

論文 超高強度繊維補強コンクリートのレディーミクストコンクリート工場での製造に関する検討

吉田 浩一郎^{*1}・玉滝 浩司^{*2}・松永 篤^{*3}・石関 嘉一^{*4}

要旨：開発した超高強度繊維補強コンクリートは、常温養生により早期に高強度を得られる特徴があり、現場への運搬や打込みが可能となる。このため、現場での施工技術を確認するため、開発品のレディーミクストコンクリート工場における製造技術について検討した。また、アジテータトラックによる運搬試験も行った。その結果、開発品はレディーミクストコンクリート工場のミキサで練混ぜ可能であり、表面水を有する細骨材を用いても安定した品質の製品を製造できることがわかった。また、アジテータトラックに繊維を投入した場合、試料中に均一に分散しており、運搬前後で品質に差異がないことを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、常温養生、表面水率、練混ぜ、鋼繊維、分散、運搬

1. はじめに

欧州において実用化された超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下, UFC) は、一般的なコンクリートと比較して非常に高い強度を有するだけでなく、添加される繊維によって高いじん性を有している。また、緻密な組織が形成されることから耐久性に優れている。2004 年に土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」¹⁾ が刊行されたことで、UFC の適用事例は増えつつあり、既存のコンクリート技術では成し得なかったような、部材の薄肉化や軽量化が可能となっている。

現在の UFC 技術の多くは、高温の養生によって、高強度・高耐久性を実現している。そのため、技術を適用できる箇所には制限があり、現場で打込みができる UFC 技術が望まれている。このようなニーズに応えるため、常温環境下でも早期に高強度が得られることを特徴とする UFC が開発されている。このような UFC (以下, UFC-SC) は、レディーミクストコンクリート工場 (以下, プラント) での製造や、アジテータトラックでの運搬が可能となれば、通常のコンクリートと同様に、現場での施工を実現できる可能性がある。しかしながら、プラントのミキサでの練混ぜ可否や骨材表面水がフレッシュ性状に及ぼす影響、またアジテータトラックによる運搬が品質に及ぼす影響等は定かでない。

このため、本検討では UFC-SC の製造技術の確立を目的として、性能の異なるプラントのミキサで練混ぜ試験を行い、流動性や圧縮強度等の品質安定性と、アジテータトラックに鋼繊維を投入した場合の繊維分散の程度を確認した。また、プラントで製造した試料はアジテータ

トラックによる長時間・長距離運搬を行い、運搬が品質に及ぼす影響を確認した。なお、一部の試験では運搬後に試料のポンプ圧送を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

本実験に使用した UFC-SC の材料や配合条件は全て同一の条件とした。UFC-SC を構成する材料は、ポゾラン材等を含む写真-1 に示すプレミックス材、高強度コンクリートに適した細骨材 (粒径 5mm 以下, 表乾密度: 2.62g/cm³, 吸水率: 2.50%), ポリカルボン酸系の高性能減水剤、および写真-2 に示す補強用鋼繊維 (直径 0.16mm, 長さ 13mm, 引張強度 2000N/mm² 以上) である。結合材は、現場施工を実現するために、低水結合材比においても流動性に優れることに加え、特に高温養生を行わずとも早期に高強度が得られるような材の選定が重要である。このため、UFC-SC では C₃A 量が少なく、かつ硬化時に反応速度の速い C₃S 量が多いセメントを用いて配合を最適化し²⁾、高流動化・高強度化を図っている。また、プレミックス材中のポゾラン材は、セメントの水和反応によって生成された水酸化カルシウムと反応して組織を緻密化し、耐久性を確保するのに寄与している。



写真-1 プレミックス材 写真-2 補強用鋼繊維

*1 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)

*2 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 工修 (正会員)

*3 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 部長 工修 (正会員)

*4(株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 工博 (正会員)

UFC-SC の標準配合を表－１に示す。UFC-SC は荷卸し時における目標フロー値を $260 \pm 30 \text{mm}$ 、目標空気量を 3.5%以下として設定した。なお、目標フロー値は材料分離が生じない範囲で高い充填性が得られるように設定し、目標空気量は空隙の残存による強度低下が生じないように設定した。補強用鋼繊維は外割りとし、添加率を 2.0vol%とした。

