

論文 石炭灰を原料とした人工軽量骨材コンクリートのポンプ圧送性と構造体コンクリート強度特性

笠井 浩^{*1}・和美 廣喜^{*2}・藤木 英一^{*3}・富岡 一則^{*4}

要旨：石炭灰の有効利用技術の一環として、石炭灰と頁岩微粉末を主原料とした人工軽量骨材が最近開発された。W/C30～45%の範囲で、この骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性と構造体コンクリートの強度特性について実験研究を行った。その結果、本骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性は碎石コンクリートとほぼ遜色がなかった。また W/C30%の材齢 91 日における構造体コンクリートのコア供試体強度は 75.5～79.4 N/mm² の範囲にあり、Fc60 N/mm² レベルのコンクリートに適用できる見通しを得た。
キーワード：石炭灰、人工軽量骨材、高強度、ポンプ圧送性、構造体コンクリート

1. はじめに

石炭火力発電所等から排出される石炭灰の有効利用技術の一環として、最近、石炭灰と頁岩微粉末を主原料とした人工軽量骨材が開発された。この骨材は二成分の原料を用いているため、これらの混合比を変えることによって、圧壊強度、吸水率及び密度が変えられるのが特長である¹⁾。

また、石炭灰と頁岩微粉末の配合割合を 60：40 程度に調整することによって、軽量、高強度、高保水性を有した骨材（以下、J ライトと略す）が得られ、この骨材を用いたコンクリートは、強度特性、ひび割れ抵抗性、中性化抵抗性等において種々の良好な効果が確認されている²⁾³⁾。

J ライトの絶乾密度は、1.5g/cm³ 程度で既存の軽量骨材の領域であるため、これをコンクリートに用いた場合のポンプ圧送性を確認することは極めて重要である。

一方、J ライトの高強度特性を活かすために、筆者らは Fc60N/mm² までの高強度コンクリートを目指している。したがって、その実現性を把握するために、構造体コンクリートの強度特性を確認する必要がある。

以上のことから、本研究では呼び強度が 60N/mm² 程度までの現場打ち高強度コンクリートを対象に、水平配管によるポンプ圧送性およびポンプ圧送後の構造体コンクリートの強度特性を究明することを目的に、実験検討を行った。

2. J ライトコンクリートのポンプ圧送性に関する実験

2.1 圧送実験計画概要

図-1 に実験用水平配管を示す。コンクリートポンプはピストン式で、最大理論吐出量 110m³/h、最大理論吐出圧 22.0Mpa を用いた。

輸送管は、管径 125mm、管厚 9mm のものを使用した。配管は水平実長 60m とし、ポンプ根元部（P1）、中間部（P2）、筒先部（P3）にそれぞれ圧力検出管を設置し、圧送時の管内圧力を測定した。管内圧力は、同一調合のコンクリート 5m³ について、計画吐出量を 20～50 m³/h の範囲で段階的に変化させて測定した。

ポンプの実吐出量は、3.5 m³ のコンクリートを計画吐出量 30 m³/h で圧送したときの容積効率から求めた。

*1 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産グループ

主任研究員 工修(正会員)

*2 島根大学総合理工学部 材料プロセス工学科

教授 工博(正会員)

*3 日本メサライト工業(株) 技術部

部長 (正会員)

*4 常磐共同火力(株)勿来発電所 土木建築グループ

課長

2.2 コンクリートの使用材料及び計画調査

使用材料を表-1に、コンクリートの計画調査を表-2に示す。

コンクリートの調合は水セメント比を30～45%とし、使用材料はセメントが普通ポルトランドセメント(O)と低熱ポルトランドセメント(L)とした。粗骨材はJライト(J)と碎石(N)とした。Jライトは絶乾密度 1.40 g/cm^3 、使用時吸水率9.3%である。Jライトは骨材製造後に散水等でプレソーキングしたものである。

2.3 コンクリートの製造

コンクリートは、生コン工場の実機プラントで製造したものをを用いた。コンクリートの練り混ぜ時間は、水セメント比45%の場合、全材料投入後、60秒間とした。水セメント比35%以下の場合、モルタルを70秒間先練りし、それに粗骨材を投入した後50秒間練り混ぜた。

