

論文 セメントシリカフュームスラリーに浸漬した再生粗骨材を用いたコンクリートの遷移帯特性に関する実験的検討

嶺山 修也*1・Wiracha Thauc*2・中山 一秀*3・岩波 光保*4

要旨 再生骨材コンクリートの遷移帯の品質向上を目的に、再生粗骨材をセメントシリカフュームスラリーに浸漬させた。再生粗骨材を用いたコンクリートの遷移帯の品質を把握するため、再生骨材コンクリートを模擬した試験体を用いて評価を行った。ビッカース硬さ試験で遷移帯厚さを、水銀圧入法で遷移帯の細孔空隙を測定し、浸漬処理によって再生粗骨材周囲にセメントとシリカフュームが付着したことで、付着モルタルと新セメントペースト間のビッカース硬さの増加と細孔空隙の減少に効果的であることを確認した。また、浸漬処理した再生粗骨材はコンクリートの割裂引張強度の増加に寄与した。

キーワード：セメントシリカフュームスラリー、再生骨材、遷移帯、ビッカース硬さ、細孔空隙

1. はじめに

再生骨材コンクリートは、再生骨材の表面に付着したモルタルや残留モルタル塊(以下、付着モルタルとする)の影響により、普通骨材を用いたコンクリートと比較して、強度特性および物質移動抵抗性が低下する¹⁾。再生骨材は品質に応じて再生骨材H、再生骨材M、再生骨材Lの3種類に分類されており、JISに基づいて規格化されている。その品質は主に再生骨材の吸水率と絶乾密度によって決定されるが、これらのパラメータは付着モルタルの量に大きく影響されるため、付着モルタルを除去することで再生骨材の品質向上が期待される。近年では、細粒化した付着モルタルに二酸化炭素を固定化させる²⁾ことが報告されているが、一般的に付着モルタルの処理は、破碎に伴うエネルギー消費などによるCO₂排出を引き起こす。このため、付着モルタルを完全に除去しない再生骨材の品質向上策が環境負荷低減につながる。

再生骨材コンクリートは付着モルタルの存在により、普通骨材コンクリートと比較して多くの界面(骨材の表面とセメントペーストの境界)が形成される。これらの界面には、通常のセメントペーストとは異なる性質を持つ領域である遷移帯が存在し³⁾、コンクリートの強度特性および物質移動抵抗性に大きな影響を与える。特に、付着モルタルと新セメントペースト間の遷移帯は脆弱であり、この脆弱性が再生骨材コンクリートの性能低下の一因となる可能性がある⁴⁾。

このような再生骨材コンクリート内の遷移帯の品質を改善する手法として、再生骨材コンクリートに微粉末混和材を添加する方法が提案されている。宮本ら⁵⁾は再生骨材の品質の改善を目的として、再生粗骨材をシリカ

フュームスラリーに浸漬し、浸漬後の付着モルタルの細孔空隙を測定した。その結果、シリカフュームスラリーは再生粗骨材内部に浸透せず、付着モルタル表面に存在する細孔空隙を主に改善することが示された。また、スラリー中のCa(OH)₂濃度を増加させることで、シリカフュームのポゾラン反応が促進され、再生骨材コンクリートの強度特性を改善できる可能性が示されている。

再生骨材の改質を目的として、シリカフュームスラリー中のCa(OH)₂濃度を増加させるためにセメントを添加したスラリーが使用されている。セメントシリカフュームスラリーに浸漬した再生粗骨材を用いたコンクリートの強度特性⁶⁾に関する研究は進められているものの、浸漬処理によって骨材表面に被覆されたシリカフュームがコンクリートの遷移帯特性に及ぼす影響について、遷移帯のBSE画像解析を用いて遷移帯付近の空隙率が減少する⁷⁾ことが示唆されているが、それ以上の詳細な評価には至っていない。

本研究では、セメントシリカフュームスラリーに浸漬した再生粗骨材を使用したコンクリート中のシリカフュームが遷移帯特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、再生骨材コンクリートを模擬した試験体を用いてビッカース硬さ試験によって遷移帯厚さを、水銀圧入法によって遷移帯の細孔空隙を測定した。また、浸漬処理した再生粗骨材を用いたコンクリートに形成される遷移帯がコンクリートの強度特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 再生粗骨材のスラリー浸漬および養生条件

