

凍結防止剤散布地域における 再生骨材コンクリートの有効利用技術 の開発に関する共同研究報告書

プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の 有効利用に係わるガイドライン (案)

材料資源研究グループ	上席研究員	古賀 裕久
	特任研究員	片平 博
耐寒材料チーム	上席研究員	安中 新太郎 ^{※5}
	主任研究員	吉田 行
	研究員	野々村 佳哲 ^{※6}
東北技術事務所	(技術) 副所長	三ヶ田 章 ^{※1}
	〃	田口 和弘 ^{※2}
	品質調査課長	島田 正義 ^{※1}
	〃	佐藤 忠彦 ^{※2}
	維持管理技術課 専門職	上西 通 ^{※2}
品質調査課	品質検査係長	辻谷 優子 ^{※3}
	〃	吉田 奈月 ^{※4}
公立大学法人 宮城大学	教授	北辻 政文

※1 : ~2018.3 , ※2 : 2018.4~ , ※3 : ~2019.3 , ※4 : 2019.4~

※5 : ~2020.3 , ※6 : ~2021.3

要 旨

土木研究所は東北技術事務所および宮城大学との共同研究により、凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートの普及を目的に検討を重ねた。その結果、プレキャスト製品への使用が可能との結論を得たので、その成果を「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係わるガイドライン(案)」としてとりまとめた。また、技術的に重要な情報を「技術資料」として巻末に整理した。

キーワード : 再生骨材コンクリート, プレキャストコンクリート, ガイドライン, 寒冷地, 凍結防止剤

はじめに

コンクリート解体材は全国で年間約3千万トン程度発生しており、そのほとんどが道路用の路盤材として再利用されている。その再利用率は極めて高い水準を維持しているが、新規道路事業が縮小する中、将来にわたって高い再利用率を維持するためには、路盤材以外への利用用途の拡大が急務である。

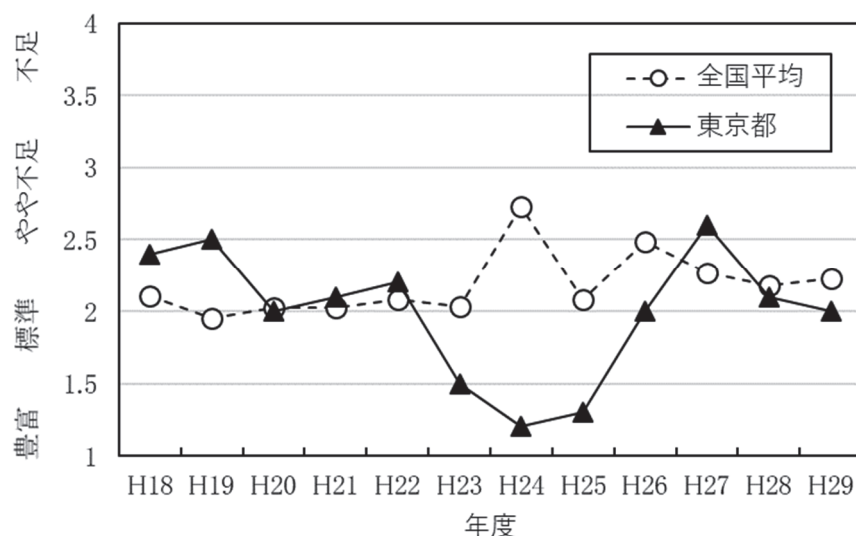


図 再生砕石の在庫指数¹⁾

図はコンクリート解体材から製造させる再生砕石（路盤材）の在庫指数を示したものである。これによれば、首都圏（東京都）において平成23～25年に在庫指数が「豊富」となっている。これは、コンクリート解体工場において再生された路盤材の製品が豊富にストックされている状態であり、ストックヤードに余裕が無くなれば、新たな解体材を受け入れることが出来ないという状態である。解体材の受け入れ先が見つからないために、公共工事の遅れが発生したという報告もある²⁾。この状況はオリンピック需要で一時的に回避されているが、新規の事業が縮小すると、近い将来に、同様の状況に陥ることも懸念される。

路盤材以外へのコンクリート解体材の利用用途としては、再生骨材として再びコンクリートに利用する考え方は古くからあり、JISも整備されている。また、国土交通省でも平成28年3月31日に「コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準」を通知し、再生骨材コンクリートの普及に努めている。

再生骨材のJISは生コンクリートへの利用を念頭に作成されているが、一般的なレディーミクストコンクリート工場では、一度の出荷量が多く、また、地域で行われる建設工事の状況により出荷量が急激に増えることがあるため、製造に必要な骨材等が常に安定して供給されていることが重要である。一方で、コンクリート解体材は、解体工事に伴って発生するため地域や時期によって発生量に変動があり、多量の再生骨材を安定的にかつ需要に応じて、柔軟にレディーミクストコンクリート工場に供給することは容易ではない。ま

た、フレッシュコンクリートの運搬可能距離には限界がある。これに対して、プレキャストコンクリート工場では、レディーミクストコンクリート工場に比較して、コンクリートの生産量や再生骨材の使用量の調整がある程度可能であること、また、一つの工場で生産された再生骨材コンクリート製品をより広いエリアに運搬できるので、地域ごとに拠点となる工場があれば、全国的に再生骨材の利用を展開できる可能性がある。このため、道路側溝や縁石等の簡易なプレキャストコンクリート製品への再生骨材の利用は有力な普及用途である。

一方で、国土交通省の「コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準」では、塩分の影響を受ける場合の塩分浸透抵抗性や、凍害（スケーリング）劣化に関する知見が十分でないことから、塩害地域や凍結防止剤散布地域は標準的な使用範囲に含まれていなかった。沿岸部はもとより、散布量が比較的少ない地域も含めると凍結防止剤散布地域が広いことが、再生骨材コンクリート普及の課題となっていた。

そこで、平成 30 年 3 月より、国立研究開発法人土木研究所（材料資源研究グループおよび寒地土木研究所耐寒材料チーム）は、東北技術事務所および宮城大学と共同研究「凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートの有効利用技術の開発」を行って検討を重ねてきた。この共同研究のなかで、東北地方整備局管内で、これまでに試験施工として設置した再生骨材 M を用いたプレキャスト製品の健全性を確認し、また、塩害地域や凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリート M の耐久性を総合的に検討した。この結果、プレキャストコンクリート製品への使用が可能との結論を得たので、その成果をガイドライン（案）としてとりまとめた。

今後、全国のリサイクル、ゼロエミッション社会を目指す技術として、広く活用されることを願う。

参考文献

- 1) 国土交通省主要資材受給・価格動向調査結果
- 2) 再生砕石の用途拡大 建設 3 団体 都議会自民党に要望, コンクリート新聞, 2015.9.24

目 次

	頁
第1章 総 則 -----	1
1.1 目 的 -----	1
1.2 適用範囲 -----	2
1.3 本ガイドライン（案）で想定するプレキャストコンクリート製品の範囲 -----	2
1.4 再生骨材の使用割合 -----	4
第2章 再生粗骨材 -----	4
2.1 使用可能な再生粗骨材 -----	4
2.2 品質管理および検査 -----	5
2.3 再生粗骨材の貯蔵 -----	5
第3章 再生骨材コンクリートの配合および製造上の留意点 -----	6
3.1 一 般 -----	6
3.2 アルカリシリカ反応抑制対策 -----	6
3.3 配合強度の設定 -----	7
3.4 空気量 -----	8
技術資料 -----	9

第1章 総 則

1.1 目 的

本ガイドライン（案）は、寒冷地を含め、プレキャストコンクリート製品への再生粗骨材 M の有効利用を促進することを目的として策定したものである。

【解説】 コンクリート解体材はそのほとんどが路盤材として有効利用されている。しかし、新規道路事業の縮小にともなって、需要が減少しつつある。このため、コンクリート解体材をコンクリート用骨材として再利用するための研究が盛んに行われ、この成果として、再生骨材コンクリートの JIS が 2004 年から 2007 年の間に制定された。

この JIS では、再生骨材の品質によって H、M、L の 3 つに分類している。H は付着モルタルをできる限り取り除き、原骨材に近い状態としたものであり、JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」に使用できる骨材としての規格として制定された。M と L は多少の付着モルタルを許容することで、製造コストを抑えるとともに、原コンクリートのより多くの部分を再生骨材として利用することが可能であるが、使用用途が限定されるコンクリートとしての規格となった。M は乾燥収縮の影響の少ない地下構造物やプレキャスト製品に利用できる。L は構造体には使用できず、均しコンクリート等に利用できる。なお、2012 年の JIS の改正では、再生骨材コンクリート M に耐凍害品が設定されるなど、用途の拡大が図られている。

また、国土交通省においては「コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準」（以下、用途別品質基準という）が 2016 年 3 月に通知されるなど、再生骨材コンクリートの利用促進に向けた規準類の整備が進んでいる。しかし、この用途別品質基準の中では、塩害地域および凍結防止剤が散布される箇所は、再生骨材の使用が耐久性に与える影響に不明な点が残されていることから、標準的な使用範囲に含まれていない。一方で、スパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量は増大しており、再生骨材コンクリートの普及の足枷となっている。

そこで、土木研究所は東北技術事務所および宮城大学と共同研究を行い、塩害地域や凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリート M の耐久性等に関して総合的に検討した。この結果、プレキャストコンクリート製品への使用が可能と判断したので、コンクリート解体材の利用促進の観点からガイドライン（案）を策定することとした。また、JIS におけるアルカリ骨材反応抑制対策の規程は複雑なので、このガイドライン（案）においては、再生骨材コンクリートのアルカリ骨材反応抑制対策をより簡便に確認できる方法を示した。さらに、本ガイドライン（案）策定にあたって整理した知見を、技術資料として巻末に紹介した。

1.2 適用範囲

- (1) 本ガイドライン（案）は、塩害地域および凍結防止剤散布地域を含む国内全ての地域において、再生粗骨材 M をプレキャストコンクリート製品に適用する場合に適用する。
- (2) プレキャストコンクリート製品の範囲は、1.3 に示すものとする。
- (3) 使用する再生粗骨材 M の品質および品質管理方法は、第 2 章によるものとする。
- (4) 再生骨材コンクリートの配合および製造上の留意点は、第 3 章によるものとする。

【解 説】 寒冷地では、冬季に凍結防止剤を散布する地域が多く、再生骨材コンクリート M を適用した場合の耐久性に懸念があった。しかし、塩害地域および凍結防止剤が散布される箇所における再生骨材コンクリート M の耐久性を総合的に検討した結果、第 2 章に示す再生骨材の品質を満足し、第 3 章に示す配合や製造における留意点を確認したプレキャスト製品であれば、再生粗骨材 M を用いたコンクリートでも、塩分の供給を受ける場合の耐凍害性や塩分浸透抵抗性等について、従来のコンクリートと同等な耐久性を有することを確認した（技術資料 1～4 参照）。

なお、本マニュアル（案）では再生骨材の使用は粗骨材のみに限定することとした。これは、再生細骨材の耐凍害性を確認する試験方法が、現状では開発されていないためである。

1.3 本ガイドライン（案）で想定するプレキャストコンクリート製品の範囲

本ガイドライン（案）で想定するプレキャストコンクリート製品の範囲は、以下の全ての条件を満足するものとする。

- ・無筋または鉄筋コンクリート構造の製品。
- ・コンクリートの設計基準強度が 30N/mm^2 以下の製品。
- ・乾燥収縮による不具合が生じない寸法形状の製品。
- ・有スランプの AE コンクリートが使用された製品。

【解 説】 プレキャストコンクリート製品には、様々なものが存在することから、あらかじめ再生骨材コンクリートの使用に適している製品の範囲を明確化した。

プレストレストコンクリート製品を設計する際には、コンクリートのクリープ係数等の特性値が必要になるが、再生骨材を用いた場合のクリープ現象への影響は十分には明確でない。また、プレストレストコンクリートには比較的高い強度が要求されるが、後述するように、再生骨材コンクリート M で強度の高いコンクリートを製造するのは必ずしも容易ではない。このため、本ガイドライン（案）では、対象範囲を無筋または鉄筋コンクリート構造の製品とした。

一般に、コンクリートの圧縮強度が高くなるほど、使用する骨材の堅硬さがコンクリートの強度に影響を与えやすくなる。このため、普通コンクリートに比べて水セメント比を大幅に低減する必要が生じるなど、再生骨材を使用することのメリットが少なくなる。既往の検討から、設計基準強度が 35N/mm^2 程度のコンクリートまでは再生骨材 M を使用することの影響は大きくない（技術資料 5 参照）と考えられるが、本ガイドライン（案）では、まずは設計基準強度が 30N/mm^2 以下のプレキャストコンクリート製品を対象とした。今後、再生骨材コンクリートの適用実績が増え、配合等への影響が小さいことが確認

されれば、設計基準強度の制限を 35N/mm²程度まで引き上げることは可能と考えられる。

再生骨材コンクリートは普通コンクリートに比較して乾燥収縮量がやや大きくなる可能性がある。一方で、コンクリート構造物の寸法が小さければ、乾燥収縮によるひび割れ発生等のリスクは小さくなる。これまで、JIS の比較的小型の製品等では、乾燥収縮により大きな影響が生じた場合はほとんどないと考えられる。解説 表-1.3.1 は、設計基準強度が 30N/mm²以下の範囲で、再生粗骨材 M の使用が可能と考えられる主なプレキャスト製品について、その寸法や質量をとりまとめたものである。JIS A 5371 および JIS A 5372 に分類される製品については、推奨仕様が示されているので、この寸法を整理した。これによれば、ほとんど全ての製品の最大寸法は 2m 以下であった。以上のことから製品の最大寸法が概ね 2m を超えない範囲を目安とすると良い。JIS 外品についても設計基準強度が 30N/mm²以下の範囲における標準的な寸法の例を解説 表-1.3.1 に示すが、最大寸法が 2m を超えないものが多い。なお、最大長さが 2m の大型 L 型擁壁を長期間屋外暴露した検討例でも、有害なひび割れは確認されていない（技術資料 6 参照）。

本マニュアルの作成にあたっては、有スランプの AE コンクリートを型枠に打ち込んで製造するプレキャスト製品を想定して検討を行った。このため、硬練コンクリートを振動・加圧締固めする方法や、遠心力締固めで成形する製品は対象外とした。

解説 表-1.3.1 本ガイドライン（案）で想定するプレキャスト製品の例

区分	項目	製品名(代表例)	種別等	標準的な寸法 (JIS製品は推奨仕様の範囲)	最大質量 の目安
JIS 製品	JIS A 5371 (無筋コンクリート)	平板	普通、透水性、保水性 厚さ=30、60、80mm	300mm×300mm～500mm×500mm	50kg
		インターロッキングブロック	普通、透水性、保水性 厚さ=60、80mm	200mm×100mm	4kg
		L形側溝	250A、250B	L=600mm	70kg
		歩車道境界ブロック	LS3-M(F) B、C種	L=600mm、1000mm、2000mm	300kg
		積みブロック	長方形、正方形、正六角形	A形 400mm×250mm×350mm程度	50kg
		大型積みブロック	長方形、正方形	2000mm×1000mm×350～1500mm	2.0t
	JIS A 5372 (鉄筋コンクリート)	上ふた式U形側溝	US1(1種2種及びふた)	サイズ150～600 L=600mm、1000mm、2000mm	700kg
		落ちふた式U形側溝	US2(1種及びふた)、US3(3種及びふた)	サイズ250～500B L=1000mm、2000mm	850kg
		L形側溝	LS2の他 1種、2種あり	サイズ250A～500C L=600mm、2000mm	700kg
		ベンチフリューム	BFの他 1種、2種の200～1000サイズあり	サイズ200～1000 L=1000mm、2000mm	1.0t
JIS 外品	道路用品	エプロン付き歩車道境界ブロック	LS3-1	200×200～250×250	1.0t
		基礎付き歩車道境界ブロック	フラット、セミフラット、マウントアップ	ブロック高さ200～250mm L=2000mm	1.0t
		各種道路用側溝	歩道用、車道用	300×300～1000×2000程度 L=2000mm	5.0t
		自由勾配側溝	US9-A、B	300×300～1000×2000程度 L=2000mm	4.0t
		暗渠型側溝	都市型側溝	300×300～600×600程度 L=2000mm	2.0t
		道路用大型積みブロック	各社タイプあり	2000mm×1000mm×350～1500mm	2.0t
		境界くい	国土交通省型他、用地境界杭	120mm×120mm～150mm×150mm	35kg
	河川用品	河川用積みブロック		0.25m ² 、0.5m ² 、1m ² 、2m ² 他	2.0t
河川用張りブロック	張りブロック、連節ブロック		1m ² 、2m ² 他	2.0t	

注:表の製品名、種別、標準的な寸法、最大質量は、メーカーによって異なるため、代表的な名称または標準的な値を示している。

注:種別には、一部東北地方整備局の土木工事標準設計図集に示す工種記号を使用している。

なお、上記のような範囲に含まれないプレキャスト製品でも、使用する再生粗骨材の品質や製品の用途・形状等によっては、再生粗骨材 M を活用できる可能性はある。ただし、この場合には、本ガイドラインの記述を参考に個別に確認する必要がある。

