

令和 2 年 7 月 4 日現在

機関番号：56401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06526

研究課題名(和文) 四国で発生するフライアッシュ及び銅スラグを多量用いたコンクリートの基礎的研究

研究課題名(英文) Basic study on concrete using large amount of fly ash and copper slag generated in shikoku

研究代表者

横井 克則 (YOKOI, Katsunori)

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授

研究者番号：80240183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：四国で発生するフライアッシュ及び銅スラグを多量用いたコンクリートとして、消波ブロックへの適用を視野に、銅スラグ細骨材に加えてマンガンスラグ粗骨材を骨材として全量使用し、さらにフライアッシュを多量混和した重量コンクリートの施工性能、強度特性、乾燥収縮特性を検討した。その結果、普通ポルトランドセメントとフライアッシュ、スラグ骨材を組み合わせることでブリーディング量は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に抑えられた。また、振動下での変形性はスラグ骨材使用により向上した。強度特性は、スラグ骨材使用によって長期強度が増進する可能性が示され、乾燥収縮量はスラグ骨材使用によって大きく低減できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

四国においては、石炭火力による発電量の増加によるフライアッシュの大量発生や、銅の溶融製錬の際に発生する銅スラグの発生量が多い現状にある。これらの産業副産物を四国内でコンクリート用材料として有効利用することは、天然骨材の温存、遠方への輸送に伴う炭酸ガスの抑制などにおいて環境負荷低減にもつながる。

そこで、近い将来発生するであろう南海地震における海岸部での津波対策として、現在も多く実施されている防波堤の改良工事や消波ブロックの増設工事などで使用するための重量コンクリートの開発をめざし研究を実施した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated various properties of heavy concrete, which uses copper-slag sand and manganese-slag gravel as aggregate, and also uses high volume of fly ash to secure segregation resistance.

As a result, the bleeding amount was inhibited to $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ or less by using ordinary portland cement with fly ash and slag aggregate. The deformability under vibration improved by using slag aggregate. Compressive strength slightly decreased by using manganese-slag gravel. Any age was reduced about $2\text{N}/\text{mm}^2$. It meant that there was no problem in property of strength. Length change was reduced by using slag aggregate. Using high volume of fly ash, the effect of suppressing hydration heat could be confirmed. Moreover, there was no problem in resistance against sulfate.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：重量コンクリート フライアッシュ 銅スラグ細骨材 マンガンスラグ粗骨材 施工性能 圧縮強度 乾燥収縮

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 高知県では防災の一環として消波ブロックが増設されているが、四国の太平洋に面する地域では、これまでも高波などの影響から消波ブロックが転倒し破損するなどの被害を受けてきた。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う甚大な津波被害が記憶に新しいが、近年では南海トラフを震源とする地震による大津波も懸念されている。消波ブロックにおいて、高密度の骨材を使用して、自重を大きくすることにより、容積を大きくすることなく重量化が可能であることから、波からの受圧面積が小さくなるため、消波ブロックを転倒させにくくすると考えられる。本研究では銅およびマンガンの精錬時に排出される副産物である、銅スラグ細骨材(以下、CUS)とマンガンスラグ粗骨材(以下、MNG)をそれぞれ細骨材・粗骨材としてそれぞれ全量使用した重量コンクリートに着眼した。これらの骨材は一般的な骨材と比べて密度が高い。一般的なコンクリートは $2300\text{kg}/\text{m}^3 \sim 2400\text{kg}/\text{m}^3$ 程度、従来の重量コンクリートは $2500\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であるが、本研究ではCUSとMNGを用いることで、 $2800\text{kg}/\text{m}^3$ 程度までの重量化を期待している。

(2) 懸念事項としてこれらの骨材は密度が大きいことや表面がガラス質であるために材料分離が生じやすくなり、フレッシュ時の性状に影響を与えることが考えられる。また、セメントペーストとCUS間の付着力および、モルタルとMNG間の付着力が弱まることで骨材界面が疎となり、硬化コンクリートの性状にも影響する可能性がある。この対策として、フライアッシュ(以下、FA)の混和が挙げられる。FAを多く混和することで水粉体比が低減され、塑性粘度が上がることなどから、ブリーディングなどに代表される材料分離現象の抑制が期待される。特に四国は良質なFAを供給可能な体制が整えられている。

