

論文 レーザー加振試験による簡易ばねモデルを用いた再生骨材の品質評価

茨木 大輔*1・遠藤 哲平*2・橋本 勝文*3・杉山 隆文*4

要旨：再生骨材は吸水率や密度による付着モルタルの物性値を基準に品質分類が行われているが、原骨材とモルタルの付着特性が品質に影響していると考えられる。また、再生骨材は炭酸化によってモルタルの品質が改善することが報告されているが、上記の付着界面への影響はあまり知られていない。本研究では、炭酸化前後の再生骨材に対して、原骨材とモルタルの付着界面に着目した品質評価を目的としたレーザー加振試験を行った。界面の付着強さをばね定数で表した簡易モデルを用いて再生骨材の品質評価に適用した結果、界面の強度を測定できるビッカース硬度と相関があることが明らかとなった。

キーワード：再生骨材, 品質評価, ITZ, ばねモデル, 付着強度, ビッカース硬度, LIBS

1. はじめに

再生骨材は多くが路盤材として利用されているが、その需要の低下と天然骨材の枯渇により、さらなる活用方法が必要とされている。再生骨材の品質分類に関して、JISにより品質の高いものから順にH, M, Lと3段階にそれぞれの規格が定められている。一般に、コンクリート塊の破碎後に、付着モルタルの除去を目的とした加熱擦りもみ等の高度処理により品質が向上する。一方で、上記の処理工程にはコストやエネルギーが必要である。また、処理の過程における微粉末や二酸化炭素、窒素化合物、硫酸化合物の発生が問題となっている。そのため、必要な処理工程が少なく、品質の低いL再生骨材の利用割合を増やすことがコストと環境負荷の両方の軽減に繋がると考えられる。以上の背景より、2018年のJIS改正に伴い、品質の低いL再生骨材と普通骨材の混合骨材がM再生骨材の品質を満足する場合、再生骨材コンクリートMへの使用が可能となった。しかしながら、再生骨材は母材コンクリートの用途や配合により品質に差があり、現行の基準ではL再生骨材とされる骨材も、普通骨材と混合することで、再生骨材コンクリートMの品質を満たす場合と満たさない場合がある。そのため、L再生骨材の中でも再生骨材コンクリートMとして再利用が可能になる適切な品質評価基準が必要であると考えられる。

現行基準で同品質とされる二種類の再生骨材を用いた場合、再生骨材コンクリートの耐凍害性に差異が確認されている¹⁾。ここから、L再生骨材の品質を細分化し最適な分類を行うために、再生骨材の原骨材と付着モルタル界面(ITZ: Interfacial Transition Zone)の付着特性に着目した新たな品質評価手法としてレーザー加振試験に

よる品質評価手法を提案した²⁾。特に、耐凍害性に差異が見られた再生骨材にレーザー加振試験を行うとき、耐凍害性とレーザー加振試験の結果には一貫性が見られた。

他方、環境負荷の軽減において、二酸化炭素排出量の削減が求められている。コンクリートの製造過程における排出量削減のために再生骨材の炭酸化が取り組まれている。再生骨材は炭酸化により品質が改善されることが知られている。現行の品質分類基準である吸水率は改善され、再生骨材の弱点である耐凍害性や乾燥収縮についても改善されたという報告がある³⁾。また、原コンクリートに普通ポルトランドセメントを用いた再生骨材を炭酸化することで、再生骨材から骨材周辺に逸散する水分の量の減少に伴い、ビッカース硬度試験に基づいて評価されるITZの幅が減少するという報告があり⁴⁾、原骨材と界面の境界層の物性も改善されていると考えられる。

以上より、炭酸化前後の再生骨材に対してレーザー加振試験を用いることで、炭酸化による再生骨材の品質改善の評価手法としての適用性を検討することを本研究の目的とした。このとき、再生骨材が形成するITZのばねモデルによる解析的検討⁵⁾に着目し、レーザー加振試験により得られる再生骨材の振動特性から簡易的なばねモデルを仮定して分析を行った。また、ビッカース硬度によるITZの機械的特性とレーザー加振試験やばねモデルによる品質評価結果の比較を行った。

2. 実験方法

2.1 炭酸化再生骨材のレーザー加振試験

(1) 供試体作製方法

二水準の水セメント比でコンクリート供試体(Aおよび

*1 北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻 (学生会員)

*2 北海道大学 工学部 環境社会工学科

*3 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門准教授 博士(工学) (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門教授 Ph.D. (正会員)

表-1 コンクリート配合表

	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)			
			W	C	s	G
A	60	50.7	201.4	335.7	909.2	907.3
B	45	47.7	201.4	447.6	810.0	911.4

表-2 再生骨材の吸水率

	吸水率 (%)					吸水率平均 (%)
	1	2	3	4	5	
AN	3.80	6.40	5.24	6.34	4.68	4.89
	6	7	8	9	10	
	5.34	5.15	3.80	4.11	4.07	
AC	1	2	3	4	5	5.02
	6	7	8	9	10	
	4.34	4.40	3.64	7.66	6.30	
BN	1	2	3	4	5	5.07
	6	7	8	9	10	
	4.76	5.28	5.10	4.63	4.48	
BC	1	2	3	4	5	5.07
	6	7	8	9	10	
	4.79	6.17	5.42	5.40	4.70	
	1	2	3	4	5	5.07
	6	7	8	9	10	
	5.20	5.41	6.20	4.79	4.63	
	6	7	8	9	10	
	4.66	4.55	5.82	4.70	4.76	

表-3 再生骨材の炭酸化後の吸水率

	吸水率 (%)					吸水率平均 (%)
	1	2	3	4	5	
AC	4.22	3.91	3.53	5.00	4.05	4.18
	6	7	8	9	10	
	3.69	3.71	2.64	5.95	5.16	
BC	1	2	3	4	5	3.63
	6	7	8	9	10	
	3.70	3.97	4.09	3.43	3.32	
	6	7	8	9	10	
	3.58	3.51	4.12	3.23	3.32	

び B) を作製し、ジョークラッシャーを用いて再生粗骨材を採取した。コンクリート配合条件を表-1 に示す。各供試体グループから吸水率が 5%前後の再生骨材をそれぞれ 20 個選別し、表-2 に示すように C(炭酸化あり) と N(炭酸化なし) に対して、炭酸化前の吸水率の平均が 5%前後になるように 10 個ずつ分類した。

炭酸化前後で ITZ の付着特性を比較するため、C グループの骨材に対して中性化装置を用いて、温度 20°C、湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の条件で炭酸化処理を行った。先行研究³⁾において同条件で炭酸化を一週間行うことで再生骨材の品質改善効果が収束することが報告されているため、本研究においても炭酸化期間は一週間とした。炭酸化後の吸水率を表-3 に示す。その結果、全ての再生骨材で 1%前後の吸水率の改善が確認できた。

(2) レーザー加振試験方法

再生骨材を図-1 に示すように治具に固定し、原骨材側に YAG レーザーを用いてパルスレーザーの照射を行った。骨材に対してパルス波を照射することで、骨材表面にアブレーションが発生する。これにより、一定の条件で骨材に振動を励起した。図-2 に示すように、付着