1.4 再生骨材の使用割合

プレキャストコンクリート製品に使用される粗骨材の全容積に占める再生粗骨材 M の容積混合率を 20%以上とすることを推奨する。

【解説】 再生骨材コンクリートの利用意義は、コンクリート副産物の廃棄量の削減である。あまりに少量の再生骨材の混入では、その利用意義が極めて乏しい。このため、再生粗骨材の使用量について、最小の割合を定めることとした。

第2章 再生粗骨材

2.1 使用可能な再生粗骨材

- (1) プレキャストコンクリート製品に使用する再生粗骨材は、JIS A 5022「再生骨材コンクリート M」の附属書 A「コンクリート用再生骨材 M」に規定される再生粗骨材 M の品質を満足するものとする。
- (2) 使用する再生粗骨材の最大寸法は 20mm 以下を標準とする。

【解説】 (1) について 再生粗骨材 M の品質は JIS A 5022 附属書 A に従うこととし、凍結融解作用がある地域には耐凍害品 (FM 凍害指数が 0.08 以下の再生粗骨材 M) を使用する。なお、再生粗骨材の耐凍害性試験には巻末の技術資料 2 に示す試験方法を用いてもよい。

なお、普通骨材と再生骨材 L の混合使用は、本ガイドラインの対象外である。JIS A 5022 の 2019 年の改正で、普通骨材と再生骨材 L を混合して再生骨材 M の品質を満足する場合は、これを用いたコンクリートを再生骨材コンクリート M として扱ってよいこととされたが、その場合、耐凍害品とはならないためである。

(2) について 本ガイドラインで想定しているプレキャスト製品は断面が小さいので、粗骨材寸法が大きい骨材を適用することは困難である。また、実際に再生粗骨材 M を製造している工場のほとんどにおいて、粗骨材最大寸法は 20mm 以下であることから、粗骨材最大寸法は 20mm 以下とした。なお、粗骨材寸法が大きいと、付着モルタルの品質が劣る粒子が混入した場合に、コンクリート中に比較的大きな欠陥部が生じるリスクがある。このリスクを低減する意味からも粗骨材の最大寸法は大きくないほうが望ましい。

2.2 品質管理および検査

- (1) 再生粗骨材 M の品質管理項目、試験方法および検査方法は JIS A 5022 「再生骨材コンクリート M」の附属書 A 「コンクリート用再生骨材 M」に準拠し、適切に実施することとする。また、JIS A 5022 附属書 A に示される品質基準に合格したものを使用する。
- (2) 品質管理および検査の頻度は適切に設定する。

【解 説】 (1) について 再生粗骨材 M の品質管理項目、試験方法は JIS A 5022 附属書 A に詳述されているので、これに従って実施することとする。

品質項目としては、不純物量（タイル、レンガ、アスコン塊、ガラス、石こうボード片、プラスチック片等）、物理的性質（絶乾密度、吸水率、微粒分量）、凍結融解抵抗性（FM 凍害指数、技術資料 2 に示す試験方法によって確認してもよい）、粒度（粒度、粗粒率）、粒形（粒形判定実積率）、塩化物量である。なお、本ガイドライン（案）では、3.2 にアルカリシリカ反応の抑制対策を示している。これによる場合は、アルカリシリカ反応性試験を省略してよい。

(2) について 検査を行うロットの最大値として JIS A 5022 では、1,500t 又は 2 週間で製造できる量のいずれか少ない量（凍結融解試験に限ってはこれよりも厳しく、500t 又は 1 週間で製造できる量のいずれか少ない量）としている。プレキャストコンクリート工場での骨材使用量はレディーミクストコンクリート工場よりも一般的に少なく、1 度に納入する再生骨材の量もそれほど多量ではないことが想定される。このため、再生粗骨材受入れ時の検査ロットの大きさとしては 500t 又は 1 週間に 1 回程度を目安とするとよい。なお、再生骨材の納入間隔が 1 週間以上の場合には、納入される全てのロットを対象に検査を行うのが良い。

再生骨材の品質変動は普通骨材よりも大きくなることが懸念されるため、技術資料 7 に示す検討を行った。これによれば、再生粗骨材 M の品質変動はある程度認められるものの、それがコンクリートの品質に与える影響は必ずしも大きなものではなかった。ただし、限られた実験結果であることから、日常の品質管理では、納入される再生粗骨材 M の品質変動の程度が確認できるまでは、骨材の品質試験をこまめに行い、品質変動の実態を把握しておくことが望ましい。

2.3 再生粗骨材の貯蔵

再生粗骨材 M は、粒度分布や含水率を適切に保ち、かつ、他の骨材と混ざらないようにしたうえで、適切に貯蔵しなければならない。

【解 説】 再生粗骨材 M は普通骨材に比較して吸水率が大きいことから、必要に応じてプレウェッティングを行うなどして、適切な含水率の状態での貯蔵することが望ましい。また、粗骨材を山積みで貯蔵すると粗い粒子が山裾に集中するなどの分離が生じやすい。そのため適宜、重機のバケット等で攪拌するなど、粒度分布が適切となるよう留意すると良い。

厳しい凍結融解作用を受ける地域では、凍結融解作用によって貯蔵中の再生粗骨材の品質が変化する可能性があるため、長期間の保存を避けるか、またはサイロ等で貯蔵するなどの対策を講じるのが良い。

第3章 再生骨材コンクリートの配合および製造上の留意点

3.1 一般

再生粗骨材 M を用いたプレキャストコンクリートは、3.2～3.4 の事項を除いては、通常のプレキャストコンクリート製品と同様に JIS A 5364 に従って製造することを標準とする。

【解 説】 再生粗骨材 M を用いたプレキャストコンクリートの製造において、特に留意する事項を 3.2～3.4 に示した。その他の事項については、通常のプレキャスト製品の製造方法に従ってよい。ただし、本マニュアルは、有スランプの AE コンクリートを型枠に打ち込んで製造するプレキャスト製品を対象に検討を行ったものである。このため、硬練コンクリートを振動・加圧締固めする製品や、遠心力締固めで成形する製品は対象としていない。

3.2 アルカリシリカ反応抑制対策

アルカリシリカ反応抑制対策は、JIS A 5022 附属書 C に従って行う。

【解 説】 「JIS A 5022 再生骨材コンクリート M」の附属書 C にアルカリシリカ反応抑制対策の方法が示されているので、それに従ってアルカリシリカ反応抑制対策を行うこととした。

ただし、JIS A 5022 には多様なアルカリシリカ反応抑制対策が示されており、抑制対策への適合を確認する方法も複雑である。そこで、JIS に示されるアルカリシリカ反応抑制対策を満足するコンクリート配合の範囲を解説表-3.2.1 に整理した。解説表-3.2.1 に示す配合条件を満足することで、アルカリシリカ反応抑制対策が施されているとみなしてよい。

解説表-3.2.1 アルカリシリカ反応抑制対策の例

	セメントの種類	単位セメント (結合材) 量	再生粗骨材の容積 混合率の上限	JIS A 5022 附属書 C における区分
対策 1)	普通	400kg/m ³ 以下	25%	a)
対策 2)	混合セメント ^{注)}	400kg/m ³ 以下	なし	d)

注) フライアッシュセメントまたは高炉セメントを使用する。普通ポルトランドセメントを使用する場合は、混和材としてフライアッシュ、若しくは高炉スラグ微粉末を使用する。いずれの場合も、結合材(セメント量+混和材量)の全体質量に対してフライアッシュは 15%以上、高炉スラグは 40%以上でなければならない。また、普通ポルトランドセメントとフライアッシュまたは高炉スラグを合計した質量が 400kg/m³ 以下でなければならない。

解説表-3.2.1 の対策 1) および 2) について、以下に解説する

対策1) について

普通ポルトランドセメントを使用する場合の対策として、再生骨材コンクリート中のアルカリ総量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下にする場合（JIS A 5022 附属書 C に示される区分 a））について試算すると、再生粗骨材 M の容積混合率は 25%程度が上限となる。以下に計算根拠を示す。

ここでは、再生骨材コンクリート中のアルカリ量は、①セメント中のアルカリ量と、②再生粗骨材中のアルカリ量の合計値とする。

① セメント中のアルカリ量

本ガイドラインで想定するように、コンクリートの設計基準強度が $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の場合、単位セメント量が $400\text{kg}/\text{m}^3$ を超える可能性は低いため、ここでは単位セメント量を $400\text{kg}/\text{m}^3$ と想定する。また、現状で流通している普通ポルトランドセメントの単位アルカリ量については、概ね 0.6%前後で安定していることから 0.6%と仮定する。

$$(\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ におけるセメント中のアルカリ量}) = 400\text{kg} \times 0.006 = 2.4\text{kg}$$

② 再生粗骨材中のアルカリ量

再生粗骨材 M の容積混合率が粗骨材質量の 25%を上限とすると、再生粗骨材の単位量は $250\text{kg}/\text{m}^3$ 以下となる。再生骨材中のアルカリ量は JIS A 5022 では、 $(0.025 \times (\text{再生粗骨材 M の吸水率}) + 0.075)$ (kg) で推定することができる。再生粗骨材 M の吸水率が規格の上限値である 5.0%と仮定する。

$$(\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ における再生粗骨材中のアルカリ量}) = (0.025 \times 5.0 + 0.075) / 100 \times 250 = 0.5\text{kg}$$

このとき、コンクリート中のアルカリ総量は、

$$(\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ のアルカリ総量}) = \text{①} + \text{②} = 2.9\text{kg}$$

となり、再生骨材コンクリート中のアルカリ総量は $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下の条件を満足する。

このように、再生粗骨材 M の容積混合率を粗骨材質量の 25%以下とすることで、アルカリ総量の規制を満足できると考えてよい。ただし、アルカリの含有率が高いセメントを使用する場合や、特殊な配合を用いる場合には、個別に確認することが必要となる。

対策2) について

再生粗骨材 M の容積混合率を 25%を超えて使用する場合は、JIS A 5022 附属書 C に従って、個別にアルカリ量を計算したうえでそのアルカリ量に応じてセメントの種類や混和材の量を選択するか、あるいは、混合セメント等を利用した抑制対策をとる必要がある。解説表-3.2.1 の対策2) では、煩雑な確認行為が不要な対策として JIS A 5022 附属書 C の区分 d)の方法を示した。

一般的に流通している高炉セメント（B種）の高炉スラグ含有量は 40~45%なので、これを利用することができる。フライアッシュセメントの場合はフライアッシュの混合率が 15%以上であることを確認する必要がある。

3.3 配合強度の設定

再生骨材コンクリートの配合強度は、普通骨材を使用する場合と同等以上とする。また、圧縮強度の変動係数は適切に設定する。

【解 説】 使用する再生粗骨材 M の品質にもよるが、再生粗骨材 M を使用するとコンクリートの圧縮強度が低下する傾向がある（技術資料 5 参照）。このため、再生骨材を用いない場合と比較してコンクリートの水セメント比を数パーセント低下させ、同等の圧縮強度が得られるように配合設計を行う必要がある。圧縮強度が再生骨材を用いない場合と同等となるように配合設計された再生骨材コンクリートに関しては、その中性化抵抗性は、強度レベルが同一の普通コンクリートと同等とみなして良い（技術資料 4 参照）。

なお、技術資料 7 によれば、再生粗骨材 M を用いたコンクリートの圧縮強度の変動幅は、普通コンクリートと比較して大きなものではなかった。これは、設計基準強度の範囲を 30N/mm^2 以下と低めに定めていることから、その強度レベルでは粗骨材の品質の影響が出にくいと考えられる。このため、過去の実績が無い場合は、再生骨材コンクリートの圧縮強度の変動係数を普通コンクリートで比較的多く採用されている 10% 程度に設定して製造を行い、強度試験結果の蓄積に合わせて、変動係数の見直しを行っていくのが良いと考える。

3.4 空気量

フレッシュコンクリートの空気量を「JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に従って測定する場合には、骨材修正係数を測定し、補正する。

【解 説】 再生骨材は、天然の普通骨材に比較して、骨材修正係数が大きい傾向にあるので、JIS A 1128 によって空気量の測定を行う際には、事前に骨材修正係数を測定しておき、測定値から骨材修正係数を差し引いて、空気量を求める必要がある（技術資料 7 参照）。

JIS A 5022 では、再生骨材コンクリート M の耐凍害品の空気量の標準は $5.5\% \pm 1.5\%$ であるので、参考にするとよい。

技術資料

	頁
1. 塩分環境下の凍結融解抵抗性 -----	11
2. 再生粗骨材の凍結融解試験方法（簡易法） -----	14
3. 塩分浸透抵抗性 -----	18
4. 中性化抵抗性 -----	22
5. 圧縮強度 -----	26
6. 大型プレキャスト製品の暴露試験の例 -----	31
7. 再生骨材の品質変動に関する検討 -----	33
8. 東北地方整備局管内における暴露試験 -----	37

技術資料 1. 塩分環境下の凍結融解抵抗性

1. はじめに

2012年のJIS改正によって、再生骨材Mを用いたコンクリートに耐凍害品が設定され、適用範囲の拡大が図られた。なお、ここで考えられている凍害は、塩分環境でない環境における凍結融解作用によってコンクリートの内部にひび割れ等の劣化が生じる、いわゆる「内部劣化」を対象に規定されたものである。一方、凍結防止剤散布地域などの塩分環境下においては、コンクリート表面でのスケーリング劣化が塩分によって促進される現象が多く報告されている。このスケーリング劣化に対する再生骨材コンクリートの抵抗性については、十分な知見が無く、2016年3月の国土交通省通知「コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準」では、塩害地域や凍結防止剤散布箇所は、再生骨材コンクリートの標準的な使用範囲には含めないこととされた。

しかし、散布量が少量の地域も含めると、我が国では凍結防止剤の散布地域は広く、このことが再生骨材コンクリート普及の妨げになっている可能性がある。そこで、粗骨材に様々な品質の再生骨材を用いたコンクリートを作製し、淡水または塩水環境での凍結融解試験を行って、塩分環境下における再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を検討した¹⁾。

2. 実験方法

2.1 使用材料

再生粗骨材として、JISの再生骨材M~Lに概ね相当する9種類の骨材(表-1)を用いた。また、比較用に良質な普通骨材(硬質砂岩)も用いた。粗骨材最大寸法は20mm(再生M-3のみ15mm)であった。

細骨材には良質な川砂(絶乾密度2.53g/cm³、吸水率1.60%)を用い、普通ポルトランドセメント、AE減水剤、AE助剤を用いた。

2.2 コンクリートの配合と供試体作製

コンクリートの配合は、水セメント比が55%、細骨材率が45%のAEコンクリートとした。練上がり

のスランプは8~14cmの範囲、空気量は4.5~5.5%の範囲であった。

供試体は100×100×400mmとし、打込みの翌日に脱型し、材齢28日まで20°Cの水中養生とした。

2.3 凍結融解試験方法

凍結融解試験は、JISA1148コンクリートの凍結融解試験方法のA法(水中凍結融解試験方法)に準じて実施した。JISA1148では、コンクリート供試体を入れるゴム容器内を水で満たして試験を行う(以下、淡水の試験という)が、これとは別に3%NaCl水溶液で満たして塩分環境下の凍結融解の条件を模した

表-1 再生粗骨材の品質

記号	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	耐凍害性※	品質
再生M-1	2.46	3.00	0.07	再生M
再生M-2	2.45	3.57	0.02	再生M
再生M-3	2.44	4.06	0.14	再生M
再生L-1	2.27	5.60	0.24	再生L
再生L-2	2.29	5.68	0.19	再生L
再生L-3	2.31	6.01	0.22	再生L
再生L-4	2.30	6.38	0.21	再生L
再生L-5	2.26	6.63	0.10	再生L
再生外	2.18	8.10	0.14	規格外
普通骨材	2.69	0.50	-	砕石

※技術資料2に示す塩水10サイクルでのFM凍害指数耐凍害品としての評価 : 0.15以下

試験（以下、塩水の試験という）を行った（図-1）。

供試体本数は条件ごとに2本とした。試験は300サイクルまで実施し、数〜数十サイクルごとに供試体を取り出し、たわみ振動による一次共鳴振動数と質量を測定した。

内部劣化の評価としては、JIS A 1148 に倣い、300 サイクルまで試験を行い、一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算出し、さらにそれを耐久性指数に換算することで評価した。なお、JIS A 1148 では、試験体の質量および断面寸法が試験終了までほとんど変わらないことを前提とした相対動弾性係数の計算式が示されているが、塩水の試験では質量減少が大きいので、その影響を考慮した。

スケーリング劣化の評価指標については、国内において統一された評価指標が確立していない。海外では米国やヨーロッパにおいて、それぞれ独自の一面凍結融解試験方法による評価が行われている。土木研究所のこれまでの研究成果によれば、これらの一面凍結融解試験結果は、塩水による JIS A 1148 A 法の 50 サイクル時点の質量減少率と対応していることが分かっている²⁾。そこで、50 サイクル時点の質量減少率をスケーリング劣化の評価指標として、粗骨材に砕石を使用した配合と再生骨材を使用した配合を比較した。