表-1にスラリーの配合を示す。本研究では、セメン

*1 東京科学大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (学生会員)

*2 東京科学大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (非会員)

*3 東京科学大学 環境・社会理工学院 助教 博士(工学) (正会員)

*4 東京科学大学 環境・社会理工学院 教授 博士(工学) (正会員)

トシリカフュームスラリーを使用し、被覆されたシリカフュームの効果を比較するために、比較対象としてセメントスラリーを使用した。スラリー中のシリカフュームの分散を促進する目的で、シリカフューム質量の1.5%に相当する量の高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系化合物とグルコール系化合物の複合体）を水に置換した。

調製に際して、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）とシリカフューム（密度：2.05g/cm³）を水中に投入し、2 分間粉体が分散するようにスコップを用いて手で練り混ぜた。その後、水に対して 50%の質量の絶乾状態の再生粗骨材をスラリーに浸漬した。スラリー中のセメントおよびシリカフュームの凝集を防止するため、1 時間ごとにスラリーの攪拌を実施した。再生粗骨材の浸漬開始から 4 時間後にスラリーから再生粗骨材を取り出した。取り出した再生粗骨材は 2.5 mm のふるいにかけて、余剰に付着したスラリーを除去した。その後、再生粗骨材表面にセメントおよびシリカフュームを付着させるため、20℃環境下で 1 日間空中養生を行い、その後 20℃の水中養生を 6 日間実施した。

2.2 使用骨材

表-2 に本研究で使用した再生粗骨材の物性を示す。再生粗骨材は、原コンクリートの材齢や強度等の詳細は不明であるが、同一のコンクリートから製造されたものであり、JIS における再生粗骨材 L に該当するものである。この再生粗骨材を無処理再生粗骨材 (URA) とした。また、セメントスラリーを用いて処理した再生粗骨材 (CRA) およびセメントシリカフュームスラリーを用いて処理した再生粗骨材 (TRA) を使用した。

URA および TRA の外観をそれぞれ写真-1、写真-2 に示す。再生粗骨材中の付着モルタルに存在するひび割れや空隙がスラリーによって充填されたことで、付着モルタルが緻密化したため、CRA および TRA は URA と比較して吸水率がわずかに減少し、絶乾密度がわずかに増加した。

2.3 模擬試験体概要

本検討では、再生粗骨材コンクリートの遷移帯特性の把握を目的としたため、再生粗骨材コンクリートを模擬した試験体を作製した。URA, CRA, TRA を使用した模擬試験体をそれぞれ URA-P, CRA-P, TRA-P と呼ぶ。

粒径 10 mm 程度の表乾状態の各種骨材を 20 mm×20 mm×30 mm 程度のプラスチック容器に 1 粒設置した。その後水セメント比 50%の普通ポルトランドセメントペーストを容器内に流し込み、軽く振動を与えて締め固めを行い、容器を封緘した。打込みから 1 日後に脱型し、材齢 7 日および 28 日まで 20℃の水中養生を実施した。それぞれの再生粗骨材に対して 12 個ずつ模擬試験体を

表-1 スラリー配合 (kg)

ケース	水	セメント	シリカ フューム	混和剤
CRA	1000	100	0	0
TRA			100	1.5

表-2 再生粗骨材の物性

骨材種類	粗骨材最大 寸法(mm)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
URA	20	2.21	6.96
CRA		2.22	6.63
TRA		2.23	6.36