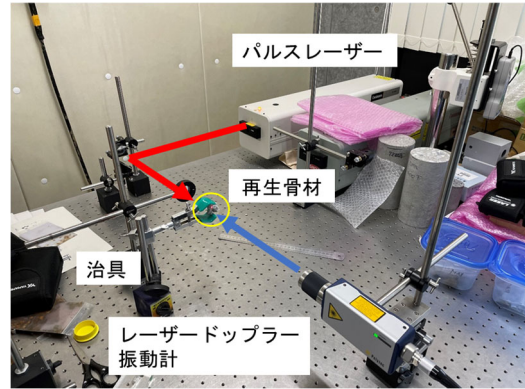


図-1 レーザー加振試験の様子

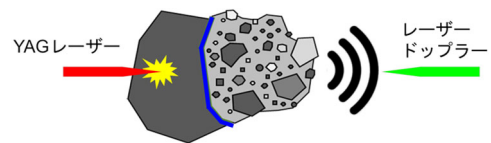


図-2 レーザー加振試験測定方法

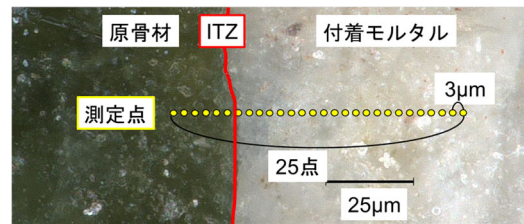


図-3 LIBS 測定方法

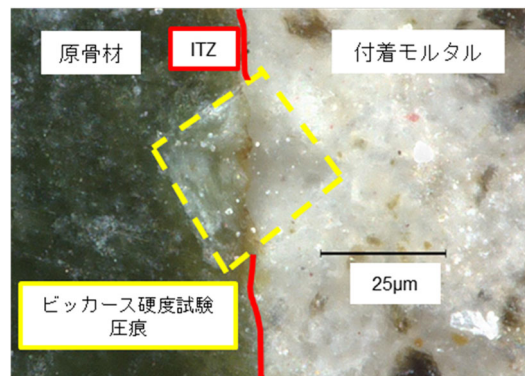


図-4 ビッカース硬度試験測定方法

モルタルの振動はレーザー Doppler 振動計を用いて振動波形を計測し、原骨材表面で励起された波動が付着モルタル表面へ伝搬する際の振動波形の振幅と周波数に着目して評価を行った。同一の再生骨材に対して 5 回測定を行った結果、波形とスペクトルが概ね類似していた。ここでは、5 回の平均を測定結果とした。パルスレーザーのエネルギーを 919mJ とし、パルス幅を 5nsec とした。

2.2 元素分析による ITZ の幅の測定

骨材部分には Si が多く含まれており、モルタル部分に

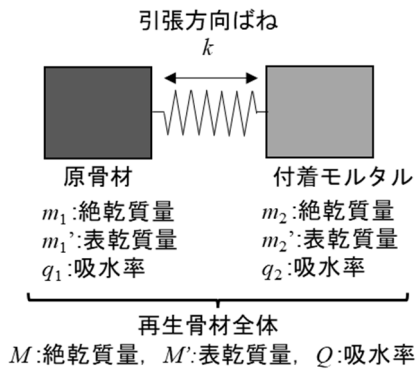


図-5 ばねモデルイメージ

はCaが多く含まれている。そのため、ITZを跨ぐように骨材からモルタルにかけてCa/Siの変化を測定することでITZの幅を測定することが可能である⁶⁾。本研究では、レーザー誘起ブレイクダウン分光法（Laser-induced breakdown spectroscopy, 以下ではLIBSと称する）を用いてITZ近辺の元素分析を行った。LIBSは測定対象に短パルスレーザーを照射し、発生したプラズマからの発光を分光測定することにより物質の元素分析を行う手法である⁷⁾。図-3示すように、界面に対して垂直になるように直線上に測定点を設置した。測定点数は3 μ m間隔で25点とし、1つの試料に対して任意の5箇所まで測定した。測定はAおよびBグループそれぞれの再生骨材の中から炭酸化前後の2個ずつ、計8個の再生骨材を選別して行った。選別の条件は炭酸化前の吸水率が5%前後の品質が同等の再生骨材とした。

2.3 ITZのビッカース硬度測定

ITZのビッカース硬度を測定し、炭酸化前後で比較を行った。ビッカース硬度試験は測定面に圧子で力を加え、圧痕の大きさと加えた力から表面の硬度を測定する方法である。LIBSによるITZの幅の計測に用いた8個の再生骨材を用いて測定を行った。図-4に示すようにITZに圧子の中心部が接触するように測定を行った。測定は1つの再生骨材に対して10点で測定を行い、硬度の上位3点と下位3点を除いた4点の測定結果の平均値を測定結果とした。

2.4 ITZの簡易ばねモデルの定義

再生骨材のITZの付着特性に関して、再生骨材を用いた供試体の力学特性をばねモデルにより評価する研究⁵⁾が行われているが、再生骨材内部に存在するITZの強度や機械的特性ではなく、付着特性を直接評価する手法は存在しない。本研究では、再生骨材の原骨材と付着モルタルの質量およびITZの面積を考慮した簡易的なばねモデル（以下、簡易ばねモデル）を構築し、レーザー加振試験の結果に基づく再生骨材の品質評価手法について検討した。ITZの付着特性について、ばねモデルを用いて