なお、スケーリング劣化は、促進劣化試験前に試験体を気中乾燥させることで、スケーリング量が低減することが分かっている。実際のコンクリート構造物でも、建設後、厳しい凍結融解作用を受ける前に乾燥する期間があるのが一般的である。このため欧米での一面凍結融解試験では一度気中乾燥させた後に試験を開始している。これに対し今回の試験は JIS A 1148 A 法に倣って 28 日の水中養生後、直ちに試験を開始しているため、スケーリングがより多く発生する条件での比較試験となっている。

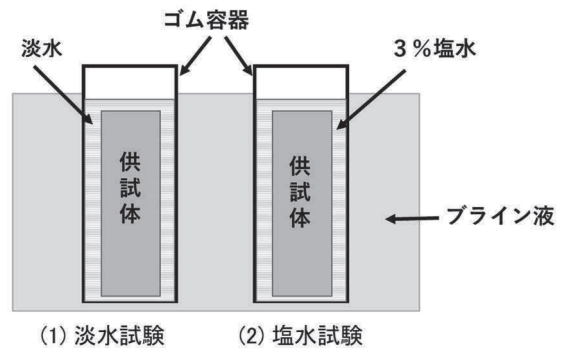


図-1 凍結融解試験の概要

3. 実験結果

3.1 内部劣化に対する抵抗性

耐久性指数について、淡水の試験と塩水の試験を比較した結果を図-2に示す（この図には、参考として普通コンクリートのデータも合わせて示した）。内部劣化の指標となる耐久性指数は淡水の試験と塩水の試験とで概ね同程度の値となり、塩分環境下であっても内部劣化の進行は一般環境下と概ね同程度と考えられる。

このことから、凍害の内部劣化に対しては、一般環境下と同様の耐凍害対策を行うことにより、塩分環境下でも耐凍害性を確保できると考えられる。

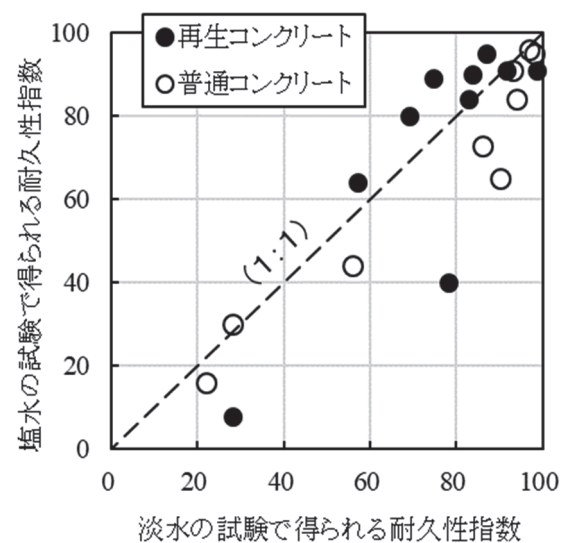


図-2 耐久性指数の比較

3.2 スケーリング劣化に対する抵抗性

粗骨材に普通骨材を用いた配合と再生骨材 M を用いた 3 配合について、50 サイクルまでの質量減少率を比較した。

淡水の試験結果を図-3 (1)に示す。いずれの配合でも質量減少率は 1 %以下と小さかった。塩水の試験結果を図-3 (2)に示す。淡水の試験結果に比較して質量減少率は全体的に大きい。普通骨材を用いた配合と再生粗骨材 M を用いた配合の質量減少率に明確な差は見られなかった。

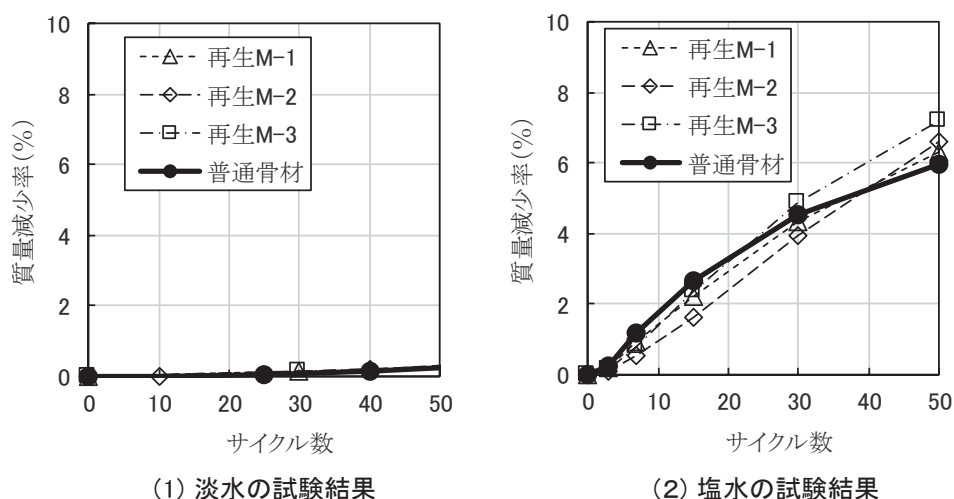


図-3 質量減少率の比較

4. まとめ

- (1) 凍結融解の内部劣化に関して、塩分環境下であっても一般環境下と大きくは変わらない結果が得られたことから、JIS A 5022 に規定されている耐凍害品の規格を満足した再生粗骨材 M を用いることで対応が可能と考えられる。
- (2) 凍結融解によるスケーリング劣化に関して、再生骨材コンクリート M と普通コンクリートで明確な差は無かった。

参考文献

- 1) 片平博, 古賀裕久: 再生粗骨材を用いたコンクリートの塩分環境下における凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.74, No. 5, V-348, 2019
- 2) 吉田行, 安中新太郎: 塩化物作用下におけるコンクリートのスケーリング促進試験方法に関する研究, コンクリートの性能評価試験の合理化・省力化に関するシンポジウム論文集, コンクリート工学会, pp.293-298, 2019

技術資料 2. 再生粗骨材の凍結融解試験方法（簡易法）

1. はじめに

再生粗骨材 M の耐凍害性の評価試験方法は JIS A 5022 「再生骨材コンクリート M」の付属書 D に示されている。しかし、この試験の実施には 10 日間以上の期間が必要であり、試験期間の短縮化が望まれている。

今回、再生粗骨材試料を浸漬する溶液を淡水から塩水に変更することで、試験期間を大幅に短縮できる結果が得られた。また、再生粗骨材の全ての粒度を試験の対象としなくとも、特定の粒度の試験だけでも良い結果が得られたので、その内容を報告する¹⁾。

2. 実験方法

JIS A 5022 「再生骨材コンクリート M」の付属書 D に示されている試験方法は概ね以下のものである（図-1 参照）。

- (1) 再生粗骨材の試料量は、5~20mm の試料の場合には 750g 以上、5~25mm の試料の場合には 1,000g 以上とする。この再生粗骨材の粒度分布を 4.75mm、9.5mm、19mm 及び 26.5mm の網ふるいを用いて、ふるい分けにより 0.1g 単位で測定する。4.75mm 以下または 26.5mm 以上の粒子がある場合はそれを排除する。
- (2) 試料をプラスチック製容器（例えばポリプロピレン製またはポリエチレン製の食品容器を用いることができる）に入れ、試料が完全に水没する量の水を入れる。この水の量は各容器ともに同じ量としなければならない。（水の凍結融解に必要な熱量は骨材の約 10 倍であり、容器中の水量が多くなると凍結融解にかかる時間が長くなる。）
- (3) 容器の一つに温度計を設置する。温度計は容器の中心部分の温度が測定できるように配置する。
- (4) 容器をスリースターまたはフォースターの冷凍庫に入れ、容器中の水が -18°C 以下となるまで冷凍する。冷凍庫に入れている時間は 16 ± 2 時間とする。（冷凍庫の大きさに応じて、一度に試験できる試料の量が限られるので、事前に確認しておく。）
- (5) 容器を冷凍庫から取り出し、 20°C 程度の水槽に入れ、中の氷が完全に融解するまで水中に置く。水槽に入れている時間は 8 ± 2 時間とする。
- (6) 1 日 1 サイクルで (4)と(5)を交互に繰り返す。休日等で試験ができない日は凍結したまま冷凍庫に保管して良い。
- (7) 10 サイクルを終了した後に容器から再生骨材試料を取り出し、気乾状態とし、(1)と同様の方法でふるい分け、19mm 以上、9.5~19mm、4.75~9.5mm 及び 4.75mm 以下の各粒度の質量を 0.1g 単位で測定する。

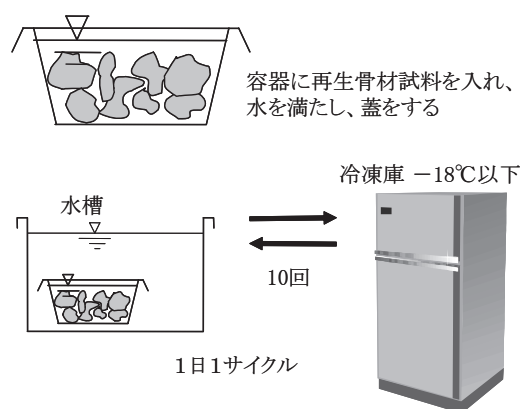


図-1 再生骨材の凍結融解試験方法

(8) 試験前後の粗粒率から次式によって FM 凍害指数を求める。

$$\text{FM 凍害指数} = \text{F.M.}_a - \text{F.M.}_b$$

ここに、 F.M._a : 試験前の F.M.

F.M._b : 試験後の F.M.

上記の方法に対して、以下の2点に着目して、試験の簡略化を検討した。

- (1) JIS の試験方法は再生粗骨材の全粒度分布を対象としており、凍結融解試験の前後にふるい分け作業が必要となるが、ふるいわけの作業は煩雑で個人差も生じやすく、不安定要素を出来るだけ排除する意味では、できるだけシンプルな粒度を対象に試験を行ったほうがよい。プレキャスト製品を想定した場合、再生粗骨材の粗骨材最大寸法は 20mm が上限と考えられることから、粗粒率を求める粒度は 2010 と 1005 の2つの粒度となる。この 2005 の標準的な粒度範囲の骨材では、2010 の占める割合が 45~80% と 1005 に比較して相対的に多い。そこで、2010 の粒度のみの試験で、全粒度を対象とした結果を代表できるか検討した。
- (2) JIS の試験方法では、凍結融解の試験に 10 日間を必要とし、試験期間の短縮化が望まれる。今回、容器に入れる溶液について、淡水に替えて塩水 (3%NaCl 溶液) を用いることで、劣化を促進させ、試験期間の短縮を試みた。

3. 実験結果

図-2 は、A~H の 12 種類の再生骨材 (M または L) の粒度分布について 2010 と 1005 の量の比較をしたものである。これによれば、2005 の全粒度に対して 7 割程度が 2010 であり、2010 の占める割合が多い。図-3 は、再生粗骨材の凍結融解試験結果について、全粒度の 2005 を対象とした FM 凍害指数と、2010 の粒度のみの FM 凍害指数を比較した結果である。双方の値は非常によく対応しており、2010 の粒度の試験結果で全粒度の試験結果を代表させても問題ないと考えられる。

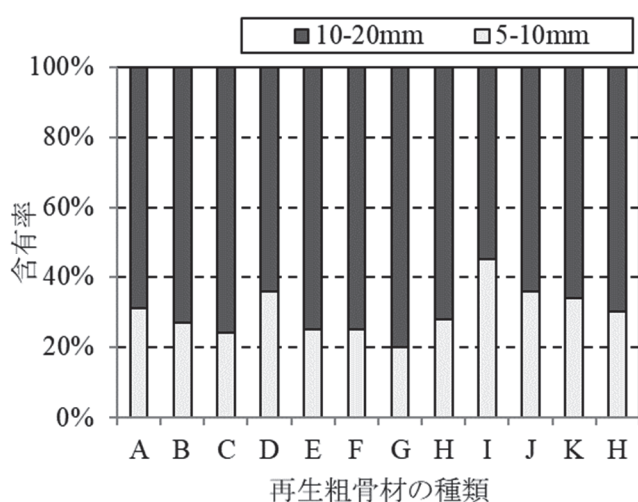


図-2 再生粗骨材の粒度

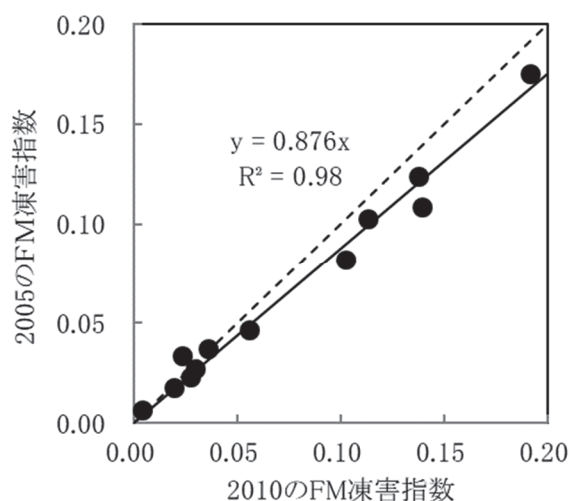


図-3 2010 と 2005 の FM 凍害指数の比較

再生粗骨材 M の 2010 の粒度を対象に、再生粗骨材の凍結融解試験を行った。対象とした再生粗骨材は製造場所の異なる 6 種類の再生粗骨材 M であり、一つの再生粗骨材に対して複数回のサンプリングを行っているために、サンプル数は合計で 10 試料となった。この各試料から、2010 の粒度をふるい分けにより抽出し、JIS の方法に従って淡水 10 サイクルの試験と、溶液を 3% 塩水に変更した 1 サイクルの試験を実施した。図-4 に双方の試験から得られた FM 凍害指数の関係を示す。これによれば、淡水 10 サイクルよりも塩水 1 サイクルの方が劣化が促進され、FM 凍害指数が大きくなった。また、双方の対応関係については、比較的良好な対応関係が得られた。

JIS A5022 の規定では、淡水 10 サイクルにおける FM 凍害指数を 0.08 以下と規定している。図-4 によれば、今回対象とした再生粗骨材 M の全てにおいて、淡水での FM 凍害指数が 0.08 を下回る結果となった。再生粗骨材 M の範囲であれば、FM 凍害指数が 0.08 を超える確率は比較的小さいことが予想される。また、塩水 1 サイクルの FM 凍害指数は淡水 10 サイクルの FM 凍害指数と比較的良好な対応を示していることから、塩水 1 サイクルの FM 凍害指数で評価しても良いと考える。

JIS A5022 では FM 凍害指数の規格値を 0.08 以下と規定している。図-4 より、淡水 10 サイクルの FM 凍害指数 0.08 に対応する塩水 1 サイクルの FM 凍害指数は 0.17 程度であり、規格値としては、それに多少の安全をみて 0.15 程度を目安とすると良いと考える。

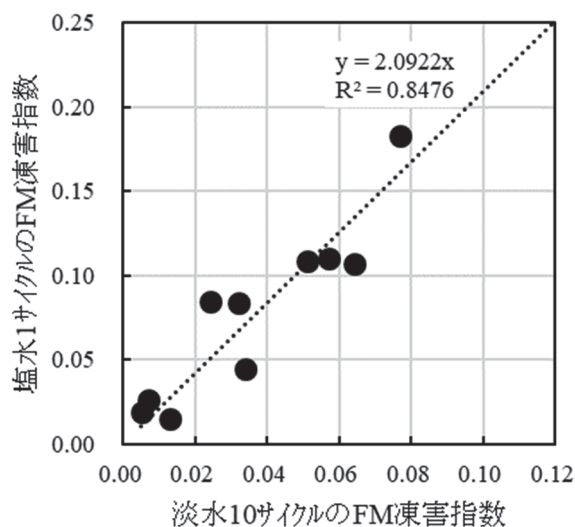


図-4 淡水 10 サイクルと塩水1サイクルの FM 凍害指数の比較

4. まとめ

再生粗骨材 M の凍結融解試験方法の簡略化について検討した結果、以下の (1) ~ (3) の結果を得た。これらの結果から、表-1 に示す簡易試験方法を提案する。

- (1) 粗骨材最大寸法が 20mm 以下の場合、試験の対象とする粗骨材の粒度を全粒度の 2005 とした場合と 2010 とした場合とで、試験結果から得られる FM 凍害指数は良好な対応を示した。
- (2) 今回の実験範囲では、全ての試験結果で淡水での FM 凍害指数が耐凍害品の規格値である 0.08 を下回る結果となった。再生粗骨材 M の品質の範囲内であれば、規格値を上回る可能性は低いことが予想され、簡易な試験法による照査でも十分に対応が可能と考えられる。

- (3) 再生骨材に対する凍結融解試験に用いる溶液を淡水から塩水に変更することで、試験サイクル数を大幅に低減できることが分かった。塩水1サイクルでのFM凍害指数の目安を0.15程度とするのが妥当と考えられる。
- (4) 以上の結果から、表-1に示す簡易試験方法を提案する。