写真-1 URA 外観

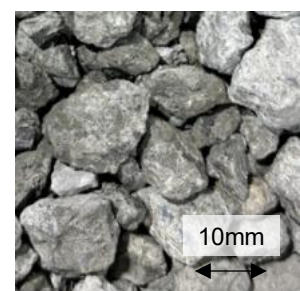


写真-2 TRA 外観

を作製した。

2.4 ビッカース硬さ試験

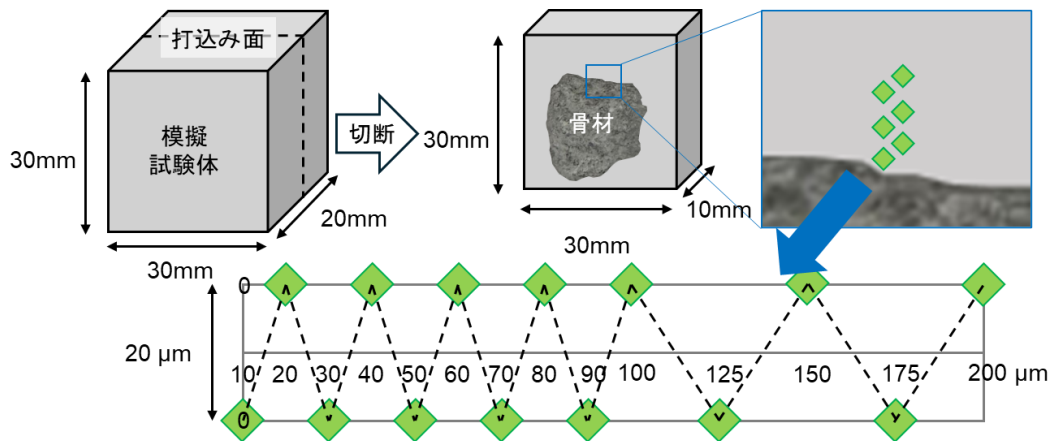
図-1 に模擬試験体およびビッカース硬さ試験の概要を示す。2.3 節で標準養生を終えた模擬試験体を自動精密切断機を用いて打込み面方向に半分に切断した。自動精密切断機による切断は、模擬試験体に対する衝撃力をほとんど伴わない。

模擬試験体の骨材断面を含む面を #80～#2500 までの研磨紙を用いて研磨した後、再生粗骨材の付着モルタルと新セメントペースト間の界面近傍におけるビッカース硬さを測定した。

ビッカース硬さは、付着モルタル界面からの距離が 100 μm までは 10 μm 間隔で、200 μm までは 25 μm 間隔で測定した。これを 1 測線とし、3 つの模擬試験体それぞれに対して 1 測線ずつ測定を行い、それぞれの測点における平均値を算出した。

遷移帯におけるブリーディングの影響について、骨材下部に溜まった水分が骨材周囲に拡散し、遷移帯厚さが増加することが知られている。本研究では、ブリーディングの影響を最小限にするため、付着モルタル端部から模擬試験体の上端方向に試験を行った。

ビッカース硬さ試験の試験条件として、試験力は 0.09807 N、試験力の保持時間は 10 秒と設定した。ビッカース硬さの算出には式(1)を使用した。



図ー1 ビッカース硬さ試験概要

$$HV = \frac{2F \sin(\theta/2)}{D^2} = 1.845 \frac{F}{D^2} \quad (1)$$

ここで、

HV：ビッカース硬さ、

θ ：ビッカース圧子角度(136°)、

F：試験力 (N)、

D：くぼみの対角線長さの平均値 (mm)

ビッカース硬さ試験における観測視野において、図ー2に示すように付着モルタルと新セメントペーストの界面付近において色の変化が認められた。この色の变化が生じた地点をビッカース硬さ試験の基準点 (0 μm) と定義して測定を行った。

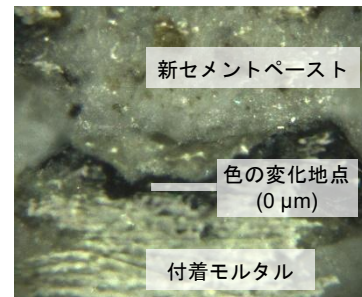
本研究では、付着モルタルから新セメントペーストの距離が 10 μm および 20 μm において測定されたビッカース硬さの平均値を「界面近傍硬さ」と定義した。また、界面の影響を受けにくい 100～200 μm において測定されたビッカース硬さの平均値を「バルク部硬さ」と定義した。さらに、図ー3に示すように、付着モルタルと新セメントペースト間の界面から新セメントペースト方向にかけてビッカース硬さが低い範囲を遷移帯厚さとした。

2.5 水銀圧入法による細孔空隙量の測定

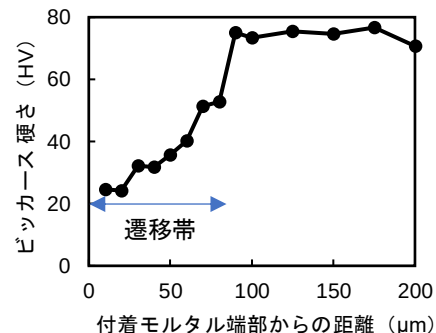
本試験では、2.4 節で切断した試験体を使用した。模擬試験体の材齢 7 日および 28 日において、付着モルタルと新セメントペースト間の界面を含む新セメントペーストを対象とし、付着モルタルを含まない部分を選定して 2mm 程度の大きさに砕いた。試料は、3 つの模擬試験体から計 3 g 程度採取した。その後、水分をアセトンで置換して水和を停止させ、その後 40℃ で乾燥処理を行った。細孔空隙の測定には水銀圧入ポロシメーターを使用し、細孔半径が 0.003～10 μm の範囲について測定した。