2. 研究の目的

(1) 港湾構造物は長期にわたり、波や海砂の断続的な衝突で摩耗していくことが予想される。摩耗すれば、構造物の重量は減少していくため、時間経過とともに波力に耐え得るために必要な重量を保つことができなくなる可能性がある。したがって、波力に耐え得る重量を保つためには、耐摩耗性の高いコンクリートが望ましいと考えられる。しかし、現状ではスラグ骨材とFAを使用したコンクリートの耐摩耗性の評価を行った研究は少なく、水中における3次元的な物体の衝突による摩耗(水中エロージョン摩耗)の検討は皆無である。本研究では、CUSとMNGをそれぞれ細骨材・粗骨材として全量使用し、FAを多く用いた重量コンクリートにおける、各種フレッシュ性状、耐摩耗性、物性(強度・乾燥収縮)、断熱温度上昇、乾湿繰り返し抵抗性に関する検討を行い、諸特性を明らかとすることを目的とする。

(2) 本研究で期待される効果として、例えば、消波ブロックを本研究で開発した重量コンクリートを用いて施工すれば、既存の型枠をそのまま転用して、さらに重量な消波ブロックを造ることが可能であるため、新たな設備投資を必要とせずに、転倒への抵抗性を向上させることができる。また、本研究で開発するコンクリートは単位容積重量を $2700 \sim 2800\text{kg}/\text{m}^3$ 程度としている。具体的な例を挙げると、既存の100トンクラスの消波ブロック(約 45m^3)の型枠で施工した場合は120トンクラスとなる。また、本研究は港湾構造物を対象としたものであるが、陸地においては、高知県内をはじめとして山地面積率が高い地域が多いことなどから、土砂災害発生リスクも高い。土砂災害への対策として施工される砂防においても、重量であることの利点は港湾構造物と同様に高いと考えられる。したがって、砂防に対しても重量コンクリートを適用することの有用性は高い。このように、四国の風土の性質から、重量コンクリートの需要は高いと考えられ、研究の成果を広く活用できると考えられる。また、産業副産物を多量に使用していることから、資源循環型社会の形成にも寄与することができる。

3. 研究の方法

本研究における代表的な使用材料、配合、実験方法を以下に示す。

(1) 表-1に使用材料の物性を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種を使用した。細骨材は、硬質砂岩砕砂およびCUSを使用した。粗骨材には、硬質砂岩砕石およびMNGを使用した。混和材には、フライアッシュ種を使用した。MNGの表面はガラス質で、また徐冷時に混入したと思われる気泡痕が見られる。細骨材の場合の吸水率は1%未満とされるが、粗骨材として使用する場合には硬質砂岩砕砂よりも若干吸水率が小さい程度であり、これは表面の気泡痕の影響と思われる。また、マンガンスラグを細骨材として全量使用した場合には、一般的な砕砂を使用した普通コンクリートとフレッシュ性状および強度特性において、同等であるとされる。銅スラグ細骨材についてはJIS A 5011-3として規格化され、また土木学会より施工指針が発刊されている。

(2) 表-2にコンクリートの配合を示す。本配合は圧縮強度の目標値を $21\text{N}/\text{mm}^2$ とした。W/Cは65%とした。セメントは2種類とし、スラグ骨材を細・粗骨材として全量使用した場合と普通骨材のみを使用した配合水準を設けた。また、スラグ骨材を細・粗骨材として全量使用した場合、材料分離の抑制を主な目的にFAを $150\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した。スラグ骨材を用いた配合では、コンクリートの単位容積重量がなるべく大きくなるよう配合設計した。目標スラブは全ての