2.4 圧送関連のコンクリート試験概要

ポンプ圧送前後の品質変化を把握するため、スランプ、スランプフロー、空気量などのフレッシュコンクリート試験を行った。また、硬化コンクリート用の供試体を採取し、標準養生後に材齢28日および91日圧縮強度試験を行った。圧送に先立ち、図-2に示すような回転翼型粘度計⁴⁾を用いて、コンクリートの流動特性値を測定した。ここに、 g 、 h はそれぞれフレッシュコンクリートをビンガム流体とみなした場合の見掛けの降伏値と見掛けの塑性粘度である。

2.5 実験結果及び考察

(1) 回転翼型粘度計による圧送前の流動特性値

回転翼型粘度計による圧送前のフレッシュコンクリートの流動特性を図-3に示す。図-2に示す g 、 h を図-3に適用すると、Jライトコンクリートの見掛けの塑性粘度、降伏値は、碎石コンクリートに比し、何れも小さい値を示した。W/C45%の碎石コンクリート(ON45)の見掛けの降伏値は、他のコンクリートよりも大きな値を示したが、これはON45のスランプが20.5cmであるのに対し、その他のコンクリートのスランプが23cm以上であったためである。

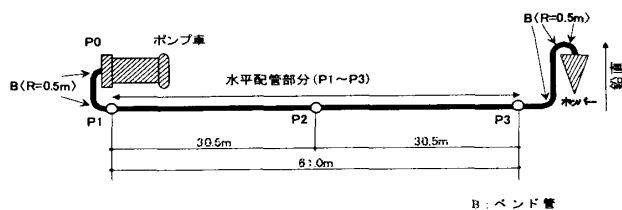


図-1 ポンプ圧送実験用水平配管

表-1 使用材料

材 料	種 類・品 質
セメント	普通ポルトランドセメント(H社製:密度 3.15 g/cm^3)
	低熱ポルトランドセメント(T社製:密度 3.22 g/cm^3)
細骨材	いわき市産山砂(表乾密度 2.58 g/cm^3 、吸水率 2.55% 、粗粒率 2.78%)
粗骨材	いわき市産碎石(表乾密度 2.75 g/cm^3 、吸水率 0.505% 、実積率 56.8%)
	Jライト(M社製:絶乾密度 1.40 g/cm^3 、使用時吸水率 9.3% 、24時間吸水率 4.8% 、 5 N/mm^2 加圧時吸水率 22.9% 、粗粒率 6.35%)
混和剤	高性能AE減水剤(P社製:ポリカルボン酸系)、AE助剤(P社製)
水	いわき市工業用水

表-2 コンクリートの計画調査

No.	※1) 記号	目標強度 (N/mm^2)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	質量(kg/m^3)			高性能 AE減水剤
						C	S	G ^{※2)}	
1	ON45	30	45	50	170	378	859	913	C×0.9%
2	ON30	60	30	46	170	567	735	921	C×2.4%
3	OJ45	30	45	50	170	378	852	462	C×0.75%
4	OJ35	48	35	50	170	486	834	452	C×1.5%
5	OJ30	60	30	50	170	567	800	434	C×2.2%
6	LJ30	60	30	50	170	567	805	437	C×0.9%

