

報告 骨材の岩種がコンクリートの品質に及ぼす影響に関する調査

内田 琢也*1・新居 宏美*2・古田 満広*3・橋本 親典*4

要旨：全国統一品質管理監査では、受審工場で生産されるコンクリートの製品検査を実施している。呼び強度、粗骨材の最大寸法、およびセメント種類が同一であっても、工場間の圧縮強度の差異が大きく品質管理の適切性が常に話題になる。香川生コン工組所属工場の全国統一品質管理監査における製品検査データの要因分析結果では、石灰岩骨材を使用する工場の圧縮強度が高くなる傾向が認められた。この傾向の真偽を検討するために、骨材の岩種がコンクリートの品質に与える影響について検討した。選定した岩種の範囲内では、スランプや長さ変化量は顕著な違いがあったが、圧縮強度には有意な違いが認められなかった。

キーワード：骨材の岩種、圧縮強度、コンクリートの配合、水セメント比、全国統一品質管理監査

1. はじめに

骨材はコンクリート全容積の約70%を占めており、自己収縮や乾燥収縮によるひび割れ発生の少ない構造物を建設するために非常に重要な材料である。しかし、最近では良質な骨材の枯渇化や資源的・地域的な制約などにより品質の優れているものだけを使用できるという状況が厳しくなっている。香川県でも平成17年度より環境保全の観点より海砂が採取禁止となり、代替骨材として砕砂全量使用、銅スラグ細骨材、あるいは高炉スラグ細骨材などが検討されたことがある。一方でコンクリートへの要求品質が多様化していることから、コンクリートに要求される品質と骨材の品質特性とを十分に把握し、必要に応じて配合設計などにも特別な配慮を払う必要が生じることがある。最近でも生コンクリートの単位水量上限値規制、あるいはコンクリートの長さ変化量上限値規制を満足させるために石灰岩骨材を使用する生コン工場が散見される。

また、全国統一品質管理監査における製品検査の圧縮強度結果でもこのような骨材事情が影響しているのか、工場間の差異が大ききことがあり、原因等について検討するため過去の強度結果を整理した。

2. 品質管理監査における強度結果

全国統一品質管理監査基準では呼び強度比（圧縮強度結果／呼び強度）が1.50以上の場合、強度管理の適切性に問題ありとし「減点1」としている。香川県における過去10年間の品質管理監査での強度結果から呼び強度比1.50以上の工場数および受審工場に対する割合を求め、図-1に示す。その割合は最小が3%、最大が31%であり、年度間の変動は大きい。また、過去5年間の全

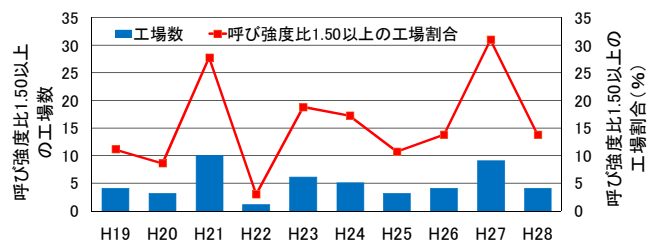


図-1 呼び強度比1.50以上の工場割合

国の呼び強度比1.50以上の工場割合は、平成24年が2741工場中252工場（9.2%¹⁾、平成25年が2654工場中209工場（7.9%²⁾、平成26年が2640工場中188工場（7.1%³⁾、平成27年が2628工場中223工場（8.5%⁴⁾、平成28年が2620工場中174工場（6.6%⁵⁾であり、全国と比べ香川県の年度間変動は大きいことが分かる。このため、監査結果を審議する香川県生コンクリート品質管理監査会議では、強度管理が主要なテーマの一つとなっている。

原因を特定するため、品質管理監査での製品検査のコンクリートの配合を、スランプを除き統一し、強度変動の要因を検証した。呼び強度は平成27年が18、平成28年は24とした。粗骨材の最大寸法は20mm、セメントの種類は普通ポルトランドセメントに両年とも統一した。結果を図-2に示す。

