

# 報告 フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンハイパフォーマンスコンクリートの試験施工

齋藤 淳\*<sup>1</sup>・堺 孝司\*<sup>2</sup>・福岡 紀枝\*<sup>3</sup>・榎原 彩野\*<sup>4</sup>

**要旨:** 結合材の質量割合をポルトランドセメント 60%, フライアッシュ 20%, 高炉スラグ微粉末 20%としたローカーボンハイパフォーマンスコンクリートを生コン工場で製造し, 実大構造物を築造する試験施工を行った。生コン工場での製造にあたっては, 高炉スラグ微粉末の代わりに高炉セメント B 種を用いて, 上記の結合材比率を実現した。また, 本コンクリートは, 通常のコンクリートと同様に製造, 運搬できること, および, 呼び強度を保証する材齢, 空気量の保持や仕上げの開始時期などに注意が必要であるものの, 通常のコンクリートと同様に打込み, 締固め, 仕上げ作業ができることを明らかにした。

**キーワード:** フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, CO<sub>2</sub> 排出量, サステナビリティ, ひび割れ抑制

## 1. はじめに

近年, あらゆる分野で低炭素技術の開発に向けた取り組みが活発に行われており, 建設産業においても, そのような活動の重要性が増してきている。建設産業における主要材料の一つであるコンクリートは, その構成材料の製造時に多量の CO<sub>2</sub> が排出されており, 環境負荷が大きな建設資材である<sup>1)</sup>。

2012 年 4 月には, コンクリート工学会を始めとした 7 つのコンクリート関連学・協会から「コンクリートサステナビリティ宣言」が発表された。その中で, 「社会のサステナビリティを実現するために, 安全なコンクリート構造物の実現を図ること」, 「コンクリート関連セクターにおける資源消費と CO<sub>2</sub> 排出の低減に向けた努力を続けること」および「コンクリート関連セクターとして, 資源循環に大きく貢献すること」などが宣言されている。

コンクリートの材料の中で最も CO<sub>2</sub> を排出する材料はセメントである。単位コンクリート当りのセメント量は, フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和材として用いることで低減できる。この方法は, CO<sub>2</sub> 排出量が少ないローカーボンコンクリートを実現する一つの有効な手段である。その代表的な例が, 高炉セメントやフライアッシュセメントなどの従来型の混合セメントである。

一方, 混和材の利用によるセメント量の低減はコンクリートが有するローカーボン性能を高める効果はあるが, 若材齢強度の低下や中性化速度の増大などの性能の低下を招くためフライアッシュや高炉スラグ微粉末の置換率には自ずと限界がある。近年, CO<sub>2</sub> 排出量の削減の観点から混和材をセメントに高置換する研究が行われているが, コンクリートの若材齢強度が著しく低下することな

どが報告<sup>2)</sup>されている。

今後, 混和材を利用していく上でコンクリートの「力学・耐久性能」と「ローカーボン性能」を両立することが重要であり, 両者のバランスのとれたコンクリートの開発が望まれている。

これまで筆者らは, 比較的少ない置換率のフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を併用した三成分系セメントを用いたコンクリートに対して様々な検討を行ってきた。その結果, 結合材の質量割合をポルトランドセメント 60%, フライアッシュ 20%, 高炉スラグ微粉末 20%とした場合に「力学・耐久性能」と「ローカーボン性能」がバランスよく得られることを見出した<sup>3)</sup>。

本論文では, 結合材の質量割合をポルトランドセメント 60%, フライアッシュ 20%, 高炉スラグ微粉末 20%としたローカーボンハイパフォーマンスコンクリート(以下, LHC と呼ぶ)を用いて, 実大構造物を築造する試験施工を行い, LHC の施工性能を検証した。

## 2. コンクリートの製造試験

### 2.1 コンクリートの製造方法および材料

コンクリートの製造は, レディーミクストコンクリート工場(以下, 生コン工場と呼ぶ)で行った。コンクリートの練混ぜには, 容量 3m<sup>3</sup>の水平二軸強制練ミキサを使用した。

