

環太平洋地域の低品質粗骨材を使用した コンクリートの強度および物質透過抵抗性 に関する研究

西田孝弘¹・大即信明²・鬼塚良介³・Wanchai Yodsudjai⁴・横倉順治⁵

¹正会員 工修 東京工業大学大学院助手 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail: nishida@cv.titech.ac.jp

²正会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail: otsuki@cv.titech.ac.jp

³正会員 九州旅客鉄道株式会社 本社 (〒812-8566 福岡市博多区博多駅前3-25-21)
E-mail: r.onitsuka@jrkyushu.co.jp

⁴正会員 工修 東京工業大学大学院博士課程 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail: wanchai@cv.titech.ac.jp

⁵国際協力事業団セネガル事務所 客員専門員 (Bureau de la JICA au Senegal, immeuble ABM 5e
etage, Rue Carnot, B.P. : 3323, Dakar, Senegal)
E-mail: Yokokura.junji@jica.go.jp

火山帯や海洋に面している環太平洋地域には、その他の地域では産出されない材料をコンクリート用粗骨材として使用している地域がある。これらの粗骨材の中には、我が国で主に使用されている粗骨材と比較して、強度および物質透過抵抗性の観点から低品質なものもある。本論文では、①環太平洋地域の粗骨材の強度および物質透過抵抗性を定量的に明らかにすること、②低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を明らかにすること、さらに、③低品質粗骨材の有効利用方法を提案することを目的とした。そのために、(1)粗骨材の強度および物質透過抵抗性の評価、(2)低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性の評価、および(3)低品質粗骨材の有効利用方法の検討を行った。

Key Words : low quality coarse aggregate, strength, material penetration resistance, circum-Pacific region, effective utilization method

1. はじめに

コンクリートは「セメント、水、細骨材、粗骨材および必要に応じて混和材を練混ぜ、その他の方法で一体化したもの」と定義される¹⁾。この中で、粗骨材はコンクリートの全容積の約 40% を占める。したがって、粗骨材の品質はコンクリートの強度および物質透過抵抗性に大きな影響を与えと考えられる。

一方、粗骨材には地域性がある。すなわち、粗骨材は使用される地域により、その種類・品質などが異なる。この理由は、一般に建設材料は、(i)多量に使用されること、かつ(ii)運搬に費用がかかることに起因する。その結果、粗骨材は現地産出材料が前提となる。特に、火山帯や海洋に面している

環太平洋地域には、その他の地域では産出されない材料を粗骨材として使用している地域がある。例えば、(a)フィリピン共和国で使用を検討されている火山噴出れき、(b)キリバス共和国で使用されている珊瑚れき、(c)ニカラグア共和国で使用されている火山岩碎石、(d)日本国で使用されている珊瑚礁堆植物碎石、などが挙げられる²⁾。

上記の粗骨材はその内部が多孔質であるため、我が国で主に使用されている硬質砂岩のような粗骨材と比較して、強度および物質透過抵抗性が低いと考えられる。すなわち、これらの粗骨材は、強度および物質透過抵抗性の観点から「低品質」と考えられる。

環太平洋地域には、このような粗骨材のみしか産出できない地域が多数ある。さらに、資源の有効利

表-1 粗骨材の産出国，種類および物理的性質

粗骨材名	産出国	種類	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%) ***	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	粗粒率
火山れき粗骨材	フィリピン共和国	火山噴出れき	1.30	0.95	35.00	0.69	65.6	6.47
珊瑚れき粗骨材	キリバス共和国	珊瑚れき	1.95	1.73	13.70	1.03	59.5	7.12
火山砕石粗骨材	ニカラグア共和国	火山岩砕石	2.73	2.69	1.83	1.50	55.6	6.88
珊瑚砕石粗骨材	日本国	珊瑚堆積物砕石	2.69	2.67	0.75	1.53	57.3	6.92
硬質砂岩粗骨材	日本国	硬質砂岩	2.65	2.62	0.94	1.57	59.8	6.48
JIS A 5002*	—	—	—	2.0 未満	—	—	50 以上	—
JIS A 5005**	—	—	—	2.5 以上	3.0 以下	—	55 以上	—

* 構造用軽量コンクリート骨材，** コンクリート用砕石及び砕砂，*** 24 時間水中浸漬後

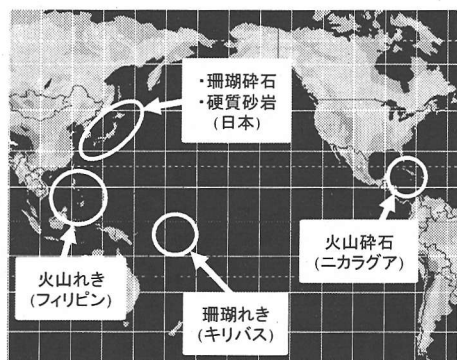


図-1 粗骨材産出国の位置

用の観点から，従来使用されていない低品質材料を粗骨材として利用する需要も高まっている．しかしながら，低品質粗骨材およびそれを使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を検討した事例は希少である．

以上の背景から，本論文では，①本論文で検討する環太平洋地域の粗骨材の強度および物質透過抵抗性を定量的に明らかにすること，②上記の粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を明らかにすること，さらに，③上記の粗骨材の有効利用方法を提案することを目的とする．そのために，まず，著者らが開発した微小圧縮強度試験³⁾および微小拡散セル試験⁴⁾を用いて，環太平洋地域の粗骨材の強度および物質透過抵抗性を定量的に評価する．同時に，粗骨材の空隙率も評価する．次に，上記の粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を評価する．最後に，以上の結果を踏まえ，上記の粗骨材の有効利用方法を検討する．