2.6 圧縮試験および割裂引張試験

圧縮試験には $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の試験体を、割裂引張試



図ー2 付着モルタルと新セメントペーストの界面付近



図ー3 遷移帯厚さの定義

表ー3 コンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m ³)				AE剤	AE減水剤
	W	C	S	G		
URA-C				880	C × 0.06%	C × 0.50%
CRA-C	175	218	821	883		
TRA-C				887		

験には $\phi 100 \times 100 \text{ mm}$ の試験体を使用した。試験体は材齢 7 日および 28 日まで標準養生を行い、JISA 1108 および JIS A 1132 に準拠して圧縮試験および割裂引張試験を実施した。

表ー3 にコンクリートの配合を示す。コンクリートの配合条件は、水セメント比 55%、細骨材率 46%、単位水量は 175 kg/m³ とした。また、コンクリート中の再生粗骨材の影響を把握するために、再生粗骨材以外の体積は一定とした。URA、CRA、TRA を使用したコンクリート

はそれぞれ URA-C, CRA-C, TRA-C と呼ぶ。

コンクリート試験体の材料として普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）および東京都八王子市美山町産砕砂（表乾密度：2.63 g/cm³，吸水率：1.35%）を細骨材として使用した。粗骨材には 2.2 節で示した各種再生粗骨材を使用した。AE 減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）と AE 剤（アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤）を用いてコンクリートの空気量を 4.5±1.5% に調整した。

3. 実験結果および考察

3.1 ビッカース硬さ

材齢 7 日におけるビッカース硬さ試験の結果を図-4、材齢 28 日の結果を図-5 に示し、界面近傍硬さおよびバルク部硬さを表-4 にまとめた。

材齢 7 日において、3 種類の模擬試験体の界面近傍硬さに大きな差異は認められなかった。一方、付着モルタルからの距離が 100～200 μm における領域では、スラリー浸漬した CRA-P および TRA-P が URA-P と比較して低いビッカース硬さを示した。CRA-P および TRA-P はスラリー浸漬処理を行った再生粗骨材を用いたものであることから、界面に存在するスラリーが原因であると考えられる。新セメントペーストの硬化時に新セメントペーストから溶出するカルシウムイオンが界面の影響を受けにくい安定した部分であるバルク部ではなく、ポーラスな遷移帯から付着したスラリーへ拡散したことでバルク部硬さの増加が阻害された可能性がある。

材齢 28 日では、材齢 7 日と比較して CRA-P および TRA-P の界面近傍硬さが増加した。一方、URA-P の付着モルタルから 10～50 μm の範囲でビッカース硬さの変化はほとんど認められなかった。CRA-P は付着モルタルに付着したセメントペーストが水和物を形成したことで界面近傍硬さが増加したと考えられる。TRA-P は、シリカフュームと新セメントペーストがポゾラン反応によって界面近傍の遷移帯を緻密化した結果であると考えられる。バルク部硬さについて、URA-P がわずかに高い値を示したものの、材齢 7 日と比較すると試験体間の差異は小さくなった。また、スラリー浸漬の有無による再生粗骨材を用いた試験体のバルク部硬さには大きな変化が見られないことから、スラリー浸漬処理の影響はセメント硬化体内の界面から数十 μm に限定されることが示された。

材齢 28 日における模擬試験体の遷移帯厚さについて、URA-P および CRA-P が 80 μm，TRA-P が 30 μm であった。普通骨材とセメントペースト間の遷移帯厚さは 25～30 μm である⁸⁾ことから、URA-P および CRA-P では、遷移帯厚さが増大した。コンクリートに表乾状態の無処理再生粗骨材を用いると吸水率の高い付着モルタルから水

