

論文 高温加熱を受けた軽量コンクリートの力学的性質

一瀬賢一^{*1}・川口 徹^{*2}・長尾覚博^{*3}・河辺伸二^{*4}

要旨:高温加熱を受けた軽量コンクリートの力学的性質について、水セメント比、加熱温度をパラメータとして実験的に検討し、以下のことを明らかにした。

(1) 加熱温度が高いほど圧縮強度、ヤング係数は低下する。残存比で比べると、水セメント比の大きいものの方が加熱温度に伴う強度、ヤング係数の低下の割合は小さい。(2) 加熱温度600°C後の残存比は、圧縮強度が常温の40%以上、ヤング係数が20~40%を確保した。(3) 高温加熱後の動弾性係数とヤング係数の相関性は高い。(4) 最大応力度におけるひずみは、加熱温度200°C以上での増加が小さく、普通骨材使用のコンクリートと大きく異なる。

キーワード:軽量コンクリート、冷間試験、力学的性質、圧縮強度、ヤング係数

1. はじめに

建築分野における軽量コンクリートは、高層事務所建物の床やコンクリート製プレキャストカーテンウォール（以下PCCWと略す）に多く使用されている。近年、人工軽量骨材の更なる軽量化やマトリックス部分の高強度化により、密度1.2~1.6g/cm³、圧縮強度30N/mm²以上のコンクリートおよびモルタルが開発されてきている。この軽量かつ高強度に注目して、PCCWだけでなく、鉄筋コンクリート部材の構造性能の把握¹⁾、道路橋床版や浮体構造物など構造体コンクリートへの適用性の検討が行われている。実施例としては、土木構造物には吊り床版歩道橋や鉄道橋などに適用されているが、建築構造物ではPCCWに採用されているにすぎない。しかし将来的には高層建物の施工の効率化、耐震性の向上などの面から高強度・軽量コンクリートが採用されるようになると推察する。建築では、耐火性は部材の要求性能として重要な要素であり、火災時・火災後における部材の耐力を推定することが重要となる。またこの耐力推定においては、高温加熱を受けたコンクリート物性の把握が重要となる。しかし従来の軽量コン

クリートについては、幾つか実験・検討²⁾が行われているものの、密度1.2~1.6g/cm³の軽量コンクリートにおける高温加熱を受けたコンクリート物性データは、まだ報告されていない。

このような背景から本研究は、高温加熱を受けた軽量コンクリート（密度1.2~1.6g/cm³）の力学的性質を中心に、加熱温度、水セメント比をパラメータとして、実験的に検討・考察したものである。

2. 実験概要

2.1 実験の組合せ

実験の組合せは、表-1に示す水セメント比3水準（W/C=50%, 40%, 30%）、加熱温度7水準（常温20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C）とした。W/C=30%については、細骨材を超軽量骨材とした場合についても実施した。

2.2 使用材料および調合

使用材料は、セメント（C）として普通ポルトランドセメント、粗骨材には膨張頁岩に発泡材を混合し、造粒、焼成した人工超軽量骨材（SLG）、細骨材には通常の軽量コンクリートに使用されている膨張頁岩の人工軽量骨材（LS）と膨張頁

*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室主任研究員 工修(正会員) *2 同室長 工博(正会員)

*3 同主席研究員 工博(正会員) *4 名古屋工業大学助教授 大学院工学研究科 工博(正会員)

岩微粉末にパーライト微粉末および発泡材を混合し、造粒、焼成した人工超軽量骨材（SLS）の2種類を使用した。骨材の品質を表-2に示す。なおSLGとLSの組合せをLシリーズコンクリート（L50, L40, L30), SLGとSLSの組合せをSLコンクリート（SL30）とした。混和剤は、W/C=50%, 40%にはリグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を主成分とするAE減水剤、W/C=30%にポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体を主成分とする高性能AE減水剤を使用した。また空気量の調整は、空気量調整剤にて適宜行った。