2. 実験概要

(1) 検討した粗骨材の概要

本論文では，環太平洋地域の粗骨材として，火山噴出れき（フィリピン共和国産），珊瑚れき（キリバス共和国産），火山岩砕石（ニカラグア共和国

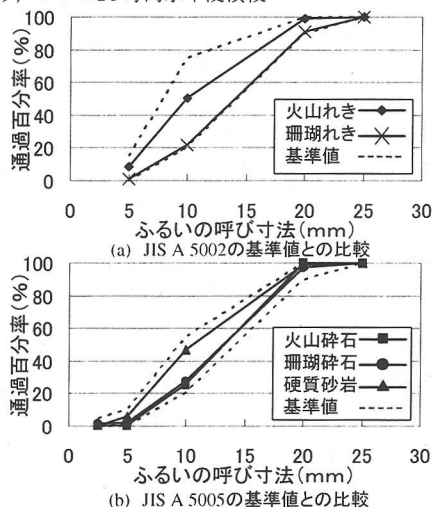


図-2 粗骨材の粒度分布

産）および珊瑚堆積物砕石（日本国産）を粗骨材として使用した（図-1 参照）．以降，それぞれの粗骨材を，火山れき粗骨材，珊瑚れき粗骨材，火山砕石粗骨材および珊瑚砕石粗骨材と称す．また，我が国で一般的に使用されている粗骨材と比較するため，硬質砂岩砕石（青梅産）を硬質砂岩粗骨材と称して使用した．表-1 にそれぞれの粗骨材の産出国，種類および物理的性質を示す．粗骨材の最大寸法は何れも 20mm とした．また，図-2 にそれぞれの粗骨材の洗浄後の粒度分布を示す．なお，JIS A 5002 によると，火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材は，絶乾密度および実積率より，我が国で使用される天然軽量粗骨材に区分される．また，JIS A 5005 によると，火山砕石粗骨材および珊瑚砕石粗骨材の絶乾密度，吸水率および実積率は，我が国で使用される砕石の基準を満足する．さらに，粒度分布に関しても，火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材は JIS A 5002 の基準を，火山砕石粗骨材および珊瑚砕石粗骨材は JIS A 5005 の基準をそれぞれ満足する．

図-3 にマイクロスコープによるそれぞれの粗骨材内部の様子を示す．これより，火山れき粗骨材，珊瑚れき粗骨材および火山砕石粗骨材は非常に多孔質

な粗骨材であることが確認される。特に、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材は、大小様々な連続空隙が存在することが確認される。また、火山砕石粗骨材は、粗大な空隙が独立して存在することが確認される。一方、珊瑚砕石粗骨材の内部にはマイクロスコプで確認されるような空隙は見当たらない。

(2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度＝3.14g/cm³）を使用した。細骨材は小櫃産陸砂（表乾密度＝2.59g/cm³，粗粒率＝2.33）を使用した。混和剤は、水結合材比が 0.25 の場合において、シリカフューム（密度＝2.20 g/cm³，比表面積＝20.55m²/g，SiO₂＝97.5%）を使用した。混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤，リグニンスルホン酸系 AE 減水剤および AE 剤を使用した。

(3) 配合

本論文で検討した水結合材比は、0.25、0.40、0.55、0.70（結合材水比はそれぞれ 4.00、2.50、1.82、1.43）の 4 水準である。表-2 に各水結合材比の配合を示す。これらの配合は、水結合材比および粗骨材の種類によらず、粗骨材の体積を統一した。これは、粗骨材がコンクリートの強度および物質透過抵抗性に与える影響を検討するためである。なお、水結合材比が 0.25 のコンクリートでは、シリカフュームをセメントに対して質量比で 10%置換した。

(4) 練混ぜおよび打設方法

a) 粗骨材の準備

粗大な空隙が確認された火山れき粗骨材，珊瑚れ

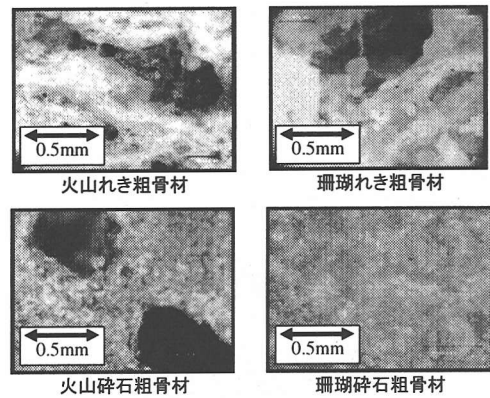


図-3 粗骨材内部の様子

き粗骨材および火山砕石粗骨材については、洗浄後に 24 時間吸水させ、表乾状態としたものを使用した。一方、珊瑚砕石粗骨材および硬質砂岩粗骨材については、洗浄後に表乾状態としたものを使用した。

b) 練混ぜ

練混ぜには、60 リットル水平二軸式強制練りミキサを使用した。なお、十分な練混ぜを行うため、水結合材比に応じて 2 種類の練混ぜ方法を使用した。

水結合材比が 0.40、0.55、0.70 の場合の練混ぜ方法を以下に示す。まず、細骨材の半分をミキサ内に投入し、広げた上にセメントを全量投入した。それを平らにならし、残りの細骨材を投入した。この状態で空練りを 30 秒間行い、次の 30 秒間で水を加えた。その後、練混ぜを止め、スコップによりミキサおよびバドルに付着したモルタルを掻き落とした。最後に粗骨材を加え、120 秒間練混ぜた。

表-2 配合

使用した粗骨材	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					(C×%)			スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	SF	S	G	AE 減水剤	AE 助剤	高性能 AE減水剤		
火山れき粗骨材	25	40	155	558	62	657	489	-	-	0.9	8.5	3.8
珊瑚れき粗骨材		40	155	558	62	657	734	-	-	1.2	12.5	2.5
火山砕石粗骨材		40	155	558	62	657	1030	-	-	2.0	65×70*	1.3
珊瑚砕石粗骨材		40	155	558	62	657	1012	-	-	2.0	60×70*	0.7
硬質砂岩粗骨材		40	155	558	62	657	997	-	-	2.0	62×72*	0.4
火山れき粗骨材	40	42.5	170	425	-	729	489	1.00	1.20	-	9.5	7.0
珊瑚れき粗骨材		42.5	170	425	-	729	734	1.00	0.60	-	7.5	4.5
火山砕石粗骨材		42.5	170	425	-	729	1030	1.50	1.00	-	10.0	5.5
珊瑚砕石粗骨材		42.5	170	425	-	729	1012	1.00	1.00	-	10.5	6.0
硬質砂岩粗骨材		42.5	170	425	-	729	997	2.00	1.00	-	5.5	6.5
火山れき粗骨材	55	45	175	318	-	806	489	0.50	1.00	-	11.0	7.2
珊瑚れき粗骨材		45	175	318	-	806	734	0.00	0.60	-	10.0	6.0
火山砕石粗骨材		45	175	318	-	806	1030	1.00	1.00	-	11.5	6.4
珊瑚砕石粗骨材		45	175	318	-	806	1012	0.25	1.00	-	12.5	5.0
硬質砂岩粗骨材		45	175	318	-	806	997	0.30	0.60	-	9.5	6.5
火山れき粗骨材	70	46	180	257	-	840	489	0.00	0.25	-	9.0	5.5
珊瑚れき粗骨材		46	180	257	-	840	734	0.00	0.25	-	12.5	4.4
火山砕石粗骨材		46	180	257	-	840	1030	0.00	1.00	-	12.5	4.5
珊瑚砕石粗骨材		46	180	257	-	840	1012	0.00	0.50	-	11.5	4.3
硬質砂岩粗骨材		46	180	257	-	840	997	0.00	1.00	-	9.0	4.5