LHC は, ポルトランドセメントに加えて, フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の 2 種類の混和材を結合材として用いるコンクリートである。一般的な生コン工場では, これらの 2 種類の混和材を常時保有しているところは少なく, これらの混和材のために貯蔵, 計量設備を

\*1 (株) 安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部 (正会員)

\*2 香川大学 工学部 安全システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 修(工) (正会員)

\*4 (株) 安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部 修(工) (正会員)

2 系統確保することは困難である。そこで、筆者らは、一般的な生コン工場で常時保有している高炉セメント B 種を高炉スラグ微粉末の代わりに用いて、LHC（結合材の質量割合：ポルトランドセメント 60%，フライアッシュ 20%，高炉スラグ微粉末 20%）を製造する方法を考案し、貯蔵設備の負担を減らした。

使用材料を表-1 に示す。所定量の材料のミキサ内への投入は、セメント、骨材、水および混和剤はプラント設備を用いた自動制御で行い、フライアッシュおよび膨張材は人力で行った。

## 2.2 コンクリートの配合

結合材として普通ポルトランドセメントのみを用いた配合（以下、NC と呼ぶ）、LHC、LHC に砂置換で膨張材を混入した配合（以下、LHC+EX と呼ぶ）の 3 種類を用いた。水結合材比は、当該生コン工場における呼び強度 24 の NC を参考に 54.5% とし、荷卸し時のスランプ、空

気量の管理値は、それぞれ  $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5\% \pm 1.5\%$  とした。コンクリートの配合および  $\text{CO}_2$  排出量<sup>4)</sup>を表-2 に示す。

## 2.3 製造試験の結果

### (1) スランプおよび空気量の経時変化

スランプおよび空気量の測定結果を図-1 および図-2 に示す。NC と比較して、LHC および LHC+EX では、スランプロスは小さくなっているが、空気量ロスは大い結果となった。本製造試験においては、一般用の AE 剤を用いた。一般的に知られているように<sup>5)</sup>、フライア

表-1 使用材料の品質

種類	記号	品質
普通ポルトランドセメント	N	密度： $3.15\text{g/cm}^3$ 比表面積： $3270\text{cm}^2/\text{g}$
高炉セメント B 種	BB	密度： $3.04\text{g/cm}^3$ 比表面積： $3680\text{cm}^2/\text{g}$
フライアッシュ II 種	FA	密度： $2.32\text{g/cm}^3$ 比表面積： $4100\text{cm}^2/\text{g}$
膨張材	EX	密度： $3.05\text{g/cm}^3$ 比表面積： $2860\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S1 (陸砂)	表乾密度： $2.58\text{g/cm}^3$ 吸水率：1.63%
	S2 (砕砂)	表乾密度： $2.69\text{g/cm}^3$ 吸水率：1.44%
粗骨材	G (碎石)	表乾密度： $2.69\text{g/cm}^3$ 吸水率：1.19%
AE 減水剤	AD	一般用、遅延形
AE 剤	AEn	一般用 (製造試験で使用)
	AEf	フライアッシュ用 (試験施工で使用)