2.2 試験概要

(1) 各種ミキサでの練混ぜ性能比較

UFC-SC の製造は、プラントに常設されている A～C の 3 つのミキサで行い、ミキサ負荷が最大となるまでの時間と練混ぜ時間を測定した。いずれのプラントも現状稼動しており、材料計量は工場の設備を使用した。写真－３にミキサ B を有しているプラントの外観を示す。なお、練混ぜ量はミキサの練混ぜ容量に対して 50～72%とした。A～C のミキサの仕様、練混ぜ回数および練混ぜ量を表－２に示す。



写真－３ ミキサ B を有するプラントの外観

表－１ UFC-SC の標準配合

単位量 (kg/m ³)				補強用 鋼繊維 (kg)
水 ^{注)}	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	32	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む

表－２ ミキサの仕様と練混ぜ回数および練混ぜ量

詳細		ミキサ A	ミキサ B	ミキサ C
ミキサ仕様	練混ぜ容量 (m ³)	3.3	2.5	3.0
	ミキサ形式	水平二軸型 (強制練り)		
	電動機	55kw ×2 機 (400V)	37kw ×2 機 (200V)	75kw ×1 機 (200V)
	回転数 (rpm)	35	26	25
	練混ぜ回数	5	2	1
練混ぜ量 (m ³)		1.7	1.8	1.5

(2) 表面水を有する骨材を用いた場合の品質確認

練混ぜは、細骨材が表面水を有した状態で使用し、表面水率を練混ぜ水に反映させて、フレッシュ性状を確認した。また、製造した UFC-SC の圧縮強度も確認した。なお、貯蔵ビン等に保管する前に、細骨材の表面水率が 10%を超過していないことを確認した。

(3) アジテータトラックへの鋼繊維投入検討

プラントのミキサに鋼繊維を投入した場合、ミキサ内に残存した鋼繊維が次バッチのコンクリートに混入する可能性がある。このため、アジテータトラックへの繊維投入を検討した。鋼繊維は、投入前に専用機を用いてほぐし、アジテータトラック内で分散しやすいように工夫した。なお、ミキサ A を有するプラントではシュートを用い、ミキサ B および C を有するプラントではベルトコンベヤを用いて、鋼繊維を投入した (写真－４、写真－５参照)。

鋼繊維投入は、アジテータトラック内の繊維分散状況を確認しながら、投入速度を調整して行った。投入作業は、鋼繊維投入の作業員に加え、アジテータトラックの積込口に繊維分散状況を確認する人員を配置して行った。なお、鋼繊維を投入する際は、アジテータトラックを低速で攪拌し、全ての繊維を投入した後に、高速で 1 分間攪拌してから排出した。

(4) アジテータトラックによる長時間・長距離運搬

アジテータトラックによって UFC 材料の運搬を検討した事例はなく、運搬可能な時間は不明である。このため、UFC-SC をアジテータトラックにより長時間・長距離運搬し、運搬がフレッシュ性状および強度に与える影響を確認した。アジテータトラックによる運搬時間は、



写真－４ ベルトコンベヤを用いた繊維投入例



写真－５ シュートを用いた繊維投入例

予め試験室内で測定を行った凝結始発時間(図－1 参照)を参考とし、夏期、標準期および冬期で、異なる運搬時間を設定した。

(5) 運搬後試料のポンプ圧送

標準期において長距離運搬を行った試料のポンプ圧送試験を行った。ポンプ圧送には定置式 10m³ タイプ電動モーター搭載型を使用した。ポンプ圧送距離の全長は 60m で、圧送途中には 3m の上下勾配を設置した。圧送には直径が 75mm の配管を用い、配管先端には 8m のフレキシブルホースを設置し、機動性を向上させた。ポンプ圧送量は 1.5m³ とし、設定流量は 5.0m³/時間とした。なお、ポンプ圧送による品質への影響を確認するため、圧送前後におけるフレッシュ性状と圧縮強度を確認した。

