MP1.2 では 400mm 間隔、約 10 秒/箇所としてパイプレータにより行った。

2.2 試験概要

(1) 曝露試験

作製した軽量コンクリート版について約 8 年間海洋環境下で曝露試験を行った。曝露場所は新潟県直江津港である。図-2 に試験体の曝露状況を示す。MP1.2 は海中中部、MP1.5 は干満帯、MP1.8 は海上部に位置している。

(2) 曲げ載荷試験

曝露試験を終了した試験体(以下、長期曝露試験体)について、曲げ載荷試験を行った。試験体を二辺単純支持し油圧ジャッキにより静的に曲げ荷重を与えた。せん断

表-1 コンクリートの示方配合

	目標単位容積質量 (t/m ³)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)									SP (C×%)
			水	セメント	石灰石微粉末	細骨材				粗骨材		
						S1	S2	S3	S	G1	G2	
MP1.8	1.80	42.5	170	400	0	0	0	0	870	0	360	1.7
MP1.5	1.50	40.0	165	413	46	167	0	0	377	0	364	0.8
MP1.2	1.20	35.0	165	471	0	159	115	47	0	264	0	0.85

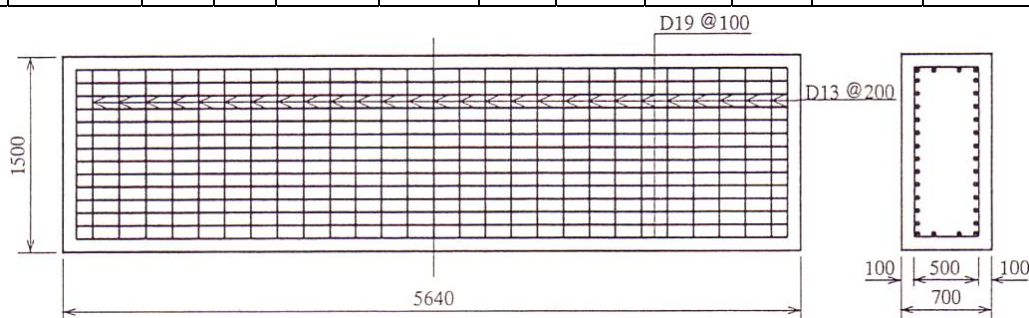


図-1 試験体の形状寸法および配筋(単位:mm)

スパンを 2400mm、荷重点間隔を 500mm とした。荷重点では直径 50mm の丸鋼により線荷重を試験体に与えた。荷重が 300kN および 800kN に達した時点で、除荷・再荷重を行った。試験体上面に圧壊が生じて荷重が上がらなくなった時点で荷重を終了した。なお、比較のため同一試験体に対して、試験装置や荷重装置等の条件を同一として、材齢 49～58 日(短期材齢試験体、曝露試験無し)で曲げ荷重試験を行っている¹⁾。

(3) コア採取によるコンクリートの各種性状の検討

高性能軽量コンクリートの実施レベルにおける材料分離特性を評価するため、打設面からの距離をパラメータとした検討を行った。曲げ荷重試験を終了した試験体について、荷重の影響の無いところから打設面からの距離 0～0.3m(H)、0.3～0.75m(MH)、0.75～1.2m(ML)、1.2～1.5(L)の位置でそれぞれφ75mm(圧縮強度、静弾性係数、超音波伝搬速度、粗骨材面積率、単位容積質量)およびφ100mm(塩化物イオン濃度)のコアを採取した。なお、いずれの試験体についても中性化は認められなかった。採取したコアについて、両端のカット・研磨を行い、h/d が 1.9～2.1 となるようコアの高さを調整した。約 1 日間減圧下において吸水させた後、1 週間水中に静置した。その後コアの質量、直径、高さを測定し、単位容積質量を求めた。超音波伝搬速度の測定は、PUNDIT を用いてコンクリート表面の余剰水を除去した後に行った。また、粗骨材面積率の測定は、コア側面に存在する粗骨材の分布を透明なシートを用いて写し取って面積を算出し、コア側面の全面積で除すことで求めた。圧縮強度および静弾性係数の測定は JIS A 1107 に準拠して行った。