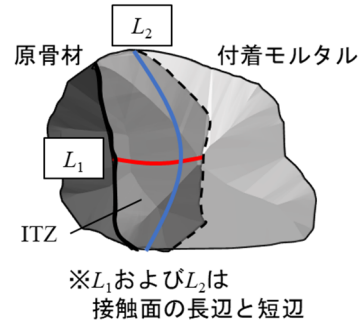


図-6 ITZの面積算出方法

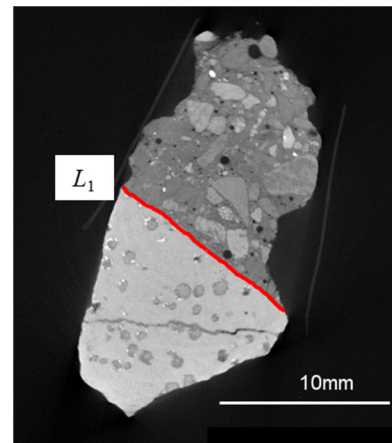


図-7 ITZ断面の1辺の長さ測定方法

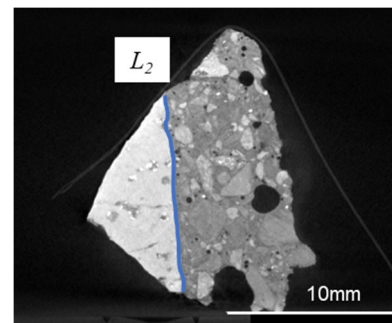


図-8 ITZ断面の1辺の長さ測定方法

評価を行うためには引張方向とせん断方向に分解する必要があると考えられる。一方で、先行研究の結果からレーザー加振試験においてせん断方向の付着の影響は品質への影響が小さいことが分かっている⁸⁾。そのため、図-5に示すように、本研究における簡易ばねモデルでは、引張方向のみのばねを設定した。

ITZ全体のばね定数を k (N/mm)とすると、ITZの面積で除することで単位面積当たりのばね定数 k' (N/mm/mm²)を求めることが出来る。よって、面積を A (mm²)とすると、式(1)が与えられる。

$$k' = \frac{k}{A} \quad (1)$$

図-6 に示す ITZ (原骨材と付着モルタルの接触面) の長さである $L_1(\text{mm})$ および $L_2(\text{mm})$ について、図-7 および図-8 に示すように、同一骨材を別々に 2 方向から撮影した X 線 CT 画像からそれぞれ求めた。また、式(2)を用いて ITZ の面積 $A(\text{mm}^2)$ を求めた。

$$A=L_1 \times L_2 \quad (2)$$

図-5 に示すように再生骨材全体の質量を $M(\text{g})$ 、原骨材およびモルタルの絶乾質量を $m_1(\text{g})$ および $m_2(\text{g})$ とする。周波数を $f(\text{Hz})$ とするとレーザー加振により得られる固有振動数 $\omega(\text{Hz})$ は以下の式(3)および式(4)で与えられる。

$$\omega = \sqrt{\frac{k'(m_1+m_2)}{m_1 m_2}} \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

式(3)および式(4)より、ばね定数と周波数の関係式は以下の式(5)で与えられる。

$$k' = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (2\pi f)^2 \quad (5)$$

ここで、骨材とモルタルの絶乾質量 $m_1(\text{g})$ および $m_2(\text{g})$ を求めるためには、再生骨材の質量を骨材部分とモルタル部分に分解しなければならない。骨材とモルタルの絶乾質量は、骨材とモルタルの吸水率および骨材全体の質量と吸水率を利用して算出した。吸水率の定義式を式(6)、式(7)および式(8)に示す。再生骨材全体の表乾質量、骨材とモルタルの表乾質量は図-5 に示すように M' (g)、 m_1' (g)、 m_2' (g) とする。式(6)、式(7)および式(8)より、式(9)および式(10)を導出した。図-5 に示すように再生骨材全体の吸水率を $Q(\%)$ とし、骨材とモルタルの吸水率は $q_1(\%)$ および $q_2(\%)$ とした。付着モルタルの吸水率 $q_2(\%)$ は、再生骨材を採取したコンクリートと同配合でモルタル供試体を作製して測定した。

$$Q = \frac{M' - M}{M} \quad (6)$$

$$q_1 = \frac{m_1' - m_1}{m_1} \quad (7)$$

$$q_2 = \frac{m_2' - m_2}{m_2} \quad (8)$$

$$m_1 = \frac{q_2 - Q}{q_2 - q_1} M \quad (9)$$

$$m_2 = \frac{Q - q_1}{q_2 - q_1} M \quad (10)$$

3. 実験結果

3.1 炭酸化前後におけるレーザー加振試験

A および B グループから得られた波形のサンプル数を 32768 点、サンプリング周波数を 20kHz とし FFT により周波数スペクトルに変換した結果を取得した。A グル