表-1 再生粗骨材の凍結融解試験方法（簡易法）

JIS A 5022 附属書 D に示される試験方法との相違点		
試験条件	JIS A 5022 附属書 D	提案する簡易法
試験の対象とする骨材粒度	全ての粒度	2010のみとしても良い
容器に入れる溶液	淡水	3%NaCl 溶液（塩水）
凍結融解サイクル数	10 サイクル	1 サイクル
耐凍害品としての評価	淡水 10 サイクルでの FM 凍害指数が 0.08 以下	塩水 1 サイクルでの FM 凍害指数が 0.15 以下
上記以外の試験条件	—	JIS A 5022 附属書 D に従う

参考文献

- 1) 片平博，古賀裕久：再生粗骨材の凍結融解試験方法（簡易法）の提案，土木学会年次学術講演会，Vol.75, No.5, V-78, 2020.9

技術資料 3. 塩分浸透抵抗性

1. はじめに

アルカリシリカ反応抑制を考えると、プレキャストコンクリートへ適用する再生骨材コンクリートの配合はある程度限定される。例えば、(1) 全粗骨材に対する再生粗骨材 M の容積混合率が 25%以下の場合には普通ポルトランドセメントを使用できる。(2) 全粗骨材に対する再生粗骨材 M の容積混合率が 25%を超える場合は、結合材にフライアッシュセメントまたは高炉セメント等を使用する。これらの条件において、再生骨材コンクリートの塩分浸透抵抗性について検討した。

実験 1 では、実際のプレキャストコンクリートを想定した配合と養生条件で試験を実施した¹⁾。ただし、普通セメントを用いた配合の再生粗骨材の容積混合率は 20%での試験であった。このため、実験 2 として、再生粗骨材の容積混合率の影響を確認する試験として容積混合率を 0, 50, 100%とした試験結果を示す。

2. 実験 1

2.1 実験方法

実験には表-1 に示す 2 種類の再生粗骨材を使用した。JIS に示される再生粗骨材 M の規定を満足する再生粗骨材と、再生粗骨材 L に該当する再生粗骨材である。

配合は表-2 に示す 7 配合とした。配合 1 は普通骨材を用いた比較用の配合であり、これに対して配合 2~4 には再生粗骨材 M を、配合 5~7 には再生粗骨材 L を使用した。配合 2 と 5 は再生粗骨材の容積混合率を 20%とした配合、配合 3 と 6 は再生粗骨材を 100%使用し、アルカリシリカ抑制対策として高炉セメント B 種を使用した配合、配合 4 と 7 は再生粗骨材を 100%使用し、アルカリシリカ抑制対策としてフライアッシュを添加した配合とした。

表-1 実験1に用いた再生骨材の品質とその他のコンクリート材料

材料の種類		骨材寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	FM凍害 指数
再生粗骨材	M	5-15	2.44	4.06	0.07
	L	5-20	2.27	5.60	0.12
その他の材料					
水(W): 上水道水					
普通セメント(NC): 密度3.15g/cm ³ , 比表面積3,310cm ³ /g					
高炉セメント(BB): 密度3.04g/cm ³ , 比表面積3,850cm ³ /g					
フライアッシュ(FA): II種, 密度2.34g/cm ³ , 比表面積5,710cm ³ /g					
細骨材(S): 砕砂, 絶乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率1.92%					
普通粗骨材(G(普通)): 砕石, 絶乾密度2.67g/cm ³ , 吸水率0.98%					
化学混和剤: 高性能減水剤(I種), AE剤(I種)					

表-2 実験1のコンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								実測値	
			W	C	FA	S	G(普通)	G(M)	G(L)	Sl(cm)	Air(%)	
1 NC-0	41.8	37.1	142	340	-	681	1188	-	-	7.0	5.4	
2 NC-20M	41.8	37.1	142	340	-	681	950	223	-	7.5	6.0	
3 BB-100M	39.0	40.1	144	<369>	-	721	-	1037	-	8.5	5.2	
4 FA-100M	41.8	38.6	152	364	73	658	-	1012	-	8.0	5.8	
5 NC-20L	41.8	37.1	142	340	-	681	950	-	221	8.0	6.3	
6 BB-100L	39.0	37.2	142	<364>	-	671	-	-	1087	8.0	5.2	
7 FA-100L	41.8	36.3	145	347	69	634	-	-	1064	8.5	5.6	

Cの欄: <>は高炉セメント, その他は普通セメント

円柱供試体 (φ100×200mm) を作製し、蒸気養生 (前置き時間 2h、昇温速度 20°C/h、最高温度 60°C で 2h) を実施し、翌日に脱型、1 日水中養生を行った後に気中養生を材齢 14 日まで行った。塩分浸透抵抗性の試験方法としては土木学会規準 JSCE-G 572 に従い、10%NaCl 溶液に 1 年間浸漬した。浸漬後、表面から 10mm 間隔で試験体を切断し、全塩化物イオンの深さ方向の分布を測定することで、見かけの拡散係数を求めた。

2.2 実験結果

試験から得られた全塩化物イオン量の分布を図-1に、また、これらの分布から得られる見かけの拡散係数を図-2に示す。

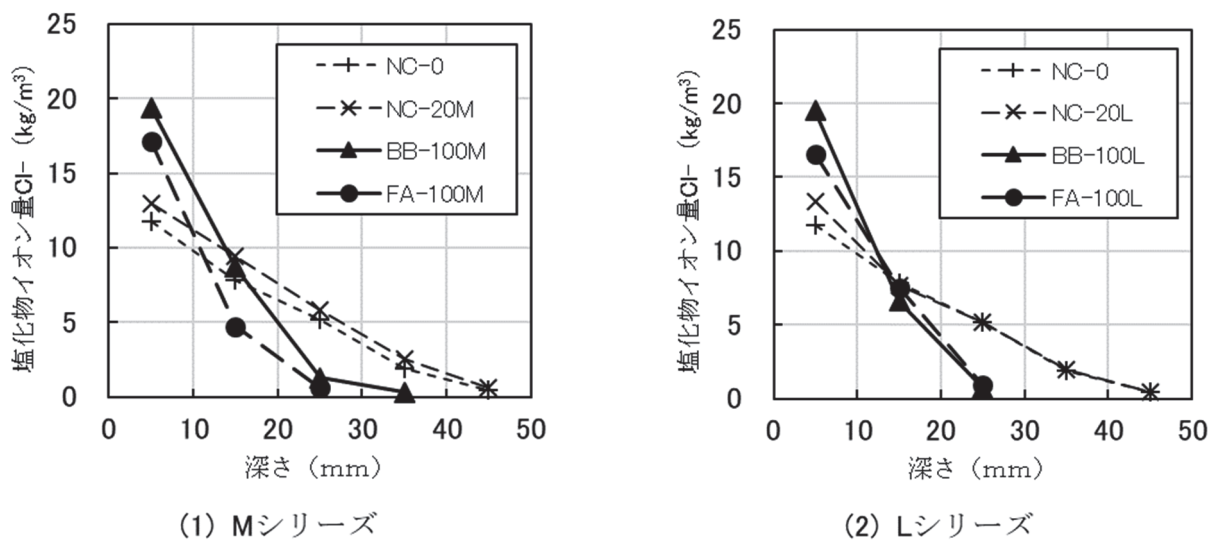


図-1 実験1の全塩化物イオン量の分布

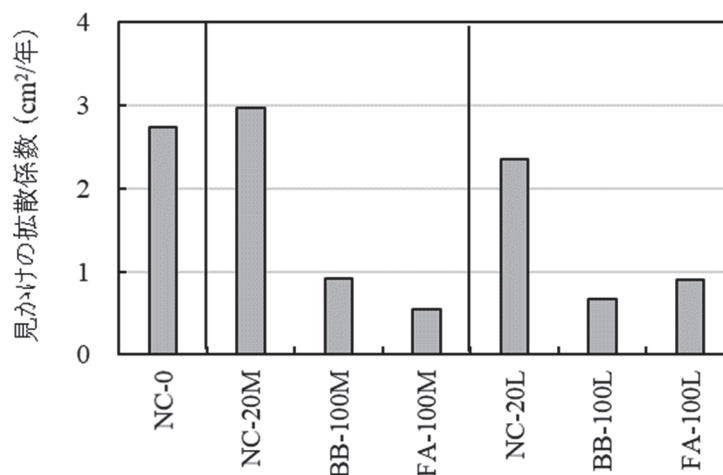


図-2 実験1の見かけの拡散係数の比較

これらの図より、まず、普通セメントを使用し、普通骨材を使用した NC-0 と、再生粗骨材を 20% 混入した NC-20M、NC-20L を比較する。図-2 に示す見かけの拡散係数では、NC-20M の値が僅かに大きく、NC-20L の値が僅かに小さいように見えるが、図-1 の塩化物イオン量の分布を見ると普通骨材を用いた場合との差はごく僅かであり、塩化物イオン量測定の影響も考えると、同等とみなしてよいと考えられる。

次に、混合セメントを用いて再生粗骨材を 100% 使用した配合であるが、混合セメントの効果によってペーストの組織が緻密化することが知られており、この効果によって、塩化物の浸透を大幅に抑えられる結果となった。

3. 実験2

3.1 実験方法

実験には表-3 に示す2種類の再生粗骨材を使用した。JIS に規定される再生粗骨材 M の規定を満足する再生粗骨材と、再生粗骨材 L に該当する再生粗骨材である。

表-3 実験2に用いた再生骨材の品質

	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
再生粗骨材M	2.49	2.40	3.77
再生粗骨材L	2.39	2.26	5.91

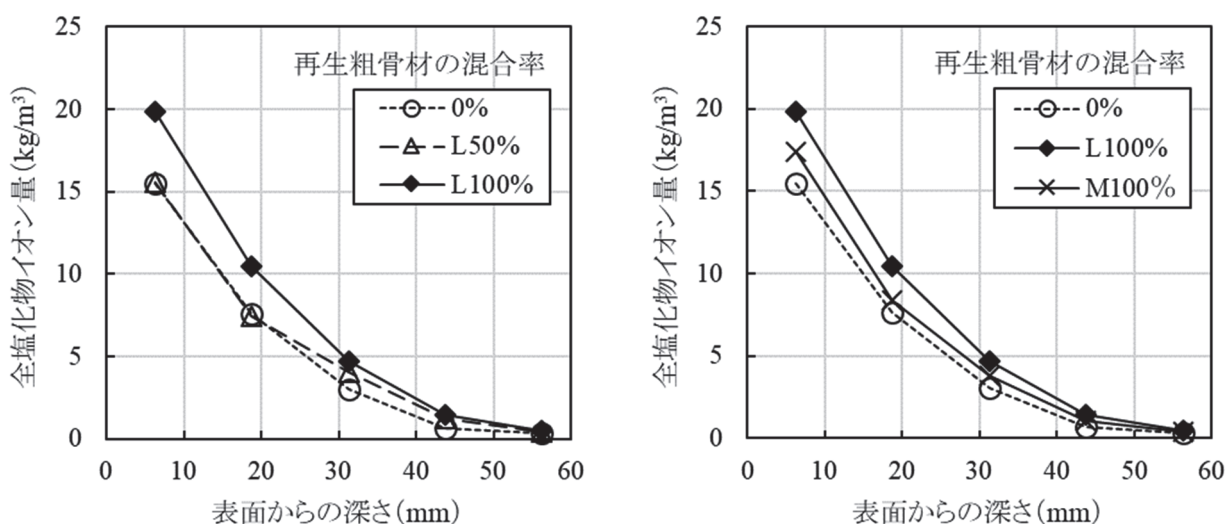
配合は水セメント比 55%、細骨材率 46%、単位水量 172kg/m³ とし、再生粗骨材 L を用いた配合では容積混合率を 0, 50, 100% とした (再生粗骨材 M を用いた配合での容積混合率は 100% のみを実施)。再生粗骨材以外の材料としては、普通ポルトランドセメント、粗骨材として砂岩砕石、細骨材として川砂を使用した。練り上がりの空気量は 4.5±1.5%、スランプは 16±2.5cm の範囲となった。

円柱供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を作製し、28日間の水中養生を行った。塩分浸透抵抗性の試験方法としては土木学会規準 JSCE-G 572 に従い、10%NaCl 溶液に1年間浸漬した。浸漬後、表面から10mm 間隔で試験体を切断し、全塩化物イオンの深さ方向の分布を比較した。

3.2 実験結果

実験結果として、再生粗骨材 L の混合率の影響を図-3（1）に示す。これによれば、再生粗骨材 L の混合率が100の配合で全塩化物イオン量がやや大きくなっているが、混合率50%の条件では混合率0%の条件とほぼ同等の分布を示した。図-3（2）は普通骨材と、再生粗骨材 L100%、M100%を比較したものである。再生粗骨材 L の分布に比較して、再生粗骨材 M の分布は普通骨材使用の分布に近い結果となった。

図-3（1）と（2）の結果から判断して、再生粗骨材 M を25%混合した場合の塩分浸透抵抗性は、普通骨材を使用したコンクリートと同等と判断してよいと考える。



(1) 再生粗骨材 L の混合率の影響

(2) 再生粗骨材 M と L の比較

図-3 実験2の全塩化物イオン量の分布

4. まとめ

- (1) 実験1の結果より、普通セメントを使用し、再生粗骨材を20%使用した配合の塩分浸透抵抗性は、普通骨材を使用した配合と同等であった。また、実験2の結果から判断して、再生粗骨材を25%使用した配合の塩分浸透抵抗性は、普通骨材を使用した配合と同等と考えられる。
- (2) 実験1の結果より、混合セメントを使用し、再生粗骨材を100%使用した配合の塩分浸透抵抗性は、混合セメント使用による効果で組織が緻密化し、大幅に改善される結果となった。

参考文献

- 1) 片平博, 古賀裕久: 再生粗骨材を用いたプレキャストコンクリートの塩分環境下における凍結融解抵抗性, 土木学会次学術講演会, Vol.72, No.5, 971-972, 2017

技術資料 4. 中性化抵抗性

1. はじめに

再生骨材コンクリートの中性化抵抗性に関しては多くの報告がある。その中には再生骨材を使用したコンクリートの中性化抵抗性は普通コンクリートと同等であるという報告と、普通コンクリートよりも劣るという報告の双方があった。

中性化はコンクリート組織の緻密さと密接な関係があり、セメントが同じであれば、緻密さと密接な関係のある圧縮強度と対応があると考えられる。そこで、過去の文献^{1)~11)}を収集し、圧縮強度と中性化抵抗性との関係について整理した。その結果、両者の間には非常に良い対応関係があることが分かった¹²⁾。

2. 調査方法

1996年から2019年までのセメント協会、土木学会、建築学会およびコンクリート工学会で発表された論文を調査し、以下の条件を満足する論文を抽出した。

- ・普通骨材コンクリートと再生骨材コンクリートを比較していること。
- ・使用セメントが普通ポルトランドセメントであること。
- ・圧縮強度試験結果 (σ_{28}) と、促進中性化試験結果が示されていること。
- ・促進中性化試験の条件として、炭酸ガス濃度 5%、温度 20°C、湿度 60%RH であること。

抽出した論文のデータから、圧縮強度と中性化速度係数との対応を調べた。

3. 調査結果

調査の結果、条件を満足した論文は 10 論文^{1)~10)}であった。これに土木研究所で実施した実験結果を加えた 11 の実験データについて検討した。

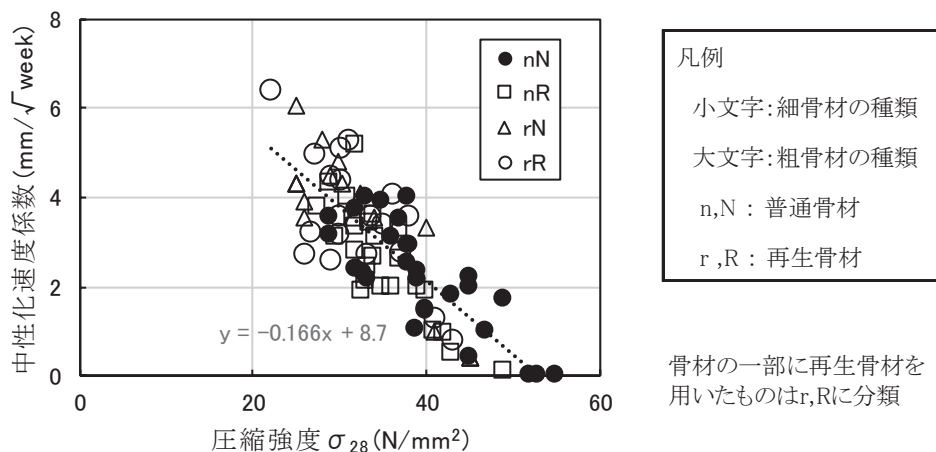
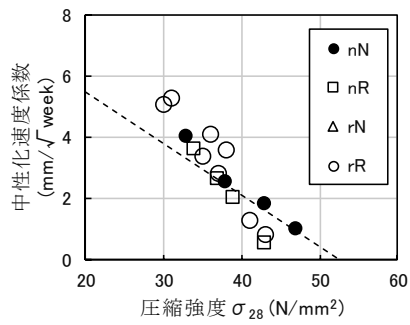
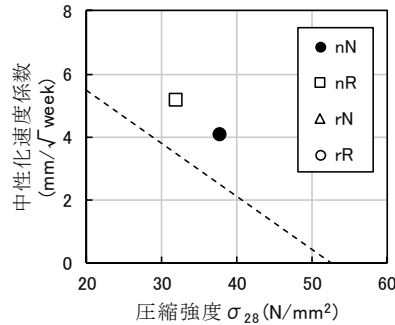