※1) 記号: O=普通ポルトランドセメント, L=低熱ポルトランドセメント, N=碎石, J=Jライト

※2) Jライトは絶乾密度表示

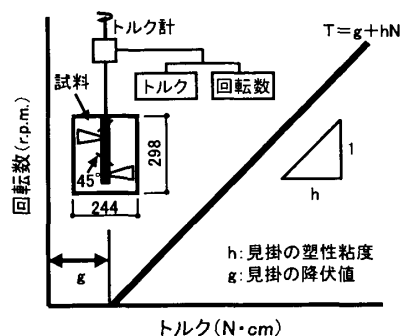


図-2 回転翼型粘度計

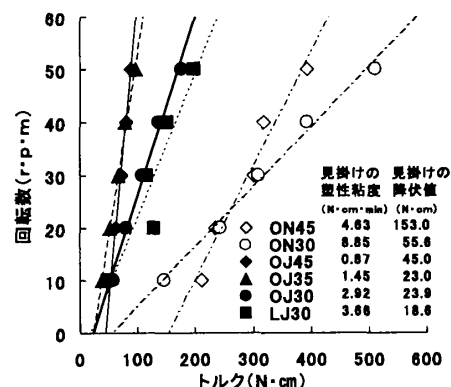


図-3 コンクリートの流動特性

表-3 圧送前後のコンクリート品質変化と容積効率

No.	記号	採取地点	W/C (%)	目標スランブ・スランブフロー (cm)	目標空気量 (%)	フレッシュコンクリート試験							圧縮強度試験			粗骨材吸水率試験 (%)	容積効率 (%)
						スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	平均空気量* (cm)	空気量* (%)	C.T. (°C)	単位容積質量 (kg/m³)	外気温 (°C)	材齢28日 (N/mm²)	材齢91日 (N/mm²)			
1	ON45	圧送前	45	スランブ 21±2.5	4.5±1.5	20.5	32.5 × 31.5	32.0	4.3	27.5	2320	27.0	48.0	56.4	1.64	80.9	
		圧送後				14.0	25.5 × 25.0	25.3	6.1	30.9	2235		40.7	47.8	1.99		
2	ON30	圧送前	30	スランブフロー 60±7.5	3±1.5	—	58.0 × 57.5	57.8	1.9	30.0	2430	27.9	85.0	96.1	1.77	85.9	
		圧送後				27.0	57.5 × 57.5	57.5	3.2	32.3	2418		85.5	92.6	1.34		
3	OJ45	圧送前	45	スランブ 21±2.5	5±1.5	22.5	43.0 × 43.0	43.0	4.1	28.0	1880	28.3	37.3	43.0	1.19	78.8	
		圧送後				21.5	38.0 × 38.0	38.0	5.7	31.4	1899		31.0	35.5	1.43		
4	OJ35	圧送前	35	スランブフロー 55±7.5	3±1.5	—	59.0 × 58.0	58.5	3.1	29.0	1900	26.9	55.2	63.6	1.21	77.8	
		圧送後				25.0	50.0 × 49.5	49.8	4.9	32.4	1913		54.2	64.7	1.31		
5	OJ30	圧送前	30	スランブフロー 60±7.5	3±1.5	—	62.0 × 60.0	61.0	2.1	31.0	1980	27.5	78.7	84.4	1.18	83.2	
		圧送後				26.5	54.0 × 55.0	54.5	3.2	33.2	1987		80.0	91.0	1.23		
6	LJ30	圧送前	30	スランブフロー 60±7.5	3±1.5	—	66.5 × 62.5	64.5	2.5	27.0	1980	27.5	82.1	80.1	10.7	76.9	
		圧送後				24.0	44.0 × 44.0	44.0	3.4	29.4	1997		56.8	73.0	14.2		