3. 高性能軽量コンクリートの材料分離特性の評価

表-3 にそれぞれのコンクリートの打設面からの距離における各種測定値を示す。表中の値はいずれも試験体 3 本の平均値である。なお、打設中における目視では、顕著な材料分離は認められなかった。

MP1.8 に着目すると、単位容積質量および粗骨材面積率ともに打設面近傍の H を除いて概ね同様の値となっており、打設面近傍 H における局所的な材料分離が顕著である。一方、MP1.5 と MP1.2 に着目すると、打設面からの距離が大きくなるにしたがって単位容積質量が大きくなる傾向が認められ、MP1.8 と異なる傾向を示した。また、MP1.5 では、粗骨材面積率が大きく変化していることが分かる。MP1.2 では粗骨材面積率に明確な傾向は認められなかったが、超音波伝搬速度は単位容積質量と同様の傾向を示している。

ここで、H～L の単位容積質量の平均値を求め、それぞれの打設高さにおいて平均値からの変化率を求めた。図-3 に打設高さ単位容積質量の変化率の関係を示す。

表-2 鋼材の力学的特性

	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
主鉄筋	D19	385	558	22
せん断補強鉄筋	D13	387	581	22

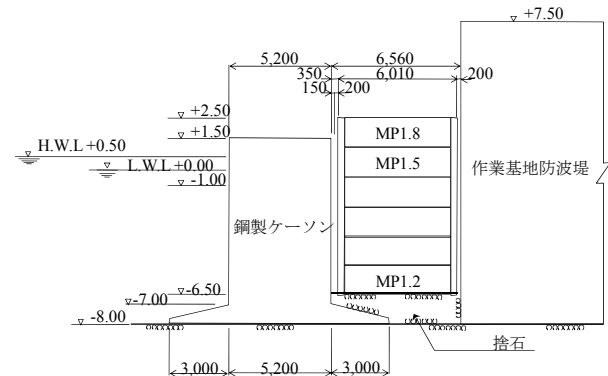


図-2 試験体の曝露状況

表-3 打設面からの距離における各種測定値

		単位容積質量 (t/m ³)	粗骨材面積率 (%)	超音波伝搬速度 (km/s)
MP1.8	H	1.86	43.41	4.28
	MH	1.91	33.69	4.30
	ML	1.92	36.24	4.28
	L	1.92	32.77	4.29
MP1.5	H	1.62	36.57	3.98
	MH	1.63	40.48	4.00
	ML	1.65	35.36	4.03
	L	1.68	28.16	4.06
MP1.2	H	1.31	36.20	3.71
	MH	1.31	39.09	3.74
	ML	1.33	35.97	3.74
	L	1.35	35.20	3.78

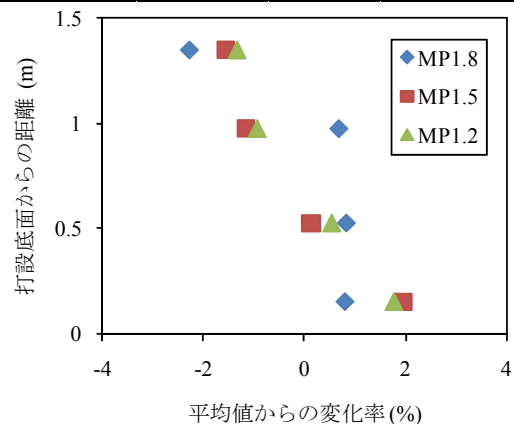


図-3 打設高さ単位容積質量の変化率の関係

上述したように、MP1.8についてはHのみにおいて材料分離が顕著であり、MP1.5およびMP1.2は打設高さからの距離に応じて変化している傾向が認められる。

4. 高性能軽量コンクリートの長期性状の評価と材料分離特性との関係性

(1) 圧縮強度および静弾性係数

表-4 にそれぞれのコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を示す。強度特性に着目すると、海洋環境下に約8年間曝露した試験体はいずれも材齢28日より大きくなっている。しかしながら、強度の伸び率は単位容積質量が大きいほど顕著となっている。単位容積質量の小さな軽量コンクリートの圧縮強度は骨材強度に大きく依存するため、低W/C化してペースト強度を高めても長期的な強度増進は望めないことが分かる。