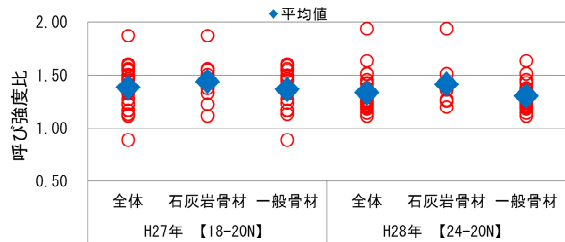
石灰岩骨材に着目し、細骨材の一部に用いている工場と使用していない工場にグループ分けし、呼び強度比を比較した。両配合とも石灰岩骨材を使用している工場の圧縮強度が使用していない工場と比べ、平均値（図中の◆）が若干高くなる傾向が認められた。監査関係者の会話でも石灰岩骨材の強度に関する優位性が話題になっており、図-2の傾向はそのことを実証したものと思われる。

*1 ロソコン開発(株) 技術課長 (正会員)

*2 香川県生コンクリート工業組合 技術課長 (正会員)

*3 香川県生コンクリート工業組合 専務理事 (正会員)

*4 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)



図ー2 配合を特定したコンクリートの呼び強度比

しかしながら、骨材の岩種以外の使用材料や配合が必ずしも同一ではないため、本結果だけでは断定できない。

既往の研究においても、石灰岩骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮量が、他の岩種の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮量より小さいことが報告されている^{6),7)}。これに対し、普通コンクリートの強度領域における圧縮強度に着目して、岩種以外の配合条件を一定にして、石灰岩骨材と他の岩種骨材を使用したコンクリートの特性について比較した研究や報告は少ないようである。

本報告では、骨材の岩種以外の使用材料や単位水量、水セメント比を同一とし、岩種がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を実験的に検討した。また、スランプ、空気量、長さ変化量等のコンクリートの品質に、骨材の岩種が与える影響についても検討した。

3. 実験概要

3.1 使用骨材の調査と選定

香川県では品質管理監査を受審する際に工場調査表の提出を義務付けている。調査結果より細骨材の岩種は石灰岩が11工場と最も多く、続いて安山岩と砂岩が5工場ずつである。一方、粗骨材では安山岩が8工場、砂岩が6工場、石灰岩が4工場と多く、細骨材、粗骨

材ともにこの3岩種が香川県において使用されている一般的な骨材と考え、本実験で比較する岩種とした。細骨材3岩種を比較した実験をシリーズ1とし、粗骨材3岩種を比較した実験をシリーズ2とした。なお、シリーズ1では粗骨材として砂岩砕石2005を、シリーズ2では細骨材として安山岩砕砂と海砂の混合品を全配合に使用した。

3.2 使用骨材の品質

使用した骨材の品質を表ー1に示す。シリーズ1に使用する細骨材は、石灰岩が他の岩種に比べ密度が大きく、微粒分量が多いといえ、また、粒形判定実積率では石灰岩に比べ砂岩は約6%小さく、安山岩は両者の中間ぐらいであることが特徴といえる。一方、シリーズ2に使用する粗骨材でも、密度および微粒分量については細骨材と同じ特徴といえるが、粒形判定実積率では大きな差異は認められない。

3.3 配合条件

シリーズ1のコンクリートの配合を表ー2に、シリー

表ー1 使用骨材の品質

シリーズ	区分	種類	岩種	粗粒率	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粒形判定実積率 (%)	備考
1	細骨材	砕砂	石灰岩	2.71	2.64	1.04	8.5	58.7	100%使用
		砕砂	砂岩	2.48	2.51	2.06	3.5	53.0	100%使用
		砕砂	安山岩	2.74	2.55	1.99	3.4	56.3	100%使用
	粗骨材	砕石2005	砂岩	6.61	2.52	1.80	1.1	—	全配合に使用 1505(40%)と2010(60%)を混合した
2	細骨材	砕砂	安山岩	2.61	2.54	2.20	6.0	58.1	全配合に使用 砕砂(60%)と海砂(40%)を混合した
		海砂	—	2.20	2.56	1.38	1.2	—	
	粗骨材	砕石2005	石灰岩	6.65	2.70	0.23	2.3	58.9	2005として入荷した
		砕石2005	砂岩	6.81	2.52	1.89	0.3	59.7	1505(40%)と2010(60%)を混合した
		砕石2005	安山岩	6.90	2.58	1.76	0.4	58.5	1505(40%)と2010(60%)を混合した

表ー2 コンクリートの配合 (シリーズ1)