* Jライトの空気量は、骨材修正係数1.5%を減じた値で示している。

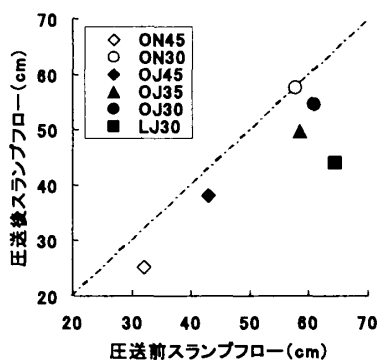


図-4 スランブフロー変化

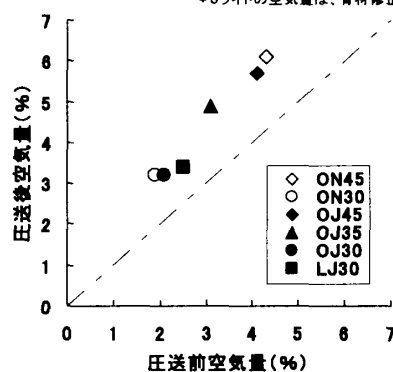


図-5 空気量の変化

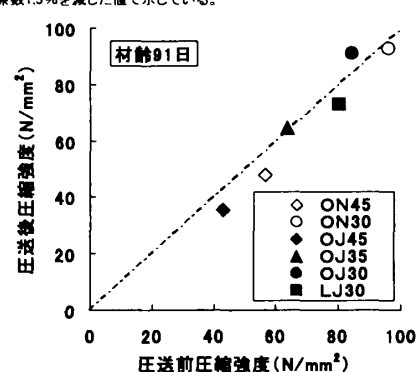


図-6 圧縮強度の変化

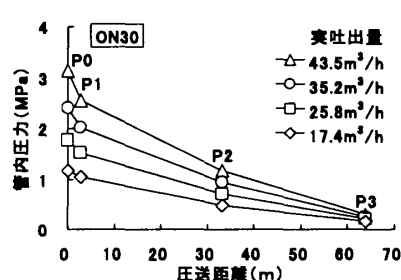
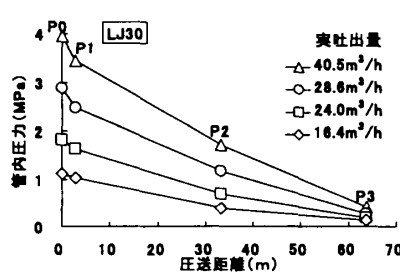
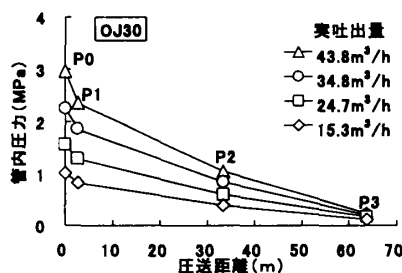


図-7 管内圧力測定の一例

(2) 圧送前後のコンクリートの品質変化

圧送前後のコンクリートの品質変化に関する結果を一括して表-3に示す。図-4に、圧送前後のスランブフローの変化を示す。J ライトコンクリートのスランブフローは圧送によって低下する傾向にあった。これは、骨材の圧力吸水によるものである。図-5に、圧送前後の空気量の変化を示す。J ライトコンクリートおよび碎石コンクリートの空気量は、圧送によって1.1~1.8%程度大きくなった。この理由は明らかでないが、低水セメント比で、かつ多量の混和剤を用いているので圧送によりエントラップドエアが導入されたことが考えられる。図-6

に圧送前後の圧縮強度の変化を示す。圧送前後のコンクリートの圧縮強度は、同等か圧送後にやや低下した程度で、ほとんど大差なかった。今回の実験では、圧送による空気量の増大が、圧縮強度に及ぼす影響は小さいと言える。

(3) ポンプ圧送性

管内圧力の測定結果の一例を図-7に示す。何れのコンクリートも管内圧力は、直線配管区間においてやや下に凸の分布を示した。この結果を基に、P1-P2の区間の平均的な圧力損失を求め、実吐出量と圧力損失の関係において整理したものが図-8である。これより、水平管の圧力損失は実吐出量に比例して大きくなる傾

向を示した。また、この関係は使用材料や水セメント比により大きく異なっていた。W/C30%における OJ30 と ON30 の圧力損失勾配は、ほぼ同様な傾向を示していた。一方、W/C45%における OJ45 の圧力損失勾配は、ON45 よりも小さい傾向を示した。OJ45 は圧送負荷が ON45 よりも小さいことから、ポンプ圧送性に有利である。低熱ポルトランドセメントを用いた LJ30 の圧力損失は、その他のものに比べ著しく大きな値を示した。この理由として LJ30 は、わずかな高性能 A E 減水剤の添加量の増減でスランプフローの変化が大きくなり、また練混ぜ後の時間の経過と共にスランプフローが著しく大きくなり、分離状態で管内を流動しているため、圧力損失が大きくなったものと考えられる。

今回の実験における圧送状況を詳細に見ると、コンクリートが正常に圧送されている場合にはコンクリートが管全断面において固体栓を形成して吐出されるのに対し、LJ30 のコンクリートは、フロー値が大きく分離気味で、管径よりも細い栓流で吐出されていることが観察された。

ここで、LJ30 を除き、図-8 の結果から実吐出量ごとに見掛けの塑性粘度と圧力損失の関係を整理したのが図-9 である。J ライトコンクリートの圧力損失と見掛けの塑性粘度の間には既往の研究⁴⁾と同様に良い相関が認められた。

J ライトコンクリートは、今回の強度範囲においては、見掛けの塑性粘度が大きくなることがないので、砕石コンクリートとほぼ同等の圧送性になることが推察される。

3. 構造体コンクリート強度特性に関する実験

3.1 実験計画概要

J ライトを用いた構造体コンクリートの強度特性を把握するため、表-2 に示すポンプ圧送後の各種コンクリートについて、a)標準養生 b)柱模擬試験体コア c)簡易断熱型枠養生の3種類の養生条件で圧縮強度の比較を行った。なお、ON45 は上述の b)、c)の養生による強度試験は実施しなかった。

