

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560463

研究課題名（和文） 微粒分を多量に含む石灰石骨材を用いたコンクリートの物性と微粒分の活用に関する研究

研究課題名（英文） Study on Properties of Concrete Using Limestone Aggregate with High Volume of Powder and Use of Powder

研究代表者

井上 正一（INOUE SHOICHI）

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10032286

研究成果の概要（和文）：

微粒分を多量に含む石灰石骨材を用いたコンクリートおよびコンクリート部材について、コンクリートにおいては配合設計法、フレッシュ性状、硬化性状、凍結融解抵抗性などの耐久性、乾燥収縮、疲労性状などを、鉄筋コンクリート部材においては、耐荷力、ひび割れ性状、変形状、疲労性状を検討した。その結果、石灰石微粒分量がJISの規格値の3倍以内であれば、石灰石微粒分量の増加はコンクリートの物性・性状に悪影響を及ぼすことはなく、むしろ好影響を及ぼすことが多いことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This study deals with the performance of concrete and reinforced concrete using limestone with rich powder. The mix proportion, properties in fresh and after hardened, durability such as freeze-thaw resistance, drying shrinkage and fatigue characteristic for concrete were investigated. In addition, the structural performance such as strength, deformation and crack, and fatigue characteristics for reinforced concrete were investigated. Test results show that if the amount of limestone powder is in within three times the value stipulated Japan industrial standards, the increase in the amount of powder doesn't influence a decrease in properties of concrete harmfully, and bring the good influences, especially improvement of workability and durability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート、コンクリート構造

## 1. 研究開始当初の背景

関西以西においては、コンクリート骨材状況は極めて悪く、大部分を砕砂、碎石に頼ってきたが、アルカリ骨材反応の

防止や乾燥収縮の抑制に対処するために石灰石骨材の使用機会が増加している。この石灰石骨材は粉体化しやすく（国交省の調査では細骨材中の24.6%を含有）、この

粉体化した石灰石微粒分はコンクリートの品質改善，特に貧配合や低品質骨材を用いた場合の品質改善に有効な混和材料として使用されてきたが，一方，過度の使用は弊害（悪影響）を及ぼすことが懸念されていた。

## 2. 研究の目的

石灰石骨材ないしは低品質骨材として熔融スラグを用いた場合において，石灰石微粒分量がコンクリートの品質，すなわち，(1)フレッシュ性状，(2)疲労強度や付着強度を含めた強度性状と変形状，(3)耐久性能（乾燥収縮，耐凍結融解性，耐硫酸性）に及ぼす影響を明らかにする事によって，石灰石骨材の有効利用の促進を図る，あるいは許容される石灰石微粒分量の基準を提案することを目的とするものである。

## 3. 研究の方法

試験計画としては，石灰石骨材は山口県と大分県産の2種類を，焼却灰熔融スラグ骨材（粗骨材には除冷スラグを，細骨材には急冷スラグを使用）は県内から調達したものを，廃瓦は山陰の石州瓦を破碎した細骨材を，それぞれ用いたコンクリートおよびコンクリート部材に対して，下記の(1)～(7)の試験を行った。

- (1) 骨材の物理的・化学的性質の把握試験
- (2) コンクリートの配合設計とコンクリートの製造法の検討
- (3) 配合設計に基づいて製造したコンクリートのフレッシュ性状の把握
- (4) 石灰石骨材を用いたコンクリートの石灰石微粒分量と充填性，材料分離性の評価
- (5) 配合設計に基づいて製造したコンクリートの硬化後の物性（強度，熱膨張係数，乾燥収縮，耐凍結融解性，耐硫酸性）の把握
- (6) 鉄筋コンクリート部材の力学的性状の把握
- (7) コンクリートおよびコンクリート部材の疲労性状の把握

なお，焼却灰熔融スラグ骨材を使用コンクリートにおいては，細・粗骨材の全量を熔融スラグ骨材で置換する。また，石灰石は，山口県美祢産の粗骨材（石灰石微粒分量を4水準）と大分県津久見産の粗骨材，細骨材を準備する。この場合，石灰石微粒分量はJIS基準である粗骨材に対して5%，細骨材に対して9%の2～3倍程度まで設定した試験を行い，微粒分量がコンクリートの物性に好影響と悪影響を及ぼす範囲や閾値を明確にする試験も組み込んだ。