打設高さ方向に着目すると、MP1.8では、L~MHでは同程度の圧縮強度を示したものの、最も打設面に近いHでは急激に低下した。この傾向は単位容積質量および粗骨材面積率と同様の傾向であり、打設面近傍における圧縮強度の低下は軽量粗骨材の浮上によるものといえる。一方、MP1.8と同じ打設方法のMP1.5、バケット打設のMP1.2では打設面からの距離が小さくなるに従って圧縮強度が小さくなり、MP1.8とは異なる材料分離の傾向を示した。表-3 に示す目標単位容積質量の傾向と比較すると、単位容積質量の増加に伴って強度が大きくなる傾向が認められる。

静弾性係数に着目すると、それぞれの要因では打設高さとは良好な相関関係は認められなかった。建築工事標準仕様書・同解説⁴⁾では、静弾性係数は単位容積質量の1.5乗もしくは2乗に比例する式が示されている。表-3 に示すように、本研究で用いた高性能軽量コンクリートでは、打設高さ方向における単位容積質量の変化は最大で0.06t/m³と小さい。よって、静弾性係数にも大きな変化は認められず、ほぼ一定の値を示したものと考えられる。

(2) 塩化物イオンの浸透性状

表-5 に各打設高さにおける塩化物イオンの見かけの拡散係数 D_{aps} および表面塩化物イオン濃度 C_0 を示す。また、比較として表-6 に土木学会コンクリート標準示方書式により求めた D_k および短期材齢において実施した電気泳動試験より得られた実効拡散係数⁵⁾を見かけの拡散係数に換算した値 D_{ae} を示す。それぞれのコンクリートの D_{aps} の違いについては、曝露条件が異なっていたために純粋な比較ができないものの、いずれも示方書式の D_k と比較すると非常に小さな値であり、高性能軽量コンクリートが非常に高い塩化物イオンの浸透抵抗性を有しているといえる。表-6 に示した短期材齢における電気泳動試験から得られた D_{ae} を参考にすると、MP1.2の D_{ae}

表-4 圧縮強度および静弾性係数

		圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
		曝露無		曝露有	
		7日	28日	8年	
MP1.8	H	27.2	42.9	50.8	22.9
	MH			59.3	25.0
	ML			60.5	24.2
	L			58.9	23.8
MP1.5	H	33.4	41.7	48.4	20.1
	MH			52.0	18.7
	ML			49.6	18.7
	L			57.8	20.0
MP1.2	H	31.7	31.8	35.4	13.6
	MH			37.4	13.5
	ML			40.5	13.9
	L			40.2	14.4

表-5 塩化物イオンの拡散係数 D_{aps}

および表面塩化物イオン濃度 C_0 。

		長期曝露試験	
		D_{aps} (cm ² /year)	C_0 (kg/m ³)
MP1.8	H	0.123	22.8
MP1.5	H	0.223	33.2
MP1.2	H	0.065	19.9
	MH	0.075	19.3
	ML	0.077	20.9
	L	0.064	30.1

表-6 示方書式、短期材齢の電気泳動試験結果

	示方書式	電気泳動試験 (円柱試験体、短期材齢)
	D_k (cm ² /year)	D_{ae} (cm ² /year)
MP1.8	0.717	0.133
MP1.5	0.570	0.144
MP1.2	0.349	0.063

表-7 試験体の主要な荷重の実験値(単位: kN)

	MP1.2		MP1.5		MP1.8	
	短期	長期	短期	長期	短期	長期
ひび割れ発生荷重	190	-	260	-	230	-
降伏荷重	730	770	730	760	740	780

が他のものよりも 1/2 以下の小さな値になっていることが分かる。これは、W/C を低下させたことに起因するものと考えられる。また、MP1.8H および MP1.5H の D_{aps} が他のものよりも大きくなった原因のもう一つは、海上部および干満帯への曝露による乾湿繰返しの影響によるものと考えられる。