図-9 周波数スペクトル(0~20kHz)

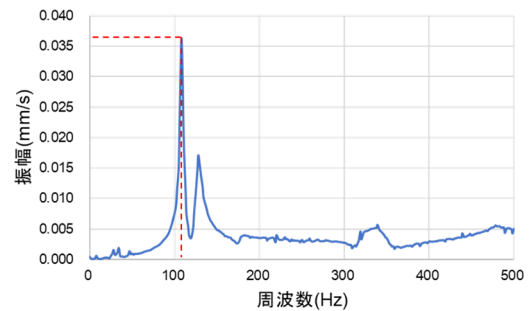


図-10 周波数スペクトル(0~500Hz)

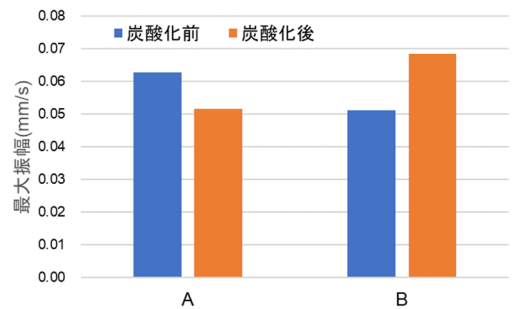


図-11 炭酸化前後の振幅

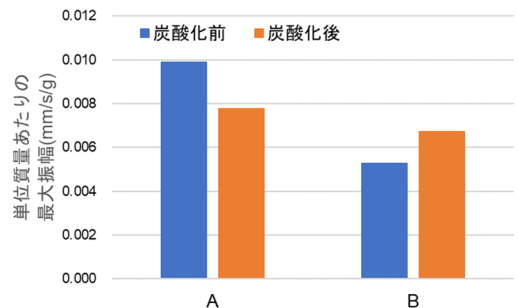


図-12 炭酸化前後の単位質量あたりの振幅

ープの結果の 1 つを図-9 に示す。この結果から、500Hz 以下の低周波領域に特徴が見られるため、低周波領域に範囲を絞った結果を図-10 に示す。これより、110Hz 付

近にピークが表れており、全ての再生骨材の結果でも同様に 110Hz 付近にピークが表れることが確認できたため、110Hz 付近のピーク周波数における振幅を比較した結果を図-11に示す。また、レーザー加振試験を用いた再生骨材の品質評価を行った先行研究²⁾と同様に、再生骨材の付着特性に関する質量の影響を考慮するために、単位質量あたりの振幅を図-12に示す。

先行研究では、レーザー加振試験の結果から得られる再生骨材の品質評価結果について、高品質の再生骨材の方が低品質の再生骨材よりも振幅が大きくなる結果が得られた²⁾。しかしながら、図-11および図-12より、Aグループの再生骨材は品質が改善されていない炭酸化前の再生骨材の方が振幅や単位質量あたりの振幅が大きくなっているのに対して、Bグループの結果は炭酸化後の品質が改善された再生骨材の方が振幅や単位質量あたりの振幅が大きくなっており、炭酸化による品質改善とレーザー加振により得られる振幅は母材コンクリートの配合影響を受けることが確認できる。レーザー加振により励起される振動の振幅だけに着目した場合、炭酸化によって現行の品質分類基準である吸水率の改善は、評価結果に反映されていないことが分かる。