コンクリートの調合条件は、単位水量175kg/m³とした。コンクリートのフレッシュ性状としてW/C=50%と40%については、目標スランプを15cm, W/C=30%については、目標スランプフローを50cmとした。目標空気量は、総て5%とした。コンクリートの調合を表-3に示す。なお表中の骨材の単位量は、絶乾質量を示す。また超軽量骨材は、絶乾状態のものを使用し、表-2に示す30分後の含水率に相当する水量を練り混ぜ時に補正した。

2.3 供試体の製作および養生方法

コンクリートは、容量100lのパン型強制練りミキサを用いて練り混ぜ、供試体を製作した。打設直後の供試体は、20°C, 80%RHの恒温恒湿室で湿潤養生とし、翌日封かん養生として実験開始材齢91日まで20±3°C, 60±5%RHの恒温恒湿室で養生した。

2.4 加熱条件

加熱は、プログラム調節器付き電気炉で行った。加熱速度は、既往の加熱後載荷試験（以下冷間試験）によれば、概ね50~500°C/hrの範囲で設定される場合が多い。また加熱後の力学的性質の把握を主眼とする実験の場合は、50~150°C/hrの範囲で設定する場合が多い。このため本実験では、既往の冷間試験^{2), 3)}を考慮し、供試体の内外温度差を小さくするため100°C/hrの加熱速度とした。また計画加熱温度到達後は、供試体内部温度が均一となるよう24時間保持させ

表-1 実験条件

項目	摘要	水準数
水セメント比	50%, 40%, 30%	3
加熱温度	20°C（常温）、100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C	7

表-2 骨材の品質

記号	骨材の種類	絶乾密度 (kg/l)	粗粒率	吸水率 (%)
SLG	超軽量粗骨材	0.89	6.44	5.7*
LS	軽量細骨材	1.61	2.69	15.5
SLS	超軽量細骨材	0.85	3.11	5.4*

* : 絶乾状態から30分後の含水率を示した。

表-3 コンクリートの調合

No.	記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 対セメント (%)
			W	C	SLG	LS	SLS	
1	L50	50	175	350	313	503	---	0.25%* ¹
2	L40	40	175	438	323	441	---	0.25%* ¹
3	L30	30	175	583	300	409	---	0.7%* ²
4	SL30	30	175	583	289	---	226	0.6%* ²

* 1 : AE 減水剤使用。* 2 : 高性能 AE 減水剤使用

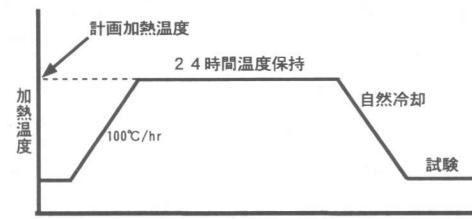


図-1 加熱パターン

た。加熱パターンを図-1に示す。降温は、自然冷却とした。実験は、炉内温度が50°C以下になった後、供試体を取り出し、常温下で実施した。また材齢の影響が強度発現に及ぼさないよう考慮して、材齢91日目から開始し、14日間で速やかに完了させた。

2.5 測定項目・測定方法

主な測定項目は、加熱前後の外観観察、質量変化、圧縮強度、動弾性係数、ヤング係数、応力-ひずみ曲線、細孔分布測定とした。各測定は、JISおよび土木学会規準等に準じて実施した。外観観察は、目視により行った。動弾性係数は、縦振動の一次共鳴振動数から求めた。ヤング係数は、コンプレッソメータによった。細孔分布は、自動ポロシメータにより水銀圧入方式で測定した。供試体の寸法は、100φ×200mmとした。供試体の本数は、1条件に対して3本

(細孔分布は、各条件について1体)とした。

2.6 コンクリートの性状

コンクリートのフレッシュ性状および加熱実験開始時における圧縮強度を表-4に示す。フレッシュ性状は、若干空気量が目標値よりも小さくなったものの、概ね目標を満足した。また実験開始時における強度は、全調合で 30N/mm^2 以上を示した。全加熱実験終了時にも強度試験を実施しており、実験開始時との強度差は土 0.5N/mm^2 以内にあり、実験期間(14日間)中の強度発現の影響はほとんど無いものと判断した。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察