2.3 練混ぜ

最初にプレミックス材と細骨材を投入し、30 秒間空練りを行った後、高性能減水剤および水を投入して練混ぜを行った。練混ぜ時間はミキサ負荷が安定した後に 4～5 分間追加で練混ぜを行うこととした。練混ぜ後はミキサ内から試料を採取し、フロー試験によって練混ぜが十分であるかの確認を行った。

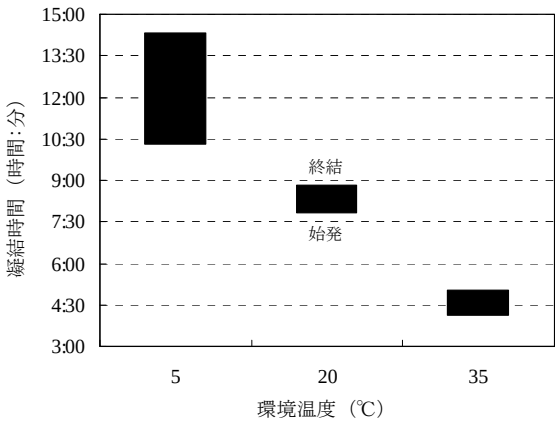
2.4 測定項目および試験条件

表－4 にそれぞれの測定項目と試験条件を示す。本検討では、アジテータトラックに繊維を投入した。

3. 実験結果

3.1 各種ミキサでの練混ぜ性能比較

プレミックス材は、プラントによって投入方法が異なり、ミキサ A および C 使用時には、貯蔵ビンに保管した



図－1 環境温度毎の UFC-SC の凝結時間

表－4 測定項目および試験条件

ミキサ種類		A		B	C	詳 細
測定項目・試験条件	練混ぜ時	細骨材表面水率	○	○	○	バッチ毎に計量時に採取した細骨材を用いて測定
		ミキサ負荷値	○	○	○	練混ぜ開始後からのミキサ負荷値を 30 秒毎に測定
		練混ぜ時間	○	○	○	注水後からホッパー排出までの時間を測定
	繊維投入直後	フロー値	○	○	○	JIS R 5201（落下なし）に準拠
		空気量	○	○	○	JIS A 1128 に準拠（コンクリート用エアメータ使用）
		圧縮強度※1	○	○	○	JIS A 1108 を参考（試験体寸法：φ 50×100mm）
		繊維混入率	○	—	—	JSCE-F 554-1999 に準拠
	長距離運搬	運搬時期	夏期	冬期	標準期	ミキサ C で練混ぜを行った場合は、アジテータトラックに繊維を投入し、その直後に各種測定を実施
		運搬距離	23 km	100 km	52 km	
		運搬時間	1 時間	4 時間	2.5 時間	
		アジテータトラック容量※2	4.25m ³		4.25m ³	
		積載量	1.7m ³	1.7m ³	1.8m ³	
	運搬後	フロー値	○	○	○	繊維投入直後の測定に同じ
		空気量	○	○	○	
		圧縮強度※1	○	○	○	
		曲げ強度※1	○	○	○	JIS A 1106 に準拠（試験体寸法：100×100×400mm）
		ポンプ圧送	—	—	○	圧送前後でフロー値、空気量および圧縮強度を確認

※1：成形後供試体は工場建屋もしくは現場建屋にて静置保管し、脱型後は試験材齢まで標準養生

※2：一般的なコンクリート積載を仮定した公称積載容量

後、計量して投入した。これに対してミキサ B は予め計量したプレミックス材を直接ミキサに投入した。なお、材料計量誤差は全て 1%以内であった。

表－5 に練混ぜ負荷が最大となった時間と練混ぜに要した時間を示す。いずれのミキサにおいても、プレミックス材と細骨材が塊状になる際にミキサ負荷が最大値となり、スラリー化すると負荷値が低下して安定した。試料が塊状になるまでの練混ぜ時間は、ミキサ A が最も短かった。これは攪拌速度が早く、また攪拌動力が大きいことから、試料に作用するせん断力が大きいためと考えられる。試料が塊状になってからスラリー化するまでには 4～5 分を要しており、ミキサによる違いは認められなかった。ミキサ B とミキサ C は、合計動力が 75kw であったが、練混ぜ時間に差が生じた。これは、練混ぜ量の違いによると考えられる。ミキサ A 使用時の負荷の推移を図－2 に示す。