シリーズ1	W/C (%)	呼び方	s/a (%)	W	C	細骨材	粗骨材	A E 減水剤
石灰岩	45	試験コン1-1	44.0	175	389	772	945	2.333
	50	試験コン1-2	45.0	175	350	805	946	2.100
	55	試験コン1-3	46.0	175	318	835	943	1.909
	60	試験コン1-4	47.0	175	292	864	937	1.750
	65	試験コン1-5	48.0	175	269	891	929	1.615
砂岩	45	試験コン2-1	44.0	175	389	739	945	2.333
	50	試験コン2-2	45.0	175	350	769	946	2.100
	55	試験コン2-3	46.0	175	318	798	943	1.909
	60	試験コン2-4	47.0	175	292	826	937	1.750
	65	試験コン2-5	48.0	175	269	852	929	1.615
安山岩	45	試験コン3-1	44.0	175	389	751	929	2.333
	50	試験コン3-2	45.0	175	350	782	946	2.100
	55	試験コン3-3	46.0	175	318	812	943	1.909
	60	試験コン3-4	47.0	175	292	839	937	1.750
	65	試験コン3-5	48.0	175	269	866	929	1.615

ズ2の配合を表-3に示す。単位水量は、全配合で8cm以上のスランブが得られるよう175kg/m³に統一した。また、水セメント比はJIS A 5308の普通コンクリートの強度領域に対応できるように65%、60%、55%、50%、45%の5水準とした。セメントの種類は普通ポルトランドセメントとし、粗骨材の最大寸法は20mmとした。細骨材率は協力工場の標準配合を参考に水セメント比65%のコンクリートで48%

とし、水セメント比を5%小さくする毎に1%小さくするように調整した。また、AE剤により空気量を調整した。

3.4 フレッシュコンクリートの品質目標値

練混ぜ時間は全材料投入後120秒とし、60Lの強制二軸形ミキサで45L練混ぜた。スランブの判定基準は設定せず、8cmより大幅に小さくなる、あるいは21cmより大幅に大きくなった場合は単位水量を調整することとした。空気量は3~6%を基本条件としたが、強度への影響を考慮し、同じ水セメント比において3岩種の差が1%以上にならないことを追加条件とした。

3.5 試験項目

実施した試験項目を表-4に示す。フレッシュコンクリートではスランブおよび空気量を、硬化コンクリートでは圧縮強度、静弾性係数、および長さ変化について実施した。圧縮強度試験および静弾性係数はコンクリー

表-3 コンクリートの配合 (シリーズ2)

シリーズ2	W/C (%)	呼び方	s/a (%)	W	C	細骨材	粗骨材	AE減水剤
石灰岩 【試験コン1】	45	試験コン1-1	44.0	175	389	750	995	2.333
	50	試験コン1-2	45.0	175	350	782	996	2.100
	55	試験コン1-3	46.0	175	318	810	992	1.909
	60	試験コン1-4	47.0	175	292	838	986	1.750
	65	試験コン1-5	48.0	175	269	865	977	1.615
砂岩 【試験コン2】	45	試験コン2-1	44.0	175	389	750	946	2.333
	50	試験コン2-2	45.0	175	350	782	946	2.100
	55	試験コン2-3	46.0	175	318	810	943	1.909
	60	試験コン2-4	47.0	175	292	838	937	1.750
	65	試験コン2-5	48.0	175	269	865	928	1.615
安山岩 【試験コン3】	45	試験コン3-1	44.0	175	389	750	965	2.333
	50	試験コン3-2	45.0	175	350	782	966	2.100
	55	試験コン3-3	46.0	175	318	810	963	1.909
	60	試験コン3-4	47.0	175	292	838	956	1.750
	65	試験コン3-5	48.0	175	269	865	948	1.615

ト採取2日後に脱型し、材齢28日まで20℃の水中養生とした。長さ変化試験は水セメント比50%の配合のみ実施し、最終材齢は182日とした。なお、試験方法はそれぞれのJIS規格に基づき行った。

3.6 総細孔容積測定

使用骨材の岩種がコンクリートのセメントペーストの空隙構造に与える影響を評価するために、総細孔容積を測定した。測定方法は、材齢28日まで標準水中養生を行ったφ100×200mmの供試体の両端を取り除き3cm厚みで6枚に均等にスライスした中から中央部の2枚を試料とし水銀圧入方法によって行った。実施した配合は、異なる3水準の水セメント比の配合とした。