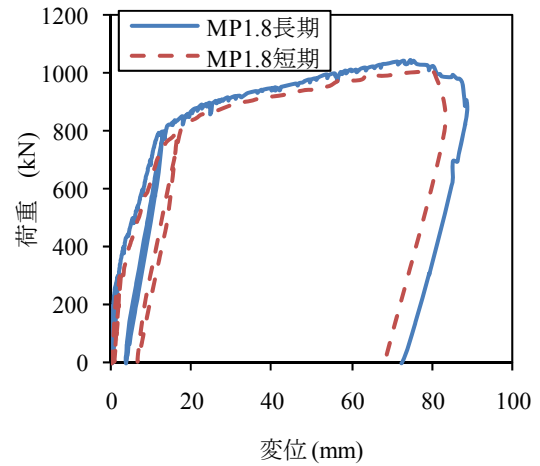
MP1.2 で材料分離の影響について比較すると、表面塩化物イオン濃度 C_0 は打設面からの距離が小さくなるに従って小さくなる傾向を示したものの D_{aps} は打設高さ方向に対してほぼ一定の値を示し、材料分離の影響をほとんど受けていないことが分かった。これは、以下のように考えられる。打設面付近における材料分離に伴う粗骨材量の増加は塩化物イオンの浸透経路となるペースト部の減少に寄与するものの、最も粗な空隙構造となる骨材-ペースト界面量が増加する。しかしながら、本研究が対象とした高性能軽量コンクリートでは、比較的吸水率の高い人工軽量細骨材に含まれる水分がもたらす自己養生効果により骨材-ペースト界面が緻密化し⁶⁾、塩化物イオンの浸透が抑制されたものと考えられる。

3.3 高性能軽量コンクリート版の長期性状の評価と材料分離との関係性

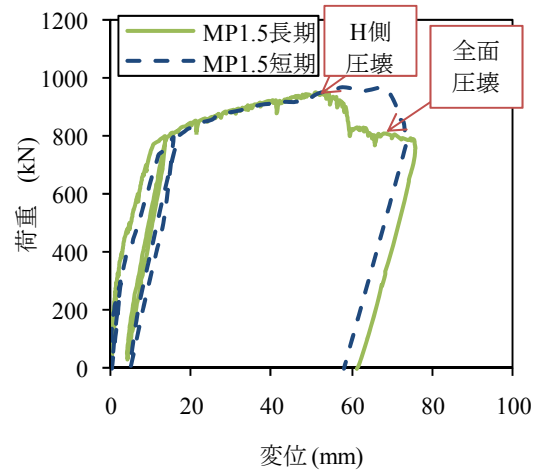
(1) 構造性能

表-7 に各試験体の曲げ載荷試験により得られた構造性能を示す。なお、長期曝露を行った試験体については、ひび割れ発生を目視で確認することが困難であったため、記載していない。降伏荷重については、いずれの試験体も長期材齢の方が若干大きな値となった。最大荷重に着目すると、いずれの試験体も短期材齢と長期曝露に大きな差は認められなかった。

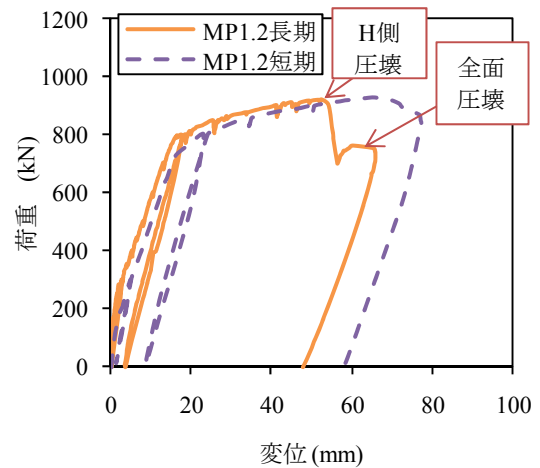
図-4 にそれぞれの目標単位容積質量の高性能軽量コンクリート版の荷重-変位関係を示す。長期曝露を行った試験体について、最大荷重時における変位に着目すると、MP1.8 では長期曝露、短期材齢ともに同様の値を示したのに対して、MP1.5 および MP1.2 では大幅に小さくなる傾向を示し、変形性が低下していた。長期曝露を行った MP1.5 および MP1.2 では、打設面側(H側)のコンクリートにおいて先に脆性的に圧壊が生じて荷重が低下した。その後、載荷とともにひび割れが打設底面側に伝播していき、打設底面側のコンクリートまでひび割れが到達した後に荷重が上がらなくなる傾向を示した。しかしながら、短期材齢ではこのような傾向は認められなかった。MP1.5 および MP1.2 は細骨材にも軽量骨材を使用しており、かつ W/C を低く設定している。このため、長期材齢になると、ペースト強度が高くなり、コンクリートの脆性的な破壊が顕著になったと考えられる。また、材料分離の影響により打設面側の圧縮強度が相対的に低下し、打設面側から先行して圧壊に至ったものと考えられる。