図-1 圧縮強度と中性化速度係数との関係 (全データ)

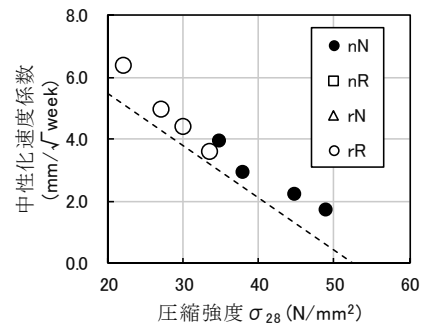
全ての実験データについて、圧縮強度と中性化速度係数との対応をみた結果を図-1に示す。これによれば、圧縮強度が高いものほど中性化速度係数が小さくなる傾向が見られた。中性化はコンクリート



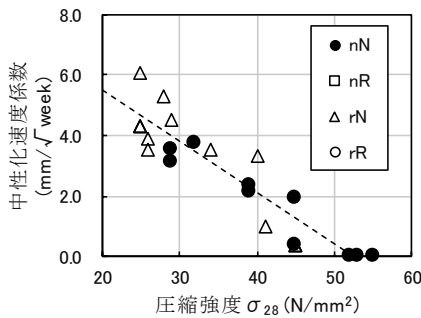
(1) 笠井, セメ技, 1996



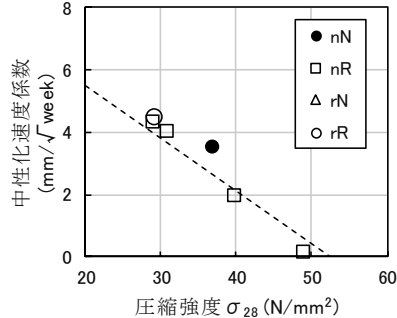
(2) 島崎, セメ技, 1999



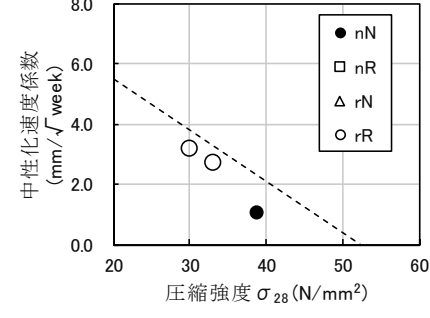
(3) 鈴木, 建築学会, 2000



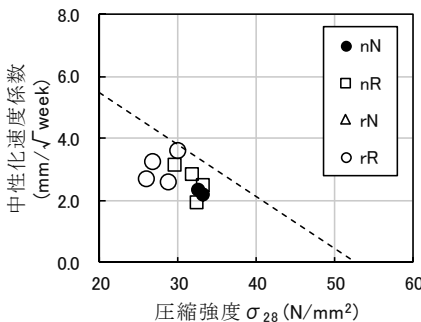
(4) 麓, 土木学会論文, 2004



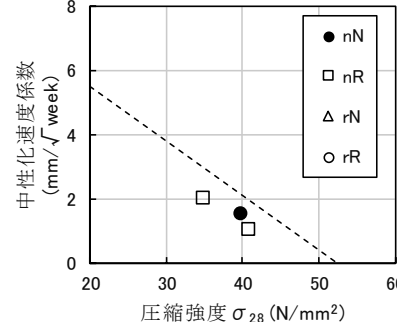
(5) 山崎, JCI年次, 2004



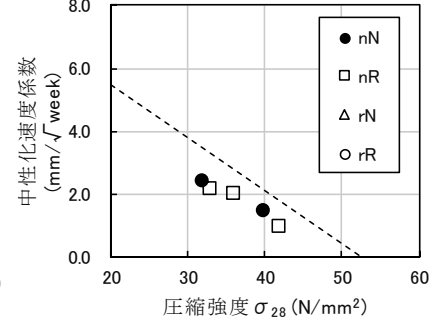
(6) 竹内, 建築学会, 2004



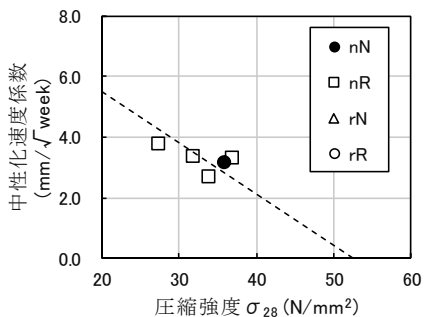
(7) 電力解体コンクリート, 2005



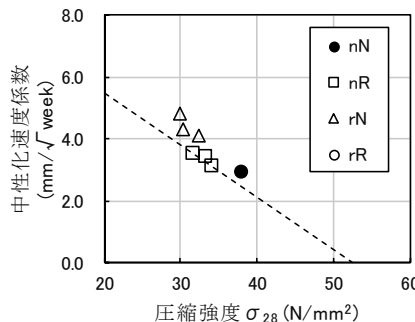
(8) 竹内, JCI年次, 2008



(9) 高橋, 建築学会, 2008



(10) 亀山, セメ技, 2013



(11) 土木研究所の実験結果

凡例の記号について

n : 普通細骨材, N : 普通粗骨材
 r : 再生細骨材, R : 再生粗骨材
 再生骨材と普通骨材の混合の場合は
 再生骨材に分類

破線 : 図-1に示す全データの回帰線

図-2 圧縮強度と中性化速度係数との関係 (各論文ごと)

組織の緻密さと密接な関係があり、セメントが同じ種類であれば、緻密さと密接な関係のある圧縮強度と良い対応があるのではないかと推察した。しかし、図-1によれば双方の対応にはある程度のばらつきが認められた。ここで、試験条件について考える。圧縮強度試験は水中養生 28 日時点で実施される。これに対して促進中性化試験は水中 28 日の養生後に、20°C、60%RH の条件で 28 日間気中養生された後に試験が開始される。すなわち、28 日間の気中養生中の強度の増加傾向がセメントごとに異なれば、ある程度のばらつきが生じるのは当然である。

そこで、論文ごとに、圧縮強度と中性化速度係数との対応をみた。この結果を図-2に示す。この図には図-1で求めた回帰直線を示した。いずれの実験結果も、データの分布が回帰直線と並行する傾向を示した。なお、論文の中には水セメント比を数段階変えることで、普通コンクリートのデータも複数存在するものもあるが、普通コンクリートのデータも再生骨材コンクリートのデータもほぼ同じ線上にプロットされる結果となった。すなわち、圧縮強度と中性化速度係数の関係は普通コンクリートでも再生骨材コンクリートでも同一である。言い換えると、水セメント比を変えて普通コンクリートと圧縮強度を揃えた再生骨材コンクリートの中性化速度係数は普通コンクリートと同等と判断できる。

図-3は供試体の養生条件に関して、標準養生と蒸気養生を比較したもの¹¹⁾である。この図にも図-1の回帰直線を示したが、データは回帰直線上にあり、圧縮強度と中性化速度係数の関係は養生条件を変えても変わらない結果となった。

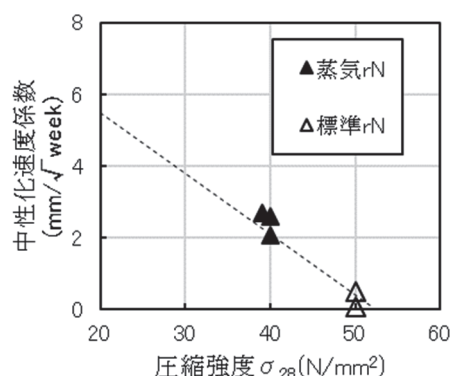


図-3 養生条件の比較¹¹⁾

4. まとめ

- (1) 中性化速度係数は圧縮強度と明確な関係があった。
- (2) 圧縮強度を普通コンクリートと同等となるように配合設計した再生骨材コンクリートの中性化速度係数は普通コンクリートと同等であった。
- (3) (1) および (2) の傾向は蒸気養生を行ったコンクリートでも同様の結果であった。

参考文献

- 1) 笠井芳夫, 阿部道彦, 柳啓: 再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究, 第 50 回セメント技術大会講演要旨, pp.346-347, 1996
- 2) 島崎泰, 村田芳樹, 山本英夫, 菅原賢治: 団地内の建替工事から発生する再生粗骨材を使用したコンクリートの基礎物性について, 第 53 回セメント技術大会講演要旨, pp.430-431, 1999

- 3) 鈴木澄江, 柳啓: 高炉セメント B 種を使用した再生骨材コンクリートの耐久性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1073-1074, 2000
- 4) 麓隆行, 山田優: 再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について, 土木学会論文集, V-64, No.767, pp.61-73, 2004
- 5) 山崎順二, 立松和彦: 実機で製造した再生骨材コンクリートの強度および耐久性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1563-1568, 2004
- 6) 竹内毅典, 寺西浩司, 江口清: オートクレープ養生した再生コンクリートの品質に関する研究 (その 3. 中性化および耐凍害性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.339-340, 2004
- 7) 土木学会コンクリート委員会 電力施設解体コンクリート利用検討小委員会: 電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針 (案), 土木学会コンクリートライブラリーNo.120, 2005
- 8) 竹内博幸, 高橋祐一, 河野政典, 山田雅裕: 再生骨材コンクリートの適用範囲拡大に向けた耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.373-378, 2008
- 9) 高橋祐一, 河野政典, 上西隆, 竹内博幸, 山田雅裕: 再生骨材コンクリートの耐久性に関する研究その 2.耐久性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1201-1202, 2008
- 10) 亀山敬宏, 松田信広, 伊代田岳史: 再生骨材の普及に向けた骨材の品質改善に関する一考察, 第 67 回セメント技術大会講演要旨, pp.338-339, 2013
- 11) 道正泰弘, 近藤学, 熊谷俊雄, 村雄一, 金子雄一, 本間雅人: 大規模電力建物における再生骨材および再生コンクリートの利用 その 28. 再生細骨材および再生粗骨材を用いた二次製品用コンクリートの性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 681-682, 2006
- 12) 片平博, 古賀裕久: 再生骨材コンクリートの圧縮強度と中性化との関係, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 20 巻, pp. 1-6, 2020.10

技術資料 5. 圧縮強度

1. はじめに

再生骨材をコンクリートに用いると、再生骨材に付着する低品質な旧モルタル分などの影響により、圧縮強度の低下が起きるとされている。本資料では、再生骨材がコンクリートの圧縮強度に与える影響の度合いについて文献調査した結果と、普通骨材と混合した場合についての室内試験の結果を紹介する。

2. 再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度に関する文献調査

コンクリート工学年次論文報告集に掲載された論文のうち、粗骨材中の全量が再生粗骨材 M または L、細骨材が普通骨材、結合材が普通ポルトランドセメントである実験報告を抽出し、それらの中から材齢 28 日における圧縮強度データを収集した。なお、養生方法は標準養生を対象とし、封緘・気中・蒸気養生と明示されている文献を除外した結果、対象文献は計 70 件であった。

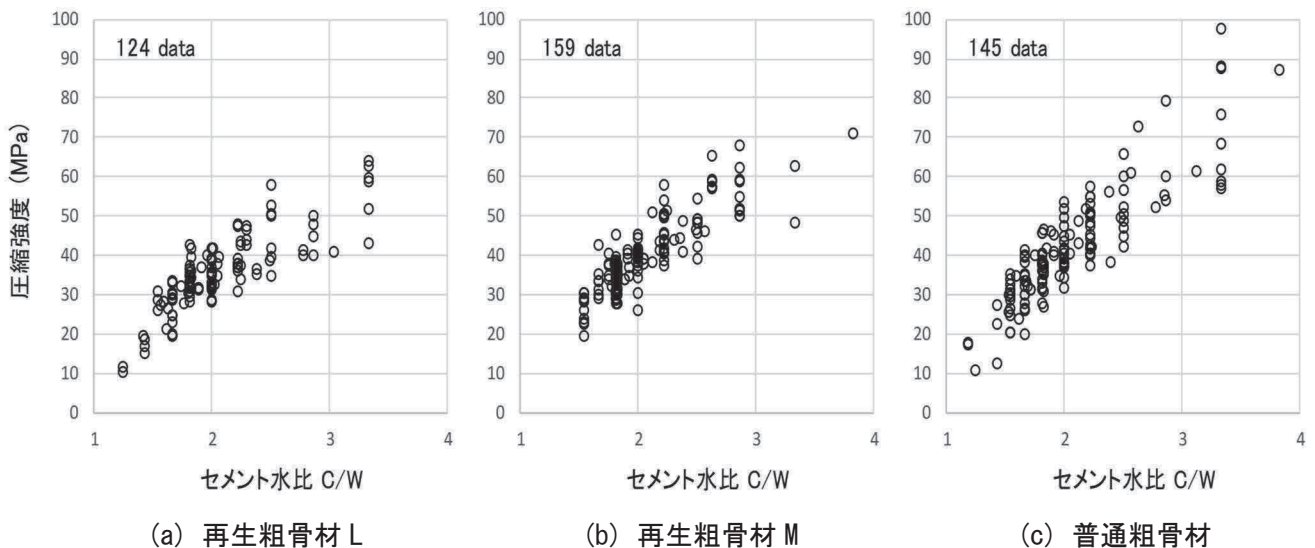


図-1 セメント水比と 28 日強度の関係

コンクリートのセメント水比と 28 日強度の関係を図-1 に示す。また、文献調査の対象とした 70 件を元に、粗骨材中の全量が普通粗骨材である場合についても関係を整理した結果を図-1(c) に示す。図-1(c) に示すように、セメント水比と圧縮強度との間には直線関係があることが知られている。しかし、再生粗骨材 L のデータを集計した図-1(a) を見ると、セメント水比 2 (W/C=50%) を境として関係が変化しており、セメント水比の増加に対する強度の伸びが小さくなり、40~50 N/mm² 程度で頭打ちの傾向を示している。これは使用する骨材の堅硬さがコンクリートの強度に影響を与え、再生粗骨材 L の存在が強度発現の上の制約要因となっているためと考えられる。

一方、本ガイドライン(案)で対象としている再生粗骨材 M は再生粗骨材 L に比べて旧モルタルの付着量が少ない。そのため、図-1(b) を見ると、セメント水比 2.9 以下 (W/C=35%以上・圧縮強度 50 N/mm² 程度) までは概ね直線的に強度が増加する傾向があった。

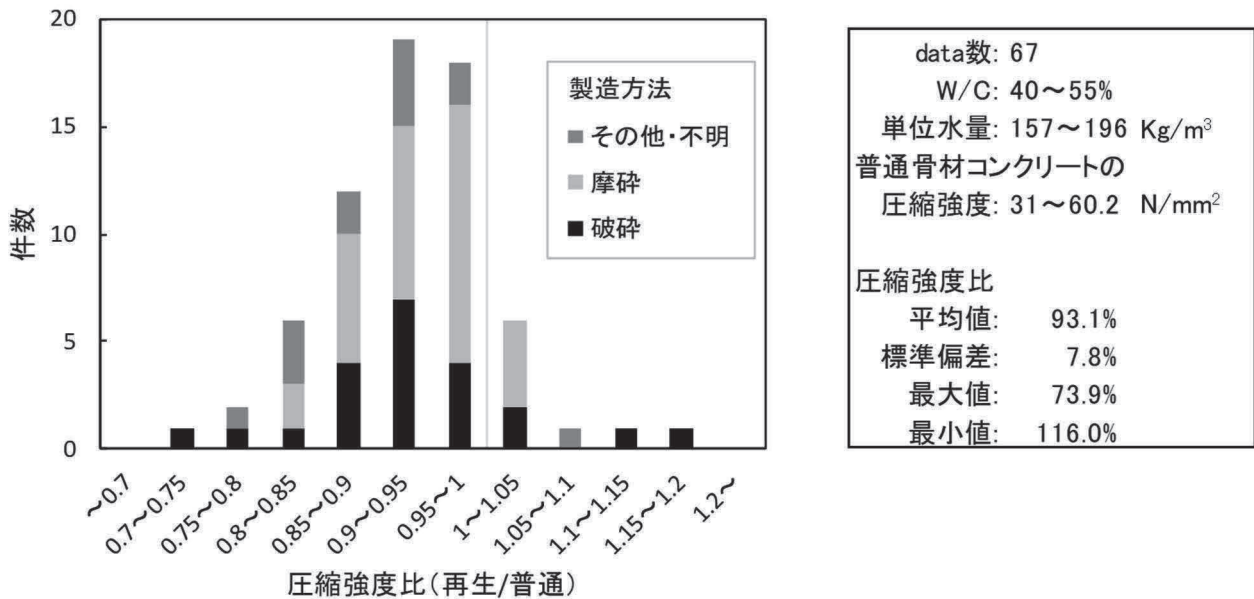


図-2 再生粗骨材Mを用いたコンクリートの圧縮強度低下率（材齢 28 日）

次に、文献調査の対象とした 70 件から、さらに、粗骨材中の全量が再生粗骨材 M、水セメント比の範囲が 40~55% である実験報告を抽出し、計 28 の文献^{1~28)}を対象に再生粗骨材Mを用いたコンクリートの圧縮強度の低下率を検討した。