*：スランプフロー

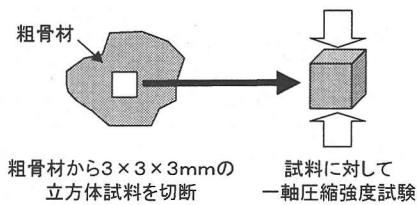


図-4 微小圧縮強度試験の概要

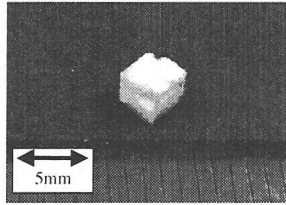


図-5 微小圧縮強度試験用試料

一方、水結合材比が 0.25 の場合の練混ぜ方法を以下に示す。材料の投入順序は、水結合材比が 0.40, 0.55, 0.70 の場合と同様である。ただし、30 秒間で水を加えた後、180 秒間練混ぜを行った。その後、練混ぜを止め、スコップによりミキサおよびパドルに付着したモルタルを掻き落とした。最後に粗骨材を加え、180 秒間練混ぜた。

(5) 粗骨材に対する試験項目

本論文では、粗骨材の強度を定量的に評価するために微小圧縮強度試験を行った。また、粗骨材の物質透過抵抗性を定量的に評価するため、微小拡散セル試験および空隙率試験（水中飽和法および水銀圧入法）を行った。

a) 微小圧縮強度試験³⁾

微小圧縮強度試験は、粗骨材から切断した微小圧縮強度試験用試料（ $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}$ ）に対して、一軸圧縮強度試験を行うものである。図-4 に微小圧縮強度試験の概要を、図-5 に微小圧縮強度試験用試料をそれぞれ示す。なお、試料の切断にはアイソメットカッター（BUEHLER 製）を使用した。また、一軸圧縮試験には 5 kN ねじ式万能試験機（JT トーション機）を使用し、変位制御により一軸圧縮載荷を行った。なお、算出される微小圧縮強度は、10 個の試料の平均とした。さらに、明らかに異常と判断される試験結果は用いないこととした。

微小圧縮強度試験の特長は、(i) 粗骨材の圧縮強度を定量的に評価できること、(ii) 同様に試験したモルタルの微小圧縮強度と比較できること、(iii) 碎石のように原石をもつ岩石のみならず、原石を持たない火山れきや珊瑚などの圧縮強度も定量的に評価できること、などである。なお、本試験をセメントペーストを対象とした試験に適用した場合、

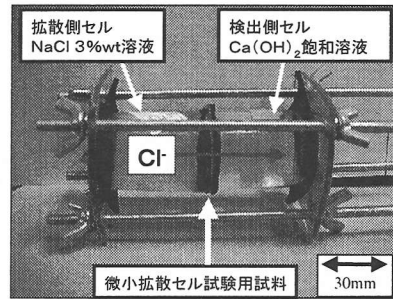


図-6 微小拡散セル試験の概要

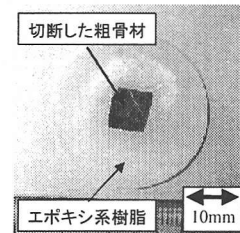


図-7 微小拡散セル試験用試料

ここで得られる微小圧縮強度試験結果は、寸法および形状の影響を受け、一般の圧縮強度試験結果より高くなることが確認された。

b) 微小拡散セル試験⁴⁾

微小拡散セル試験は、粗骨材から切断した試料（ $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}$ ）とエポキシ系樹脂から構成される微小拡散セル試験用試料（ $\phi 30 \times 1 \text{ mm}$ ）に対して、拡散セル試験を行うものである。図-6 に微小拡散セル試験の概要を、図-7 に微小拡散セル試験用試料をそれぞれ示す。本試験では、容量 15ml の拡散側セル（NaCl 3%wt 溶液封入）および検出側セル（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 飽和溶液封入）の中央にゴム製シートを介して試料を設置した。なお、試料の研磨には電動研磨機（BUEHLER 製）を使用した。ここで、図-3 で示したように、本論文で検討した粗骨材内部には、ミリオーダーの空隙が存在するものもある。したがって、研磨後の試料内にこれらの空隙が存在した場合、得られる拡散係数は空隙の影響を大きく受ける。そのため、試料を研磨する際、試料面に目視にて確認される空隙が存在しないように注意した。

試験結果は、図-8 に示すように濃度変化が定常状態となる時の傾きを Cl の濃度変化速度 $\Delta C / \Delta t$ [mol/cm^3] とし計算した。その後、上記の濃度変化速度 $\Delta C / \Delta t$ とフラックス J_{Cl} [$\text{mol/cm}^2/\text{sec}$] の間には式(1)の関係があることを考慮し（Fick の拡散則）、コンクリート中微小領域の Cl 拡散係数 D_{Cl} [cm^2/sec] を算出した。なお、算出される Cl 拡散係数は 3 個の試料の平均とした。

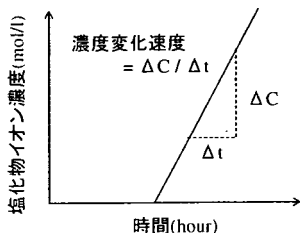


図-8 濃度変化の概要

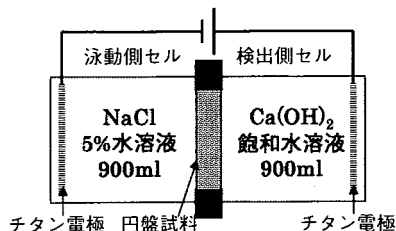


図-9 電気泳動セル試験の概要

$$D_{Cl} = -\frac{J_{Cl}}{\partial C / \partial t} \quad (1)$$

微小拡散セル試験の特長は、粗骨材やモルタルなどコンクリート中微小領域の Cl^- 拡散係数を直接測定できることである。なお、微小拡散セル試験結果は、後に示す電気泳動セル試験結果と同程度となることが確認された。

c) 空隙率試験

コンクリートの強度および物質透過抵抗性は、その空隙構造と密接な関係があると考えられる。また、同様のことが、碎石の由来となる岩石においても確認されている⁵⁾。したがって、粗骨材の強度および物質透過抵抗性を検討する際、その空隙率について評価することは極めて重要である。本論文では、粗骨材の空隙率を測定するために、水中飽和法⁶⁾および水銀圧入法を用いた。前者は空隙中に水を浸透させ、水分浸透量により空隙率を測定する。一方、後者は圧力下で空隙中に水銀を圧入し、水銀圧入量より空隙率を測定する。なお、水銀圧入法で測定できる空隙径は $0.006\mu m \sim 500\mu m$ の範囲である。

(6) モルタルに対する試験項目

本論文では、モルタルの強度および物質透過抵抗性と粗骨材の強度および物質透過抵抗性を比較するため、モルタルに対しても粗骨材と同様に微小圧縮強度試験、微小拡散セル試験および空隙率試験を実施した。試験方法は粗骨材に対する方法と同様とした。

