

ローカーボンPCグラウトのサステナビリティ評価

熊本高等専門学校	学生会員	○河野 恭生
熊本高等専門学校	正会員	博(工) 松家 武樹
東海旅客鉄道株式会社		池末 啓太郎
熊本高等専門学校	博(工)	富澤 哲

Abstract : Sustainability evaluation methods in the concrete sector are based on an idea to comprehensively evaluate environmental, economic, and social aspects. In this study, these three aspects are considered as CO₂ emissions, cost, and compressive strength, and low-carbon PC grout using fly ash and blast-furnace slag was evaluated comprehensively.

The test results revealed that the correlation of CO₂ emissions, cost and compressive strength become different between the nine proportions of PC grout with different compounding, when different percentage of cement mass, 30%-60%, were replaced by fly ash and blast-furnace slag.

Key words : Sustainability , PC grout , Fly ash , Blast-furnace slag

1. はじめに

近年、あらゆる分野においてサステナビリティの重要性が強調されている。持続可能性を意味するサステナビリティは、社会、経済および環境の3つの側面を柱として構成されたものであり、そのことは一般に認識され始めている。一方、建設分野においてはサステナビリティ思想の導入が展開され始めている。堺ら¹⁾²⁾は、コンクリート構造物のサステナビリティに関する書籍を発刊し、建設分野におけるサステナビリティ評価の重要性やケーススタディ等を示している。コンクリート分野の規格に関しては、ISO13315シリーズでコンクリート及びコンクリート構造物の環境マネジメントに関する規格が制定されており、それらの内容は国内にも展開されている。2017年2月にはそれらの内容の一部がJIS Q 13315-1³⁾およびJIS Q 13315-2⁴⁾として規格化されており、環境思考を取り入れたサステナビリティ思想が拡がりつつある。今後、建設分野におけるあらゆる技術をサステナビリティの観点から再評価し、社会、経済および環境の3つの要素の相互関係について把握することが重要であることを意味する。

一方、サステナビリティ評価の要素のひとつである環境的側面については、著者らはこれまでにコンクリートおよび鉄筋のCO₂排出量に焦点をあてた研究⁵⁾を行ってきており、近年ではPCグラウトを対象にしている⁶⁾。PCグラウトは、水、セメントおよび混和剤を練混ぜ製造されるものであり、セメントの使用割合はコンクリートの配合に比して極めて多い。これまでPCグラウトは、品質基準となるレオロジー特性、ブリーディング率および圧縮強度等の材料性能に着目した研究が行われてきたが、サステナビリティの観点からPCグラウトの評価を行った研究は極めて少ない。

そこで本研究では、PCグラウト配合におけるサステナビリティ評価を行い、それらの相互関係を明らかにすることとした。社会、経済および環境側面の3つの要素を圧縮強度、コストおよびCO₂排出量として捉え、PCグラウト配合にはフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグと略記）を組合せた配合についても評価を行うこととした。

2. 実験概要

2. 1 PCグラウトの使用材料および配合

表-1に本研究で使用したPCグラウトの材料の種類および品質を示す。練混ぜ水は上水道水、セメントは普通ポルトランドセメント、フライアッシュはフライアッシュII種、高炉スラグは高炉スラグ微粉末4000、混和剤は高粘性タイプのものを使用し結合材の質量に対して1.0%を添加した。

表-2にPCグラウト配合における混和材置換率の組合せを示す。混和材の置換率は、セメントの質量に対しフライアッシュを0%から30%とし、高炉スラグを0%から60%の範囲とした。本研究ではこれらを組み合わせた全9配合の検討を行っている。

表-3にPCグラウトの配合を示す。従来のPCグラウトの配合をN、フライアッシュ置換をFA、高炉スラグ置換をBS、およびフライアッシュと高炉スラグの併用置換（以下、併用置換と略記）をLCの記号を用いて示している。各配合における流下時間は高粘性PCグラウトの規格値である14秒から23秒⁷⁾が得られるように水結合材比（以下、W/Bと略記）を調整し決定した。同表に示すPCグラウトに内在する塩化物イオン含有量は、前記表-1に示す各材料の塩化物イオン量を用いて算出した値を計算値とし、セメント質量に0.08%⁷⁾を乗じた値を許容値として求めている。なお、混和材の使用は塩化物イオン含有量を減少させている。