Lシリーズの供試体の場合、加熱温度 300°C 以上になると 0.05mm 以上のひび割れが供試体表面に目立ちはじめ、加熱温度 600°C では供試体全面にわたりひび割れが亀甲状に細かく生じた。またひび割れ幅も加熱温度が高いほど大きく、加熱温度 600°C では 0.2mm を越えるものも多数発生した。しかし爆裂まで至らなかった。SL30の場合も、同様のひび割れが発生し、Lシリーズの供試体との相違を認められなかった。

3.2 圧縮強度

加熱温度と圧縮強度の関係を図-2に示す。Lシリーズ、SL30の供試体とともに加熱温度 100°C では、常温と同程度または若干低い圧縮強度を示し、加熱温度 200°C 以上では加熱温度の上昇に伴い、直線的に強度低下を示した。またLシリーズでは、加熱温度 300°C まではW/C比の小さいL30の強度が高いものの、加熱温度 300°C を超えると逆にL50の方が高い強度を示した。またSL30の圧縮強度は、L30に比べ常温から加熱温度 600°C まで $5\sim10\text{N/mm}^2$ 低いが、その差は加熱温度が高くなるほど小さくなつた。

加熱温度と圧縮強度残存比の関係を図-3に示す。ここで圧縮強度残存比は、常温の圧縮強度に対する各加熱温度の圧縮強度の比とする。また文献2)で実施した普通骨材(粗骨材G:青梅産碎石、細骨材S:木更津産丘砂)によ

表-4 フレッシュ性状および強度

No.	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm × cm)	単位容積 質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	温度 (°C)	強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
L50	15.5	—	1450	4.1	24.5	36.9	1.39
L40	13.5	—	1507	3.5	25.0	38.4	1.54
L30	—	51×51	1556	3.6	25.0	42.0	1.70
SL30	—	54×54	1264	3.7	25.5	33.7	1.17

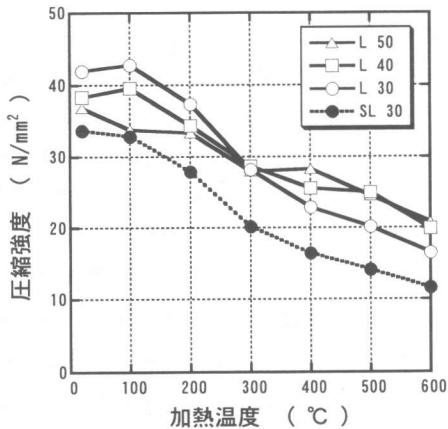


図-2 圧縮強度

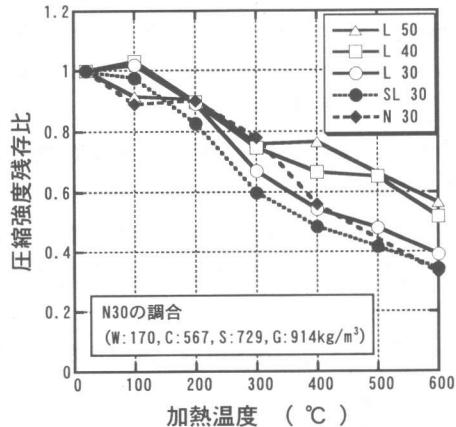


図-3 圧縮強度残存比

るW/C=30%の結果(以下N30とする。なおW/C=40%, 50%の結果も加熱温度 300°C 以上では、N30と同程度²⁾)を併せて示す。Lシリーズでは、W/C比の大きいものが圧縮強度残存比も大きくなつた。L50とL40は、加熱温度 300°C 以上における圧縮強度残存比の低下が小さく、加熱温度 600°C 後でも常温の50%以上の残存比を得ることができた。人工軽量骨材を使用したコ

ンクリートは、高温時の耐熱性に優れていると指摘されており⁴⁾、このL50とL40についてもあてはまった。しかし、SL30とL30は、加熱温度600°Cで約40%のやや低い圧縮強度残存比を示した。これは、普通骨材を用いたN30の場合と同程度であった。