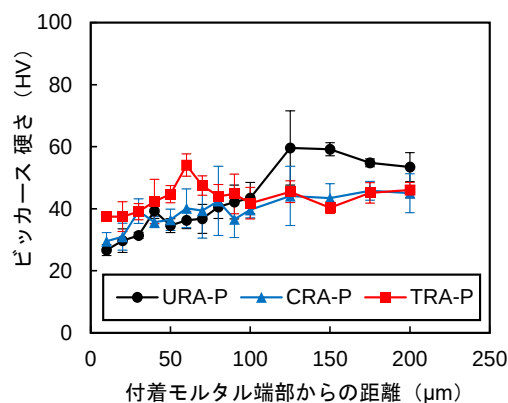


図-4 ビッカース硬さ（材齢 7 日）

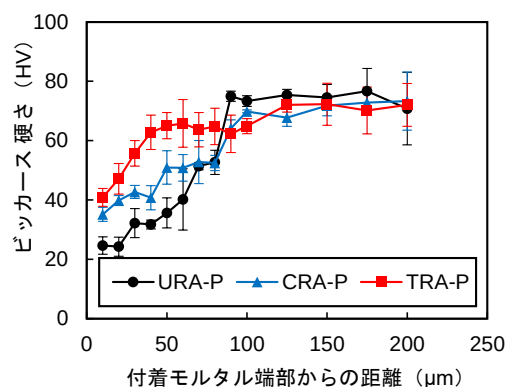


図-5 ビッカース硬さ（材齢 28 日）

表-4 界面近傍硬さおよびバルク部硬さ

ケース	材齢	界面近傍 (HV)	バルク部 (HV)
URA-P	7	28.2	54.1
	28	24.4	74.2
CRA-P	7	30.3	43.6
	28	37.5	71.1
TRA-P	7	37.5	43.7
	28	44.0	70.3

分が滲出することが報告されている⁹⁾。本実験で用いた再生粗骨材は表乾状態であったため、模擬試験体内の付着モルタルから水分が滲出し、骨材近傍の見かけの水セメント比が増加したと考えられる。高水セメント比のセメントペーストは粗大な水酸化カルシウムを形成しやすく¹⁰⁾、付着モルタルと新セメントペースト間で新セメントペースト側に粗大な水酸化カルシウムが析出したことで、URA-P および CRA-P において付着モルタルと新セメントペースト間の遷移帯厚さが増大したと考えられる。一方で、TRA-P においては TRA の周囲にシリカフュームが付着している。このシリカフュームが付着モルタルから滲出する水分を拘束する¹¹⁾ことで、新セメントペーストへの水分移動が抑制された可能性がある。その結果、TRA-P では見かけの水セメント比の増加が抑制され、遷移帯厚さの増加が抑えられたと考えられる。

3.2 細孔空隙量

材齢 7 日および材齢 28 日における模擬試験体の遷移帯を含むセメントペースト試料の細孔径分布を図-6 に示す。材齢 7 日においては、全てのケースで空隙径のピークは約 $0.1\ \mu\text{m}$ 付近に位置し、使用した再生粗骨材によって大きな差異は認められなかった。

遷移帯の細孔空隙について、遷移帯は材齢 3 日頃より形成され、材齢 7 日前後で厚さが最大になり、以後材齢の進行とともに減少することが報告されている⁸⁾。また、遷移帯では骨材近傍で空隙が最も多く、バルク部に近づくほど空隙が減少する。これらから、材齢 7 日で観測される細孔空隙径の大きい部分に遷移帯が含まれると考えられる。材齢 7 日において、空隙径が $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ における空隙量がすべてのケースで少ないことが確認された。遷移帯は骨材近傍の数十 μm 程度の領域であることから、この空隙は模擬試験体中のバルク部に起因するものであると考えられる。そこで、 $0.2\ \mu\text{m}$ よりも大きい空隙に着目すると、URA-P および CRA-P では空隙径が $0.3\ \mu\text{m}$ 以上の空隙が存在しているのに対し、TRA-P は空隙径が $0.3\ \mu\text{m}$ 以上の細孔空隙がほとんど認められなかった。URA-P および CRA-P で粗大な細孔空隙が形成された要因は、界面近傍の水セメント比が増加したことによるものであると考えられる。界面近傍の水セメント比が増加することで、粗大な水酸化カルシウムが形成する。水酸化カルシウムは六角板状の結晶を析出し、遷移帯はカードハウス構造である。このカードハウス構造が粗大な空隙の形成に寄与した可能性がある。