4. 実験結果および考察

4.1 スランブ

表-4 試験項目

細骨材・粗骨材	W/C (%)	呼び方	スランブ	空気量	コンクリート温度	圧縮強度	静弾性係数	総細孔容積	長さ変化
石灰岩 【試験コン1】	45	試験コン1-1	○	○	○	○	○		
	50	試験コン1-2	○	○	○	○	○	○	○
	55	試験コン1-3	○	○	○	○	○	○	
	60	試験コン1-4	○	○	○	○	○	○	
	65	試験コン1-5	○	○	○	○	○		
砂岩 【試験コン2】	45	試験コン2-1	○	○	○	○	○		
	50	試験コン2-2	○	○	○	○	○	○	○
	55	試験コン2-3	○	○	○	○	○	○	
	60	試験コン2-4	○	○	○	○	○	○	
	65	試験コン2-5	○	○	○	○	○		
安山岩 【試験コン3】	45	試験コン3-1	○	○	○	○	○		
	50	試験コン3-2	○	○	○	○	○	○	○
	55	試験コン3-3	○	○	○	○	○	○	
	60	試験コン3-4	○	○	○	○	○	○	
	65	試験コン3-5	○	○	○	○	○		

シリーズ1のスランプと骨材の岩種の間を 図-3 に、シリーズ2を 図-4 に示す。単位水量を 175kg/m^3 から変更せず一般的に使用される範囲(8~21cm)のスランプが得られた。シリーズ1では石灰岩が大きく20cm前後となっている。砂岩では9cm前後、安山岩では約12~13cmとなり岩種の違いが顕著に現れた。なお、要因として砂岩については、粗粒率が他の岩種と比べ約0.2小さかったことが影響していると考えられるが、粗粒率がほぼ同じである石灰岩と安山岩でもスランプ差が生じていることから、粗粒率に加え粒形判定実積率が影響したと考えられる。シリーズ2では何れの岩種も15cm前後であり、顕著な差異は認められない。両シリーズの結果よりスランプへの影響については粗骨材よりも細骨材のほうが大きいといえる。

4.2 空気量

空気量の試験結果を 図-5 および 図-6 に示す。同一水セメント比において3岩種の差が1%以内であり、当初の目標を達成することができた。

4.3 圧縮強度

圧縮強度と骨材の岩種の間を 図-7 および 図-8 に示す。また、圧縮強度とセメント水比の間を 図-9

に示す。

両シリーズとも岩種の影響は小さい。1章で調査した結果である石灰岩骨材の強度への優位性が否定される結果になった。

岩種に関係なく、同一シリーズでは、圧縮強度とセメント水比の関係は1つの直線群に分布した。また、6の直線式それぞれの相関係数は $0.9564\sim 0.9992$ の範囲であり、強い相関が認められた。両シリーズを比較するとシリーズ2の方が、全体的に圧縮強度が低くなる傾向が認められる。実験時期の影響が考えられ、シリーズ1を2月に、シリーズ2を6月に実施していることから初期養生温度の違いが要因として想定される。

4.4 静弾性係数

静弾性係数と骨材の岩種の間を 図-10 および 図-11 に示す。シリーズ1では全ての水セメント比において砂岩と安山岩はほぼ同じ結果を示しているものの石灰岩では数 kN/mm^2 大きくなっている。シリーズ2では全ての水セメント比において最も石灰岩が大きく、次いで安山岩、砂岩であり、3岩種の差が明確になっている。本結果より要求される静弾性係数を満足するコンクリートを製造するための単位セメント量を指標とし評価

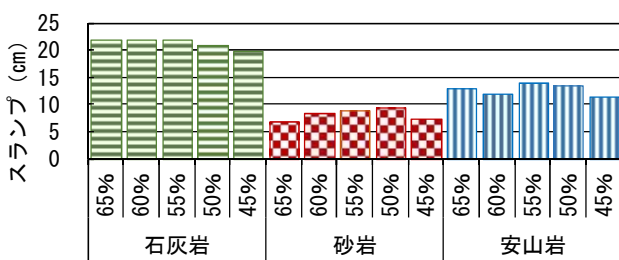


図-3 スランプ (シリーズ1)

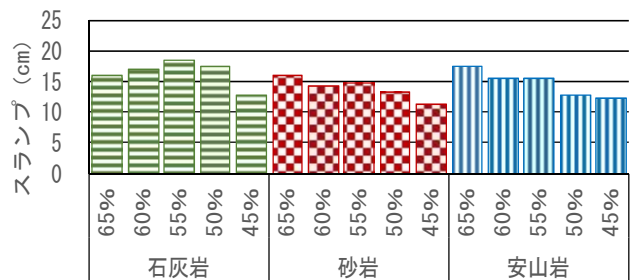


図-4 スランプ (シリーズ2)