2. 2 PCグラウトの製造

PCグラウトの製造は、回転数600rpmのハンドミキサーを用いて行った。練混ぜは、最初に水および混和剤を30秒間練り混ぜ、次にセメント、フライアッシュおよび高炉スラグを加え180秒間行った。PCグラウト製造時における気温は28.8℃から34.0℃の範囲で、練上がり時点でのPCグラウト温度は30.8℃から34.4℃の範囲であった。なお、各配合で製造したPCグラウトの量は10ℓである。

2. 3 試験項目および方法

フレッシュ性状では、練混ぜ直後にJP漏斗を用いた流下時間の測定をJSCE-F 531 に準拠し、同一条件で3回行った。硬化後における試験では、圧縮強度試験をJSCE-G 531-2007に準拠して行った。圧縮強度試験の結果は、同一条件で3個の供試体の結果を平均した値である。供試体の作製時におけるタンピングなどの空気を除外させる作業は除外した。なお、本研究では、ブリーディング率および体積変化率についての試験は行っていない。

3. 実験結果および考察

3. 1 流下時間

表-1 使用材料の種類および品質

使用材料	種類	記号	品質
練混ぜ水	上水道水	W	密度：1.0g/cm ³ 、残留塩素：0.3mg/ℓ
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15g/cm ³ 、比表面積：3520cm ² /g 塩化物イオン量：0.023%
フライアッシュ	フライアッシュII種	FA	密度：2.31g/cm ³ 、比表面積：3940cm ² /g
高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末4000	BS	密度：2.91g/cm ³ 、比表面積：4150cm ² /g 塩化物イオン量：0.004%
混和剤	高粘性タイプ	Ad	主成分：メラミンスルホン酸系化合物、 水溶性高分子エーテル系化合物 塩化物イオン量：0.6%

表-2 混和材置換率の組合せ

	0	高炉スラグ置換率(%)					
		10	20	30	40	50	60
フライアッシュ置換率(%)	○	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○	○	○

表-3 PCグラウトの配合

記号	W/B(%)	FA置換率(%)	BS置換率(%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(kg)	塩化物イオン含有量(kg)		
				水W	結合材B				高粘性Ad	計算値	許容値C×0.08%
					セメントC	フライアッシュFA	高炉スラグBS				
N	45	0	0	586	1303	0	0	13.03	0.33	1.04	
FA10	45	10		578	1155	128	0	12.84	0.29	0.92	
FA30	45	30		561	873	374	0	12.47	0.23	0.70	
BS20	45	0	20	582	1035	0	259	12.94	0.27	0.83	
BS40	43		40	567	792	0	528	13.19	0.23	0.63	
BS60	43		60	563	524	0	786	13.10	0.18	0.42	
LC10	44		10	10	570	1037	130	130	12.96	0.27	0.83
LC20	45	20	20	565	754	251	251	12.57	0.21	0.60	
LC30	45	30	30	556	494	370	370	12.35	0.15	0.40	

図-1に流下時間の結果を示す。同図には、高粘性PCグラウトにおける流下時間の規格値も示しており、括弧内には同一条件で3回の流下時間の平均値およびW/Bを示している。いずれの配合においても流下時間は規格値内に収まっており、同一条件における流下時間のばらつきの範囲は0.6秒から1.7秒の範囲である。

本論文ではフライアッシュおよび高炉スラグが流下時間に及ぼす影響を明らかにするために、各配合で異なるW/BおよびPCグラウトの練上がり温度を一定として、混和材が流下時間に及ぼす影響について評価することとした。N配合のW/BおよびPCグラウトの練上がり温度を基準とし、W/Bが1%の増加に対して2.2秒、および練上がり温度1°Cの増加に対して0.15秒短くなるように流下時間を補正⁷⁾した。

図-2に補正した流下時間の結果を示す。フライアッシュ置換および併用置換の場合、混和材置換率の小さいFA10およびLC10配合ではN配合に比して流下時間が短くなっている。これはフライアッシュのボールベアリング効果が流動性の向上に寄与したものと考えられる。一方、FA30、LC20およびLC30配合ではN配合に比して流下時間が長くなっている。これはセメントの比表面積より大きい混和材を過度に置換したことに起因して、PCグラウトの粘性が増加し結果的に流下時間を長くさせたものと考えられる。高炉スラグ置換の流下時間の結果については、必ずしも一般化できる結果ではない。既往の研究では、高炉スラグの置換は流下時間が短くなる傾向と、粘性の増加により流下時間が長くなる傾向の2つの報告^{8),9)}があり、本研究の結果はこれら2つの影響が複雑に絡み合ったものと考えられる。流下時間は塑性粘度と相関関係にあることから、今後、塑性粘度を含めた詳細な検討を行う必要がある。