## 4. 研究成果

本研究では，微粒分量が異なる（細・粗骨材中に含まれる微粒分量をJISの規格値（細

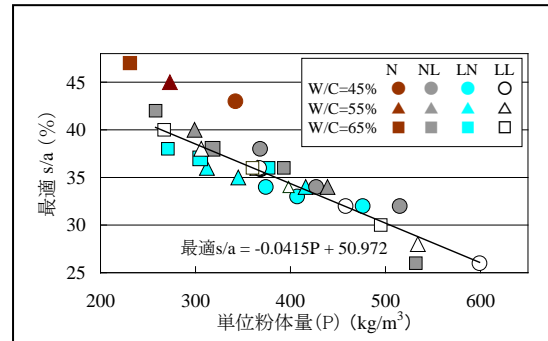
骨材：9%，粗骨材：5%）の3倍までの範囲で選定した）石灰石骨材を使用したコンクリートとして，細・粗骨材とも普通骨材を使用したNコンクリートに対して，粗骨材のみに石灰石を使用したNLコンクリート，細骨材のみに石灰石を使用したLNコンクリートおよび細・粗骨材とも石灰石を使用したLLコンクリートの3種類を採り上げた。

まず，各コンクリートの適性配合を決定し，フレッシュコンクリートの性状，硬化コンクリートの性状，耐久性，鉄筋コンクリート部材の構造性能を検討した。その結果に基づいて石灰石微粒分の有効利用についても考察を加えた。以下に研究成果の概要を示す。

石灰石骨材および石灰石骨材に含まれる微粒分量がコンクリートの配合およびフレッシュ性状に及ぼす影響については：

### (1) 配合設計に関して

① 微粒分を含んだ石灰石骨材を用いたコンクリートの最適細骨材率は，LN，NL，LLのいずれの骨材であっても石灰石微粒分量の増加に伴って小さくなり，石灰石微粒分量と最適細骨材率との間には直線関係が存在する。また，単位粉体量（単位セメントと石灰石微粒分量との和）で表せば，石灰石骨材の種類やW/Cの大小に拘わらず，最適s/aは単位粉体量から一義的に決まる（1本の直線式で近似できる）ことが明らかになった。



単位粉体量と最適 s/a との関係

② 所定のスランプを得るために必要な単位水量は石灰石微粒分量の増加に伴って大きくなる。さらに，石灰石微粒分量と単位水量の間には直線関係が見られ，石灰石微粒分量の増加に伴う単位水量の増加は，NL や LL よりも細骨材に石灰石砕砂を用いた LL において大きくなる。なお，LN，NL，LL において微粒分量が少ない場合の単位水量は NN のそれよりも少なくなった。

③ 所定の空気量を得るために必要な AE 助剤量は，微粒分量が少ない場合には NN と同等であるが，石灰石微粒分量の増加に伴って多くなる。さらに，石灰石微粒分量と AE 助剤量の間には直線関係が見られるが，石灰石

微粒分量の増加に伴う AE 助剤量の増加の程度は、LN と NL では同等であるが、LL はそれより小さくなった。

(2) フレッシュ性状

① 石灰石骨材を用いたコンクリートに対して、注水から 90 分経過後までの空気量およびスランブの経時変化は、W/C=45%、55%、65%においては NN と同程度ないしは小さく、石灰石微粒分量の増加がこれらの経時変化に及ぼす影響はない。

② 石灰石骨材を用いたコンクリート (LN, NL, LL) におけるブリーディング率は、微粒分量の増加に伴って、さらには W/C が小さくなるに伴って、小さくなる。なお、NL のブリーディング率は NN よりも小さいが、NL < LL < LN の順にブリーディング率が大きくなり、細骨材に石灰石砕砂を用いた LN におけるブリーディング率は W/C の増加に伴って大きくなり、W/C=65% においては NN のそれよりも大きくなる結果となった。

③ 石灰石骨材を用いたコンクリートの始発・終結時間はともに、LN は NN よりも長く、NL は NN と同等ないしは短く、LL は NN よりも短くなる。

(3) 微粒分を含む石灰石骨材を用いた硬化コンクリートの物性

① 細・粗骨材に石灰石を用いたコンクリート (LL) および細骨材には普通砂を用いた粗骨材のみに石灰石を用いたコンクリート (NL) における初期強度は普通コンクリート (NN) のそれよりも大きい。また、LL における 28 日以降の長期材齢における圧縮強度は NN と同程度ないしは小さい。一方、NL における 28 日以降の長期材齢における圧縮強度は NN のそれと同程度かやや大きい。