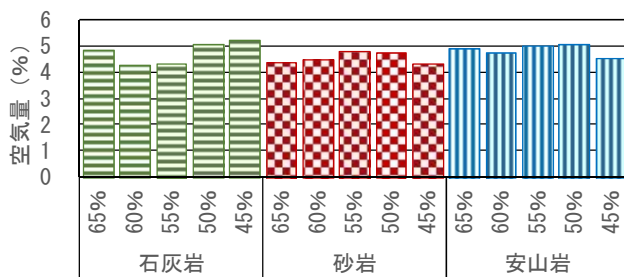


図-5 空気量 (シリーズ1)

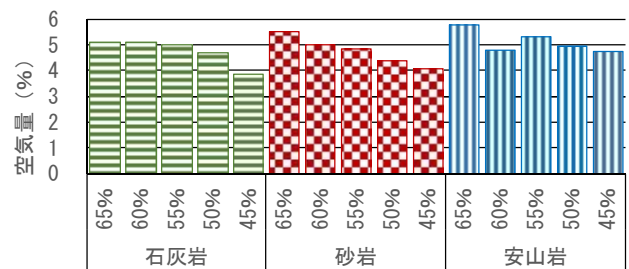


図-6 空気量 (シリーズ2)

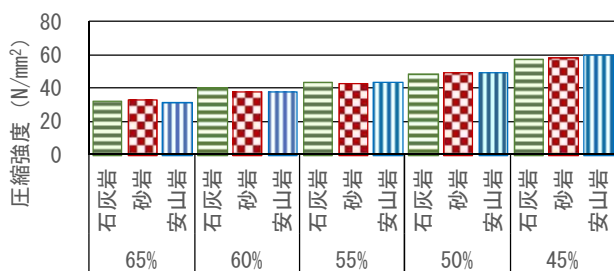


図-7 圧縮強度 (シリーズ1)

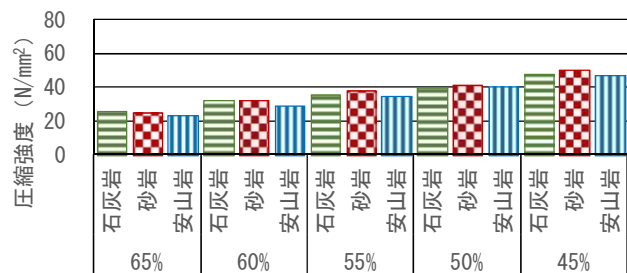


図-8 圧縮強度 (シリーズ2)

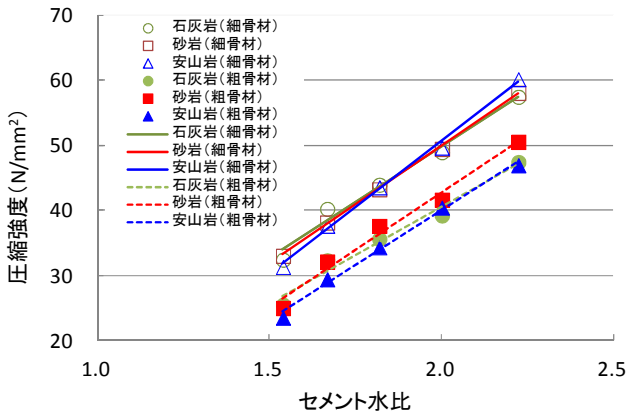


図-9 圧縮強度とセメント水比の関係

すると、コスト面では石灰岩の優位性が証明された。

4.5 長さ変化

長さ変化と骨材の岩種との関係を図-12 および図-13 に示す。両シリーズとも同じ傾向を示し、石灰岩、安山岩、砂岩の順で長さ変化率が大きくなっている。笹田らの研究⁷⁾では、吸水率が大きい骨材を使用すると長さ変化が大きいと報告がある。本実験も同様な傾向であり、石灰岩系骨材の吸水率が他の骨材より小さいことが、長さ変化率が小さくなった理由の1つと考えられる。

