

論文 重晶石および人工重量骨材を用いたコンクリートの力学特性

川端 雄一郎*¹・加藤 絵万*²・河村 直哉*³・岩波 光保*⁴

要旨:本研究は、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について検討したものである。普通コンクリートと比較して、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同等以上であり、また破壊エネルギーは20%強小さかった。一方、重晶石を用いたコンクリートの破壊エネルギーは普通コンクリートよりも60%弱小さかった。この原因として、重晶石内の劈開の存在や粒子間結合の脆弱さが影響していることを示した。また、重晶石のような劈開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を明らかにした。

キーワード: 重量コンクリート, 重晶石, 人工重量骨材, 破壊エネルギー, 短繊維

1. はじめに

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、外洋からの波浪に対する安定性を確保するため、防波堤には所定の重量が求められ、所定の重量を得るために堤体幅が変化する。一般的に、防波堤では、ケーソンに中詰め材料を充填して所定の質量とすることで、構造物全体の安定性を確保している。

一方、防波堤を設置する現地の状況によっては、ケーソンの堤体幅が十分に確保できない場合がある。この場合の対策として、中詰め材料の重量を増加させるとともに、堤体の自重を増加させるために重量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重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2.3t/m³であるとされる。これに対して、重量コンクリートは約4.0t/m³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。

一方、近年の研究では、重晶石（Barite）や人工重量骨材である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が開発されつつある。重晶石は硫酸バリウム（BaSO₄）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重量をさらに増加させることができる。

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。これまでの研究から、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¹⁾、コンクリートの密度と鉄筋との付着応力には明確な関係性が認められないこと²⁾、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³⁾。これら既往の研究から、重晶石を用いたコンクリートについては、力学特性が普通コンクリートと比較して若干劣ることが考えられ、今後のデータの蓄積とともに、その本質的な原因解明が必要である。また、人工重量骨材を用いたコンクリートについても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検討を行った。また、重晶石を用いたコンクリートの力学特性を改善することを目的として、コンクリートに短繊維を混入し、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について検討を行った。

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 空港舗装研究チーム 修士(システム生命科学) (正会員)

*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	記号	備考	密度 (g/cm ³)	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	碎石 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 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 ³)								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	

2. 実験概要

2.1 使用材料, 配合および試験体作製

表-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 1.にて示した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。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, 重量コンクリートとの比較のため, 普通コンクリートも使用した。

表-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%として, スランブ 8±2.5cm, 空気量 2.0±1.0%を満足するよう決定した。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。

コンクリートの配合は, 普通コンクリート (N2.3), 重

表-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

晶石を用いた重量コンクリート (HWC3.4), 金属スラグ系骨材および酸化鉄粉を用いた重量コンクリート (HWC3.8) の 3 種類とした。また, HWC3.4 については破壊エネルギーの改善を図るため, 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ブ低下を考慮し, 単位水量を 180kg/m³に増

加させた。また、単位水量の増加に伴って材料分離が生じないように細骨材率を 48.0%に増加させた。以降では、それぞれのコンクリートの配合は表-2 に示す記号にしたがって記載する。表-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。

後述する各種試験のため、練り混ぜたコンクリートを使用して供試体を作製した。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%以上の恒温室にて湿布養生を行った。

2.2 試験項目

(1) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

作製した $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 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。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 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 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。

3. 実験結果および考察

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-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¹⁾。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ることができ