表 - 1 使用材料

材料(記号)	物性など
高炉セメントB種(BB)	密度:3.04g/cm ³ ,比表面積:3820cm ²
普通ポルトランドセメント(OPC)	密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3320cm ² /g
硬質砂岩砕石(S)	表乾密度:2.58g/cm ³ ,FM:2.98
	吸水率:1.67%,実積率:63.4%
銅スラグ細骨材(CUS)	表乾密度:3.56g/cm ³ ,FM:2.55
	吸水率:0.26%,実積率:65.4%
硬質砂岩砕石(G)	表乾密度:2.63g/cm ³ , FM:6.65, 吸水率:0.86%,実積率:60.2%, すりへり減量:17%
マンガンスラグ粗骨材(MNG)	表乾密度:2.77g/cm ³ ,FM:6.53, 吸水率:1.42%,実積率:57.6%, すりへり減量:30%
フライアッシュ 種(FA)	密度:2.30g/cm ³ ,比表面積:3260cm ² /g
増粘剤一液型高性能AE減水剤(Ad1)	ポリカルボン酸エーテル系増粘性高分子化合物の複合体
高性能AE減水剤(Ad2)	ポリカルボン酸エーテル系
AE剤(Ad3)	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表 - 2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							混和剤			単位容積質量(kg/m ³)	SL (cm)	Air (%)	C.T. ()		
				W	OPC	BB	FA	S	CUS	G	MNG	Ad1	Ad2					Ad3	
OPC-FA-S	65	38	50	135	208	-	150	-	1307	-	1017	-	0.9	-	2817	3.0	4.0	19	
BB-FA-S					-	208		-	1302	-	1013	0.5	-	-	2808	2.5	3.2	15	
OPC-FA-N					208	-		947	-	965	-	-	-	1.3	-	2405	5.0	1.6	17
BB-FA-N					-	208		944	-	962	-	-	1.0	-	-	2399	4.5	3.0	18
OPC-N	65	65	175	269	-	-	896	-	914	-	-	-	0.75	0.3	2254	9.5	5.0	19	
BB-N				-	269	-	892	-	909	-	-	0.6	-	0.3	2245	8.0	3.6	15	

配合について 8.0±2.5cm とし、一般的な W/C65%の配合を想定した OPC-N と BB-N を参考に、化学混和剤の添加量を調整して単位水量や s/a を調整しながら試し練りを実施した。しかし、いずれもせん断型のスランプ形状になった。このため、スランプの目標値は定めずに、せん断型のスランプ形状とならず、また練り上がり時にブリーディングが浮いてこないかを目視で判断した結果を基に、練上がりが良好だった配合を実験に供した。目標空気量については、普通骨材のみを使用し、FA を混和しない OPC-N と BB-N については 4.5±1.0% とした。その他の配合については、耐凍害性を必要としない地域での適用を想定していることや、FA を多量に使用しているため、未燃カーボンの影響によりエントレインドエアの連行は困難なことから、目標値を定められないものとした。したがって FA を用いた配合の空気量の値は、エントラップトエアの影響であると考えられる。

(3) 加振 L フロー試験及び摩耗試験

本試験は内部振動機により締固めを行った際の、型枠内でのコンクリートの挙動を検討するものである。L 形容器 (JSCE-F514)、棒状内部振動機 (φ28mm、周波数 200Hz 程度) を用いて実施した。試験の概要を図 - 1 に示す。試験手順は、仕切りゲートの挿入後、試料を詰めた。停止状態の棒状内部振動機を試料投入側の中央に、底面からの高さが 50mm となるよう挿入した。仕切りゲートを上げて加振を行った。コンクリートが流動しなくなるまで継続して加振し、流動停止したときのフローを測定してこれを流動停止フローとした。図 - 2 に摩耗試験の概要を示す。ASTM C1138 を参考に試験装置を作製した。塩ビ管の底部に円盤供試体 (直径 300mm、50mm) を、