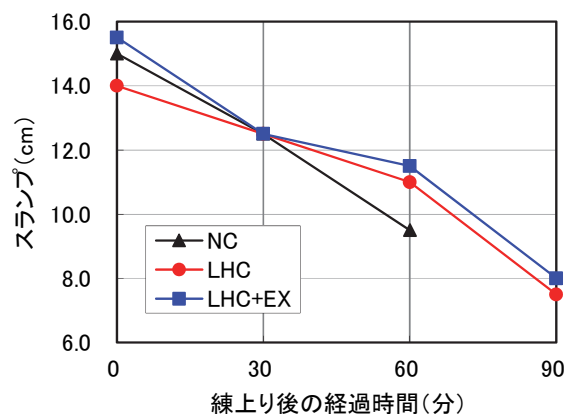


図-1 スランプ測定結果

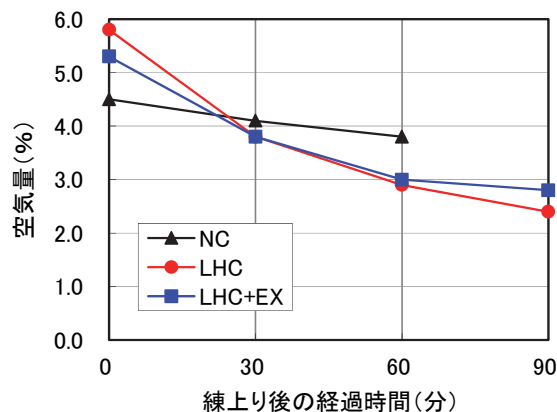


図-2 空気量測定結果

表-2 コンクリートの配合および  $\text{CO}_2$  排出量

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )								$\text{CO}_2$ 排出量 ( $\text{kg/m}^3$ )
					水	結合材(B)			細骨材			粗骨材	
						W	N	BB	FA	S1	S2		
NC	$12.0 \pm 2.5$	$4.5 \pm 1.5$	54.5	43.9	169	310	—	—	544	245	—	1038	243.6
LHC				43.8	158	94	138	58	551	246	—	1053	142.5 (41%低減)
LHC+EX				43.9	162	96	142	59	540	237	15	1043	157.3 <sup>※1</sup> (35%低減)

※1：膨張材の  $\text{CO}_2$  排出量の原単位は、ポルトランドセメントと同じ値とした。

ッシュ中の未燃焼炭素に AE 剤が吸着されたために、空気量ロスが大きくなったと考える。

したがって、LHC および LHC+EX の凍結融解抵抗性を確実に確保するためには、フライアッシュ用の AE 剤を用いることが望ましいといえる。

(2) ミキサの練混ぜ負荷

1 バッチ当りの練混ぜ量を 2.25m<sup>3</sup> とし、ミキサの負荷電力を計測した結果を図-3 に示す。セメント、骨材などの材料の投入に当たってミキサの負荷電力は上昇した。そして、練混ぜ開始から 20 秒程度経過した時点でピークに達し、経過時間 50 秒程度で、どの配合も一定の電力量となっていた。また、ピーク時および最終的に安定した電力値が、LHC+EX および NC と比較して LHC が大きい値を示していることは、LHC の練上り時のスランプが LHC+EX および NC より 1cm 程度小さいこと (図-1 参照) に対応している。