再生骨材コンクリートの圧縮強度を、同一文献における普通骨材コンクリートの圧縮強度で除した値を圧縮強度比とし、その頻度分布を図-2に示す。なお、水セメント比が同じ再生骨材コンクリートと普通骨材コンクリートのデータを用いた。その結果、圧縮強度の低下率は平均で 6.9%となった。また、製造方法別に見ると、単純な破砕により作成した場合よりも、摩砕を行った場合の方が、圧縮強度の低下率が比較的小さくなった。

なお、再生粗骨材 M という点は共通するものの、付着する旧モルタル分の品質や量、原骨材の質は様々であり、その結果、圧縮強度比にも変動があったと考えられる。

3. 普通粗骨材と再生粗骨材の混合利用による影響

2. では、粗骨材の全量を再生骨材としていたが、再生骨材を普通骨材と混合利用した場合は、その圧縮強度への影響は低下すると考えられる。ここでは、圧縮強度の低下や混合率の影響がより明確となる L 相当の再生粗骨材と普通粗骨材とを混合使用したコンクリートの室内試験結果²⁹⁾を紹介する。

表-1 に使用材料の一覧を示す。再生粗骨材は、建築解体材を破砕・分級した再生粗骨材 L を、普通粗骨材は安山岩砕石と石灰岩砕石の 2 種類を用いた。セメントはアルカリシリカ反応対策を念頭に高炉セメント B 種を、細骨材は海砂を用いた。混和剤には、リグニンスルホン酸塩系の AE 減水剤、および樹脂酸塩系の AE 剤を用いた。

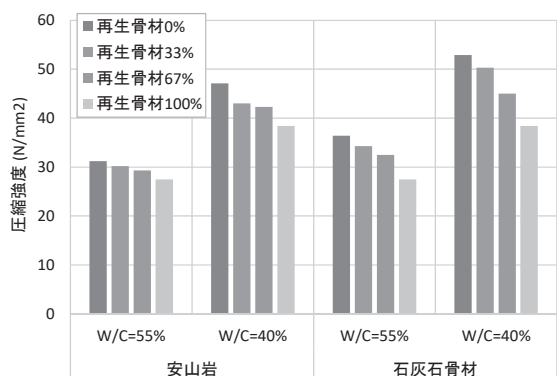
コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-2に示す。水セメント比は 55%と 40%の 2 種類とし、再生粗骨材と普通骨材のブレンド比が容積比率で 100%、67%、33%、0%となるよう設定した。目標スランプは 12±2.5cm、目標空気量は 5.0±1.0%とし、混和剤で調整した。

表－1 使用材料

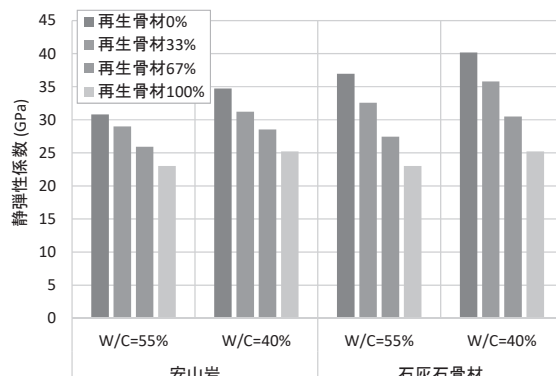
種別	使用材料
セメント	高炉セメントB種（密度 3.05 g/cm ³ 、比表面積 3.770 cm ² /g）
粗骨材	普通骨材（安山岩）
	普通骨材（石灰石）
	再生骨材
細骨材	苫小牧市錦多峰産海砂（表乾密度 2.69g/cm ³ 、吸水率 1.19%）

表－2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

No.	セメント	W/C (%)	骨材割合(%)		s/a (%)	単位量 (k/m ³)				混和剤 (%/C)			スランブ (cm)	空気量 (%)	
			普通	再生		W	C	S	安山岩	石灰石	再生	減水剤			AE剤
1	BB	55	100	0	45.0	154	280	846	1035	—	—	0.24	0.0020	10.0	4.3
2			67	33					691	—	314	0.28	0.0013	10.0	4.3
3			33	67					345	—	627	0.36	0.0010	11.1	4.7
4			100	0					—	1045	—	0.00	0.0031	13.2	4.7
5			67	33					—	697	314	0.08	0.0029	14.0	5.5
6			33	67					—	348	627	0.18	0.0018	13.0	5.1
7			0	100					—	—	941	0.33	0.0010	11.0	5.5
8	BB	40	100	0	41.0	156	390	729	1050	—	—	0.43	0.0022	10.5	5.0
9			67	33					701	—	318	0.50	0.0016	11.2	5.5
10			33	67					350	—	636	0.49	0.0010	10.0	4.9
11			100	0					—	1061	—	0.15	0.0025	11.6	4.6
12			67	33					—	707	318	0.34	0.0015	12.0	4.9
13			33	67					—	354	636	0.42	0.0010	10.3	4.9
14			0	100					—	—	955	0.45	0.0010	8.5	5.4



図－3 圧縮強度



図－4 静弾性係数

材齢 28 日まで 20°C 水中養生した円柱供試体の圧縮強度の試験結果を図－3 に、静弾性係数の試験結果を図－4 に示す。再生骨材の使用量が多いほど、圧縮強度と静弾性係数は低下した。また、その低下の程度は、圧縮強度、静弾性係数ともに、再生粗骨材の使用割合に対して比例する傾向が見られた。

4. まとめ

- (1) 普通粗骨材の代わりに再生粗骨材 M を用いた場合、圧縮強度 50 N/mm² 程度までは、セメント水比の増加に応じて概ね直線的に強度が増加する傾向があった。
- (2) 再生粗骨材 M を用いた場合、普通粗骨材を用いた場合に比べて圧縮強度は低下する傾向がある。
- (3) 普通粗骨材と再生粗骨材とを混合利用した場合、圧縮強度、静弾性係数ともに、再生粗骨材の使用

割合に対して比例する傾向があった。

そのため、再生粗骨材 M を使用したコンクリートの強度管理式は、再生粗骨材 M の使用量に応じて、普通骨材コンクリートとは別に管理する必要がある。なお、粗骨材の全量を再生骨材 M とした場合も、文献調査によれば強度の低下は平均で 6.9% であり、適切に管理すれば必要な強度を得ることは十分可能と考えられる。

参考文献

- 1) 南波篤志, 阿部道彦, 棚野博之, 前田弘美: 再生コンクリートの品質改善に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.65-70, 1995
- 2) 南波篤志, 阿部道彦, 前田弘美: 再生コンクリートの力学特性および乾燥収縮に及ぼす再生粗骨材の品質の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1047-1052, 1996
- 3) 板谷英克, 小玉克巳, 栗原哲彦: PC 枕木廃材を再生骨材として利用するための基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.157-162, 1999
- 4) 柳橋邦生, 米澤敏男, 神山行男, 井上孝之: 高品質再生粗骨材の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.205-210, 1999
- 5) 山崎順二, 二村誠二: 骨材性能評価システムによる再生骨材コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.253-258, 2001
- 6) 矢村潔, 坂田一隆, 愛甲秀行: コンクリート用再生骨材の実用化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.259-264, 2001
- 7) 早川光敬, 陣内浩, 並木哲, 飯島真人: 再生骨材を用いたコンクリートの強度特性と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1203-1208, 2002
- 8) 高橋智彦, 長瀧重義, 大久保嘉雄: 重回帰分析等を用いた再生コンクリートの強度特性に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1227-1232, 2002
- 9) 辻大二郎, 田村雅紀, 野口貴文: 低品質再生骨材の改質処理による構造体への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1251-1256, 2002
- 10) 片平博, 河野広隆: 小径コアの短時間吸水量に着目したコンクリートの耐久性評価法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1599-1604, 2002
- 11) 山崎順二, 立松和彦: 実機で製造した再生骨材コンクリートの強度および耐久性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1563-1568, 2004
- 12) 依田和久, 小野寺利之, 新谷彰, 川西泰一郎: 再生粗骨材の品質がコンクリートの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1457-1462, 2006
- 13) 棚野博之, 鹿毛忠継, 濱崎仁, 杉本琢磨: 中品質再生骨材を用いた再生骨材コンクリートの性能評価と活用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.165-170, 2007
- 14) 竹内博幸, 高橋祐一, 河野政典, 山田雅裕: 再生骨材コンクリートの適用範囲拡大に向けた耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.373-378, 2008
- 15) 黒田泰弘: 反応性を有する再生骨材を用いたコンクリートの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.379-384, 2008
- 16) 入江真吾, 神代泰道, 一瀬賢一: 建物解体コンクリート塊から製造した再生粗骨材の品質が再生骨材

- コンクリートに与える影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31， No.1， pp.1777-1782， 2009
- 17) 高橋祐一，榊田佳寛，竹内博幸：モルタル塊残留率が再生骨材コンクリートの性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32， No.1， pp.1433-1438， 2010
- 18) 入江真吾，神代泰道，一瀬賢一：低品質再生粗骨材の付着モルタルの特性が再生コンクリートに与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32， No.1， pp.1439-1444， 2010
- 19) 高橋祐一，榊田佳寛，竹内博幸，黒田満：混入モルタルの存在形態および性質が再生骨材コンクリートの強度性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33， No.1， pp.1517-1522， 2011
- 20) 麓隆行：絶乾状態の再生骨材を使用したコンクリートの物理的特性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.33， No.1， pp.1523-1528， 2011
- 21) 河村景史，堺孝司，錦織和紀郎，北垣亮馬：廃コンクリートの低環境負荷完全リサイクルに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34， No.1， pp.1492-1497， 2012
- 22) 六名良輔，堺孝司，北垣亮馬，名取正夫：低環境負荷再生骨材コンクリートの強度・弾性係数に及ぼす再生細骨材の改質と微粉の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35， No.1， pp.1459-1464， 2013
- 23) 岡友貴，橋本親典，渡邊健，石丸啓輔：低度処理再生骨材およびフライアッシュを使用したコンクリートの施工性能および初期強度発現性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38， No.1， pp.1569-1574， 2016
- 24) 竹川翔馬，高巢幸二，小山田英弘，陶山裕樹：品質の異なる再生骨材を組み合わせ使用したコンクリートの力学性状および収縮性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.38， No.1， pp.1803-1808， 2016
- 25) 高橋祐一，松田信広，竹内博幸：再生粗骨材Mを用いたコンクリートの適用部位の拡大に向けた基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38， No.1， pp.1797-1802， 2016
- 26) 道正泰弘：低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの品質改善，コンクリート工学年次論文集，Vol.39， No.1， pp.1525-1530， 2017
- 27) 馬徳群，都築敦大，福山智子，千歩修：THE FROST EVALUATION OF DRIED CONCRETE USING RECYCLED COARSE AGGREGATE BY THE ACCELERATED FREEZE-THAW TEST AND THE CRITICAL DEGREE OF SATURATION TEST，コンクリート工学年次論文集，Vol.40， No.1， pp.795-800， 2018
- 28) 藤本就真，渡辺健，鈴木彩莉，橋本親典：高炉スラグ及び再生粗骨材を用いたコンクリートに対する圧縮強度評価式の適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41， No.1， pp.1889-1894， 2019
- 29) 野々村佳哲，吉田行，安中新太郎：再生粗骨材と普通粗骨材の混合使用と塩分浸透抵抗性について，寒地土木研究所月報，第 793 号，pp.54-59， 2019.6

表-1 コンクリート配合

試験体名	W/B (%)	細骨材率 (%)	単 位 量					
			水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	再生粗骨材 (kg/m ³)	膨張材 (kg/m ³)	減水剤 (kg/m ³)
N40	40.0	47.0	154	385	847	895	0	3.27
EX30-40	40.0	47.0	154	355	847	895	30	3.27
N50	50.0	50.0	150	300	944	885	0	3.00
EX30-50	50.0	50.0	150	270	944	882	30	3.00

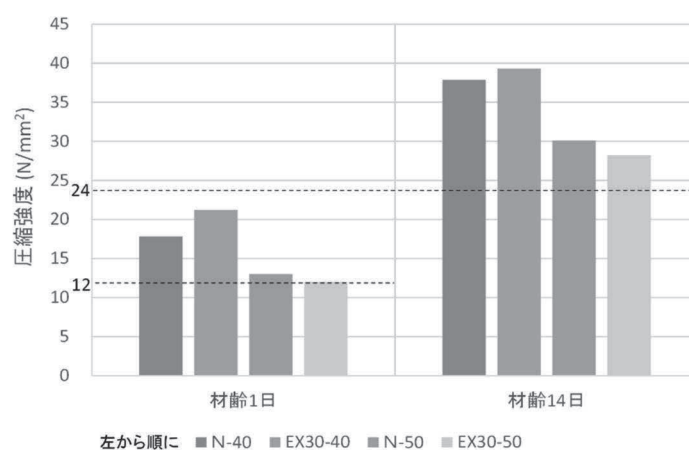


図-2 圧縮強度試験結果

3. 暴露状況

作製した大型L型擁壁は、材齢 1 ヶ月経過後、北海道の日本海沿いに位置する増毛暴露試験場に設置した。写真-1に示すように、各擁壁には背面土を盛っておらず、両面が暴露状態となっている。

現在、暴露後 6 年が経過しているが、乾燥収縮によるひび割れや、凍塩害によるスケーリングなど、外觀性状の変化は生じていない。



写真-1 暴露試験場への設置状況

参考文献

- 1) 清野昌貴, 吉田行, 島多昭典: 再生粗骨材 M を使用した大型プレキャストコンクリート製品の積雪寒冷地での適用性, 寒地土木研究所月報, 第 744 号, pp.20-25, 2015.5

技術資料 7. 再生骨材の品質変動に関する検討

1. はじめに

再生骨材は普通コンクリートに比較して品質の変動が大きいことが予想される。そこで、実際に再生クラッシュランを製造している工場から定期的に試料を採取し、品質の変動を調査した。また、この試料を用いてコンクリートを製造し、コンクリートの圧縮強度の変動に与える影響について調査した。

2. 実験方法

再生クラッシュランを製造している A 工場および B 工場から、約半年間にわたり、2 週間に 1 回程度の割合で再生クラッシュラン RC40 を 10 回採取した。採取したクラッシュランを 25mm および 5mm のふるいにかけて、2505 の粒子を採取し、これを A-L、B-L と称した。次に、この再生 A-L、B-L をロサンゼルス試験機にかけて一定時間研磨した。これを 5mm ふるいにかけて、5mm 以下の粒子を排除し、洗浄したものを A-M、B-M と称した。

これらの再生骨材の密度および吸水率等を測定し、品質変動の程度を検討した。また、各 10 種類ずつ製造した再生粗骨材から吸水率と FM 凍害指数の品質のレベルが上・中・下の骨材（A 工場：3 水準、B 工場：4 水準）を選定し、これらを用いて再生骨材コンクリート（水セメント比 55%、細骨材率 46%、空気量 4.5%、普通ポルトランドセメント、川砂、AE 減水剤を使用）を製造し、スランプ、圧縮強度（ σ_{28} ）および静弾性係数の変動幅を調べた。なお、コンクリートの製造に用いた骨材については、粗粒率（F.M.）と空気量測定時の骨材修正係数の値も測定した。

また、A、B 工場に加えて、約半年間の間に、再生骨材コンクリート M を用いたプレキャスト製品を実際に製造している C 工場から約半年間の間に 3 回、D 工場から 2 回、再生骨材 M を調達し、骨材試験とそれを使用したコンクリートの試験を実施した。これらを C-M、D-M と称した。