3.2 実験方法

(1) 標準養生の圧縮強度試験

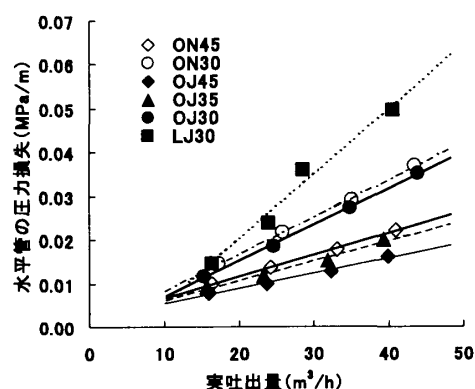


図-8 実吐出量と圧力損失の関係

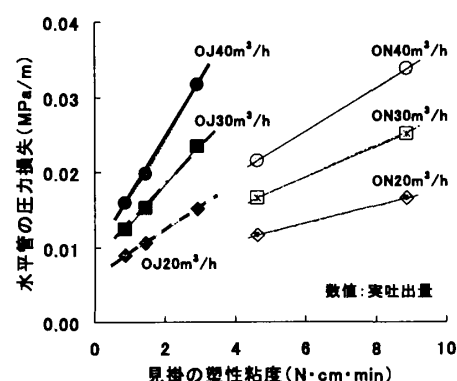


図-9 見掛けの塑性粘度と圧力損失の関係

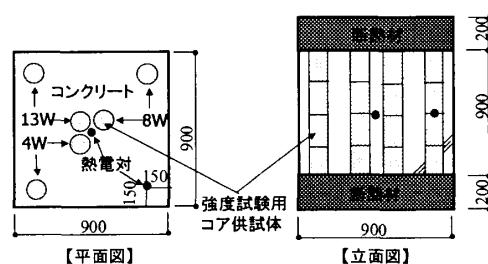


図-10 柱模擬試験体の外観

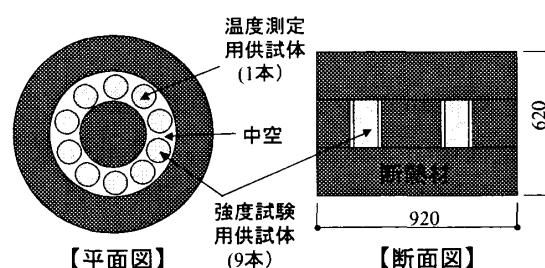


図-11 簡易断熱型枠の外観

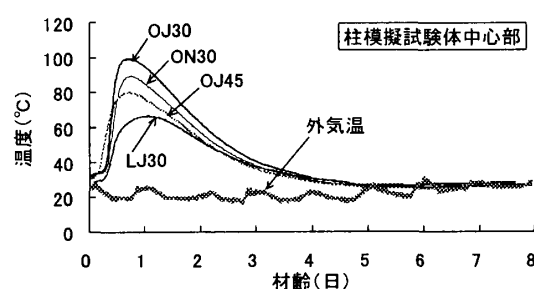


図-12 柱模擬試験体の温度履歴（中心部）

標準養生圧縮強度供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱とし、試験はJIS A 1108に準じた。

(2) 構造体コンクリート強度試験

柱模擬試験体は、図-10に示すように $900 \times 900 \times 900\text{mm}$ とし、上下面を厚さ 200mm の発泡スチロール断熱材で養生し、所定のコア抜き材齢まで屋外に暴露した。なお、図-10の●位置に熱電対をセットし温度履歴を測定した。コア抜きは、試験体上部から垂直方向に $\phi 100 \times 900\text{mm}$ の円柱コアを1材齢あたり2本(中心部及び周辺部)とし、各々のコアから $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の供試体を4本成型した。

(3) 簡易断熱型枠養生による強度試験

図-11に示す円柱型の発泡スチロール型枠⁵⁾に、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の供試体を10本セットし、所定の試験材齢まで柱模擬試験体と同じ位置で屋外に暴露した。供試体の1本は熱電対を挿入し温度履歴を測定した。

3.3 実験結果及び考察

(1) 柱模擬試験体及び簡易断熱型枠の温度履歴

柱模擬試験体の温度履歴を図-12～13に、簡易断熱養生型枠の場合を図-14に示す。柱模擬試験体中心部の温度履歴は、コンクリート打込み後、LJ30を除き、急激に温度が上昇し約16～17時間で最高温度に達し、その後徐々に温度は、降下し材齢5日で外気温に収束した。低熱セメントを用いたLJ30の場合は、25時間で最高温度に達し、最高温度は他のコンクリートの約60%程度だった。また、OJ30の最高温度は約 100°C に達し、ON30より約 10°C 高かった。