3.1 節において、材齢 28 日における TRA-P で遷移帯が確認されたものの、材齢 7 日における水銀圧入法による結果では TRA-P に遷移帯と判断される空隙が確認されなかった。この結果は、シリカフュームが界面近傍の空隙を緻密化したことで、模擬試験体中の遷移帯にインクボトル空隙を形成した可能性がある。シリカフュームの粒径は $0.1\ \mu\text{m}$ 程度であり、空隙径が $0.1\ \mu\text{m}$ 以上の空隙のみが小さくなったと考えられる。また、再生粗骨材に付着したシリカフュームが遷移帯の形成が阻害した可能性が考えられる。遷移帯と考えられる空隙を有する CRA-P では、付着モルタル周囲に付着したセメントスラリーから遷移帯が形成される。TRA-P においても CRA-P と同様にセメントスラリーから遷移帯が形成すると考えられるが、TRA の表面に付着したシリカフュームが遷移帯の形成を阻害した結果、TRA-P に粗大な水和物が形成されなかった可能性がある。

材齢 28 日における CRA-P の空隙径が $0.1\ \mu\text{m}$ における細孔空隙量は URA-P と比較して多かった。この結果は、CRA のスラリー処理過程の標準養生中に再生粗骨材に付着したセメント粒子が水和物を形成し、模擬試験

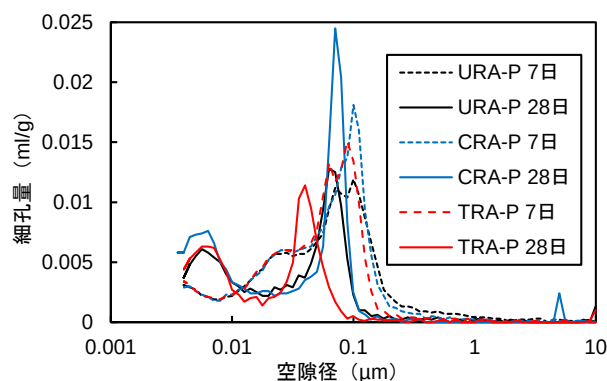


図-6 細孔径分布

体内でその水和物の上に界面が形成されたことに起因すると考えられる。

材齢 28 日における URA-P および CRA-P の細孔空隙径のピークは $0.1\ \mu\text{m}$ 程度であるが、TRA-P では、空隙径のピークは約 $0.05\ \mu\text{m}$ と小径側にシフトした。これは、シリカフュームのポゾラン反応によって遷移帯が緻密化した結果であると考えられる。

以上の結果から、シリカフュームは初期材齢においてシリカフュームが骨材近傍に充填されることで、遷移帯の形成を阻害する可能性が示された。また、シリカフュームのポゾラン反応を通じて二次的な C-S-H ゲルを生成し、遷移帯を緻密化させる効果を有する可能性があることが示された。

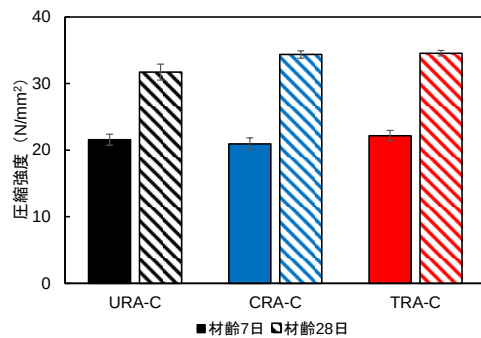
3.3 圧縮強度および割裂引張強度

圧縮強度の結果を図-7 に、割裂引張強度の結果を図-8 に示す。

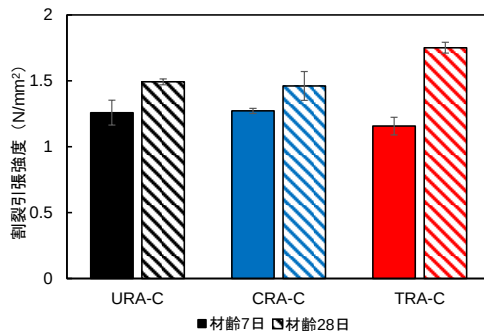
材齢 7 日における圧縮強度では、全ての試験体間で顕著な差は認められなかった。この結果は、材齢 7 日時点では再生骨材コンクリート中のモルタル部が先行して破壊に至ったためであると考えられる。