(a)MP1.8



(b)MP1.5



(c)MP1.2

図-4 荷重-変位関係

(2) ひび割れ発生状況

図-5 に曲げ載荷試験終了後の試験体の打設面側および打設底面側のひび割れ発生状況を示す。いずれの試験体についてもスパン中央に曲げひび割れが 50mm 程度の間隔で生じており、圧縮側におけるコンクリートの破壊が認められた。特に、打設面側におけるコンクリートの

圧壊が顕著であった。打設面側と打設底面側のひび割れ状況にも大きな差は認められなかった。また、長期曝露試験体のこれらの傾向は短期材齢試験体におけるひび割れ状況¹⁾とほぼ同様であった。

(3) 鉄筋の腐食状況

圧壊部のコンクリートをはつり、内部鉄筋の状況を確認した。図-6にMP1.5の鉄筋の状況を示す。鉄筋部まで塩化物イオンが十分に浸透していないこともあり、鉄筋は腐食していなかった。この傾向はすべての試験体で同様であり、高性能軽量コンクリートの鉄筋腐食に対する長期耐久性が確保されていることが確認された。

4. まとめ

本研究は、海洋環境に約8年間曝露した高性能軽量コンクリートについて、材料分離の観点からコンクリートの各種性能や鉄筋コンクリートの性能について検討および考察を行った。以下にその概要を示す。

- (1) 本研究で用いた高性能軽量コンクリートは、顕著な材料分離は示さなかったが、単位容積質量によってその材料分離特性は異なった。粗骨材にのみ軽量骨材を使用した場合、打設面付近のみ材料分離を生じる傾向を示したが、細骨材にも軽量骨材を使用した場合、打設高さ方向に対して全体的に材料分離を生じる傾向を示した。
- (2) 高性能軽量コンクリートの圧縮強度は材料分離の程度に応じて変化し、軽量骨材が浮上する打設面に近いほど圧縮強度が低下する傾向を示した。一方、静弾性係数は打設高さ方向に対しほぼ一定値を示した。
- (3) 高性能軽量コンクリートの塩化物イオンの拡散係数は土木学会コンクリート標準示方書より求められるものよりも1オーダー程度小さい値を示した。また、塩化物イオンの見かけの拡散係数は材料分離の影響を大きく受けることなく、ほぼ一定の値を示した。
- (4) 海洋環境に長期曝露を行った鉄筋コンクリート版の曲げ載荷試験の結果、短期材齢と比較して最大荷重に変化は認められなかったものの、単位容積質量が1.5および1.2としたコンクリートは最大荷重時の変位が小さくなり、変形性が短期材齢よりも低下した。また、いずれの試験体も打設面側から破壊する傾向を示し、目標単位容積質量が小さくなるに従ってその傾向は顕著となった。また、高性能軽量コンクリートは、長期材齢になるとより脆性的な破壊が顕著となった。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局に多大なるご協力をいただきました。ここに付記し、関係各位に深く御礼申し上げます。



図-5 ひび割れ状況(長期曝露試験体)



図-6 内部鉄筋の状況(MP1.5)

参考文献

- 1) 横田弘ほか：高性能軽量コンクリートの港湾構造物への適用に関する基礎的研究，港湾技研資料，No.967，2000.9
- 2) 岡本享久ほか：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.37，No.4，pp.12-18，1999.4
- 3) 岩波光保，加藤絵万，横田弘：高性能軽量コンクリートの構造性能と施工性に関する実験的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1138，2006
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，pp.165-170，1997
- 5) Funahashi, M, et al.: Mechanical properties of super lightweight aggregate concrete, Proceedings of 3rd International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Vancouver, pp.1336-1343, 2001. 6
- 6) 加藤俊充，五十嵐心一，川村満紀：含水状態の異なる軽量骨材の使用による骨材周囲の組織変化，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.1077-1078，2003.9