よって、各配合の練混ぜ負荷は同等であるといえる。

(3) 練混ぜの均一性

ミキサ内を右、中央、左に 3 分割し、それぞれの部分から練混ぜ直後のコンクリートを採取し、圧縮強度を測

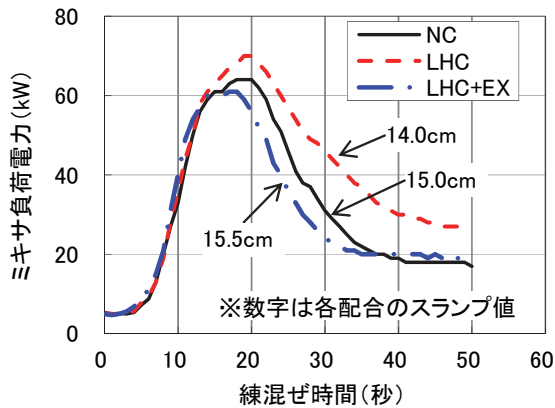


図-3 練混ぜ時のミキサの負荷電力

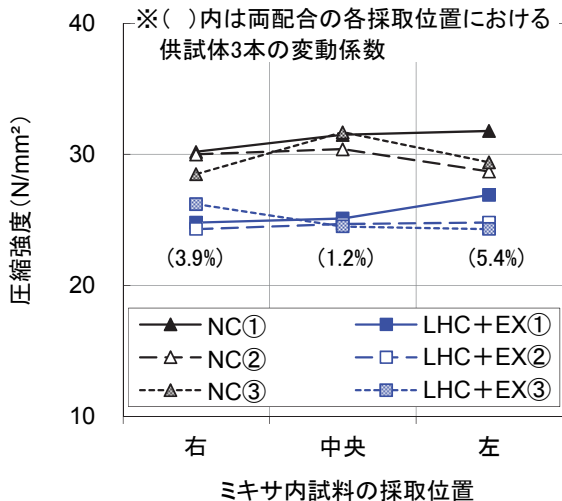


図-4 ミキサ内 3 箇所の圧縮強度 (材齢 28 日)

定した。NC を基準として、練混ぜ材料の種類が最も多い LHC+EX を比較した。材齢 28 日における圧縮強度の測定結果を図-4 に示す。両配合の各採取位置における 3 本の供試体の変動係数は 1.2~5.4% と小さい値であった。さらに、各配合の 9 本の供試体の変動係数は NC が 4.1%, LHC+EX が 3.6% であった。よって、両配合の圧縮強度のばらつきの程度は、同等かつ小さいことが確認できた。

また、スランプ、空気量についても、圧縮強度と同様の傾向であった。

以上のことより、LHC や LHC+EX のように、練混ぜ材料の種類が、通常のコンクリートよりも 2~3 種類多くなった場合でも、通常のコンクリートと同様に均一な練混ぜができるといえる。

3. 実大構造物の試験施工

3.1 試験施工の概要および配合

(1) 対象構造物と配合

安藤ハザマ技術研究所内に築造する図-5 に示す集積ピットを対象構造物とした。底版の寸法は幅 4.4m、長さ 10.0m、厚さ 0.2m であり、壁部は高さ 2.0m、厚さ 0.2m として 0.5~0.6m の凸部を 5 か所設けた。底版は LHC+EX、壁部は向って左側は NC、右側は LHC+EX を打ち込んだ。また、壁部の打込み日には、コンクリートの性能を比較

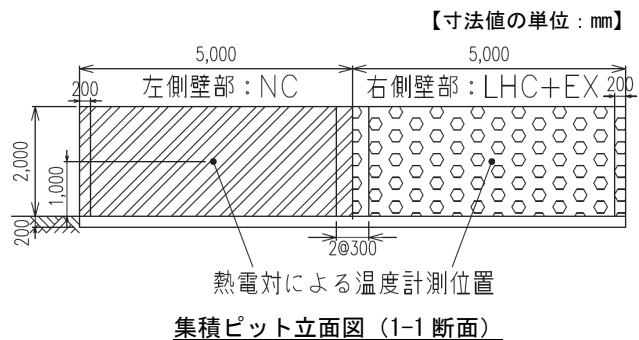
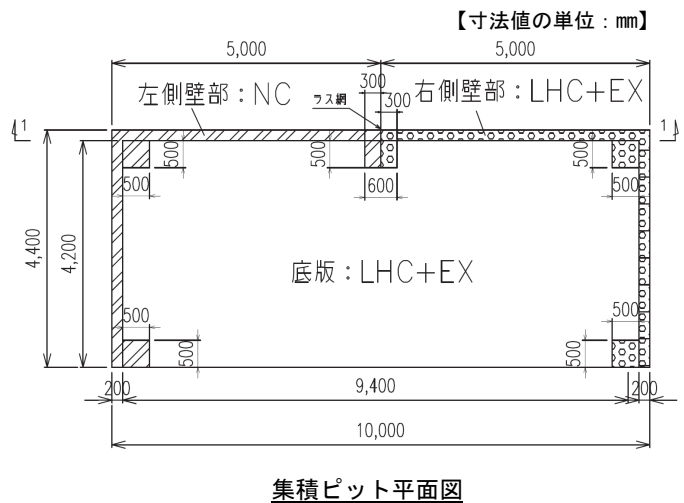