2. 実験結果

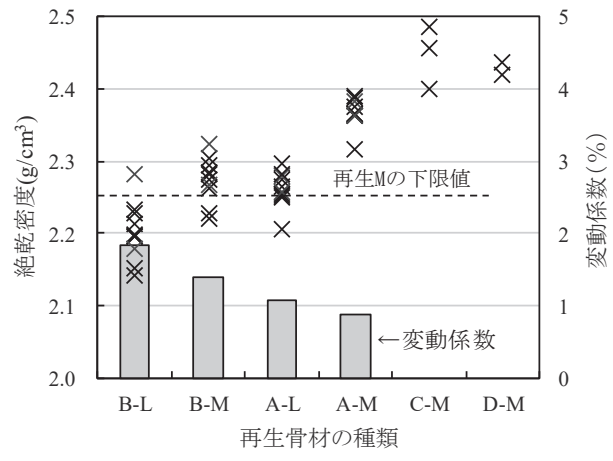
再生粗骨材の絶乾密度、表乾密度、吸水率および FM 凍害指数（塩水 1 サイクル、技術資料 2 参照）について、それぞれの値の分布と変動係数（データ数の多い A、B 工場のみ）を図-1～4 に示す。図の横軸は再生骨材の種類であり、各再生粗骨材の吸水率の平均値が大きいものから順に示したが、いずれの物性も吸水率が小さいものほど（グラフの左から右にいくほど）変動係数が小さくなる傾向を示した。なお、図-1 において、再生粗骨材 M の絶乾密度の規制値は 2.3g/cm^3 以上であるが、有効桁の関係で 2.25g/cm^3 以上は合格と判定されるので、 2.25g/cm^3 に下限値を示した。

これらの図から、まず、工場ごとの製品の特長を述べる。A 工場産の A-L は再生骨材 L の品質規格（吸水率 7.0% 以下）を満足しており、研磨後の A-M の品質は概ね再生骨材 M の品質規格（絶乾密度 2.3g/cm^3 以上、吸水率 5.0% 以下）を満足した。これに対して B 工場産のものは、B-L の骨材品質が A-L に比較して悪く、再生骨材 L の品質規格を満足しないものがあった。また、研磨後の B-M の品質は、再生粗骨材 M の品質規格を満足するには至らなかった。

JIS A 5022 に規定されている再生粗骨材 M の絶乾密度の許容差は「生産者と購入者とが協議によって定めた絶乾密度に対して $\pm 0.1\text{g/cm}^3$ とする」と記されている。図-1 によれば再生粗骨材 M の規準を満

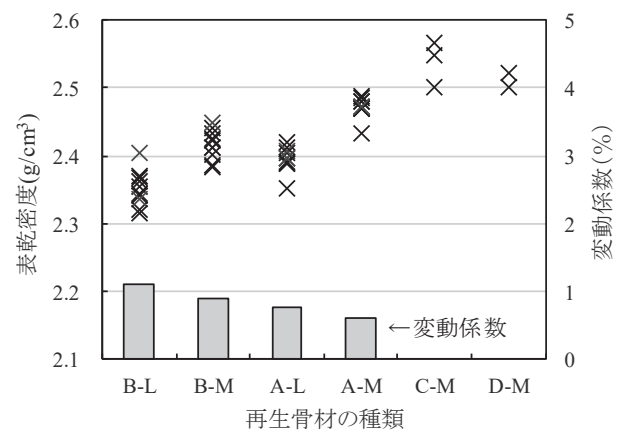
たす A-M の変動係数は 1 % (0.024 g/cm³) 未満であり、JIS の許容差に比較して十分に小さな変動幅であった。

コンクリートの配合計算に用いられる粗骨材の表乾密度については図-2に示すように、再生骨材 M 相当（表乾密度で概ね 2.40g/cm³ 以上と推定）の A-M の変動係数は 0.7%程度であった。コンクリート製造工場における粗骨材量の計量精度が 3%以下であることを考えると、再生粗骨材 M の表乾密度の変動の影響は比較的小さいと想定される。



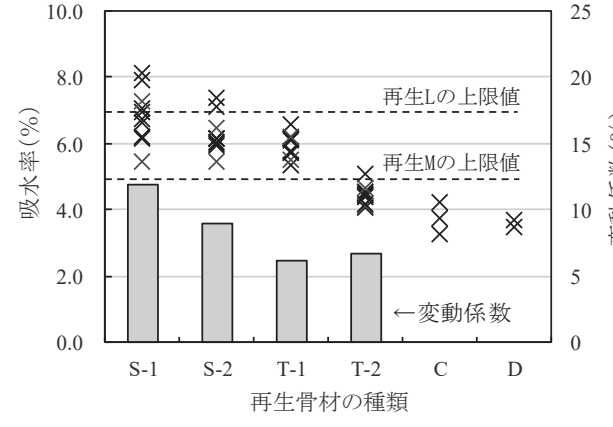
※C-M, D-Mはデータ数が少ないため変動係数を示していない

図-1 絶対乾密度の分布と変動係数



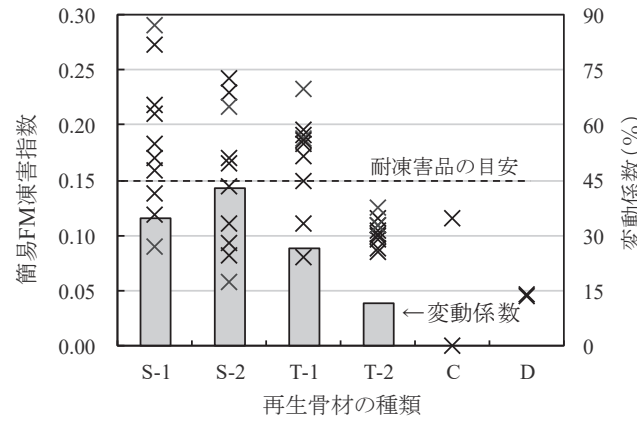
※C-M, D-Mはデータ数が少ないため変動係数を示していない

図-2 表乾密度の分布と変動係数



※C-M, D-Mはデータ数が少ないため変動係数を示していない

図-3 吸水率の分布と変動係数



※C-M, D-Mはデータ数が少ないため変動係数を示していない

図-4 FM凍害指数の分布と変動係数

再生粗骨材の耐凍害性を示す FM 凍害指数（技術資料2 参照）は図-4に示すように、再生粗骨材の品質が L 相当の場合には値の変動が大きいが、M 相当の品質であれば、ばらつきも小さく、また、今回のケースでは、その全てが耐凍害品の目安である 0.15 以下の値となった。

再生粗骨材の粒度分布を表す粗粒率（F.M.）を図-5に示す。F.M.の変動幅は 0.4 程度認められた。また、スランプの変動幅を図-6に示すが 5cm 程度の変動を示した。今回は各再生骨材の試料量が少ないこともあり、粒度分布まで調整していない。コンクリートのフレッシュ性状の安定化には粒度分布の変

動を抑えることが重要であり、実際の製造においては、粒度分布の安定化が重要と考えられる。

図-7は、フレッシュコンクリートの空気量測定時の骨材修正係数の値である。これによれば、骨材修正係数は再生粗骨材 L で 0.6~0.9%程度、再生粗骨材 M で 0.2~0.5%程度を示した。このように、再生骨材の骨材修正係数は普通骨材に比較して大きく、補正は必須と考える。なお、M クラスの変動は L クラスに比較して小さく、定期的な測定を行い、適宜、骨材修正係数の見直しを行うことで、コンクリートの品質に与える影響を小さく管理できると考えられる。

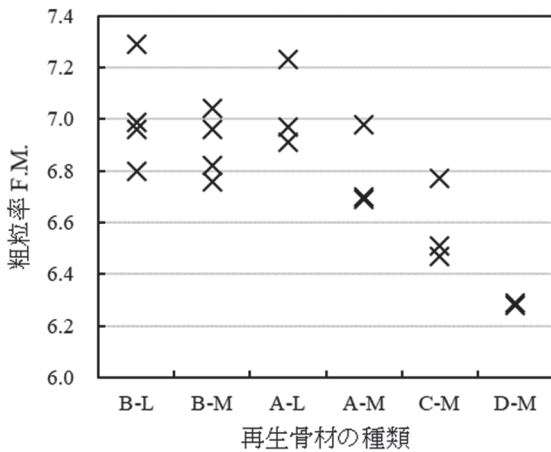


図-5 再生粗骨材の粗粒率

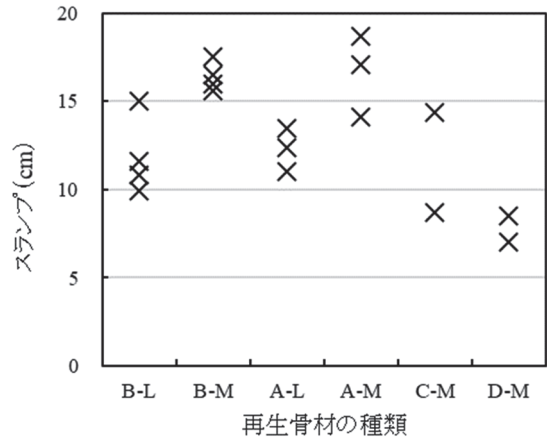


図-6 再生骨材コンクリートのスランプ

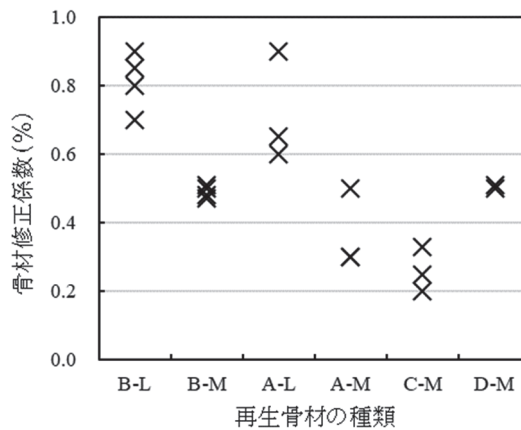
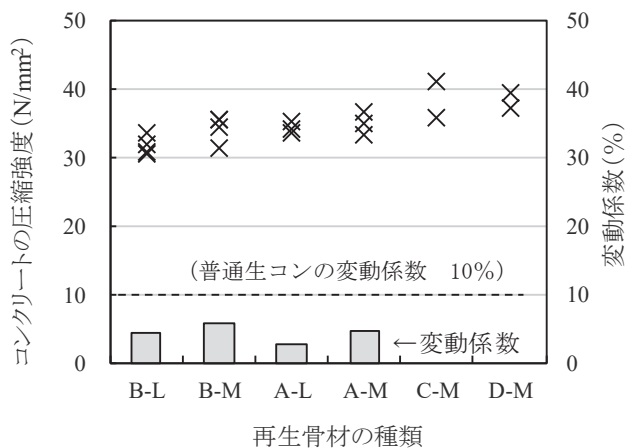


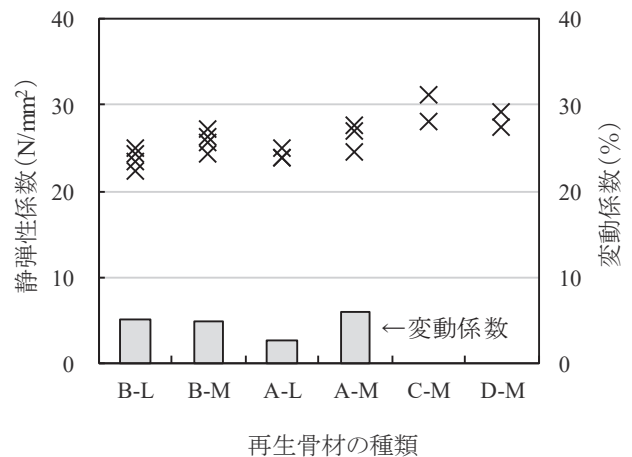
図-7 再生骨材の骨材修正係数

再生骨材コンクリートの圧縮強度を図-8に、静弾性係数を図-9に示す。再生粗骨材の品質がよくなるほど圧縮強度は高くなる傾向を示し、変動幅は概ね 5N/mm^2 程度認められた。静弾性係数の結果も概ね同様であった。一般的に、コンクリートの製造においては、圧縮強度の変動係数を 10%程度として配合設計を行っている工場が多い。これに対して今回の実験で得られた再生骨材コンクリートの圧縮強度の変動係数は小さな値であった。このことより、配合設計に用いる変動係数の値には、最初に普通コンクリートの製造と同程度の値を採用し、製造を進めるうえで、適宜見直しを行うのが良いと考えられる。



※C-M,D-Mはデータ数が少ないため変動係数を示していない

図-8 再生粗骨材コンクリートの圧縮強度



※C-M,D-Mはデータ数が少ないため変動係数を示していない

図-9 再生骨材コンクリートの静弾性係数

3. まとめ

今回の実験の範囲では、以下の傾向が確認された。

- (1) 再生粗骨材の各種物性の変動係数は、L から M に品質が良くなるほど小さくなる傾向を示した。
- (2) 再生粗骨材 M の絶乾密度の変動幅は JISA 5022 に規定されている再生粗骨材 M の絶乾密度の許容差に比較して小さい値であった。
- (3) 再生粗骨材 M の表乾密度の変動係数は 0.6% 程度であり、粗骨材の計量精度 (3% 以下) に比較して小さな値であった。
- (4) 再生粗骨材の粗粒率 (F.M.) の変動幅は 0.4 程度認められた。再生骨材コンクリートのフレッシュ性状を安定させるには再生粗骨材の粒度分布の変動を抑えることが重要と考えられる。
- (5) 再生粗骨材の骨材修正係数は普通骨材よりも大きいので、定期的に測定して、測定空気量を補正する必要がある。
- (6) 圧縮強度が 30~40N/mm² 程度の場合、再生骨材コンクリート M の配合設計に用いる圧縮強度の変動係数は、普通コンクリートと同程度の値を用いて良いと考えられる。

技術資料 8. 東北地方整備局管内における暴露試験

1. はじめに

東北地方では、以前から再生粗骨材 M を用いた低コストで耐久的なプレキャストコンクリート製品（以下 PCa 製品という）が検討されており、試作された PCa 製品が東北地方整備局管内に設置されてきた経緯がある。本報では、その追跡調査結果を紹介する。

2. 再生粗骨材 M の品質と PCa 製品の配合

試作された PCa 製品には、路盤材製造工場において製造された再生粗骨材 M を用いた。それらの品質を年度別に表-2.1 に示す。代表的な外観写真を図-2.1 に示す。いずれも JIS に示された規格値を満足している。

PCa 製品は、道路用製品である側溝や蓋であり、東北地方整備局管内の 7 つの PCa 製品工場で作製した。再生粗骨材 M 以外の材料は、それぞれの工場で通常の製品を製造する際に使用されている材料とした。

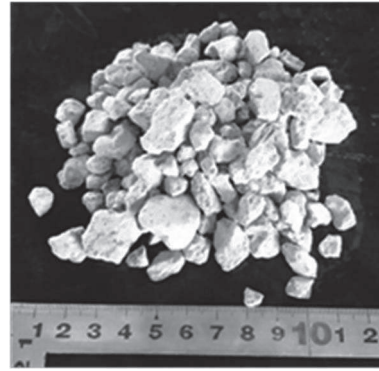
表-2.1 再生粗骨材 M の品質

試験項目		2009 年度	2010 年度	2016 年度	JIS 規格値
密度 g/cm^3	表乾	2.51	2.53	—	—
	絶乾	2.41	2.42	2.41	2.3 以上
吸水率	%	4.31	4.80	4.31	5.0 以下
微粒分量	%	0.11	0.29	—	1.5 以下
不純物量	%	0.00	0.00	—	3.0 以下
塩化物量	%	0.008	0.008	—	0.04 以下
粗粒率	%	6.53	6.33	—	—
骨材修正係数	%	0.5	—	—	—
FM 凍害指数		0.01	—	—	0.08 以下

PCa 製品のコンクリート配合は、製造時期等により異なるが、代表的なものを表-2.2~2.4 に示す。なお、アルカリシリカ反応対策としては、普通セメントに JIS に適合するフライアッシュ II 種を添加した配合、高炉セメント B 種を用い配合、普通セメントでアルカリ総量規制に対応した配合がある。また、JIS のアルカリシリカ反応抑制対策とは合致しないが、比較として JIS に適合しないフライアッシュを混合した配合もある。



2009 年度



2016 年度

図-2.1 再生骨材 M の外観

表-2.2 コンクリートの配合 (JIS フライアッシュ使用)

配合名	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
			水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤 (C×%)	
							砕石 CG	再生骨材 RG	減水剤 AD	AE 剤 AE
NP	45.0	38.0	162	360	—	671	1108	—	0.70	5A*
RG290			162	360	—	671	787	290	0.70	5A
FARG			162	360	54	605	—	1003	0.70	30A

*1A=C×0.002%

表-2.3 コンクリートの配合 (非 JIS フライアッシュ使用)

配合名	最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
				水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤 (C×%)	
								砕石 CG	再生骨材 RG	減水剤 AD	AE 剤 AE
NP	20	43.0	39.0	162	372	—	697	1099	—	3.72	6.5A
FARG	20					56	574	—	1112	4.28	2.0

表-2.4 コンクリートの配合 (高炉セメント B 種使用)

配合名	最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水 W	高炉セメント BBC	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤 (C×%)	
							再生骨材 RG	減水剤	AE 剤	
BB15	15	47.0	46.5	160	341	851	977	1.11	0.014	
BB20	20		43.7	154	328	813	1056	1.15	0.008	