3. 2 圧縮強度

図-3に材齢3日から材齢91日の範囲におけるPCグラウトの圧縮強度の結果を示す。同図にはPCグラウトの標準的な管理値⁷⁾である材齢7日で30N/mm²の値を示している。本研究内におけるPCグラウトの圧縮強度はFA30およびLC30を除く配合において管理値を満たしている。高炉スラグを用いた場合の材齢28日から91日間の圧縮強度の増進がほとんどない結果となっており、BS20では0.7N/mm²、BS40では

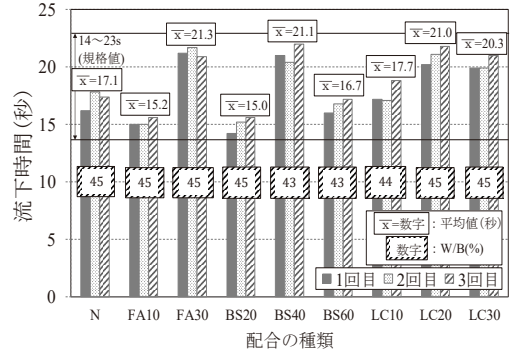


図-1 流下時間

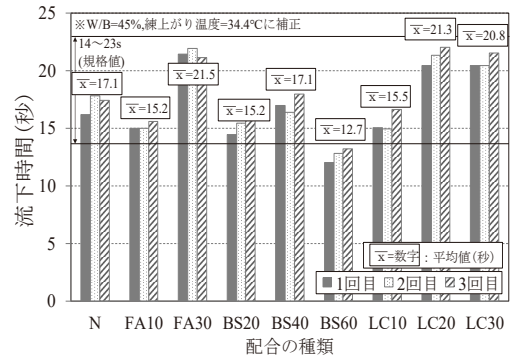


図-2 補正した流下時間

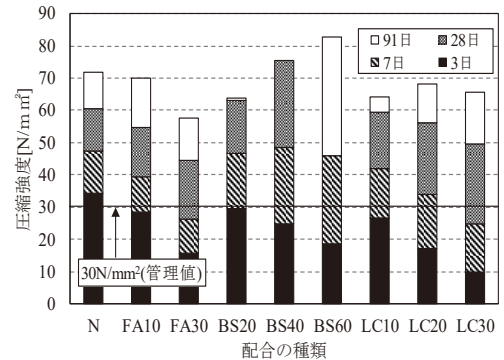
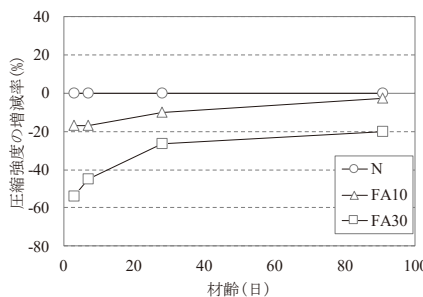
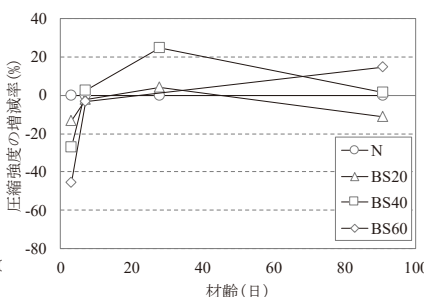