図-5 集積ピットの形状および配合区分

するために LHC も製造した。

なお、製造試験の結果を踏まえ、LHC および LHC+EX では AE 剤をフライアッシュ用に変更した。

(2) 試験施工の日時

コンクリートの打込みは、底版は 2013 年 8 月 5 日に行った。この日の外気温は 31.0~33.8℃であり、コンクリート温度は 31.0~34.0℃であった。一方、壁部はおよそ 1 か月後の 9 月 11 日に打込みを行い、外気温は 27.0~29.0℃、コンクリート温度は 27.5~30.0℃であった。

(3) 練混ぜ量と運搬時間

1 バッチの練混ぜ量は 2.12m<sup>3</sup> とし、2 バッチ 4.24m<sup>3</sup> を 1 台の生コン車に積んで運搬した。生コン車による運搬時間はおよそ 30 分であった。また、ポンプ車は標準の配管であり、4 インチ管でおよそ 20m の配管距離があった。

3.2 フレッシュ性状

(1) 生コン車運搬による変化

壁部コンクリートの練上り直後と現場荷卸し時におけるスランプ、空気量の測定結果を表-3 に示す。LHC および LHC+EX のスランプロス、空気量ロス、NC と同程度以下であることが確認できた。

(2) ポンプ圧送による変化

壁部コンクリートのポンプ圧送前後におけるスランプ、空気量の測定結果を表-4 に示す。LHC+EX のスランプロスおよび空気量ロスは、NC と同程度以下であることが確認できた。

3.3 打込み、締固めおよび仕上げ

コンクリートの打込み作業状況を写真-1 に示す。また、壁部コンクリートの打込み作業に要した時間を表-5 に示す。壁部コンクリートは 50cm ずつ 4 層に分けて打ち重ねた。1 層の打込みに要した時間は、NC が 18 分~26 分、LHC+EX が 17 分~26 分であり、相違は認められなかった。以上のことより、LHC+EX は通常のコンクリートと同様の打込み、締固め作業が実施できるといえる。

また、壁部コンクリート打込み時に行った凝結試験の結果を図-6 に示す。NC の始発時間は 5 時間 44 分であった。一方、LHC の始発時間は、NC より 1 時間 51 分遅れた 7 時間 35 分、LHC+EX は、NC より 2 時間 57 分遅れた 8 時間 37 分となった。

凝結が遅くなるメリットは、締固めが可能な時間が長くなるため、コールドジョイントやジャンカなどの締固め不良による不具合の危険性が少なくなることである。

一方、デメリットとしては、仕上げ開始時期が遅くなることがあげられる。現に、底版コンクリートの打込みでは、真夏の施工であるにもかかわらず、練上りから 4 時間 30 分程度経過するまで、金ゴテ仕上げを開始することができなかった。しかしながら、この課題については左官作業の開始予定時間を予め遅く計画するなど、施工

表-3 生コン車運搬によるスランプ、空気量の変化

配合名	スランプ (cm)			空気量 (%)		
	練上り	荷卸し	差	練上り	荷卸し	差
NC	18.0	11.0	-7.0	4.3	3.9	-0.4
LHC	16.5	13.0	-3.5	4.4	5.0	+0.6
LHC+EX	18.0	14.0	-4.0	4.4	4.4	±0.0

表-4 ポンプ圧送によるスランプ、空気量の変化

配合名	スランプ (cm)			空気量 (%)		
	圧送前	圧送後	差	圧送前	圧送後	差
NC	12.0	10.0	-2.0	3.4	3.6	+0.2
LHC+EX	14.5	14.0	-0.5	4.3	4.7	+0.4



写真-1 コンクリートの打込み作業状況

表-5 壁部コンクリートの打込み時間

配合名	1 層の打込み作業に要した時間			
	1 層目	2 層目	3 層目	4 層目
NC	18 分	26 分	18 分	21 分
LHC+EX	22 分	26 分	17 分	21 分