② 圧縮強度が同一の場合の LL の引張強度は NN のそれよりも大きい。微粒分量の増加に伴って小さくなる NN のそれに近づく。一方、NL の引張強度は NN のそれと同等で、石灰石微粒分量の相違は引張強度に影響を及ぼさない。

③ LL における静弾性係数は、微粒分量が JIS の上限値程度までは NN のそれよりもやや大きく、JIS の上限値の 2 倍程度の微粒分量を含むと、微粒分量の増加に伴ってさらに小さくなる。一方、NL における静弾性係数は普通骨材を用いたコンクリートのそれと同等で、微粒分量が弾性係数に及ぼす影響は認められない。

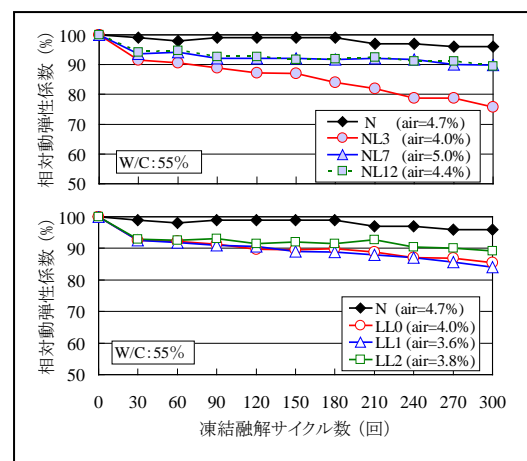
④ 骨材の組合せ、石灰石微粒分量の多少が最大付着応力度を含めた付着応力度～すべり量関係に及ぼす影響は認められず、それぞれのコンクリートと鉄筋との付着性状は同等である。このことより、今回設定した微粒分量を含む石灰石骨材を用いたコンクリートで鉄筋コンクリート構造物を作製しても通常のコンクリートと同等の付着性状を確保

できる。

(4) 石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮と耐久性

微粒分を多量に含む石灰石砕砂および石灰石砕砂を単独に、あるいは併用した形でコンクリート用骨材に有効に利用することを目的とし、JIS の上限値の 2 倍程度までの微粒分量を含む石灰石骨材を用いたコンクリートに対して、スランブ 8cm、水セメント比 45~65% の範囲において乾燥収縮、凍結融解抵抗性、耐硫酸性、熱膨張係数、および断熱温度上昇量に及ぼす影響を普通コンクリートとの比較の上で明確にし、併せて微粒分を多く含む石灰石のコンクリート用骨材としての適用性も検討した。さらに、石灰石骨材に含まれる微粒分がコンクリートの耐久性に与える影響について検討した。その結果、①乾燥収縮：石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は、石灰石骨材を粗骨材に用いても細骨材に用いても普通骨材を用いたそれよりも小さく、石灰石骨材を粗・細骨材の両方に用いるとさらに小さくなる。また、骨材中に含まれる石灰石微粒分量が JIS の上限値の 2 倍程度までの範囲では石灰石微粒分量の多少が乾燥収縮に及ぼす影響はほとんどない。

②凍結融解性：石灰石骨材を粗骨材に使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は、微粒分が少ない (100kg/m<sup>3</sup>) 場合には普通骨材を用いたコンクリートよりも劣る傾向が認められたが、微粒分量を増やすことによって改善できた。これは、ブリーディングが減少する効果に加えて微粒分の物理的充てんにより細孔径が小さくなる効果などによるものと考えられる。さらに、微粒分の増加に伴い AE 助剤量が増えることで気泡が安定したことも影響している。



耐凍結融解性 (NN を N と標記)

③耐硫酸性：硫酸溶液 5% に浸漬した場合、水セメント比が小さいコンクリートほど硫酸

侵食に対する抵抗性が劣ること、石灰石を用いたコンクリートの侵食による劣化は普通コンクリートよりも大きい、コンクリート内部への硫酸の浸透は普通コンクリートよりも小さいということ、石灰石微粒分量の多少は耐硫酸侵食に影響を与えない、という結果が得られた。