3. 東北地方整備局管内における暴露試験

試作された PCa 製品は、室内での各種強度特性、耐久性に関する試験では、良好な成績が得られており¹⁾、屋外での暴露試験により、実環境下での耐久性を検証すべく暴露試験を実施した（2009年に5か所、2010年に6か所、2016年には3か所にそれぞれ PCa 製品を設置）。図-3.1 に設置状況を示す。設置された箇所は冬季には大量の凍結防止剤が散布される極めて気象条件が厳しい環境である。

暴露された PCa 製品に対して、2015 年度および 2019 年度に追跡調査を実施し、コンクリートの劣化状況を確認した。これらの調査結果を表-3.1~3.3 に示す。

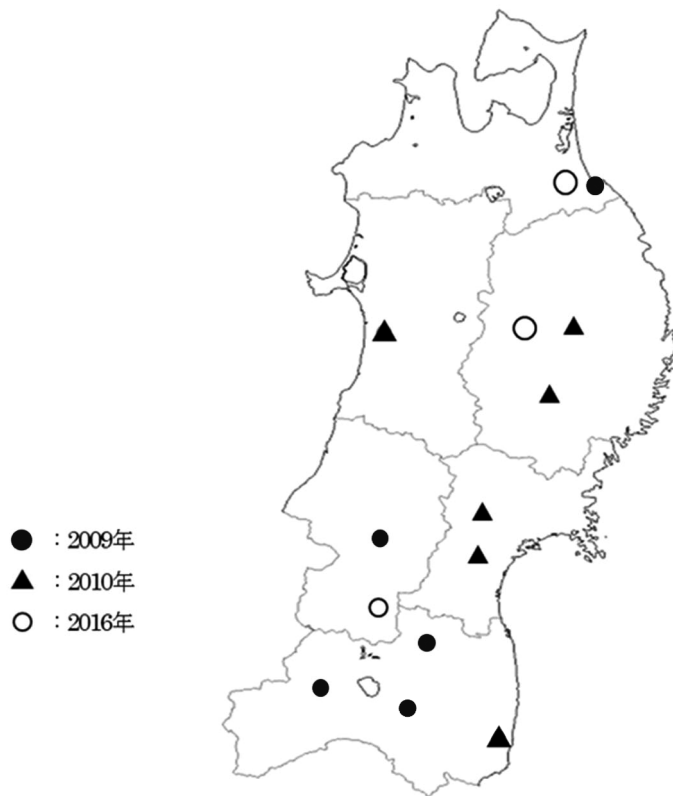



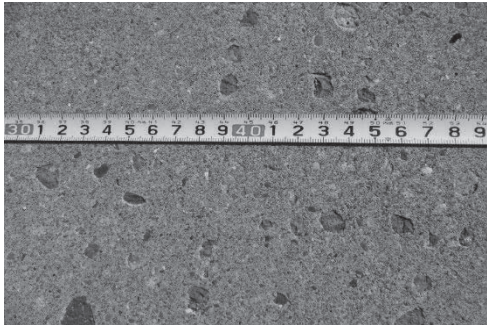


図-3.1 再生骨材コンクリート製品敷設現場



表-3.1 2009年度設置コンクリートの追跡調査結果（2015年度）

番号	2009-1	
事務所名	福島河川国道事務所	追跡調査（2015年7月）
工事名	栗子国道維持工事	 
施工箇所	福島市飯坂町中野	
延長（m）	6m	
施工時期	2009年9月頃	
対象製品	US3-B400-H400(F有) (延長 2m × 5個)	
製品製造	Y社	



変状は認められない。

番号	2009-2	
事務所名	青森河川国道事務所	追跡調査（2015年7月）
工事名	八戸国道維持工事	 
施工箇所	三戸郡階上町字後口	
延長（m）	10	
施工時期	2009年9月頃	
対象製品	LS2-h200 (延長 2m × 5個)	
製品製造	T社	

1年で表面モルタルの剥離が生じたが、経年による劣化進行は小さい。再生骨材使用が原因ではなく、セメントや養生の影響が大きいと考えられる。

番号	2009-3	
事務所名	山形河川国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	飯田高架橋耐震補強工事	 
施工箇所	山形県山形市飯田地内	
延長 (m)	12	
施工時期	2009年12月頃	
対象製品	LS2-h250 (延長 2m × 5個)	
製品製造	T社	

変状は認められない。

番号	2009-4	
事務所名	郡山国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	福原交差点改良工事	 
施工箇所	福島県河沼郡会津坂下町	
延長 (m)	約 18m	
施工時期	2009年10月～12月頃	
対象製品	US2-B400-H400 L=6m US3-B400-H400 L=6m US9-B400-H800 L=6m	
製品製造	Y社	

変状は認められない。









番号	2009-5	
事務所名	郡山国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	郡山4号維持工事	 
施工箇所	福島県須賀川市滑川字西山	
延長 (m)	約 6m	
施工時期	2009年8月中旬頃	
対象製品	US2-B300-H300	
製品製造	Y社	
<p>変状は認められない。</p>		



表-3.2 2010年度設置コンクリートの追跡調査結果（2015年度）

番号	2010-1	
事務所名	岩手河川国道事務所	追跡調査（2015年7月）
工事名	田瀬西道路改良工事	  <p>変状は認められない。</p>
施工箇所	岩手県花巻市東和町田瀬地内	
延長（m）	約10m	
施工時期	2010年11月頃	
対象製品	US3-B300-H300 （延長2m×5個）蓋不要	
製品製造	S社	

番号	2010-2	
事務所名	岩手河川国道事務所	追跡調査（2015年7月）
工事名	昼久保道路改良工事	  <p>変状は認められない。</p>
施工箇所	岩手県盛岡市玉山区昼久保地内	
延長（m）	約10m	
施工時期	2010年10月頃	
対象製品	US3-B400-H400 （延長2m×5個）蓋不要	
製品製造	T社	



番号	2010-3	
事務所名	仙台河川国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	川根道路舗装工事	 
施工箇所	宮城県柴田郡大河原町字金ヶ瀬地内	
延長 (m)	約 10m	
施工時期	2011年～1月頃	
対象製品	US3-B400-H400 (延長 2m × 5個) 蓋付き	
製品製造	M社	
		変状は認められない。



番号	2010-4	
事務所名	仙台河川国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	大衡道路舗装工事	 
施工箇所	宮城県黒川郡大衡村大衡地内	
延長 (m)	約 10m	
施工時期	2010年10月頃	
対象製品	US2-B400-H400 (延長 2m × 5個) 蓋付き	
製品製造	T社	
		変状は認められない。


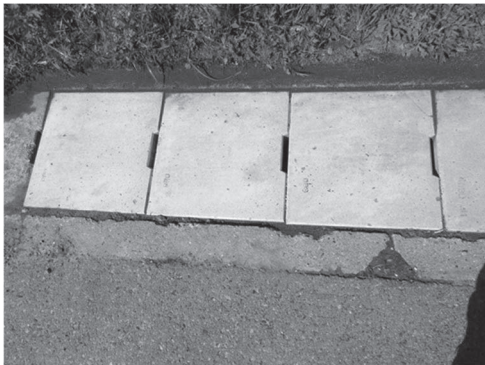
番号	2010-5	
事務所名	磐城国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	原町北地区道路舗装工事	
施工箇所	福島県南相馬市原町区北原地内	
延長 (m)	約 10m	
施工時期	2010年 11月	
対象製品	LS3-1 h200-t200 (延長 2m × 5個)	
製品製造	D社	 変状は認められない。

番号	2010-6	
事務所名	秋田河川国道事務所	追跡調査 (2015年7月)
工事名	合貝交差点改良工事	
施工箇所	秋田県大仙市協和船岡地内	
延長 (m)	約 10m	
施工時期	2011年 2月頃	
対象製品	L 型側溝 LS3-1 h200-t200 U 型側溝 US3-B400-H400 (延長 2m × 5個)	
製品製造	K社	 変状は認められない。

表-3.3 2016年度設置コンクリートの追跡調査結果（2019年度）

番号	2016-1	
事務所名	青森河川国道事務所	追跡調査（2019年6月）
工事名 施工箇所	八戸市城下	 
延長（m）	6	
施工時期	2016年11月	
対象製品	US3-400 ふた 4種類×3枚=12枚	
製品製造	D社	
<p>高炉セメントを用いた製品において若干剥離があるが、他に変状は認められない。</p>		

番号	2016-2	
事務所名	岩手河川国道事務所	追跡調査（2019年6月）
工事名 施工箇所	岩手県岩手郡雫石町橋場	 
延長（m）	6	
施工時期	2016年11月	
対象製品	US3-400 ふた 4種類×3枚=12枚	
製品製造	D社	
<p>変状は認められない。</p>		

番号	2016-3	
事務所名	山形河川国道事務所	追跡調査 (2019年6月)
工事名 施工箇所	山形県米沢市万世町刈安	 
延長 (m)	6	
施工時期	2016年11月	
対象製品	US3-400 ふた 4種類×3枚=12枚	
製品製造	D社	変状は認められない。



普通コンクリート 再生骨材 M コンクリート

図-3.2 2009-3 コンクリート追跡調査(10年後)

暴露後2年～6年が経過した再生骨材コンクリートMの変状は、高炉セメントを用いた製品において、若干の表面剥離が認められたものの、その程度は軽微であった。高炉セメント以外のセメントを用いた再生骨材Mコンクリートは、外観変状が認められなかった。

図-3.2は、番号2009-3のコンクリートについて、さらに設置後10年を経過した時点で調査を行った状況である。左が普通骨材コンクリート、右が再生骨材コンクリートM(非JISフライアッシュ)である。この設置箇所では、普通コンクリートよりも再生骨材コンクリートMのほうが健全な状態であった。

これらの状況のことから、再生骨材Mを用いたコンクリートであっても、適切に製造されたものは、

凍結防止剤が散布される積雪寒冷地の環境において普通コンクリートと同等以上の耐久性を確保できることが分かった。

4. 高炉セメント B 種を用いる場合の留意点

高炉セメント B 種を用い、製造時に高温で養生された製品では、表面に微細クラックや剥離の発生がしばしば確認された。その影響程度は、製品の形状や設置環境によっても異なるが、L 型側溝で設置後 1 カ月後に図-4.1 のように発生し、さらに冬季を経過すると表層部に剥離が生じた (図-4.2)。この原因が高炉 B 種セメント使用によるものか再生骨材使用によるものかを見極めるために、いずれも高炉 B 種セメントを使用し、普通骨材を用いた配合と再生骨材を用いた配合について暴露試験で比較した (図-

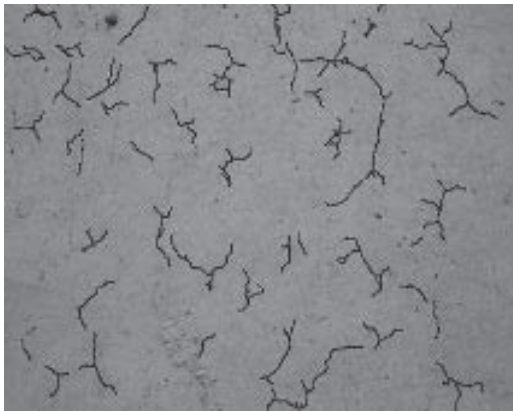


図-4.1 微細クラック発生状況

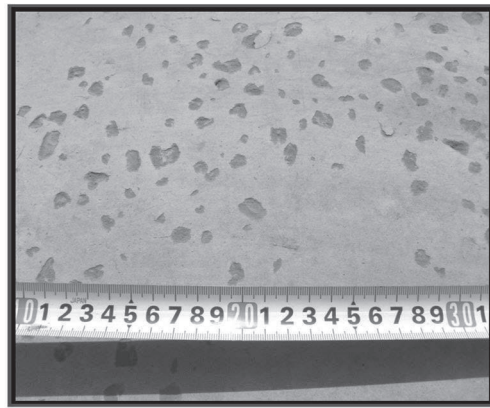


図-4.2 越冬 1 年後の表面剥離



図-4.3 普通骨材+BB (越冬 2 年目)

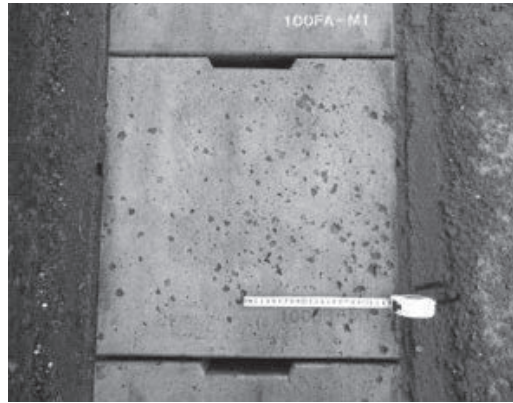


図-4.4 再生骨材 M+BB (越冬 2 年目)

4.3 および図-4.4)。この結果、剥離は普通骨材を用いた PC a 製品においても同様に確認された (図-4.3)。この剥離は、内部まで及ぶものではなく、ごく表層の現象であり、乾燥収縮によるものと考えられる。ここで用いられた高炉セメントは A 社のものであった。C 社の高炉セメントを用いた製品では、剥離は発生していなかった。剥離の生じやすさは、製造元の異なる高炉セメントで異なるようであった。そこで、製造元が異なる 3 種類 (A 社、B 社および C 社) の高炉セメント B 種を用いて、蒸気養生後の乾燥収縮試験を行った。

ここで、収縮に影響を及ぼすセメント中の SO_3 量は、A 社、B 社および C 社のそれぞれで 1.74%、2.04% および 2.91% であった。なお、普通セメントの SO_3 量は 2.11% であった。製造者の違いにより SO_3 量に

1%程度の違いがある。SO₃は、水和反応によりエトリンガイトを生成し、セメントが水和する際、セメント中のアルミネート相と石膏との反応で水和初期に針状結晶として析出する。エトリンガイトはそれ自体で強度を発現し初期強度の発現に大きく寄与している。また、セメント硬化体を膨張させる性質があり、エトリンガイト系の膨張剤もある。このため、SO₃の膨張性を利用できれば、ケミカルプレストレスがコンクリートに働き、乾燥収縮の低減に効果があると考えられる。

蒸気養生後の乾燥収縮量を図-4.5に示す。この場合は、普通セメントを使用した場合に比べ高炉セメントB種を用いた場合は2~4(×10⁻⁴)収縮が大きかった。また同じ高炉セメントB種であっても製造元の違いにより、収縮量に違いがあり、A社の高炉セメントはSO₃量が少ないことが収縮量と関係している可能性がある。

以上のことから、PCa製品へ高炉セメントB種を利用する場合、そのSO₃含有量についても留意するのが良いと考えられる。

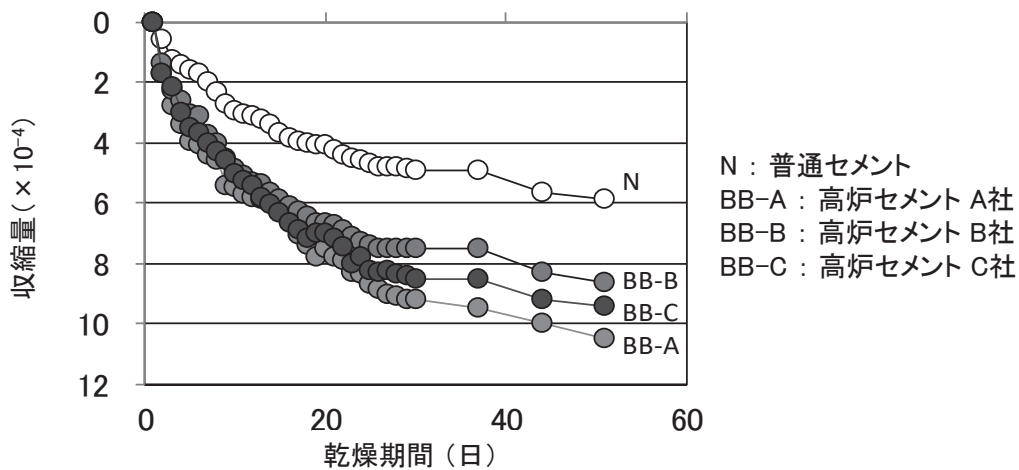


図-4.5 乾燥収縮試験結果

5. おわりに

塩分環境下における再生骨材 M を用いたプレキャストコンクリート製品の耐久性について、暴露試験結果をもとに確認した。その結果、過去に暴露された製品について、軽微なスケールリングが見られた場合があったが、その原因は再生骨材の影響によるものではなかった。

高炉セメントを使用した製品では、スケールリングに対する抵抗性がやや落ちる場合があることが分かった。本来、高炉セメントは塩分浸透性が小さく、塩分環境下においては有効に作用すると考えられ積極的に利用されている。しかし、高温蒸気養生を伴うプレキャストコンクリートでは、脱型直後に発生する微細ひび割れに起因するスケールリングを生じているものと考えられた。なお、高炉セメントを用いる場合も、石膏 (SO₃) 量の多いものを選定することにより、微細ひび割れの発生を抑えられると考えられる。

参考文献

- 1) 北辻政文, 丹野恒紀, 吉田修栄, 遠藤孝夫; 再生粗骨材 M のプレキャストコンクリート製品への利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.32, pp.1469-1474, 2010