3.2 表面水を有する骨材を用いた場合の品質確認

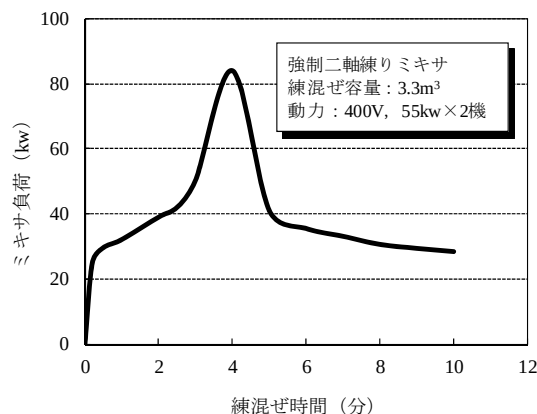
(1) 繊維投入直後のフレッシュ性状

UFC-SC の製造においては、骨材の表面水率を正確に把握することが、品質安定化を図る上で重要であるため、バッチ毎に骨材の表面水率を測定し、これを計量値に反映させた。図－3 に細骨材の表面水率とフロー値を示す。繊維投入直後のフロー値の平均は 259mm (243～280mm) となり、変動係数は 5.5% であった。一方、空気量の平均値は 2.0% (1.7～2.2%) となり、変動係数は 10.2% であった。また、練上り温度は 13～34℃ となった。練上り温

表－5 負荷が最大となった時間と練混ぜ時間

ミキサ	注水後の負荷が最大となった時間 (分)	注水後の練混ぜ時間 (分)
A	4	8
B	11	16
C	7	11

注) ミキサ A および B は平均値を採用

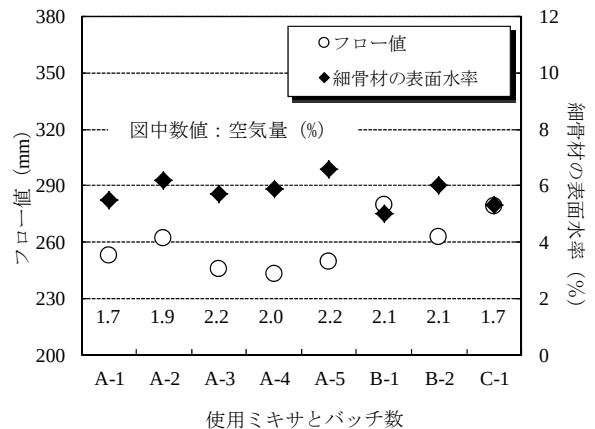


図－2 ミキサ負荷の推移例 (ミキサ A 使用)

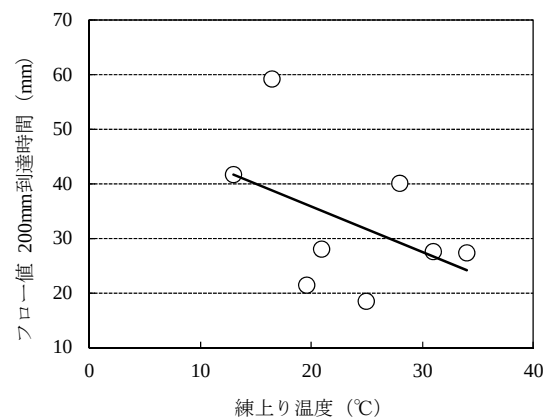
度が本検討の範囲であれば、フロー値や空気量の変動は小さいと考えられる。ただし、フロー値が 200mm に到達する時間は練上り温度が低くなると長くなる傾向にあった。これは低温環境において高性能減水剤の吸着量が低下し、結合材の分散状態が変化したことによると考えられる。(図－4 参照)。