硫酸溶液 0.5 %においては、5%結果とは異なり、水セメント比が大きいコンクリートほど耐硫酸性が劣ること、細骨材に石灰石を用いたコンクリートは細骨材に普通砕砂を用いたコンクリートよりも浸透深さが小さくなる、という傾向は認めているが、硫酸侵食が進行していないため評価は困難と思われる。

(5) 石灰石骨材を用いたコンクリートの熱的性質

①熱膨張係数：石灰石粗骨材を用いたコンクリートの熱膨張係数は、普通コンクリートのそれより小さい値を示し、また、石灰石微粒分量の相違が熱膨張係数に及ぼす影響はない。

②断熱温度上昇：石灰石微粒分量の相違が断熱温度上昇量に及ぼす影響はない。

(6) 石灰石骨材を用いたコンクリートの疲労性状

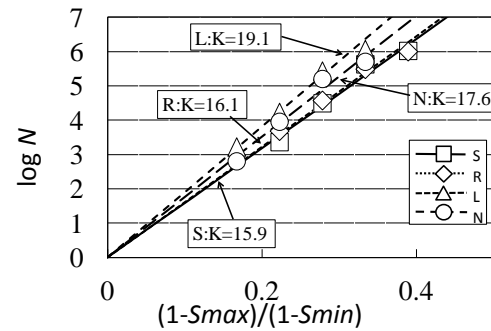
微粒分を含んだ石灰石骨材を用いたコンクリートに対して、石灰石微粒分量が多い状態のままで使用した場合におけるコンクリートの一軸圧縮疲労性状およびひりの疲労特性を明確にすることによって石灰石微粒分がコンクリートの物性に及ぼす影響を明らかにし、併せて石灰石微粒分がコンクリートの物性に悪影響を及ぼさない範囲を明確にするための試験を行った。なお、コンクリートの圧縮疲労については、破碎・摩砕しやすい骨材として、石灰石骨材に加え、廃瓦細骨材、ごみ熔融スラグ骨材を用いたコンクリートないしは鉄筋コンクリート部材の疲労性状も併せて試験した。その結果、

①これら骨材を用いたコンクリート疲労寿命も大きくばらつくため、結果の整理には普通コンクリートと同様に確率統計的な取扱をする必要がある。

②これら骨材を用いた無筋コンクリートの一軸圧縮疲労試験、および RC はりの曲げ疲労試験における疲労寿命の分布は、2母数ワイブル分布、3母数ワイブル分布、対数正規分布のいずれの分布形にも従うが、対数正規分布に最もよく適合する。

③石灰石骨材を用いたコンクリートの疲労強度は普通コンクリートのそれよりも大きい。一方で、廃瓦細骨材ないしはごみ熔融スラグ粗骨材を用いたコンクリートの疲労強度はほぼ等しいが、いずれも普通コンクリートのそれよりも小さい。なお、S-N線式として Goodman 式を用いる場合に使用する K 値

としては、石灰石と普通骨材を用いたコンクリートでは  $K=17$ 、廃瓦細骨材とごみ熔融スラグを用いたコンクリートでは  $K=16$  となる。



S-N 線図

④破碎・摩砕しやすいこれら骨材を用いても、圧縮強度が同一の場合には RC はりの静的耐力、荷重～たわみ関係、破壊様式は普通コンクリートを用いたものと同様で、コンクリートの種類による差異はない。

⑤これら骨材を用いたコンクリートの圧縮疲労強度はコンクリートの種類によって異なるが、これらコンクリートを用いた RC はり（主鉄筋比 2.8%、 $a/d=3.03$ ）の疲労強度はコンクリートの種類によって変わらない。

⑥これら骨材を用いた RC はりの破壊様式は、静的荷重下では曲げ引張破壊、繰返し荷重下では主鉄筋の疲労破断による破壊を示し、使用骨材の種類の相違は RC はりの破壊様式に影響しない。

(7) 石骨材を用いた RC 部材の強度と変形性状

微粒分を多く含む石灰石骨材を用いたコンクリートで RC 部材を作製し、石灰石の使用や石灰石に含まれる石灰石微粒分量が RC はりの耐力やひび割れ性状に及ぼす影響を明確にし、さらに普通コンクリートを用いた RC はりの性状との比較し、石灰石微粒分を多く含む石灰石骨材の構造用コンクリートへの適用性と適用上の問題点を検討した。以下に、試験を通して明らかになったことを列挙し、結論とする。