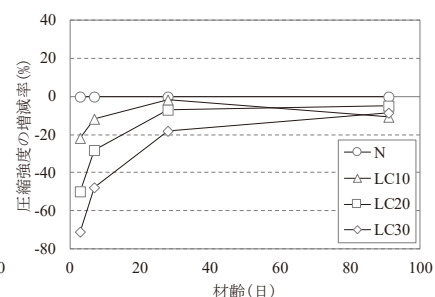
図-3 圧縮強度



a) フライアッシュ置換



b) 高炉スラグ置換



c) 併用置換

図-4 圧縮強度の増減率

-2.6N/mm²となっている。なお、BS60の材齢28日における圧縮強度試験については実施できていない。

図-4に圧縮強度の増減率を示す。N配合のPCグラウトの圧縮強度の増減率を0%とし、各配合における圧縮強度の増減率を示している。材齢3日における圧縮強度の増減率をみると、混和材置換率の増加とともに低下率が大きくなっている。これは単位セメント量の減少に起因するものである。N配合と比較して、フライアッシュ置換の場合は17%から54%、高炉スラグ置換の場合は13%から46%、併用置換の場合は22%から71%の範囲で圧縮強度は低下している。なお、材齢7日以降においては圧縮強度の低下率が材齢3日の場合に比して小さくなっている。材齢91日でのフライアッシュ置換、高炉スラグ置換および併用置換における圧縮強度の増減率をみると、フライアッシュ置換では3%から20%、高炉スラグ置換では-15%から12%、併用置換では5%から11%の範囲で圧縮強度が低下しているが、材齢3日に比してその低下率は小さくなっている。これはフライアッシュのポゾラン反応や高炉スラグの潜在水硬性によるものであると考えられる。

4. コストおよびCO₂排出量の算定

4. 1 コスト

PCグラウトのコストは各材料の単価に使用量を乗じて算出している。各材料の単価は月間建設物価より引用¹⁰⁾した。ポルトランドセメント、フライアッシュ、高炉スラグおよび混和剤の単価は、それぞれ9,600円/t、12,000円/t、8,000円/t、および1,610円/kgとした。練混ぜ水に関しては熊本市上下水道局ホームページ¹¹⁾から引用し988円/m³とした。図-5にPCグラウト1m³あたりのコストを示す。フライアッシュおよび高炉スラグ置換率の増加に伴いコストは減少している。なお、本研究内におけるPCグラウト1m³あたりのコストは32,576円/m³から34,066円/m³の範囲である。

4. 2 CO₂排出量

PCグラウトのCO₂排出量は各材料のCO₂排出原単位に使用量を乗じて算出している。各材料のCO₂排出原単位は、コンクリートの環境テキスト(案)[改訂版]¹²⁾より引用した。練混ぜ水、ポルトランドセメント、フライアッシュおよび高炉スラグのCO₂排出量は、それぞれ0.348kg-CO₂/t、769kg-CO₂/t、29.0kg-CO₂/t、および35.6kg-CO₂/tである。なお、混和剤に関しては、使用量が少量であることから対象から除外している。CO₂排出量の算出は、CO₂排出原単位に、各材料の使用量を乗じて行っている。

図-6にPCグラウト1m³あたりのCO₂排出量を示す。フライアッシュおよび高炉スラグ置換率の増加に伴いCO₂排出量は減少している。CO₂排出量の内訳は、いずれの配合においても97%以上をセメントが占めていることがわかる。なお、本研究におけるPCグラウト1m³あたりのCO₂排出量は404kg/m³から1002kg/m³の範囲である。

5. サステナビリティ評価

冒頭で論述した通り、サステナビリティは3つの側面を総合的に評価するものであり、本研究では圧縮強度、コストおよびCO₂排出量の3つの要素を扱いPCグラウトのサステナビリティ評価を行うこととした。本研究ではその評価を行うにあたり、圧縮強度、コストおよびCO₂排出量を余裕度指数、コスト指数およびCO₂指数として評価を行い、各配