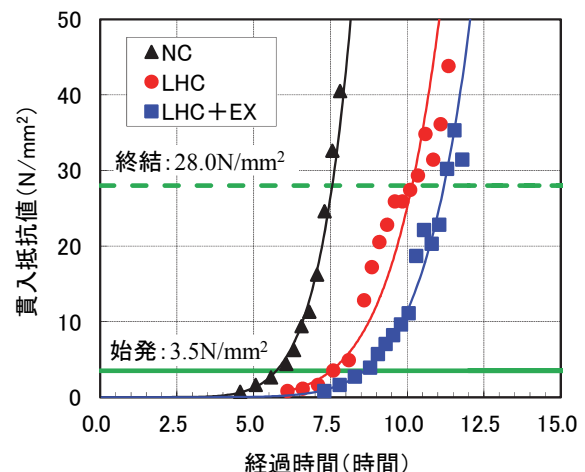


図-6 壁部コンクリートの凝結時間

計画の工夫で容易に解決することができる。

### 3.4 硬化コンクリート

#### (1) 外観

型枠解体後の集積ピットを写真-2に示す。LHC+EXで施工した底版コンクリートの仕上げ面は、一般的なコンクリートと同様な良好な状態であった。

また、壁部コンクリートの型枠解体後の鉛直面も、NCとLHC+EXで相違はなく、良好な状態であった。

#### (2) 温度ひび割れ

筆者らは既報<sup>3)</sup>で、断熱温度上昇試験などの実験結果に基づいた温度応力解析を行い、LHCはコンクリート温度をNCより低く抑えられることから、温度ひび割れ発生の危険性が低減できることを明らかにしてきた。

本試験施工においては、壁部コンクリートにNCおよびLHC+EXを用いたが、両者とも温度ひび割れの発生は認められなかった。

そこで、壁部コンクリートの内部温度をT型熱電対で測定した結果を図-7に示す。温度測定位置は、それぞれの配合について壁の中央部とした(前述した図-5参照)。

コンクリート内部の最高温度は、NCの45.7℃に対して、LHC+EXは41.7℃となり4.0℃低減した。このことから推察すると、温度ひび割れ発生の危険性もLHC+EXの方が低かったといえる。

#### (3) 圧縮強度

壁部コンクリートの圧縮強度試験結果とその近似式<sup>6)</sup>を併せて図-8に示す。材齢2日における圧縮強度は、NCの16.2N/mm<sup>2</sup>に対し、LHCは7.98N/mm<sup>2</sup>、LHC+EXは10.8N/mm<sup>2</sup>であり、NCの50~60%程度の値であった。しかしながら、最も値が小さいLHCでも鉛直面の脱型に必要な強度5N/mm<sup>2</sup>を材齢2日で十分に超えており、施工上の影響は少ないといえる。

材齢28日における圧縮強度は、NCの31.2N/mm<sup>2</sup>に対し、LHCは28.0N/mm<sup>2</sup>であり、NCのおよそ90%程度の値であった。しかしながら、材齢56日程度でNCの材齢28日強度を超え、長期的にはNCより大きな強度が得られるものと推察される。一方、LHC+EXの材齢28日強度はNCと同等の31.8N/mm<sup>2</sup>となり、その後はNCより強度が増進した。

#### (4) 静弾性係数

壁部コンクリートの静弾性係数の試験結果を図-9に示す。いずれの配合においても、土木学会式を若干下回る結果となったものの、配合間での相違は認められなかった。よって、LHCおよびLHC+EXの静弾性係数は、NCと同様に扱うことができるといえる。