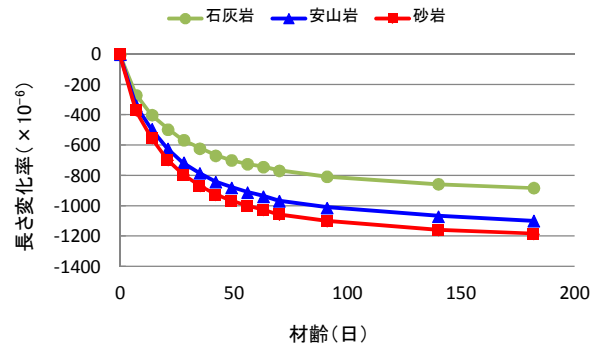


図-12 長さ変化率 (シリーズ1)

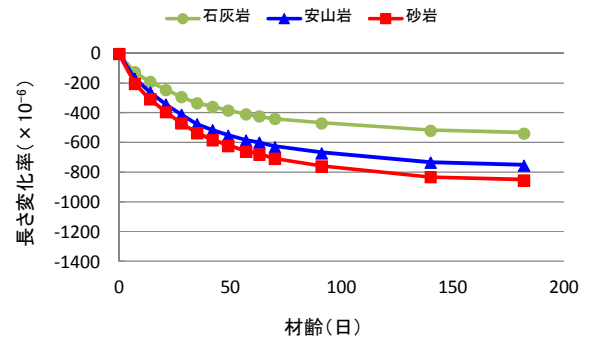


図-13 長さ変化率 (シリーズ2)

5. 岩種がセメントペーストの細孔構造に与える影響

総細孔容積と骨材の岩種との関係を図-14 および図-15 に示す。

シリーズ1では、安山岩の総細孔容積が最も小さく、砂岩が最も大きい。この傾向は全水セメント比において同じであるが、顕著な差異は認められない。

一方、シリーズ2では、水セメント比によって傾向が

異なり、総細孔容積と岩種との関係を特定することはできなかった。

また、両シリーズとも水セメント比が小さくなれば総

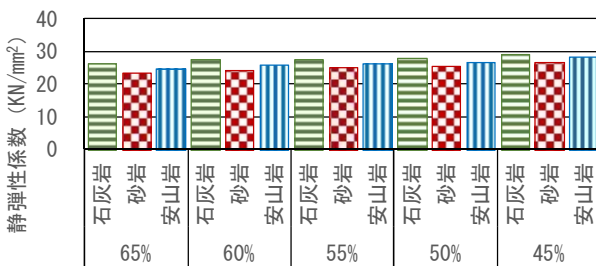


図-10 静弾性係数 (シリーズ1)

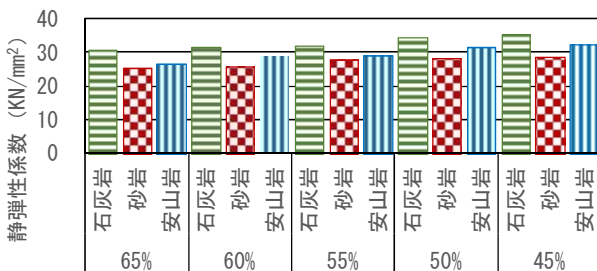


図-11 静弾性係数 (シリーズ2)

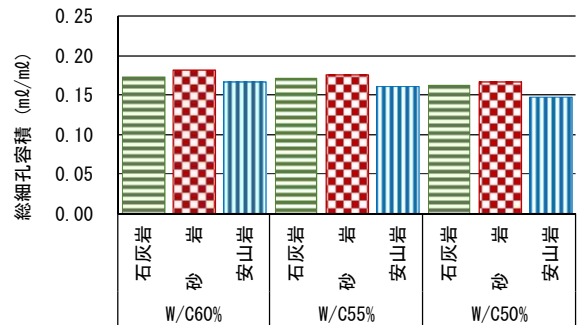


図-14 総細孔容積と岩種との関係 (シリーズ1)

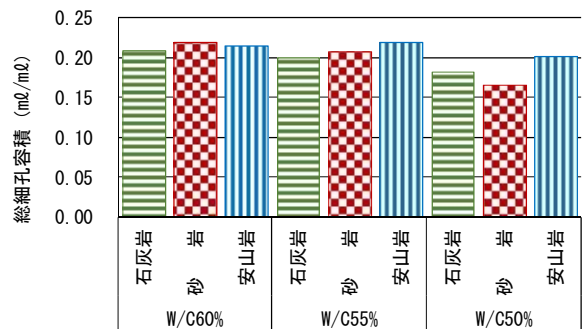


図-15 総細孔容積と岩種との関係 (シリーズ2)