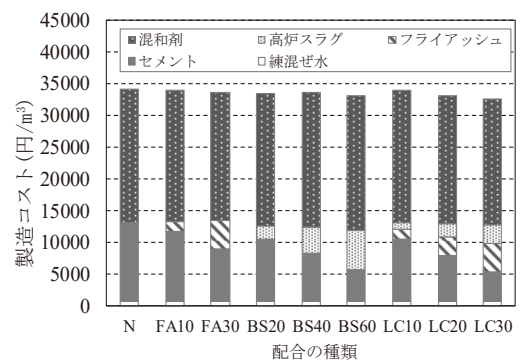


図-5 コスト

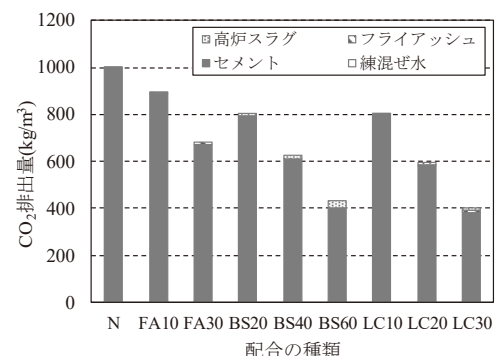


図-6 CO₂ 排出量

合におけるそれぞれの相互関係について明らかにすることとした。

各指数について詳述すると、余裕度指数は圧縮強度の標準的な管理値である材齢7日の30N/mm²を基準として算出した。すなわち、圧縮強度が30N/mm²の場合に余裕度指数は1.0となり、圧縮強度が高くなるとともに余裕度指数は高くなることを意味する。コスト指数およびCO₂指数は、N配合のコストおよびCO₂排出量を、各配合のコストおよびCO₂排出量で除すことで算出した。つまりN配合のコスト指数およびCO₂指数は1.0となり、N配合よりもコストおよびCO₂排出量が小さくなる場合にコスト指数およびCO₂指数は高くなることを意味する。

図-7に余裕度指数-コスト指数-CO₂指数の相互関係を示す。本論文では4配合の結果のみを示している。三角形の面積が大きいほど総合的に高い性能を意味しており、BS60配合は総合的に高い性能を有しているといえる。さらに同図から余裕度指数、コスト指数およびCO₂指数の相互の関係性は、混和材の種類によって異なることが明らかである。

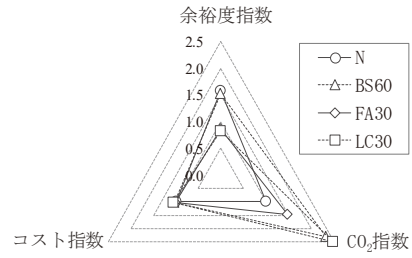


図-7 各指数の相互関係の一例

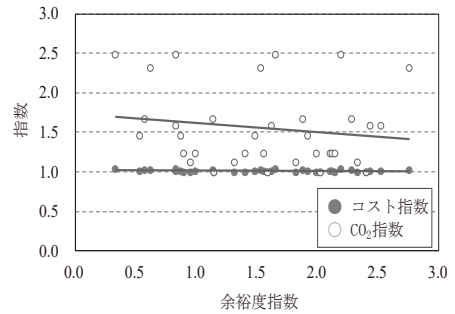


図-8 余裕度指数-コスト/CO₂指数の関係

図-8には余裕度指数の変化に伴うコスト指数およびCO₂指数の関係を示している。余裕度指数の値に関係なく、コスト指数はほぼ同じであることがわかる。一方、CO₂指数は余裕度指数の増加とともに減少する傾向にあるが、その値のばらつきは大きい。横田ら¹³⁾の文献によると、構造的観点から安全性の余裕度を高めれば、コストおよびCO₂排出量は線形的に増加することを明らかにしているが、本研究のような材料的観点からの検討では余裕度指数とCO₂指数の関係は必ずしも相関がみられない。本研究ではさらに、CO₂指数の変化を混和材の種類および材齢から、より詳細な検討を行っている。

図-9に各混和材を用いた配合における余裕度指数とCO₂指数の関係を示す。混和材別および材齢別に整理すると、全体的に余裕度指数の増加はCO₂指数を減少させている。この結果は横田ら¹³⁾と同様であり、安全性の余裕度を高めれば、CO₂排出量は増加することを意味している。しかしながら、高炉スラグ置換の材齢28日および91日では余裕度指数とCO₂指数の関係性が逆になっている。これは高炉スラグ特有の潜在水硬性が圧縮強度の増加に寄与したことに起因して余裕度指数を大きくしている。

混和材を用いたPCグラウトのサステナビリティ評価を行う場合、セメントの水和反応、フライアッシュのポズラン反応および高炉スラグの潜在水硬性等の化学作用が強度特性に影響するため、混和材料の種類に加え、材齢によっても3つの要素の相互関係性は異なることが明らかとなった。