(7) コンクリートに対する試験項目

a) 圧縮強度試験

材齢 28 日まで水中養生した供試体を用い、コンクリートの圧縮強度を測定した。試験は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠して行った。なお、算出される圧縮強度は 3 本の供試体の平均とした。

b) 電気泳動セル試験

コンクリートの Cl^- 浸透性を把握するため、電気泳動セル試験⁷⁾を行い、 Cl^- 拡散係数を測定した。

図-9 に電気泳動セル試験の概要を示す。試料は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体から切断した厚さ 10mm の円盤試料とした。なお、本論文で検討した粗骨材の最大寸法は 20mm である。したがって、ここで使用した円盤試料の厚さは薄すぎると考えられる。しかしながら、本論文では、粗骨材がそれを使用したコンクリートの物質透過抵抗性に及ぼす影響をより鋭敏に把握するため、円盤試料の厚さを 10mm と粗骨材の最大寸法より小さい値とした。泳動側セル (NaCl 5%wt 水溶液封入) および検出側セル ($Ca(OH)_2$ 飽和水溶液封入) の間にゴム製シートを介して試料設置した。次に、電流密度が 1.0 A/m^2 となるように電流を制御して通電した。その後、検出側セルにおける Cl^- の濃度経時変化から Cl^- 拡散係数を算出した。なお、算出される Cl^- 拡散係数は 2 体の供試体の平均とした。また、電極には陰陽極共にチタン電極を使用した。

3. 検討した粗骨材の強度、物質透過抵抗性および空隙率

(1) 強度

図-10 に微小圧縮強度試験により得られたそれぞれの粗骨材の微小圧縮強度を示す。なお、粗骨材と同様に測定した水結合材比が 0.25, 0.40, 0.55, 0.70 のモルタルの微小圧縮強度も併せて示す。

図-10 より何れの粗骨材も硬質砂岩粗骨材と比較して微小圧縮強度が低いことが確認される。特に、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材の微小圧縮強度は、硬質砂岩粗骨材の微小圧縮強度と比較して、著しく低いことが確認される。

また、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材の微小圧縮強度は、何れの水結合材比におけるモルタルの微小圧縮強度と比較しても低いことが確認される。火山砕石粗骨材の微小圧縮強度は、何れの水結合材比におけるモルタルの微小圧縮強度と比較しても高

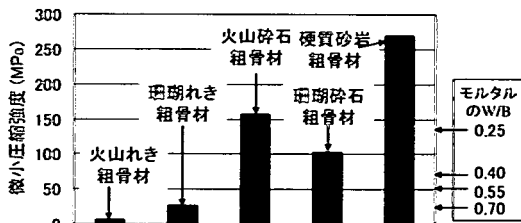


図-10 粗骨材の微小圧縮強度

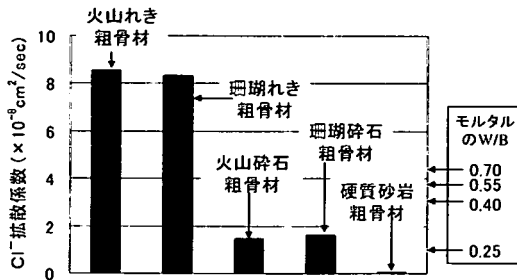


図-11 粗骨材の Cl^- 拡散係数

いことが確認される。珊瑚砕石粗骨材の微小圧縮強度は、水結合材比が 0.40 以上のモルタルの微小圧縮強度と比較して高く、水結合材比が 0.25 のモルタルの微小圧縮強度と比較して低いことが確認される。

(2) 物質透過抵抗性

図-11 に微小拡散セル試験により得られたそれぞれの粗骨材の Cl^- 拡散係数を示す。なお、粗骨材と同様に測定した水結合材比が 0.25, 0.40, 0.55, 0.70 のモルタルの Cl^- 拡散係数も併せて示す。

図-11 より何れの粗骨材も硬質砂岩粗骨材と比較して Cl^- 拡散係数が大きいことが確認される。特に、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材の Cl^- 拡散係数は、硬質砂岩粗骨材の Cl^- 拡散係数と比較して、著しく大きいことが確認される。これは、図-3 に示したように、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材には連続空隙が存在しているためと考えられる。なお、ここで得られる Cl^- 拡散係数は厚さ 1mm の円盤試料に対して行っているため、算出される拡散係数は目視では観察され得ない連続空隙の影響を大きく受けていると考えられる。また、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材の Cl^- 拡散係数は、何れの水結合材比におけるモルタルの Cl^- 拡散係数より大きいことが確認される。一方、珊瑚砕石粗骨材および火山砕石粗骨材の Cl^- 拡散係数は、水結合材比が 0.25 のモルタルの Cl^- 拡散係数と比較して大きく、水結合材比が 0.40 以上のモルタルの Cl^- 拡散係数と比較して小さいことが確認される。

表-3 粗骨材の空隙率

粗骨材の種類	水中飽和法による空隙率	水銀圧入法による空隙率
火山れき粗骨材	35.80*	13.00
珊瑚れき粗骨材	35.90*	2.73
火山砕石粗骨材	6.98*	2.56
珊瑚砕石粗骨材	0.77	7.93*
硬質砂岩粗骨材	0.93*	0.06

単位：全粗骨材体積に対する空隙量の百分率(%)

*：本論文で採用した粗骨材の空隙率

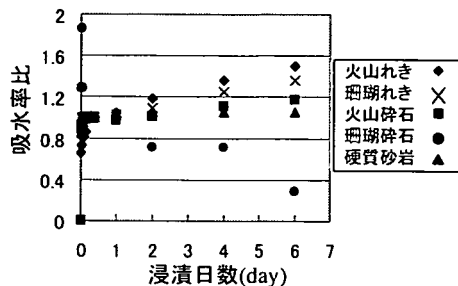


図-12 吸水率比経時変化

吸水率比：そのときの吸水率を 24 時間吸水率で除して無次元化した値

(3) 空隙率

表-3 に水中飽和法あるいは水銀圧入法により得られたそれぞれの粗骨材の空隙率を示す。これより、何れの粗骨材においても、水中飽和法と水銀圧入法で求めた空隙率に差異があることが確認される。

火山れき粗骨材、珊瑚れき粗骨材、火山砕石粗骨材および硬質砂岩粗骨材の空隙率は、水中飽和法により求めたものの方が、水銀圧入法により求めたものと比較して、高いことが確認される。これは、水銀圧入法により測定できる空隙径の範囲の影響と考えられる。すなわち、水銀圧入法において測定できる空隙径の範囲は $0.006 \sim 500 \mu\text{m}$ である。そのため、ミリオーダーの粗大な空隙を持つ火山れき粗骨材、珊瑚れき粗骨材および火山砕石粗骨材の空隙率は、水銀圧入法では正確に測定できないと考えられる。同様に、 $0.006 \mu\text{m}$ 以下の微小な空隙を持つ硬質砂岩粗骨材の空隙率も、水銀圧入法では正確に測定できないと考えられる。