(2) 圧縮強度

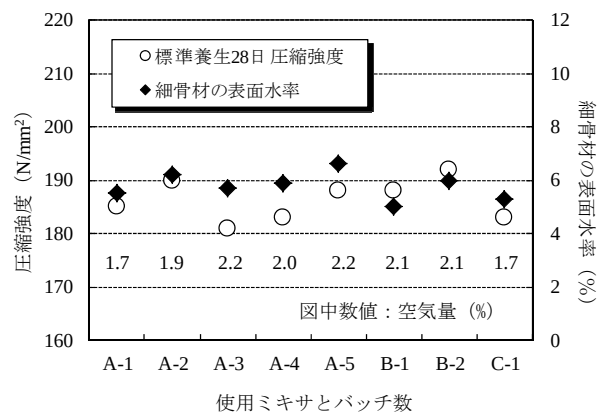
細骨材の表面水率と運搬前に成形した供試体の標準養



図－3 細骨材の表面水率とフロー値



図－4 練上り温度毎のフロー値 200mm 到達時間



図－5 細骨材の表面水率と圧縮強度



写真-6 鋼繊維の洗い試験状況

表-6 鋼繊維混入率

アジテータトラック からの試料採取箇所	V_{f1} (%)	V_{f2} (%)	平均 V_f (%)
1/3	2.08	2.01	2.05
2/3	2.06	2.09	2.08
3/3	2.05	2.09	2.07

生材齢 28 日の圧縮強度を図-5 に示す。圧縮強度の平均値は 187N/mm^2 ($181\sim192\text{N/mm}^2$) となり、変動係数は 4.0% であった。

本製造の結果によれば、細骨材の表面水率が変化しても、表面水率を正確に把握し、計量値に反映させることで品質の安定した UFC-SC の製造が可能と考えられる。

3.3 アジテータトラックへの繊維投入検討

本製造では、アジテータトラックの積込口から、鋼繊維の投入状況を確認しながら、10~20 分をかけて繊維を投入した。このため、試料排出時には繊維ダマが認められず、均一に分散していることが目視で確認された。また、ベルトコンベヤとシュートを使用した場合、投入後の繊維の分散状況には大差が認められなかった。アジテータトラック内の試料中に均等に鋼繊維が分散しているかを確認するため、排出時の 1/3、2/3 および 3/3 の箇所で試料を採取し、試料中に含まれる繊維混入率の測定を行った。繊維混入率の測定は、ミキサ A によって製造された試料を用い、アジテータトラックに積み込んでから 2 時間経過した後に採取した。鋼繊維の洗い試験状況を写真-6 に、繊維混入率の測定結果を表-6 に示す。

測定結果によれば、アジテータトラック内の試料中には、鋼繊維が均一に混入しており、鋼繊維の混入量が、投入量相当であることが確認された。

3.4 アジテータトラックによる長時間・長距離運搬

(1) 運搬後のフレッシュ性状

アジテータトラックでの運搬時間とフロー値および空気量の関係を図-6 および図-7 に示す。なお、図-6 中の数値は運搬前後の UFC-SC の温度を示している。今回の試験では、いずれの場合も運搬後のフレッシュ性状