・静的一方向載荷試験：

①石灰石骨材を用いた RC はりおよび普通コンクリートの RC はりの破壊様式は、主鉄筋量が釣合い鉄筋量以下で、かつ十分なせん断補強を施した場合、曲げ引張破壊をし、断面が単鉄筋断面であるか複鉄筋断面であるか、骨材の種類（石灰石骨材か普通骨材）、石灰石骨材の使用法（石灰石骨材を細・粗骨材に使用しているか粗骨材にのみ使用しているか）、および石灰石微粒分量の違い（L①、NL5、NL16）は RC はりの破壊様式に影響を及ぼさない。

②コンクリート強度が同一でかつ主鉄筋量が同一の場合、骨材の種類や石灰石骨材の使

用法（石灰石骨材を細・粗骨材に使用しているか粗骨材にのみ使用しているか）、および石灰石微粒分量の違いが RC はりの曲げひび割れ耐力、終局耐力、斜めひび割れ発生時の耐力に及ぼす影響はなく、また、それぞれの耐力比（実験値と計算値の比）がほぼ 1.0 であることから、土木学会式によって精度よく算定できる。

③コンクリート強度と静弾性係数が同一で、かつ主鉄筋量が同一であれば、骨材の種類や石灰石骨材の置換方法、および石灰石微粒分量の違いが、RC はりの荷重～ひずみ関係に及ぼす影響はなく、鉄筋降伏までの荷重～ひずみ関係は計算によって精度よく算定できる。

④コンクリート強度と静弾性係数が同一で、かつ主鉄筋量が同一であれば、骨材の種類や石灰石骨材の使用法（石灰石骨材を細・粗骨材に使用しているか粗骨材にのみ使用しているか）、および石灰石微粒分量の違いが、RC はりの荷重～スパン中央たわみ関係およびモーメント～曲率関係に及ぼす影響はない。

⑤RC 部材のひび割れ性状は、用いた骨材の種類や石灰石骨材の使用法、および石灰石微粒分量の違いによる影響を受けず、土木学会式によってかなり精度よく、かつ安全側の値として算定できる。

#### ・正負交番載荷試験

①正負交番載荷下における RC はりの破壊様式は、主鉄筋量、骨材の種類（石灰石骨材か普通骨材か）や石灰石骨材の使用法（細・粗骨材ともに石灰石を用いるか粗骨材にのみ石灰石を用いるか）の相違、石灰石骨材においては含まれる微粒分量の違い（L①, NL5, NL16）に関係なく、主鉄筋が降伏した後に圧縮鉄筋の座屈を伴う曲げ破壊をした。

②正負交番載荷下における荷重～スパン中央たわみの履歴ループは、石灰石微粒分を含む石灰石骨材を用いた RC はりと普通骨材を用いた RC はりとできわめて類似しており、コンクリートの種類の相違が RC はりの変形性能に及ぼす影響はない。

③主鉄筋量が同一の RC はりの終局変位およびじん性は、石灰石微粒分を含む石灰石骨材を用いた RC はりと普通骨材を用いた RC はりは同等とみなせる。

④主鉄筋量が同一ならば、石灰石微粒分を含む石灰石骨材を用いた RC はりは大変形に伴う場における荷重保持性能は、普通骨材を用いた RC はりのそれと同等である。

⑤主鉄筋量が同一ならば、微粒分量の異なる石灰石骨材を用いた RC はりのひび割れの進展状況、最大曲げひび割れ幅の推移、最大斜めひび割れ幅の推移は、いずれも普通骨材を用いた RC はりとほぼ同等の挙動を示し、使用骨材や微粒分量の相違が RC はりのひび割れ性状に及ぼす影響はない。

これら一連の研究を通して、石灰石微粉は石粉など他の微粉と異なり、使用量が JIS の上限値をかなり（2 培程度）越えてもコンクリートの物性およびコンクリート構造挙動に悪影響を及ぼさず、むしろ好影響を及ぼすことが明らかにされた。このことは、石灰石微粉の有効活用の道が開けたばかりでなく、最近、完全リサイクルコンクリートとして石灰石骨材を使用して、これを解体してセメントから骨材まで全てをコンクリート材料として再生させる研究があるが、この再生コンクリートを製造する際に微粒分が悪影響を及ぼさないということも立証できた。