各種コンクリートの柱模擬試験体周辺部の温度履歴は、中心部と同様な傾向を示したが、OJ30の最高温度は 80°C でON30とほぼ同温であった。Jライトコンクリートの周辺部最高温度は中心部の約80%で、砕石コンクリートの場合は約90%であった。これより、周辺部は外気温の影響を受けている。図-12において、OJ30の最高温度はON30より高いのはJライトの熱容量が砕石よりも小さい影響によるものである。

簡易断熱型枠養生の温度履歴及び最高温度は、

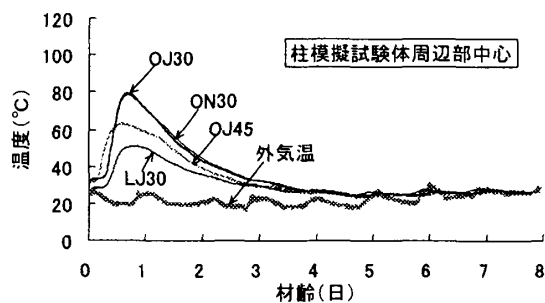


図-13 柱模擬試験体の温度履歴(周辺部)

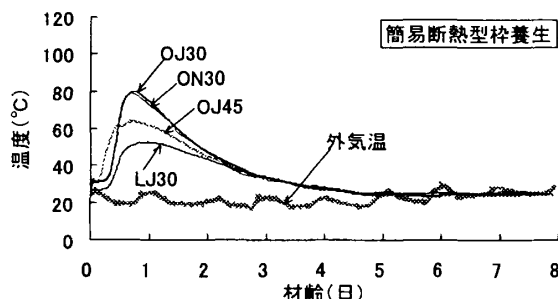


図-14 簡易断熱型枠養生供試体の温度履歴

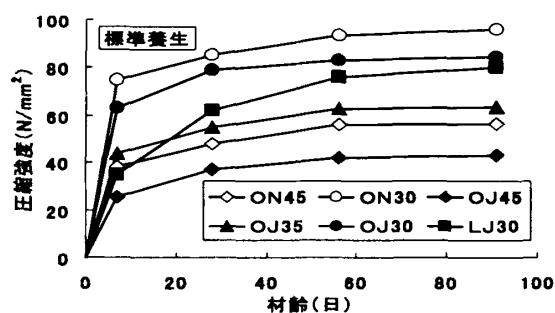


図-15 材齢と圧縮強度(標準養生)

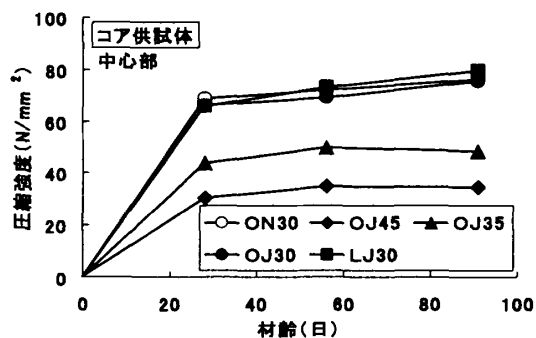


図-16 材齢と圧縮強度(コア供試体中心部)

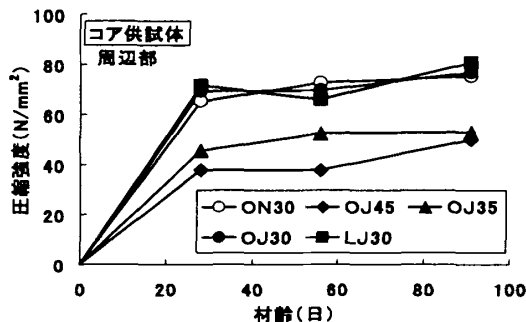


図-17 材齢と圧縮強度(コア供試体周辺部)

柱模擬試験体周辺部の場合とほぼ同様であった。

(2) 各種コンクリートの圧縮強度試験結果
養生条件の違いにおける材齢と圧縮強度の関係を図-15~18に示す。標準養生コンクリートの圧縮強度は、材齢と共に増進し、W/C30%及び45%共に碎石コンクリートの方がJライトコンクリートより大きい傾向にあった。