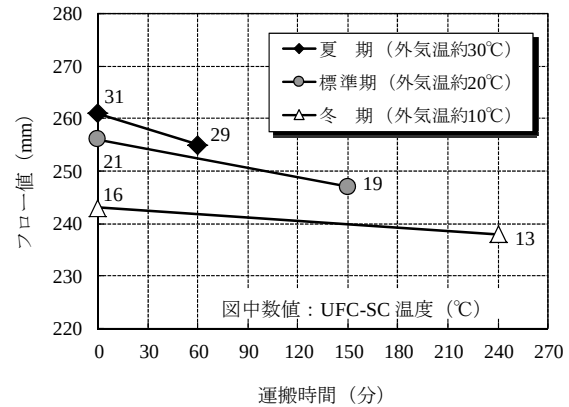


図-6 運搬時間とフロー値の関係

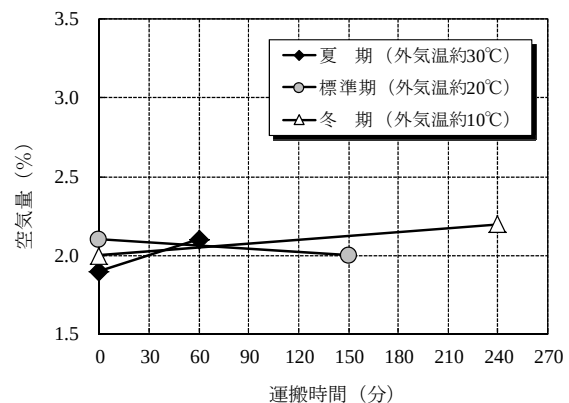


図-7 運搬時間と空気量の関係

が荷卸し時の目標値を満足した。標準期および夏期の運搬では、フロー値のロスが認められたことから、練上り直後のフロー値を大きくすることが必要と考えられる。一方、冬期の運搬では、フローロスが認められておらず、練上り直後のフロー値はほぼ目標値を設定してよいと判断された。また、運搬中の攪拌による空気量の増大や、著しい温度変化は認められなかった。100km を運搬した試料は長時間攪拌した影響により、排出した試料の繊維分散状況が良好であった (写真-7 参照)。

(2) 運搬前後の圧縮強度および曲げ強度

運搬前後の試料を用いて成形した供試体の圧縮強度および曲げ強度を表-7 に示す。運搬後の試料を用いて成形した供試体の圧縮強度は、運搬前の試料と比較して差が認められなかった。これは運搬による空気量の巻き込みがなかったことによると考えられる。また、曲げ強度も運搬前後で差が認められなかったが、これは繊維分散の程度に差がなかったためと考えられる。

3.5 運搬後試料のポンプ圧送

標準期に長距離運搬を行った試料のポンプ圧送前後のフレッシュ性状および圧縮強度を表-8 に示す。また、圧送後試料のフロー試験状況を写真-8 に示す。

今回の条件では、圧送圧力が約 6Mpa となり、配管の



写真－７ 運搬後の排出状況（100km 運搬後）

表－７ 運搬前後の圧縮強度および曲げ強度

運搬時期 運搬距離	圧縮強度 (N/mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)	
	運搬前	運搬後	運搬前	運搬後
夏 期 23km	190	184	33.2	32.5
標準期 52km	188	192	34.1	32.7
冬 期 100km	183	188	30.9	33.1

閉塞もなく、ポンプ圧送することが可能であった。圧送前後におけるフロー値と空気量には差異が認められず、圧送後試料の圧縮強度は圧送前とほぼ同等であった。以上から、ポンプ圧送前後において品質に差異は生じないと考えられる。

4. まとめ

常温環境下でも早期に高強度が得られる超高強度繊維補強コンクリートについて、レディーミクストコンクリート工場での製造およびアジテータトラックによる長時間・長距離運搬の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) UFC-SC はレディーミクストコンクリート工場に常設されたミキサで練混ぜ可能である。ただし、練混ぜ時間はミキサの性能や練混ぜ量によって異なる。
- (2) 表面水を有する細骨材を用いた場合でも、表面水を練混ぜ水に反映させることで、品質の安定した UFC-SC を製造することができる。
- (3) 予めほぐした鋼繊維をアジテータトラックに投入し

表－８ 圧送前後のフレッシュ性状および圧縮強度

試料採取 時期	フロー値 (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
圧送前	256	2.1	192
圧送後	247	2.0	195



写真－８ 圧送後のフロー試験状況

た場合、鋼繊維は試料中に均一に分散しており、投入量相当の繊維量が確保されている。

- (4) UFC-SC はアジテータトラックによる運搬が可能である。また、運搬前後においてフレッシュ性状や圧縮強度に差異は認められない。
- (5) UFC-SC はポンプ圧送が可能である。また、圧送前後においてフレッシュ性状や圧縮強度に差異は認められない。

本検討では、UFC-SC の製造および運搬によって、練混ぜ時間や運搬前後の品質変化等を確認することができた。今後は製造・運搬の実績を重ねることにより、更なる品質の安定化を図ることが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2004.9
- 2) 丸屋英二，歳谷一雄，高橋俊之，平田隆祥：超高強度繊維補強コンクリートの流動性及び強度に及ぼすセメントの鉱物組成の影響，土木学会第 66 回学術講演会講演概要集，pp.953-954，2011.9