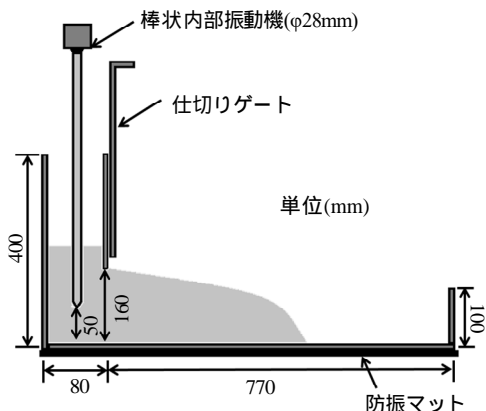


図 - 1 加振 L フロー試験の概要

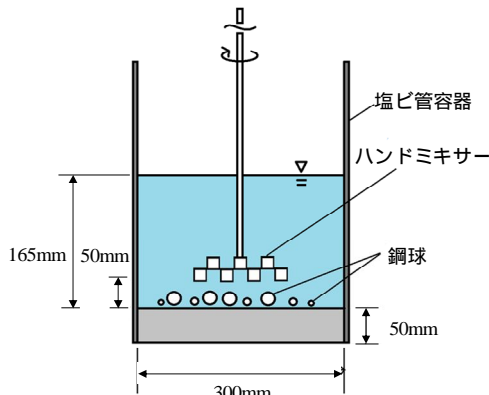


図 - 2 摩耗試験の概要

摩耗面を上にして設置した。なお、摩耗面は打設面の対面とした。この時、スクリー底部と供試体摩耗面との間隔は50mmとした。鋼球は玉軸受用鋼球(JIS B1501)とし、25.4mmを10個、19mmを35個、12.6mmを25個用い、供試体の摩耗面の上に置いた。水位は摩耗面から165mmとした。またトルクの回転数は1300rpmとした。試験開始から12時間は3時間ごとに供試体の表乾質量を測定し、それ以後は累計24時間となるまで6時間ごとに測定した。式(1)により累積すりへり係数(mm³/cm²)および平均摩耗深さ(mm)を算出した。また、式(1)のAの単位を(mm²)とすることで平均摩耗深さ(mm)に換算した。

$$= (W_d - W_{step}) / (\rho \times A) \quad (1)$$

ここで、 ρ : 累積すりへり係数 (mm³/cm²)、 W_d : 試験前供試体表乾質量 (g)、 W_{step} : 各時間の供試体表乾質量 (g)、 ρ : 供試体表乾密度 (g/mm³)、 A : 摩耗面積 (cm²) である。

(4) 他に、強度特性を確認するために圧縮強度試験や弾性係数試験、マスコンクリートとしての使用を想定した断熱温度上昇試験、乾燥収縮によるひび割れ防止のために長さ変化試験等を実施した。

4. 研究成果

本研究では、銅スラグ細骨材およびマンガンスラグ粗骨材を細・粗骨材として全量使用し、さらにフライアッシュを多量に使用した重量コンクリートの各種特性について検討した。本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) フレッシュ性状として、図-3に示すように、ブリーディング量はセメントの種類にかかわらず、0.1cm³/cm²以下と小さかった。図-4に示すように、加振Lフロー試験の結果、スラグ骨材を用いた場合、スランプが小さい場合でも流動停止フロー、流動速度ともに十分なスランプを持つ普通骨材を用いたコンクリートよりも大きくなり、水走りといった材料分離も生じていなかった。したがって、複雑な形状の消波ブロックの施工においても十分な充てん性が期待される。

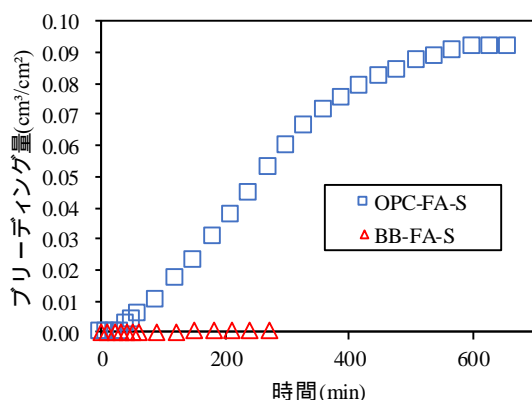


図-3 ブリーディング試験結果

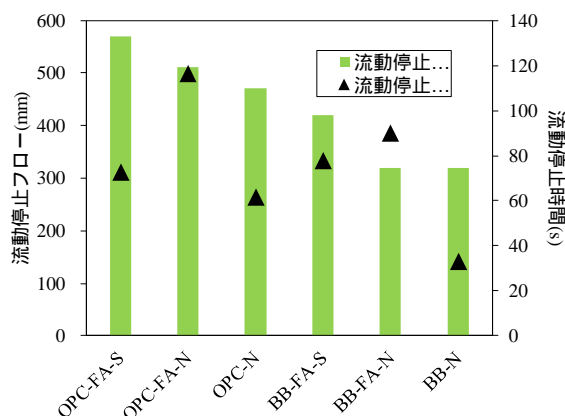


図-4 加振Lフロー試験結果

(2) 強度特性として、圧縮強度は、細・粗骨材として銅スラグ細骨材とマンガンスラグ粗骨材をそれぞれ全量使用した場合には、普通骨材(硬質砂岩砕砂・硬質砂岩砕石)を使用した場合と比べて低下した。これはマンガンスラグ粗骨材の表面形状による影響が懸念される。動弾性係数は、銅スラグ細骨材およびマンガンスラグ粗骨材の使用によって大きくなる傾向を示した。