一方、珊瑚砕石粗骨材の空隙率は、水銀圧入法により求めたものの方が、水中飽和法により求めたものと比較して、高いことが確認される。これは、珊瑚砕石粗骨材の主成分が石灰であり、水中に浸漬した際に、石灰成分が水に溶出したためと考えられる。実際に、図-12 に示すように、珊瑚砕石粗骨材を水中に浸漬した場合、その吸水率比(そのときの吸水率を 24 時間吸水率で除して無次元化した値)は経時的に減少することが認められた。そのため、水中飽和法で測定された珊瑚砕石粗骨材の空隙率は、湿潤

状態の粗骨材の質量が減少し、乾燥質量との差が小さくなるため、実際の空隙率より低い値として測定されたと考えられる。一方、図-3 に示したように珊瑚碎石粗骨材にはミリオーダーの空隙は確認されないが、マイクロオーダーの空隙は多数存在することが予測される。これは、水銀圧入法による空隙率の測定が可能な範囲である。以上より、珊瑚碎石粗骨材の空隙率は、水中飽和法では正確に測定できず、水銀圧入法により得られる空隙率が正確な値であると考えられる。

以上を考慮すると、火山れき粗骨材、珊瑚れき粗骨材、火山碎石粗骨材および硬質砂岩粗骨材については水中飽和法により、珊瑚碎石粗骨材については水銀圧入法により、それぞれの適切な空隙率が測定されたと考えられる。したがって、本論文では、火山れき粗骨材、珊瑚れき粗骨材、火山碎石粗骨材および硬質砂岩粗骨材については水中飽和法により測定された空隙率を、珊瑚碎石粗骨材については水銀圧入法により測定された空隙率をそれぞれの粗骨材の空隙率とする。

(4) 粗骨材の強度および物質透過抵抗性と空隙率の関係

図-13 に粗骨材の微小圧縮強度と空隙率の関係を、図-14 に粗骨材の Cl^- 拡散係数と空隙率の関係をそれぞれ示す。これらより、粗骨材の空隙率が高いほど、粗骨材の微小圧縮強度が低下し、粗骨材の Cl^- 拡散係数が増大することが確認される。すなわち、粗骨材の空隙率が高いほど、粗骨材の強度および物質透過抵抗性が低下することが確認される。

(5) まとめ

以上の検討結果より、本論文で検討した粗骨材は何れも我が国で使用されている粗骨材（硬質砂岩粗骨材）と比較して、強度及び物質透過抵抗性に関して劣ることが確認された。したがって、本論文ではこれらの粗骨材を「低品質粗骨材」とし、4 章にてこれらの粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を把握する。

4. 低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性

(1) 低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度

一般にコンクリートの圧縮強度と水結合材比の間には式 (2) のような直線関係が成立する。

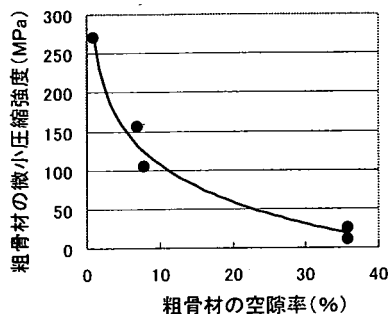


図-13 粗骨材の微小圧縮強度と空隙率の関係

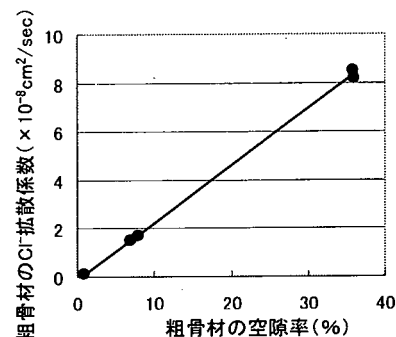


図-14 粗骨材の Cl^- 拡散係数と空隙率の関係

$$f'_c = a + b \left(\frac{B}{W} \right) \quad (2)$$

ここで、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa),
 B/W : 結合材水比,
 a, b : 実験定数

図-15 にそれぞれの粗骨材を使用したコンクリートの圧縮強度と結合材水比の関係を示す。これより、水結合材比が 0.70 の場合（結合材水比=1.40）では、何れの粗骨材を使用したコンクリートの圧縮強度も同程度に低いことが確認される。また、使用した粗骨材により、直線部の傾き b も異なることが確認される。すなわち、火山碎石粗骨材を除く低品質粗骨材を使用したコンクリートの直線部の傾きは、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの直線部の傾きと比較して小さいことが確認される。特に、火山れき粗骨材を使用したコンクリートの直線部の傾きは、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの直線部の傾きと比較して著しく小さいことが確認される。すなわち、火山れき粗骨材を使用したコンクリートの場合、結合材水比によらず圧縮強度は殆ど変化しないことが確認される。

図-16 に水結合材比が 0.55（結合材水比=1.82）

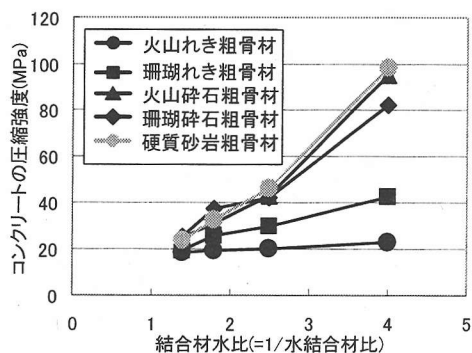


図-15 コンクリートの圧縮強度と結合材水比の関係

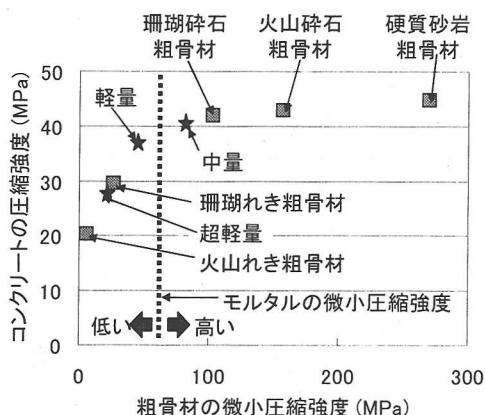


図-16 コンクリートの圧縮強度と粗骨材の微小圧縮強度の関係 (W/B=0.55)
(★は我が国で使用されている人工骨材を使用した場合の同様の方法で求めた結果)