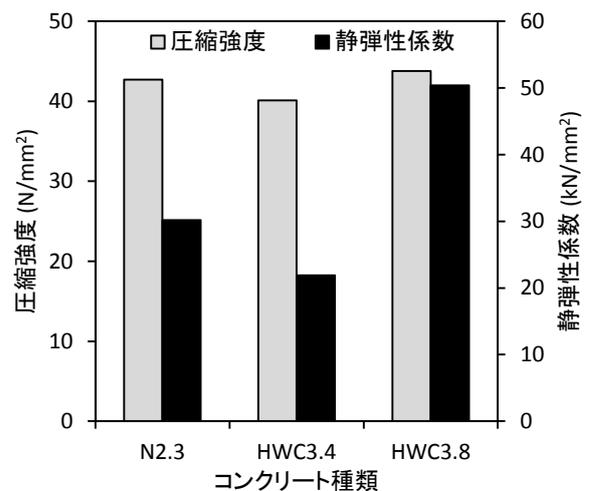


図-1 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

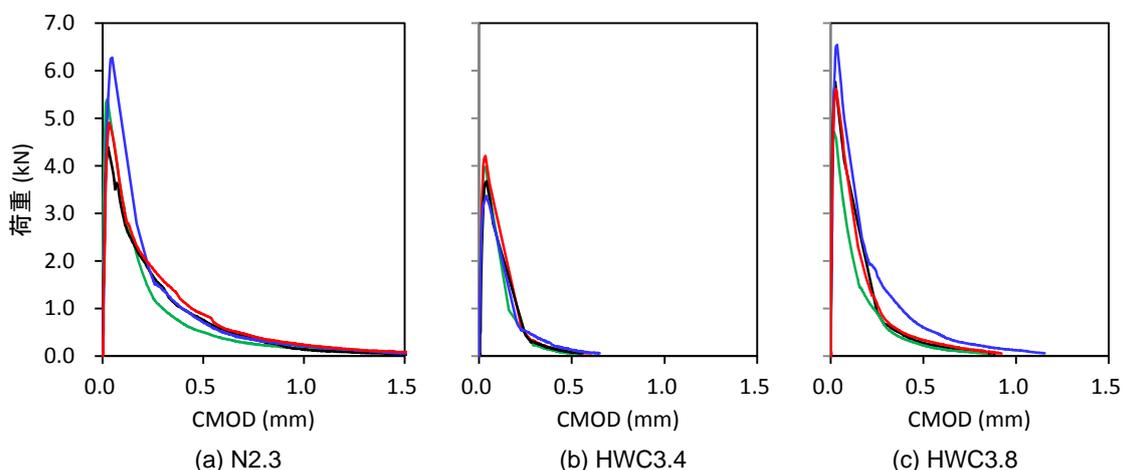


図-2 コンクリートの荷重-CMOD 曲線

る。

(2) 破壊エネルギー

図-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。N2.3 は 4.5~6.2kN を最大荷重として軟化が進行し、CMOD が約 1.5~2.0mm の時点で荷重がゼロとなった。一方、HWC3.4 の最大荷重は 3.3~4.2kN と N2.3 よりも約 20%小さかった。また CMOD が 0.5mm 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 1.0mm 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 (N・mm)

W_1 : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)

A_{lig} : リガメントの面積 (mm²)

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 (9.807m/s²)

$CMOD_C$: 破断時のひび割れ開口変位 (mm)

図-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¹⁾。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。

破壊エネルギー試験が終了した供試体の破断面について、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-4