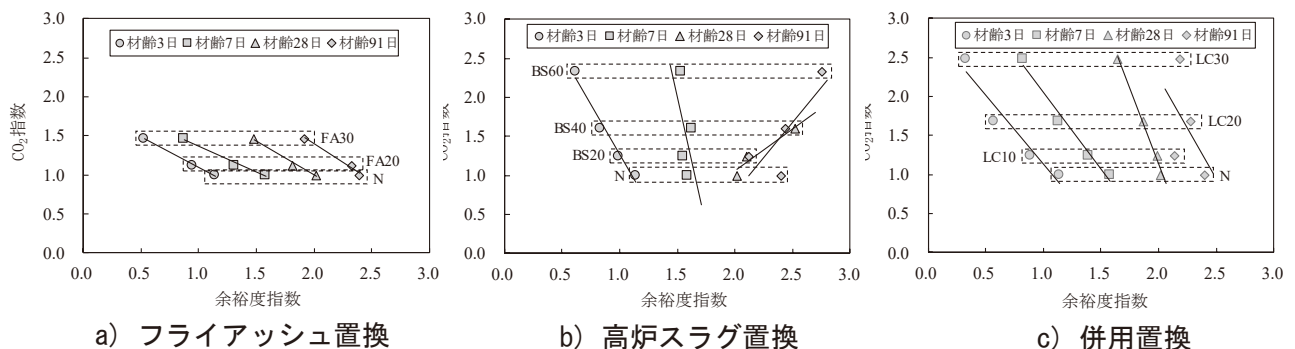


図-9 余裕度指数とCO₂指数の関係

6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1)フライアッシュおよび各混和材の併用置換では、最大20%の混和材置換の場合、流下時間は短くなるが、それ以上の置換をすると流下時間は長くなる。一方、高炉スラグ置換の場合、その傾向は異なる。
- (2)フライアッシュおよび高炉スラグの利用は、材齢3日における圧縮強度を13%から71%の範囲で低下させるが、材齢が経過するとともにその低下率は小さくなり、材齢91日における圧縮強度を-15%から20%の範囲で低下させる。
- (3)フライアッシュおよび高炉スラグを用いた場合のPCグラウトのコストは32,576円/m³から34,066円/m³の範囲であり、CO₂排出量は404kg/m³から1002kg/m³の範囲である。
- (4) PCグラウトのサステナビリティ評価における余裕度指数、コスト指数およびCO₂指数の相互の関係性は、混和材の種類および材齢によって異なる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省研究費補助金（基盤研究（C）（一般））、課題番号17K00607；研究代表者：松家武樹）および独立行政法人国立高等専門学校機構研究プロジェクト（若手研究；研究代表者：松家武樹）の助成により行った。

参考文献

- 1) K.Sakai and T.Noguchi : The Sustainable Use of Concrete, CRC PRESS, 2013
- 2) 堺孝司, 横田弘 : コンクリート構造物のサステナビリティ設計—地球環境と人間社会の不確実性への挑戦—, 技報堂出版, 2016
- 3) 日本規格協会 : JIS Q 13315-1 : コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメント—第1部 : 一般原則, 2017
- 4) 日本規格協会 : JIS Q 13315-2 : コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメント—第2部 : システム境界及びインベントリデータ, 2017
- 5) T.Matsuka, K.Sakai, K.Fukudome, Y.Suzuki : Pore structure and strength property of low-carbon concrete using fly ash and blast-furnace slag, Proceedings of the Seventh International Conference on Concrete under Severe Conditions (CONSEC'13), pp.207-217, 2013
- 6) 河野恭生, 松家武樹, 岩坪要, 堀井克章 : 尿素を用いたPCグラウトの諸特性, プレストレストコンクリート工学会第25回シンポジウム論文集, pp.125-130, 2016
- 7) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会 : PCグラウトの設計施工指針（改訂版）, 2012
- 8) 李春鶴, 山口光俊, 池田正志, 辻幸和 : 高炉スラグ微粉末の併用による高品質なPCグラウトの製造, プレストレストコンクリート技術協会第18回シンポジウム論文集, pp379-384, 2009
- 9) 山口光俊, 李春鶴, 辻幸和, 池田正志 : 高炉スラグ微粉末の併用により塩化物イオン量を低減したPCグラウトの製造, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.769-774, 2009
- 10) 一般財団法人建設物価調査会 : 月刊建設物価, 2016
- 11) 熊本市上下水道局 : 読み上げ用水道料金・下水道使用料金早見表（平成26年4月施行）, http://www.kumamoto-waterworks.jp/?waterworks_article=11123, (2017年4月20日アクセス)
- 12) 公益社団法人日本コンクリート工学会 : コンクリートの環境テキスト（案）〔改訂版〕, 2016
- 13) H.Yokota, S.Goto, K.Sakai : Parametric Analyses on Sustainability Indicators for Design, Execution and Maintenance of Concrete Structures, International Conference on Concrete Sustainability, 2016