3.2 炭酸化前後における ITZ の幅の測定

LIBS による測定点と付着モルタル側の骨材およびセメントペーストの不均質性が測定結果に影響を及ぼすことが想定されたため、移動平均を用いてデータを平滑化して分析を行った。Aグループの1つの再生骨材の結果を図-13に示す。図-13に示すグラフはITZの始点が揃っていない(任意の試料に対する測定時には、ITZの幅や位置は未知である)ため、本研究では骨材側3点のCa/Siの平均を骨材のCa/Siと仮定し、骨材のCa/Siを超えた地点をITZの始点とした。1つの再生骨材で行った5回の測定結果の始点を揃えた上で平均した結果を図-14に示す。ITZにおいて、見かけ上水セメント比が上昇することで水酸化カルシウムの析出量が増加するために、Ca/Siはモルタル部分よりも大きくなることが一般に知られている⁸⁾。図-14の25 μ m前後に見られるようにITZと思われる場所にピークが表れている。骨材からの距離の増加とともにピークの値が減少に転じて、次に上昇に転じ始める点をITZの終点とした。図-13および図-14においてピークが小さい結果も見られる。これは、界面付近に細骨材が多く含まれていたことが原因であると考えられる。しかしながら、ピークの高さにかかわらず、ピークが現れる挙動は同様であることから、ピークの小さい結果も含めて測定結果とした。以上の方法で求めたAおよびBグループの炭酸化前後のITZの幅を平均した結果を図-15に示す。炭酸化前後のITZの幅の変化はAグループでは3 μ m程度増加し、Bグループでは3 μ m程

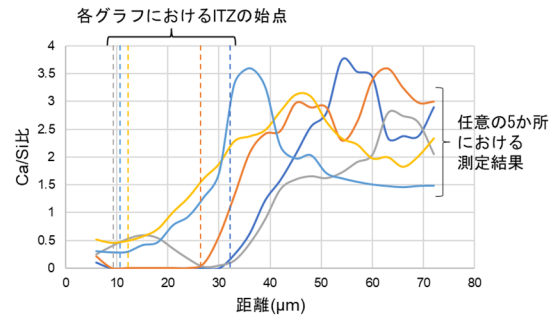


図-13 LIBSによるCa/Si比の測定結果の一例

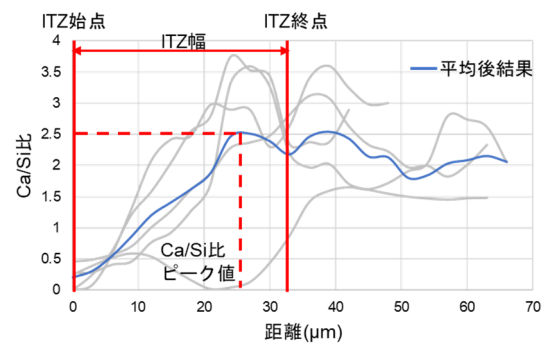


図-14 LIBSによる測定値
(始点を揃えた上で平均化処理後)