(3) 断熱温度上昇試験を行った結果、フライアッシュを多量に使用し、単位セメント量を低減することで、フライアッシュを用いていない場合に比べて最高温度を8~9程度、低減できることを確認した。

(4) 乾燥収縮特性として、乾燥収縮量は、銅スラグ細骨材とマンガンスラグ粗骨材をそれぞれ単独で使用した場合、小さくなった。また双方を併用した場合には、より乾燥収縮量を低減することができた。銅スラグ細骨材ならびにマンガンスラグ粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮量の低減効果は、コンクリートの弾性と相関がみられた。

(5) 耐摩耗性試験結果を図-5に示す。耐摩耗性として、水中エロージョンによる摩耗に対する抵抗性については、銅スラグ骨材およびマンガンスラグ粗骨材をそれぞれ単独で使用した場合、併用した場合の双方とも低下した。この要因としては、銅スラグ骨材の摩耗粉が硬質であるため、研磨材のような作用をもたらしたことや、マンガンスラグ粗骨材のすりへり減量が大きいことが影響した可能性が考えられる。ただし、実際に消波ブロックが設置される箇所は波によって摩耗粉が浚われると考えられ、摩耗粉が上記のように研磨剤として作用する可能性は低いと考えられる。フライアッシュの使用によって摩耗に対する抵抗性は向上した。これは、フライアッ

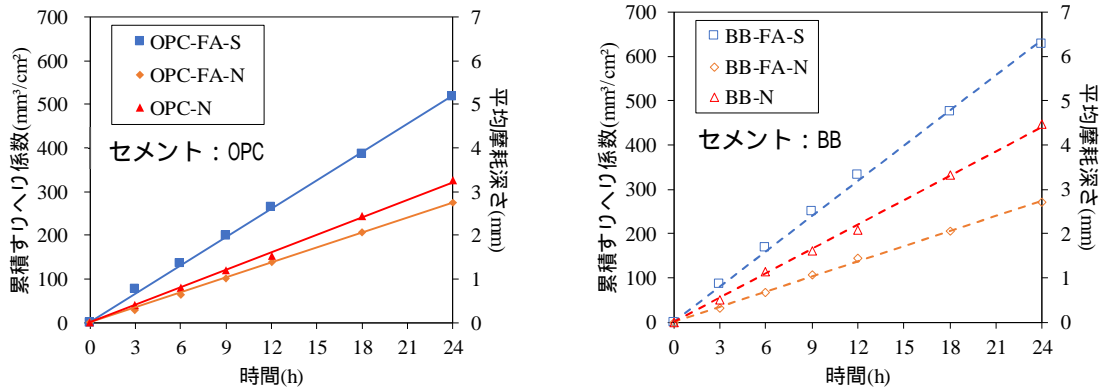


図 - 5 摩耗試験結果

シュの使用による強度増加が影響したと考えられる。

(6) 乾湿繰り返し抵抗性として、質量パーセント濃度 5%の硫酸マグネシウム水溶液に 2 日間浸漬させ、恒温恒湿室で 2 日間乾燥させる計 4 日間を 1 サイクルとし、これを 30 サイクル行った。その結果、30 サイクル後の質量減少率は最大でも 0.16%以下と小さかった。これはフライアッシュを多量に使用したことによる影響と考えられる。

本研究では、消波ブロックへの適用を想定して、フライアッシュを多量に使用し、スラグ骨材を細・粗骨材として全量使用した、また普通骨材とスラグ骨材を併用したコンクリートの施工性能、強度特性、断熱温度上昇特性および耐久性について検討を行った。