材齢 28 日において、CRA-C および TRA-C の圧縮強度は URA-C と比較して約 10%増加した。この結果は、再生骨材中に存在していた空隙やひび割れがセメントスラリーおよびセメントシリカフュームスラリーによって充填され、再生骨材コンクリートの脆弱部が減少したためであると考えられる。CRA-C と TRA-C の圧縮強度に大きな差異が認められなかったため、圧縮強度においては、シリカフュームの添加による改善は確認されなかった。

材齢 7 日の割裂引張強度について、TRA-C が最も低い結果となった。TRA-C は TRA の周囲にシリカフュームを含むスラリーが付着している。この部分ではセメント量が少ないため、材齢 7 日において界面が脆弱となった可能性がある。一方で、材齢 28 日では、TRA-C の割裂引張強度が最も高く、URA-C と比較して 17%程度増加した。この結果は、シリカフュームがポゾラン反応によって、脆弱となる骨材と新セメントペースト間の界面近傍



図ー7 圧縮強度試験結果



図ー8 割裂引張強度試験結果

にC-S-Hゲルを生成したことで骨材とセメントペースト間で化学的付着が向上したと考えられる。

引張応力下におけるコンクリートはコンクリートの脆弱箇所から破壊するため、コンクリート界面の品質の影響を受けやすいと考えられる。3.1 節で示したビッカース硬さの結果において、TRA-P の界面ビッカース硬さはURA-P および CRA-P と比較して高かった。コンクリート中の脆弱箇所が強化されたことで TRA-C の割裂引張強度が増加したと考えられる。

4. まとめ

本研究では、セメントシリカフュームに浸漬した再生粗骨材を用いたコンクリートの遷移帯特性および強度特性について実験的に検討した。実験結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) セメントシリカフュームスラリーに浸漬した再生粗骨材を用いたセメント硬化体の付着モルタルと新セメントペースト間の遷移帯厚さは無処理再生粗骨材を用いたものと比較して小さくなった。
- 2) セメントシリカフュームスラリーに浸漬した再生粗骨材を用いたセメント硬化体では、無処理再生粗骨材を用いたセメント硬化体における空隙径のピークがシリカフュームのポゾラン反応によって小径側へシフトした。
- 3) セメントシリカフュームスラリーに浸漬した再生粗骨材を用いたコンクリートの割裂引張強度は増加し

た。これは、コンクリート内の骨材とセメントペースト間の界面の強化に起因するものであると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 須山祐介, 山下牧生: 再生骨材の製造工程で生じた微粉による CO₂ 固定に関する検討, 第 78 回セメント技術大会講演要旨, pp.30-31, 2024
- 3) 加藤佳孝, 魚本健人: 細骨材の量と比表面積が遷移帯形成に及ぼす影響, コンクリート工学会年次論文集, Vol. 20, No. 2, pp.775-780, 1998
- 4) C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam: Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, Construction and Building Materials, Vol. 18, pp. 461-468, 2004.
- 5) 宮本高秀, 湯浅幸久, 犬飼利嗣, 畑中重光: シリカフュームによる再生骨材の品質改善の可能性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.688-692, 2001
- 6) Ali S. Alqarni, Husain Abbas, Khattab M. Al-Shwikh, Yousef A. Al-Salloum: Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance, Construction and Building Materials, 307, 124960, 2021
- 7) Jian Liu, Kunlin Ma, Jingto Shen, Jianbin Zhu, Guangcheng Long, Youjun Xie: Influence of recycled aggregate concrete enhancement methods on the change of microstructure of ITZs on recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, 271, 130772, 2023
- 8) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタルおよびコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, Vol. 4, No. 2, pp.1-8, 1993
- 9) 佐川康貴, 真壁央稔, 濱田秀則, 池田隆徳: 骨材中の水分が再生骨材コンクリートの強度に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp.1529-1534, 2011
- 10) 上原元樹, 佐々木孝彦, 立松英信: 水酸化カルシウムの形態的特徴による効果コンクリートの水セメント比 (W/C) 評価法, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-426, pp.851-852, 2003
- 11) Ariel Goldman, Amon Bentur: Bond Effects in High-Strength Silica-Fume Concretes, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 5, pp.440-447, 1989