コア供試体強度は材齢と共に増進し、特に図-16に示す柱中心部の場合は、材齢91日においてLJ30で79.4N/mm²、OJ30で75.5N/mm²、ON30で76.3N/mm²であった。Jライトコンクリートのコア供試体強度は碎石コンクリートと同等と認められる。簡易断熱型枠養生による強度は、コア供試体強度とほぼ同様な傾向だった。

(3) 構造体コンクリートの強度評価

Fc36N/mm²を超えるような構造体コンクリートの強度評価は、現場水中養生強度で評価することは必ずしも適切でなく、材齢91日のコア供試体強度を材齢28日標準養生強度で除した値（構造体強度補正係数：K値と略す）で構造体強度の補正を行っている。K値は、過去の多くの実績から定めた値であり、普通セメントを用いた場合K=0.85、低熱セメントを用いた場合K=1.0を用いている⁶⁾。図-19は、履歴最高温度を横軸にK値を縦軸に示したものである。普通セメントを用いたOJのK値は、ONと同等であり、0.85に設定できる。低熱セメントを用いたLJのK値は、1.0以上に設定できる。Jライトを用いた高強度コンクリートのK値は、碎石を用いた場合と同等に評価できるが、今後多くの実験データを蓄積する必要がある。

4. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) Jライトコンクリートのポンプ圧送後のスランプフローは低下する傾向にある。
- 2) Jライトコンクリートの見掛けの塑性粘度は碎石コンクリートよりも小さく、このポンプ圧送性は碎石コンクリートとほぼ遜色がない。
- 3) W/C30%で材齢91日のJライトコンクリートのコア強度は75.5~79.4N/mm²であった。

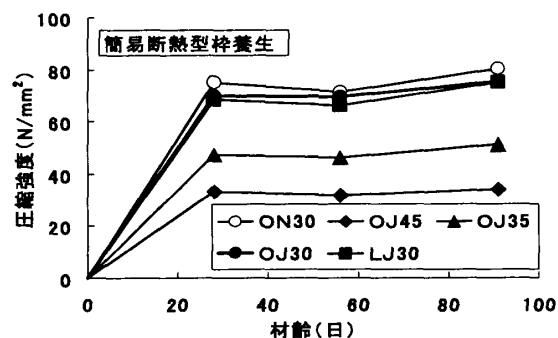


図-18 材齢と圧縮強度（簡易断熱型枠養生）

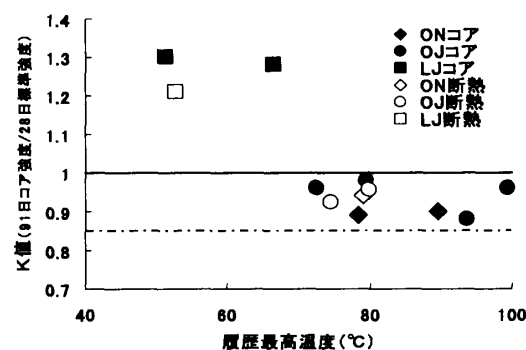


図-19 履歴最高温度とK値の関係

- 4) Jライト高強度コンクリートの構造体強度補正係数は碎石コンクリートと同等に設定できる。

参考文献

- 1) 石川寛範, 藤木英一, 田中公徳, 和美廣喜: 石炭灰を用いた人工骨材の製造方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.253-258, 2000
- 2) 笠井浩, 和美廣喜, 新井一彦, 森田哲: 石炭灰人工骨材を用いたコンクリートのセルフキュアリング効果に関する実験研究, Vol.22, No.2, pp.1273-1278, 2000
- 3) 笠井浩, 和美廣喜ほか: 石炭灰の資源化に関する研究(その4) 石炭灰人工骨材の耐久性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.609-610, 2000.9
- 4) 和美廣喜, 桜本文敏, 柳田克巳: 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, 11-20, 1994.12
- 5) 柳田克巳, 和美廣喜ほか: 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの水和熱養生条件下における強度特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.727-728, 1991.9
- 6) 桜本文敏, 富田彰則ほか: 高ビーライト系セメントを用いた Fc=600kgf/cm² の高強度コンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.34, No.9, pp.31-39, 1996.9