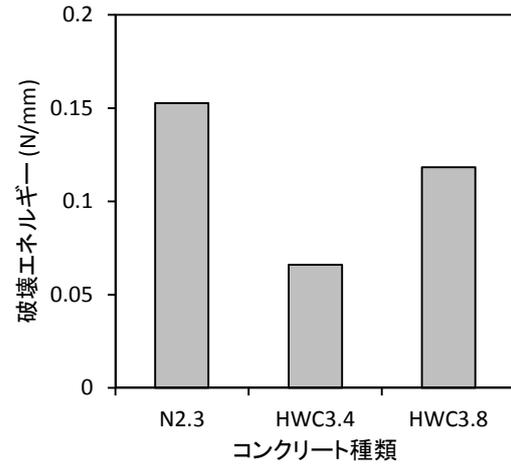


図-3 コンクリートの破壊エネルギー

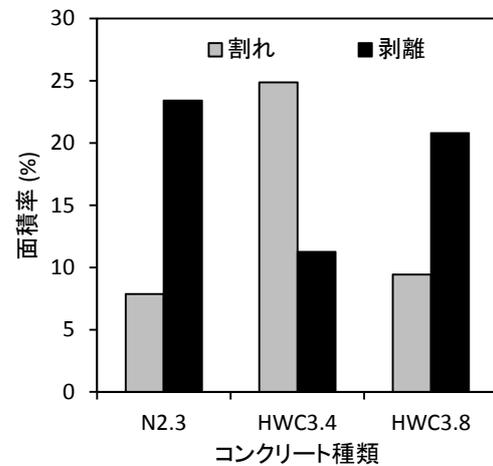


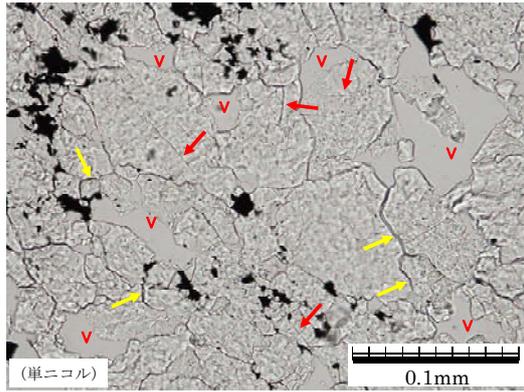
図-4 コンクリート破断面における粗骨材の破壊形態

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」が顕著に多かった。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、粗骨材の破壊形態である「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い傾向が認められる。

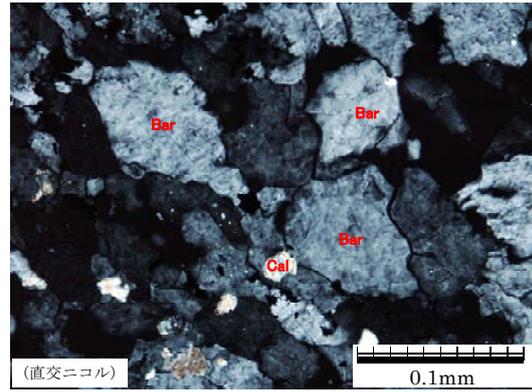
以上の結果から、HWC3.4 の破壊エネルギーが普通コンクリートよりも小さい原因として、ひび割れ進展過程で形成される破壊進行領域において、骨材の架橋効果が小さいことが挙げられる。骨材の架橋効果は重晶石の岩石学的な特徴と関連していると考えられる。

(3) 重晶石の岩石学的特徴

写真-1 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、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。



(a) 単ニコル



(b) 直交ニコル

写真-1 重晶石の偏光顕微鏡像

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、短繊維混入等による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-5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（赤点線）および静弾性係数（青点線）をあわせて示す。図より、いずれの短繊維を混入した場合であっても圧縮強度および静弾性係数はほぼ同等となった。

(2) 破壊エネルギー

図-6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-2）と比較して最大荷重および最大荷重以降のポストピーク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0.2mm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2.0mmよりも大きくなると荷重が再度低下したが、CMOD4.0mmにおいても1.2~2.4kN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4.2~4.6kNであり、最大荷重もわずかに大き

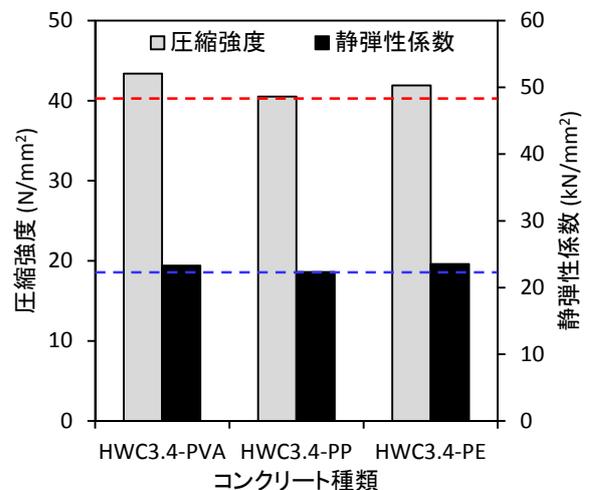


図-5 短繊維を混入したHWC3.4の圧縮強度および静弾性係数

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0.2mmよりも大きくなると、荷重が増加傾向になった。CMODが4.0mm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4.0~4.9kN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3.0mmの時点で荷重がゼロとなった。