のコンクリートの圧縮強度と使用した粗骨材の微小圧縮強度の関係を示す。なお、水結合材比が 0.55 (結合材水比=1.82) のモルタルの微小圧縮強度も併せて示す。これより、使用した粗骨材の微小圧縮強度により、コンクリートの圧縮強度が異なることが確認される。すなわち、粗骨材の微小圧縮強度がモルタルと比較して低い場合、粗骨材の微小圧縮強度が高いほど、コンクリートの圧縮強度が高くなることが確認される。一方、粗骨材の微小圧縮強度がモルタルと比較して高い場合、コンクリートの圧縮強度は、粗骨材の微小圧縮強度によらず、同程度となることが確認される。

以上の現象について、ひび割れの進展経路に着目して考察する⁸⁾。一般にコンクリートが圧縮応力を受ける際の破壊過程は以下のようにまとめられる。コンクリートが圧縮応力を受けると、まず、粗骨材とモルタル間に存在する遷移帯 (Interfacial Transition Zone; 以下 ITZ と略記) に微細なひび割れが局部的に発生する (ひび割れの発生期)。次に、

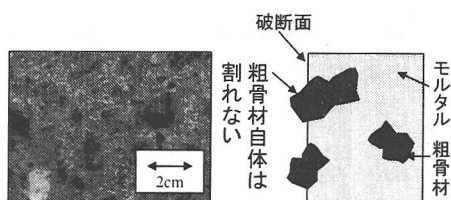


図-17 モルタルと比較して強度の高い粗骨材を使用したコンクリートの破断面 (硬質砂岩粗骨材, W/B=0.55)

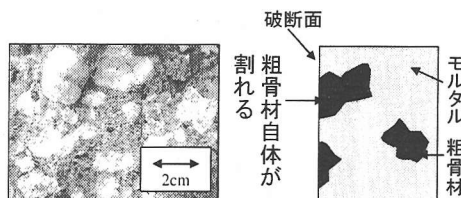


図-18 モルタルと比較して強度の低い粗骨材を使用したコンクリートの破断面 (火山れき粗骨材, W/B=0.55)

そのひび割れがコンクリート中を進展する (ひび割れの進展期)。さらに、ひび割れが互いに連結して、大きなひび割れが形成される (ひび割れの連結期)。最後に、全体的な構造的不安定を引き起こしコンクリートが破壊する (コンクリートの破壊期)。

粗骨材の強度がモルタルの強度と比較して十分に高い粗骨材を使用した場合、粗骨材周辺の ITZ に局部的に発生したひび割れは、比較的強度の低いモルタル中を進展する。そして、ひび割れは粗骨材を迂回するように連結し、コンクリートが破壊する。この際、ひび割れの「進展しやすさ」および「連結しやすさ」はモルタルの強度の影響を受け、粗骨材の強度の影響を受けない。その結果、モルタルと比較して微小圧縮強度の高い粗骨材を使用した場合、粗骨材の微小圧縮強度によらず、コンクリートの圧縮強度が同程度となると考えられる。なお、図-17 にモルタルと比較して強度の高い粗骨材を使用したコンクリートの破断面 (硬質砂岩粗骨材, 水結合材比=0.55, 結合材水比=1.82) を示す。これより、ひび割れがモルタル部のみを通過したことが確認される。

一方、粗骨材の強度がモルタルの強度と同程度か、もしくはモルタルの強度と比較して低い場合、粗骨材周辺の ITZ に局部的に発生したひび割れは、モルタル中のみならず粗骨材内部をも進展する。そして、ひび割れはモルタル中および粗骨材中で連結し、コンクリートが破壊する。この際、ひび割れの「進展しやすさ」および「連結しやすさ」はモルタルおよび粗骨材の強度の影響を受ける。特に、粗骨材の強度がモルタルの強度と比較して低い場合、ひび割れはモルタル中を進展するより先に、粗骨材内部を進

展する。すなわち、ひび割れの進展期が早まる。また、ひび割れがモルタル中だけではなく粗骨材内部をも進展するため、ひび割れが容易に連結する。すなわち、ひび割れの連結期が早まる。したがって、モルタルの強度が一定ならば、ひび割れの「進展しやすさ」および「連結しやすさ」は、モルタルの強度のみならず粗骨材の強度に影響を受ける。その結果、モルタルと比較して微小圧縮強度の低い粗骨材を使用した場合、粗骨材の微小圧縮強度が高いほど、コンクリートの圧縮強度が高くなると考えられる。なお、図-18 にモルタルと比較して強度の低い粗骨材を使用したコンクリートの破断面（火山れき粗骨材、水結合材比=0.55、結合材水比=1.82）を示す。これより、ひび割れが粗骨材内部を通過したことが確認される。

(2) 低品質粗骨材を使用したコンクリートの物質透過抵抗性

図-19 にそれぞれの粗骨材を使用したコンクリートの Cl^- 拡散係数と水結合材比の関係を示す。これより、水結合材比が 0.25 の場合では、何れの粗骨材を使用したコンクリートの Cl^- 拡散係数も小さいことが確認される。一方、水結合材比が 0.40 以上の場合では、粗骨材の種類により、コンクリートの Cl^- 拡散係数が異なることが確認される。すなわち低品質粗骨材を使用したコンクリートの Cl^- 拡散係数は硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの Cl^- 拡散係数と比較して大きいことが確認される。特に、火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材を使用したコンクリートの Cl^- 拡散係数は著しく大きいことが確認される。

図-20 に 4 水準の水結合材比におけるコンクリートの Cl^- 拡散係数と粗骨材の Cl^- 拡散係数の関係を示す。これより、何れの水結合材比においても粗骨材の Cl^- 拡散係数が大きいほど、コンクリートの Cl^- 拡散係数も大きいことが確認される。これは、物質透過抵抗性の低い粗骨材を使用したコンクリートでは、物質がモルタル部のみならず、粗骨材内部も移動してコンクリート内部に移動するためと考えられる。

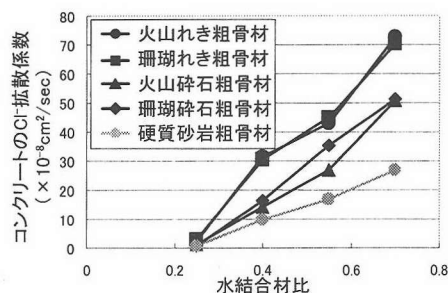


図-19 コンクリートの Cl^- 拡散係数と水結合材比の関係

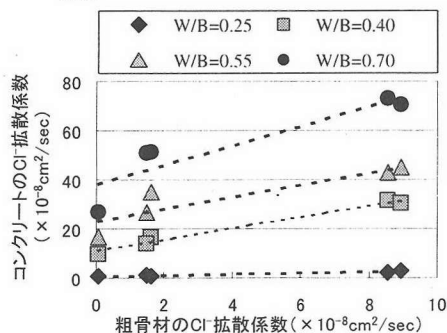


図-20 コンクリートの Cl^- 拡散係数と粗骨材の Cl^- 拡散係数の関係

(3) まとめ

以上の検討結果より、本論文で検討した粗骨材を使用したコンクリートは何れも我が国で使用されている粗骨材（硬質砂岩粗骨材）を使用したコンクリートと比較して、強度及び物質透過抵抗性に関して劣ることが確認された。したがって、5 章にてこれらの粗骨材の有効利用方法を提案する。