写真-2 集積ピット

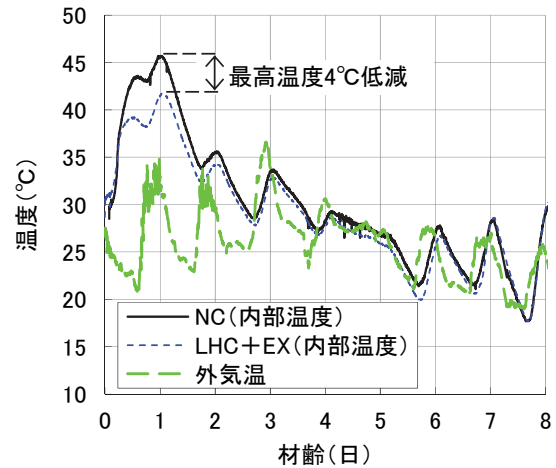


図-7 壁部コンクリートの内部温度

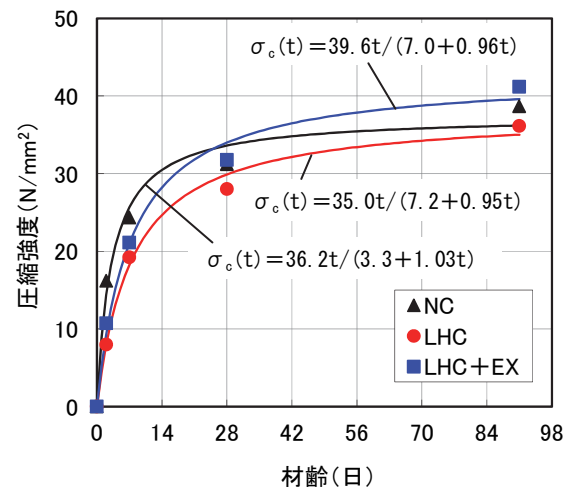


図-8 壁部コンクリートの圧縮強度

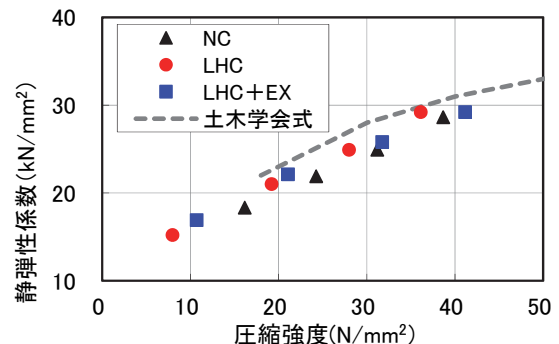


図-9 壁部コンクリートの静弾性係数

#### 4. 結論

LHC (結合材の質量割合:ポルトランドセメント 60%, フライアッシュ 20%, 高炉スラグ微粉末 20%) の施工性能を検証するために, 生コン工場で製造した LHC を現場まで生コン車で運搬し, ポンプ車で打込みを行って集積ピットを築造する試験施工を行った。本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) 生コン工場においては, 高炉スラグ微粉末の代わりに常備品である高炉セメント B 種を用いることで, 混和材貯蔵設備の負担を軽減できるとともに, 均一な品質の LHC および LHC+EX を製造することができる。
- (2) LHC および LHC+EX は, NC と同様な施工が実施できる。ただし, フライアッシュ用 AE 剤の使用, 呼び強度を保証する材齢および仕上げ面の左官作業開始時期については, 施工計画で配慮する必要がある。
- (3) 高炉スラグ微粉末の代わりに高炉セメント B 種を用いて, LHC あるいは LHC+EX を生コン工場で製造した場合においても, その品質特性はこれまでの室内試験結果<sup>3)</sup>と同様の傾向である。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: 特集 / CO<sub>2</sub>削減に向けて, コンクリート工学誌, Vol.48, No.9, pp.8-15, 2010
- 2) 大澤友広, 平田隆祥, 二戸信和, 仁見尚: 種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性と CO<sub>2</sub> 削減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.179-184, 2010
- 3) 例えば, 齋藤淳, 堺孝司, 鈴木康範, 福留和人; フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1537-1542, 2013
- 4) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案), コンクリートライブラリー125, pp.14-16, 2005
- 5) 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), コンクリートライブラリー94, pp.16-17, 1999
- 6) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.340-341, 2008