図-7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4.0mm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で3倍の破壊エネルギーの改善効果が認められた。

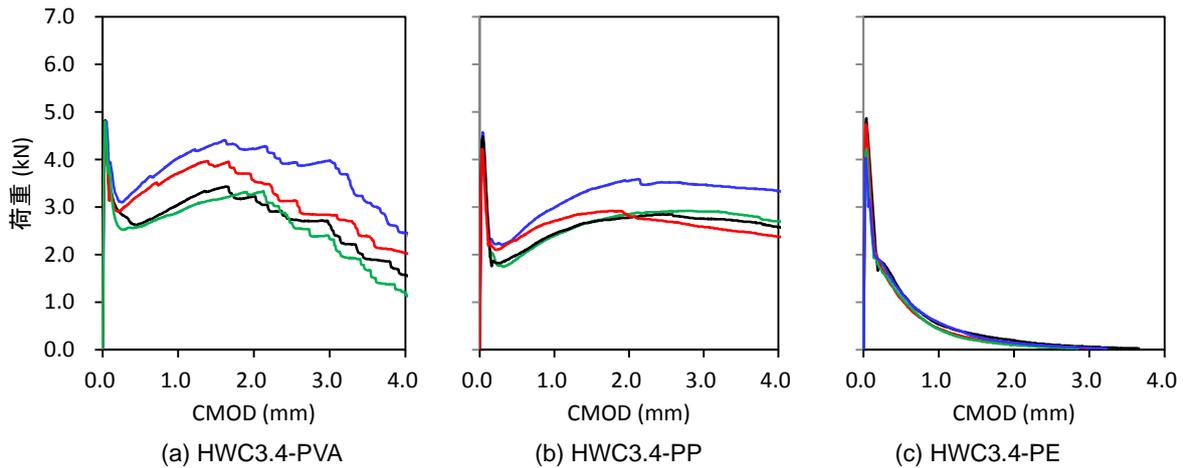


図-6 短繊維を混入したHWC3.4の荷重-CMOD曲線

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. 結論

本研究は、重晶石および人工重量骨材を用いた重量コンクリートの力学特性について実験的に検討を行った。また、重晶石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、力学特性の改善を図った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (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る。また、破壊エネルギーは普通コンクリートよりも20%強小さい。
- (2) 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よりもわずかに小さい。一方、重晶石を用いた場合、コンクリートの破壊エネルギーは60%弱小さくなる。
- (3) 重晶石の岩石学的特徴として、重晶石内に劈開が存在していること、また粒子間結合が弱いことが考えられた。これらの骨材の脆弱さに起因して、破壊進行領域において骨材の架橋効果が低下したことがコンクリートの破壊エネルギー低下に寄与していると考えられた。
- (4) 重晶石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、普通コンクリートより高い破壊エネルギーが得られた。したがって、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を大幅に改善できることが分かった。

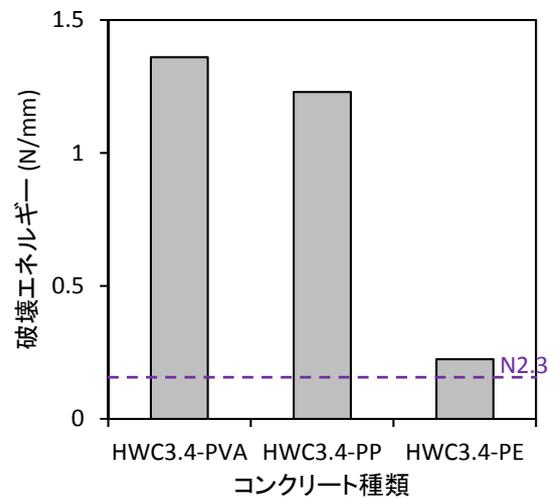


図-7 短繊維を混入したHWC3.4の破壊エネルギー

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、長岡技術科学大学の松本拓也君（港湾空港技術研究所 平成24年度実務訓練生）には実験にご協力いただいた。ここに付記し、深く御礼申し上げます。

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) 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
- 3) 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