5. 低品質粗骨材の有効利用方法の提案

表-4 に環太平洋地域の低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性をまとめたものを示す。なお、これは、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートと比較した結果である。これより、低品質粗骨材を使用したコンクリートは、2 種類に分けることができる。すなわち、(1) 火山れき粗骨材および珊瑚れき粗骨材を使用したコンクリート

表-4 各粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性

区分	粗骨材名	圧縮強度				Cl ⁻ 浸透抵抗性			
		(W/B)				(W/B)			
		0.25	0.40	0.55	0.70	0.25	0.40	0.55	0.70
(I)	火山れき粗骨材	×	×	×	×	○	×	×	×
	珊瑚れき粗骨材	×	×	×	×	○	×	×	×
(II)	火山砕石粗骨材	○	○	○	○	○	×	×	×
	珊瑚砕石粗骨材	×	○	○	○	○	×	×	×

○：硬質砂岩粗骨材と同程度、×：硬質砂岩粗骨材より劣る

のように、強度および物質透過抵抗性ともに硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートと比較して劣る粗骨材、および(Ⅱ)火山碎石粗骨材および珉瑯碎石粗骨材を使用したコンクリートのよう、強度は硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートと同程度であるが、物質透過抵抗性は硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートと比較して劣る粗骨材、に分けることができる。本章では、(Ⅰ)については、強度および物質透過抵抗性を改善すること、(Ⅱ)については、物質透過抵抗性を改善すること、を目的とする。ここでは特に、(Ⅰ)については、火山れき粗骨材を使用したコンクリート、(Ⅱ)については、火山碎石粗骨材を使用したコンクリートを対象として有効利用方法を提案する。なお、使用するコンクリートの水結合材比は0.55とする。また、粗骨材の有効利用方法に関しては、再生骨材に対する有効利用方法を参照する^{9), 10)}。

(1) 火山れき粗骨材を使用したコンクリートの有効利用方法の提案

a) 混合工法

前章までの検討により、火山れき粗骨材を使用したコンクリートは、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートと比較して強度および物質透過抵抗性が非常に劣ることが確認された。また、それは火山れき粗骨材の強度が低く、物質透過抵抗性が低いことが原因であると考えられた。さらに、水結合材比を低くしても殆ど強度が向上しない、つまり、モルタル部を改善することでの強度向上は殆ど望めないことが確認された。そこで、火山れき粗骨材と硬質砂岩粗骨材を混合して使用することにより(以下、混合工法と称す)、強度および物質透過抵抗性を改善することを試みる。

なお、火山れき粗骨材は先ごろ噴火したピナツポ火山の噴出物であり、資源の有効利用の観点からコンクリート用粗骨材としての使用が検討されているものである。そのため、火山れき粗骨材の単独使用に限らず、火山れき粗骨材と硬質砂岩粗骨材を混合使用することにより強度および物質透過抵抗性を改善することは意味があるものと考えられる。なお、火山れき粗骨材と硬質砂岩粗骨材の混合率は体積比で1:1とした。また、粗骨材の粒径は5mm~20mmとした。

b) 改善効果

図-21 に混合工法による圧縮強度の改善効果を、図-22 に混合工法による Cl^- 拡散係数の改善効果を

それぞれ示す。

図-21 より、火山れき粗骨材において、混合工法により、改善後のコンクリートの圧縮強度は、改善前の圧縮強度に対し、約35%向上できることが確認される。この圧縮強度は、水結合材比が0.55の場合の硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの圧縮強度の約80%程度である。

図-22 より、火山れき粗骨材において、混合工法により、改善後のコンクリートの Cl^- 拡散係数は、改善前の Cl^- 拡散係数に対し、約50%低減できることが確認される。

以上の結果、混合工法により火山れき粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を改善することができた。

(2) 火山碎石粗骨材を使用したコンクリートの有効利用方法の提案

a) プレコーティング工法

前章までの検討により、火山碎石粗骨材を使用したコンクリートは、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートと比較して、物質透過抵抗性が劣ることが確認された。また、それは、物質が粗骨材内部を通じてコンクリート内部に浸透していくことが原因であると考えられた。そのため、火山碎石粗骨材を使用したコンクリートの物質透過抵抗性を改善するには、物質の粗骨材内部通過を抑制することが有効であると考えられる。そこで、プレコーティング工法を用いて火山碎石粗骨材を使用したコンクリートの物質透過抵抗性を改善することを試みる。

一般にプレコーティング工法とは、粗骨材を低水結合材比のペーストでコーティングし、粗骨材とモルタルの付着性状を改善することにより、コンクリートの強度および物質透過抵抗性を改善するものである¹⁰⁾。今回は、 Cl^- の粗骨材内部通過を抑制する目的でプレコーティング工法を採用する。

プレコーティング工法の特長として、コンクリートを打設する前に粗骨材のプレコーティングが必要となるが、新しい設備や費用が不必要なため、発展途上国での適用に適していることが挙げられる。

表-5 にプレコーティング用セメントペーストの配合を示す。セメントペーストの量は粗骨材を球形と仮定し、その周囲に250 μm 程度のコーティング層を形成する量とした。コンクリートの打設3時間前に、火山碎石粗骨材とあらかじめ練混ぜたセメントペーストをミキサ内で混合することにより、火山碎石粗骨材をプレコーティングした。なお、プレコーティング実施直後の粗骨材から余分なセメントペー

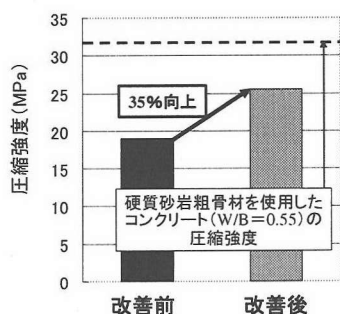


図-21 混合工法による圧縮強度の改善効果
(火山れき粗骨材, W/C=0.55)

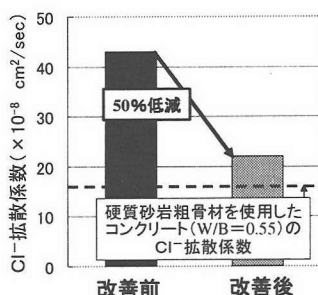


図-22 混合工法による Cl⁻ 拡散係数の改善効果
(火山れき粗骨材, W/C=0.55)