3.3 ヤング係数

加熱温度とヤング係数の関係を図-4に示す。全シリーズのコンクリートで加熱温度が高いほどヤング係数が低下した。Lシリーズでは、加熱温度100°CまではW/C比の小さいものが高いヤング係数を示したが、200°C以上ではW/C比の大きいものの方が高いヤング係数を示した。また加熱温度300°C～500°Cのヤング係数の低下は小さく、加熱温度600°Cで再び低下が大きくなつた。一方SL30のヤング係数は、常温から加熱温度600°CまでL30よりも低いが、加熱温度300°C以上での低下は小さい。

加熱温度とヤング係数残存比の関係を図-5に示す。ここでヤング係数残存比は、常温のヤング係数に対する各加熱温度のヤング係数の比とした。この結果から、Lシリーズのコンクリートは、W/C比の大きいものほどヤング係数残存比が大きくなることが認められ、600°C加熱後でも常温のヤング係数の20～40%の残存比を得た。またL30とSL30とは、概ね同様のヤング係数残存比を示した。

普通骨材を用いたN30は、常温から直線的にヤング係数残存比が低下するのに対し、軽量コンクリートの場合は、加熱温度300°C以上での低下が小さい。これは、普通骨材と軽量骨材のヤング係数および熱膨張率の相違がコンクリートに影響したものと推察する。

3.4 動弾性係数

加熱後のヤング係数と動弾性係数の関係を図-6に示す。この結果から、加熱温度、水セメント比、細骨材の相違によらずヤング係数と動弾性係数との相関性が高い（相関係数R=0.996）ことがわかる。このことから加熱後の動弾性係数を測定することでヤング係数の推定が可能で

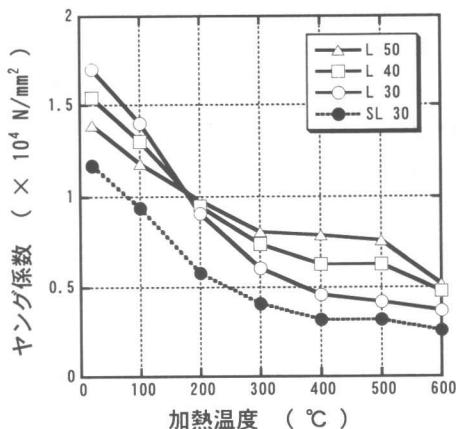


図-4 ヤング係数

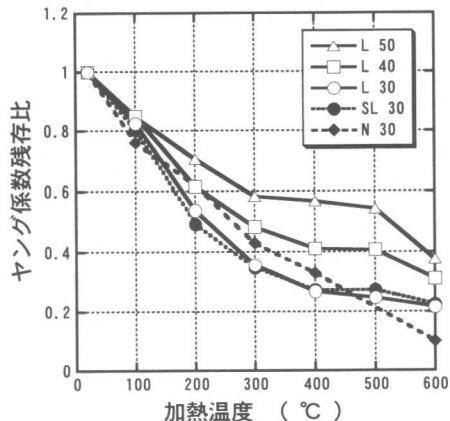


図-5 ヤング係数残存比

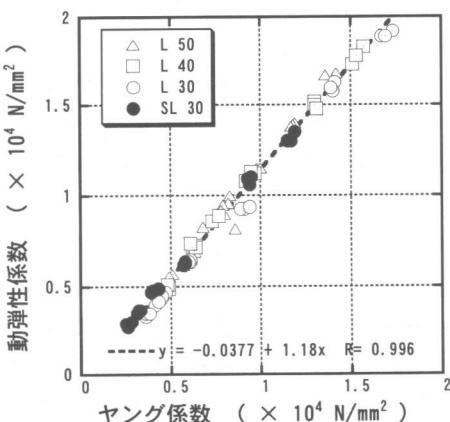


図-6 ヤング係数と動弾性係数

あることがわかる。

3.5 質量減少率

加熱温度と質量減少率（加熱前後の質量差／加熱前の試験体容積、を百分率で示したもの）を図-7に示す。加熱温度200℃までは全シリーズのコンクリートとも急激に質量が減少し、200℃以上ではやや緩やかに減少した。LシリーズではW/C比の大きいものほど質量減少率も大きくなつた。これは、W/C比の大きいものほどコンクリート中の自由水が多いので、加熱により水蒸気として多く放出したことを示す。L30とSL30との質量減少率の差は、使用した細骨材の吸水率の違いによる骨材中に含まれていた水分量の差によると考えられる。またSL30は、使用した超軽量細骨材の吸水率が低いので、普通骨材を使用したN30と同様の質量減少率を示したものと推察する。