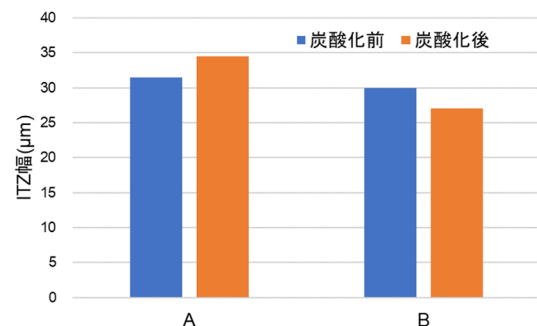


図-15 炭酸化前後のITZの幅

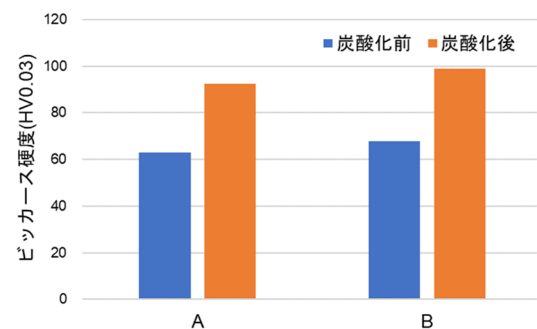


図-16 炭酸化前後のビッカース硬度

度減少しており、炭酸化前後での差異はごく僅かであることが確認できる。このことから、炭酸化前後の再生骨

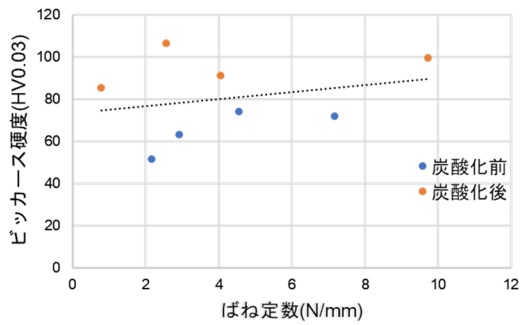


図-17 ばね定数 k とビッカース硬度

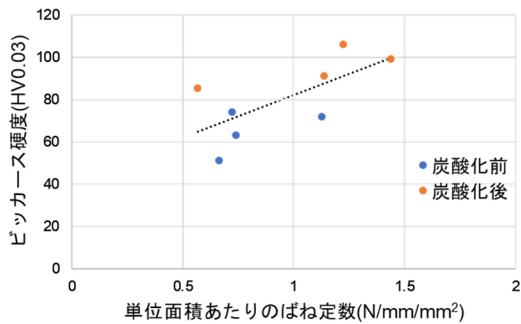


図-18 単位面積あたりのばね定数 k' とビッカース硬度

材において、ITZ の幅を Ca/Si 比を用いて定義した場合、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムを析出する反応機構からも、ITZ の幅の評価は出来ないことが分かる。

3.3 炭酸化前後の ITZ のビッカース硬度

ビッカース硬度試験の結果を図-16 に示す。これより、A および B グループ共に炭酸化後の方が炭酸化前よりもビッカース硬度が 30 (HV0.03) 程度上昇していることが確認できる。炭酸化によって ITZ に含まれる水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化することで体積が膨張し、ITZ の空隙構造が緻密化したことで界面の付着強さが向上したと考えられる。

3.4 ばねモデルによる付着特性評価

LIBS やビッカース硬度試験で用いた再生骨材のレーザー加振試験の結果を用いて上述のばね定数 (ばね定数 k および単位面積当たりのばね定数 k') を算出した。ITZ の付着強さを示すビッカース硬度とばね定数および単位面積あたりのばね定数の関係を図-17 および図-18 に示す。また、図-17 および図-18 におけるそれぞれの回帰直線を点線で示す。図-17 に示す回帰直線の決定係数は 0.0669 であった。それに対して図-18 に示す回帰直線の決定係数は 0.4733 であった。以上の決定係数の比較から、原骨材とモルタルの付着面積を考慮したばね定数 k よりも、付着単位面積あたりのばね定数 k' とビッカース硬度の相関が強くなっている。付着強さを示すビッカ

ース硬度をレーザー加振試験により得られる原骨材とモルタルの付着単位面積あたりのばね定数で表現できることが分かる。以上の結果から、レーザー加振試験が再生骨材の品質評価手法として有用であると言える。

4. まとめ

本論文で得られた知見を以下に示す。

- 1) ITZ をビッカース硬度により定義する場合は、炭酸化により ITZ が縮小することが報告されているが、ITZ を Ca/Si 比で定義すると ITZ の幅に対する炭酸化の影響を評価出来ない。
- 2) ITZ のビッカース硬度は炭酸化を行うことで上昇する。炭酸化を行うことで ITZ に含まれる水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化し、ITZ の空隙が緻密化することで付着強さが向上する。
- 3) レーザー加振試験と簡易ばねモデルによって得られた単位面積あたりのばね定数は、ビッカース硬度と同様に、再生骨材の品質および ITZ の付着強さを評価できる。

参考文献

- 1) 彌永貫至ほか：再生骨材を混合利用して蒸気養生したコンクリートの凍結融解抵抗性の評価，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.77，V-495，2022
- 2) 茨木大輔ほか：レーザー加振を用いた再生骨材の品質評価手法の提案，土木学会北海道支部論文報告集，No.79，E-17，2023
- 3) 松田信広ほか：炭酸化による低品質再生骨材の改質技術の提案と改質再生骨材がコンクリートに与える影響，コンクリート工学論文集，Vol.30，pp.65-76，2019
- 4) 田人瑞ほか：炭酸化した改質再生粗骨材周辺の脆弱性に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集，Vol.23，pp.29-32，2023
- 5) 奥山英俊ほか：付着モルタルが再生骨材コンクリートの力学特性の及ぼす影響の解析評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，2003
- 6) 大即信明ほか：骨材周囲の境界相がコンクリートの CI-拡散係数に与える影響に関する実験的研究，材料，Vol.55，No.10，pp.899-904，2006
- 7) 染川智弘ほか：レーザー誘起ブレイクダウンを利用したコンクリート構造物の遠隔塩分評価手法の開発，レーザー研究，Vol.50，No.6，pp.318-321，2022
- 8) 茨木大輔ほか：模擬再生骨材を用いたレーザー加振技術による再生骨材界面の付着評価手法の検討，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol.78，V-231，2023