ストを取り除くことにより、元々の配合にプレコーティングに使用したセメントペーストが及ぼす影響を極力低減した。

b) 改善効果

図-23 にプレコーティング工法による Cl⁻ 拡散係数の改善効果を、図-24 に圧縮強度の改善効果をそれぞれ示す。

図-23 より、火山砕石粗骨材において、プレコーティング工法により、改善後のコンクリートの Cl⁻ 拡散係数が、改善前の Cl⁻ 拡散係数に対し、45%程度低減できることが確認される。この Cl⁻ 拡散係数は、水結合材比が 0.55 の場合の硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの Cl⁻ 拡散係数と同程度である。

さらに、図-24 より、Cl⁻ 拡散係数のみならず圧縮強度が 35%向上できることが確認される。この圧縮強度は、水結合材比が 0.40 の硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの圧縮強度と同程度である。

これらの効果は、粗骨材とモルタル間の ITZ 性状がプレコーティングにより改善されるためと考えられる¹⁰⁾。

表-5 プレコーティング用ペーストの配合

W/B	単用量 (kg/m ³)		C×%	
	W	C	高性能減水材	消泡剤
0.25	440	1760	2	0.004

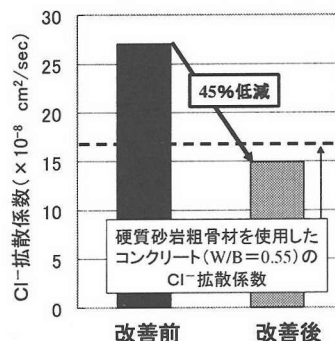


図-23 プレコーティング工法による Cl⁻ 拡散係数の改善効果(火山砕石粗骨材, W/C=0.55)

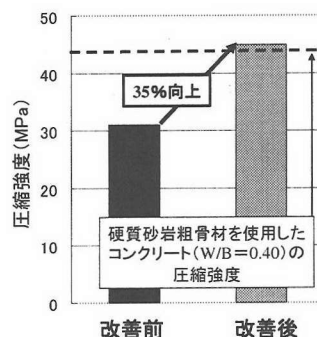


図-24 プレコーティング工法による圧縮強度の改善効果(火山砕石粗骨材, W/C=0.55)

6. 結論

本論文では、環太平洋地域の低品質粗骨材として、火山噴出れき（フィリピン共和国産）、珊瑚れき（キリバス共和国産）、火山岩砕石（ニカラグア共和国産）および珊瑚堆積物砕石（日本国産）を由来とする粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性に関して検討した。その結果得られた結論を以下に示す。

1. 環太平洋地域の低品質粗骨材の強度および物質透過抵抗性に関して、微小圧縮強度試験および微小拡散セル試験を用い、それぞれの粗骨材の強度および物質透過抵抗性を定量的に評価した。その結果、本論文で検討した火山噴出れき、珊瑚れき、火山岩砕石および珊瑚堆積物砕石の粗骨材は、硬質砂岩粗骨材と比較して多孔質であり、強度および物質透過抵抗性の観点から、低品質であることが確認された。

2. 環太平洋地域の低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性は、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートのそれと比較して、強度および物質透過抵抗性が劣ることが確認された。特に、モルタルと比較して強度の低い粗骨材を使用した場合、粗骨材の強度が低いほど、コンクリートの強度が低いことが確認された。また、粗骨材の Cl^- 拡散係数が大きいほど、コンクリートの Cl^- 拡散係数が大きいことが確認された。
3. 硬質砂岩碎石(青梅産)との混合工法により、強度および物質透過抵抗性が劣る粗骨材(火山噴出れき)を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性を改善できた。また、プレコーティング工法により、物質透過抵抗性のみが硬質砂岩碎石と比較して劣る粗骨材(火山岩碎石)を使用したコンクリートの物質透過抵抗性を、硬質砂岩碎石を使用したコンクリートの物質透過抵抗性と同程度まで改善できた。

謝辞：本論文を作成するにあたり、東京工業大学大学院理工学研究科教授・二羽淳一郎先生にご指導、ご協力を頂いた。また、本論文は、平成 14 年度科学研究費補助金基盤研究(B)(2)「セメント系硬化体内部微小領域の強度特性および物質透過特性の定量的評価に関する研究、No.14350232」の一部として行った。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 村田二郎、長瀧重義、菊川浩治共著：土木材料コンクリート第2版、共立出版株式会社、p.1、1996。
- 2) 大即信明、横倉順治、宮里心一：ところかわればコンクリートもかわる、セメント・コンクリート、No.660、pp.31-39、2002。
- 3) 山根洋之、大即信明、西田孝弘、鬼塚良介：コンクリート中微小領域の引張強度および圧縮強度の定量的評価、第56回セメント技術大会講演要旨、pp.118-119、2002。
- 4) Yodsudjai Wanchai、大即信明、西田孝弘、山根洋之：コンクリート中微小領域の Cl^- 拡散係数測定方法の開発、第57回セメント技術大会講演要旨、pp.130-131、2003。
- 5) 西山勝栄、中島悟、多田隆次、内田隆：岩石間隙水中のイオンの拡散と間隙の性質、鉱山地質 40(5)、pp.323-336、1990。
- 6) 尾口本一、大井才生、久田真：水和物の組成の違いがCaの溶脱による硬化体物性の変化に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.457-462、2001。
- 7) 大即信明、久田真、大谷隆之、丸山俊夫：電気泳動試験によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数の推計、土木学会論文集、No.592/V-39、pp.97-105、1998。
- 8) 笠井芳夫編著：コンクリート総覧、pp.416-418、技報堂出版、1998。
- 9) 大即信明、宮里心一、原法生、Yodsudjai Wanchai：再生骨材コンクリートの物質透過性および強度の評価とその結果に基づく改善方法の提案、コンクリート工学年次論文集、Vol.12、No.2、pp.1-12、2001。
- 10) Nathaniel, B.D., Otsuki, N. and Miyazato, S.: The Use of Coated Coarse Aggregate and Double Mixing in Making Concrete, Proceedings of the First International Summer Symposium, pp.275-278, 1999。

(2002.11.11 受付)

STUDY ON STRENGTH AND PERMEABILITY OF CONCRETE USING LOW QUALITY COARSE AGGREGATES FROM CIRCUM-PACIFIC REGION

Takahiro NISHIDA, Nobuaki OTSUKI, Ryosuke ONITSUKA,
Yodsudjai WANCHAI and Jyunji YOKOKURA

In circum-Pacific region there are a lot of low quality coarse aggregate, i.e. volcanic aggregate and coral aggregate. However there is no research that examined the strength and material permeability resistance of concrete using these low quality coarse aggregate from the circum-Pacific region yet. Therefore the purposes of this study are to investigate the strength and the material permeability resistance of low quality coarse aggregate in the circum-Pacific region and concrete using it, and to propose the effective utilization method for low quality coarse aggregate.