消波ブロックは隅角部を多く有する複雑な形状をしており、充填不足が生じやすいと考えられるが、十分に重量を確保するためにも密実な施工が求められる。本研究の範囲で得られた結果より、スラグ骨材を全量使用しても、ブリーディングを抑制し、また、良好な振動締固めが可能と考えられる。また、強度特性や乾燥収縮特性についても良好であった。

フライアッシュの多量使用による性能の向上も確認でき、マスコンクリートにおいて懸念される断熱温度の上昇を抑制することができた。また、実環境における耐久性に関しては、海水中に含まれる成分である硫酸マグネシウムを用いた乾湿繰り返し試験によって検討を行い、耐硫酸塩性の向上もみられた。

スラグ骨材の使用で、単位容積質量を大幅に増加させることにより、消波ブロックの容積低減効果が認められる。容積低減に伴って、スラグ骨材およびフライアッシュの使用量が増加することで、資源循環型社会の形成にも寄与することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 前田凌, 山田悠二, 横井克則, 近藤拓也	4. 巻 40(1)
2. 論文標題 各種スラグ骨材を用いたハイポリウムフライアッシュ重量コンクリートに関する実験的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1401-1406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 戸松功祐, 山田悠二, 川崎佑磨, 横井克則	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 銅スラグ細骨材とマンガンスラグ粗骨材およびフライアッシュを使用した重量コンクリートのフレッシュ性状および耐摩耗性の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1547-1552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本大貴, 小林崇, 横井克則, 近藤拓也	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 フライアッシュを用いたプレキャストPC床版用軽量コンクリート2種の基礎的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1505-1510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田悠二, 前田凌, 横井克則, 近藤拓也
2. 発表標題 スラグ骨材とフライアッシュを多量に使用した重量コンクリートの施工性能評価
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田凌, 山田悠二, 横井克則, 近藤拓也
2. 発表標題 各種スラグ骨材を用いたハイポリウムフライアッシュ重量コンクリートに関する研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本大貴, 横井克則, 近藤拓也, 小林崇
2. 発表標題 軽量FAコンクリートを用いたプレキャストPC 床版の高耐久化に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村大地, 山口幸大, 横井克則, 近藤拓也
2. 発表標題 フライアッシュを海砂代替材として使用した実機練りコンクリートの品質
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本修大, 横井克則, 堀井克章, 三岩敬孝, 近藤拓也
2. 発表標題 尿素とフライアッシュを混入したコンクリートの基礎的検討
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本大貴, 横井克則, 芝沙矢香, 近藤拓也
2. 発表標題 水結合材比一定でフライアッシュの置換率が異なるコンクリートの特性
3. 学会等名 第23回土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村大地, 横井克則, 芝沙矢香, 近藤拓也
2. 発表標題 フライアッシュを細骨材補充材として用いたコンクリートの水中疲労特性
3. 学会等名 第23回土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本修大, 横井克則, 近藤拓也, 山田悠二, 三岩敬孝
2. 発表標題 尿素とフライアッシュを混入したコンクリートの基礎的性質
3. 学会等名 第23回高専シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村大地, 横井克則, 近藤拓也, 山田悠二, 芝沙矢香
2. 発表標題 フライアッシュを細骨材置換したコンクリートの水中疲労特性
3. 学会等名 第23回高専シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本大貴, 横井克則, 近藤拓也, 山田悠二, 小林崇
2. 発表標題 PC床版用軽量コンクリートの基礎的研究
3. 学会等名 第23回高専シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田凌, 横井克則, 近藤拓也, 山田悠二
2. 発表標題 各種スラグ骨材を用いた重量コンクリートの強度特性
3. 学会等名 第23回高専シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水成, 横井克則, 近藤拓也, 野村悠太, 佃幸壽
2. 発表標題 フライアッシュを混入したポリマーセメントモルタルの開発
3. 学会等名 第26回土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本大貴, 横井克則, 近藤拓也, 小林崇
2. 発表標題 プレキャストPC床版用軽量FAコンクリートの基礎的検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森下将樹, 田村大地, 横井克則, 近藤拓也
2. 発表標題 フライアッシュコンクリートの気中疲労強度特性
3. 学会等名 第25回土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----