石灰石は我が国で自給自足できる数少ない原料である。したがって、このような研究は日本ではあるが、外国ではこの種の研究は比較的少ないといえる。今後、石灰石微粒分は他の粉体と異なることを JIS で規格化するためには、他の機関におけるさらなる立証研究が必要となる。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

- ① 井上正一、黒田保、高井伸一郎、大西勝利、低品質骨材を用いたコンクリートおよびコンクリート部材の疲労性状、材料、査読有、Vol. 56、No. 9、2012、pp. 730-735
- ② 吉野公、大西勝利、井上正一、黒田保、骨材の性質および配合がコンクリートの充てん性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、査読有、Vol. 34、No. 1、2012、pp. 1204-1209
- ③ 大西勝利、井上正一、黒田保、微粒分量が多い石灰石骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮と耐凍害性、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、Vol. 34、No. 1、2012、pp. 82-87
- ④ 吉本勝哉、吉武勇、井上正一、微粒分量の多い石灰石粗骨材を用いたコンクリートに関する基礎実験、セメント・コンクリート、査読有、No. 65、2011、pp. 298-303
- ⑤ 大西勝利、井上正一、黒田保、微粒分量が多い石灰石骨材を用いたコンクリートの配合と物性、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、Vol. 33、2011、pp. 143-148

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① 大西勝利、井上正一、黒田保、高炉スラグ細骨材と石灰石砕砂を混合使用したコンクリートのフレッシュ性状、土木学会中国支部研究発表会、2013年5月25日、鳥

- 取大学
- ② 大西勝利、井上正一、黒田保、藤田龍二、  
微粒分量が多い石灰石骨材を用いたコン  
クリートの耐凍害性に関する一考察、土  
木学会 第 67 回土木学会年次学術講演会、  
2012 年 9 月 6 日、名古屋大学
  - ③ 大西勝利、尾崎祐一、井上正一、黒田保、  
微粒分量が多い石灰石骨材を使用したコ  
ンクリートの耐久性に関する一考察、土  
木学会中国支部研究発表会、2012 年 6 月  
9 日、呉工業高等専門学校
  - ④ 大西勝利、高品慎之、井上正一、微粒分  
の多い石灰石骨材を用いたコンクリート  
の配合設計に関する一考察、土木学会中  
国支部研究発表会、2011 年 5 月 21 日、  
岡山大学
  - ⑤ 池田遙、吉野公、大西勝利、井上正一、充  
填性に及ぼす骨材の種類と微粒分量の影  
響、土木学会中国支部研究発表会、2011  
年 5 月 21 日、岡山大学
  - ⑥ 箱崎恵介、小林聖人、井上正一、石灰石  
骨材を用いた RC 部材の力学的特性、土  
木学会中国支部研究発表会、2011 年 5  
月 21 日、岡山大学
  - ⑦ 尾崎祐一、井上正一、吉野公、林昭富：  
石灰石骨材を用いたコンクリートの耐久  
性について、土木学会中国支部研究発表  
会、2010 年 5 月 14 日、徳山大学
  - ⑧ 箱崎恵介、井上正一、黒田保、高井伸一  
郎：石灰石骨材を用いた RC 部材の力学的  
特性に及ぼす微粒分の影響、土木学会中  
国支部研究発表会、2010 年 5 月 14 日、  
徳山大学
  - ⑨ 高品慎之、金子泰治、井上正一、黒田保：  
廃瓦細骨材を用いたコンクリートの配合  
と物性および耐凍結融解性、土木学会中  
国支部研究発表会、2010 年 5 月 14 日、  
徳山大学
  - ⑩ 小橋由佳、井上正一、黒田保、大西利勝：  
微粒分量の多い石灰石骨材を用いたコン  
クリートのフレッシュおよび硬化後の物  
性、土木学会中国支部研究発表会、2010  
年 5 月 14 日、徳山大学
  - ⑪ 田垣嘉基、井上正一、大西利勝、田中智  
基：石灰石粗骨材を用いた硬化コンクリ  
ートの熱的性質、土木学会中国支部研究  
発表会、2010 年 5 月 14 日、徳山大学

[図書] (計 1 件)

- ① 井上正一 他、コンクリート工学会中国支  
部、コンクリートの今日的課題と展望  
2013、2013, pp. 34-47

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 正一 (INOUE SHOICHI)  
鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10032286

### (2) 研究分担者

黒田 保 (KURODA TAMOTSU)  
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30263487  
吉野 公 (YOSHINO AKIRA)  
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：40135835