細孔容積も小さくなることが確認できた。両シリーズともに、岩種による違いはほとんどなかった。

4.3 で記述したとおり、細骨材、粗骨材ともに、単位水量と水セメント比が同一であれば、圧縮強度はほぼ同程度であった。総細孔容積も同程度であった。一般に、総細孔容積が小さくなり、細孔径分布が粗から密に移行することによって、セメントペーストやセメントペーストと骨材界面の遷移帯等が緻密にあり、物質移動抵抗性や圧縮強度等の力学的特性が良好になると考えられている。本研究では、総細孔容積のみの比較ではあるが、岩種が細孔構造に与える影響はあまり大きくないと推定される。

一方、4.5 で記述したとおり、長さ変化率に関しては石灰岩の影響が大きい結果になった。もし、長さ変化率が細孔構造に影響されるのであれば、3種類の岩種で総細孔容積が異なるはずである。しかしながら、そういう結果にならなかった。これは、圧縮強度と長さ変化率に与える細孔構造の影響が異なることを意味する。本研究では、総細孔容積のみのデータからの考察であり、長さ変化率と細孔構造の関係に関しては、さらに深い研究が必要と思われる。今後の研究課題の1つにしたいと考えている。

6. 岩種が強度に与える影響に関する品質管理監査結果と本実験結果の違いに関する考察

品質管理監査における圧縮強度の変動が香川県生コンクリート品質管理監査会議の主要な議題になり、その要因を分析する過程で本実験が必要と考え実施した。

しかし、当初想定したコンクリートの圧縮強度に対する石灰岩骨材の優位性は認められなかった。

品質管理監査での強度結果と今回の強度結果において骨材の岩種の影響が異なった要因として、実際の生コン工場の配合は、強度実績から求めた水セメント比では水セメント比上限値規制を満足しないため小さく見積もったり、あるいは石灰岩骨材使用コンクリートにおいては目標スランプに対して単位水量が極端に少なくなるので、単位セメント量を一定量確保してワーカブルなコンクリートとするために単位水量を安全側に見積もっている（つまり、石灰岩骨材コンクリートは単位セメント量が増加する）のではと推測される。

これに関しては、今後の検討課題としたい。

7. まとめ

骨材の岩種がコンクリートの品質に及ぼす影響について検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) スランプでは、粗骨材よりも細骨材の影響が大きいことが分かった。細骨材においては砂岩の粗粒率が小さく、その影響があったものの石灰岩と他の岩種との差は顕著であった。
- (2) 圧縮強度では岩種の影響は小さく、実験前の想定が否定された。
- (3) 静弾性係数では岩種に影響され、コスト面から評価すると両骨材とも石灰岩の優位性が認められた。
- (4) 長さ変化試験でも岩種に影響され、両骨材とも石灰岩の優位性が認められた。
- (5) 総細孔容積の観点から、セメントペーストの細孔構造に与える岩種の影響はあまり大きくないと推定される。

謝辞：本実験は、JCI 四国支部の「四国の生コン技術力活性化委員会【第3期】」の活動として実施した。委員の皆様および多大な応援を頂いた香川県生コン工組の組合員工場の皆様に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 全国生コンクリート品質管理監査会議：平成 24 年度全国統一品質管理監査結果報告書，p.19，2013.3
- 2) 全国生コンクリート品質管理監査会議：平成 25 年度全国統一品質管理監査結果報告書，p.19，2014.3
- 3) 全国生コンクリート品質管理監査会議：平成 26 年度全国統一品質管理監査結果報告書，p.19，2015.3
- 4) 全国生コンクリート品質管理監査会議：平成 27 年度全国統一品質管理監査結果報告書，p.19，2016.3
- 5) 全国生コンクリート品質管理監査会議：平成 28 年度全国統一品質管理監査結果報告書，p.20，2017.3
- 6) 井上 裕貴，橋本 親典，渡邊 健，石丸 啓輔：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.473～478，2011
- 7) 笹田 宏紀，橋本 親典，渡邊 健，香川 浩司：低吸水性細骨材の混合使用によるコンクリートの乾燥収縮抑制対策に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.406～411，2012