3.6 応力ひずみ関係

応力ひずみ曲線の一例を図-8に示す。加熱温度が高くなるに従い、最大応力度（以下 σ_{max} とする）におけるひずみ（以下 ϵ_{max} とする）が大きくなることが認められた。

加熱温度と ϵ_{max} の関係を図-9に示す。Lシリーズでは、加熱温度200℃を超えると、W/C比の小さいものほど ϵ_{max} が大きくなつた。またSL30は、L30に比べ常温時の ϵ_{max} も大きく、加熱温度の上昇に伴いひずみが増加した。加熱温度200℃以上では、その増加は小さくなるものの加熱温度600℃まで増加した。軽量コンクリートの加熱温度による ϵ_{max} の変化は、普通骨材を用いたN30の場合と大きく異なる。N30では、常温から加熱温度200℃までの ϵ_{max} の増加は小さいけれども、加熱温度200℃以上になると急激な ϵ_{max} の増加を示した。これは、ヤング係数と同様に骨材のヤング係数および熱膨張率の相違がコンクリートに影響したものと推察する。

各温度別の σ_{max} と ϵ_{max} の関係を図-10に示す。この結果から σ_{max} と ϵ_{max} の相関性は高いことがわかった。

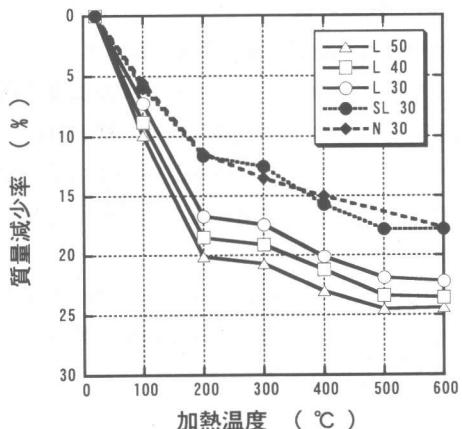


図-7 質量減少率

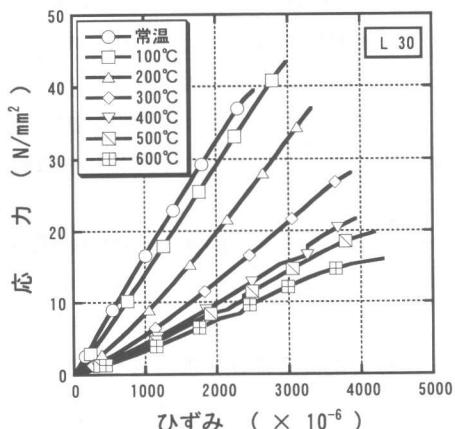


図-8 応力ひずみ（L30）

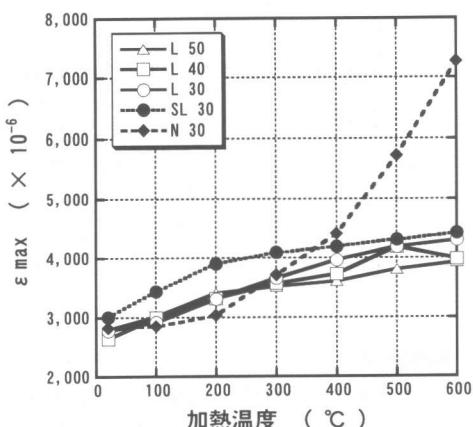


図-9 加熱温度と ϵ_{max}

3.7 総細孔量

加熱温度と総細孔量の関係を図-11に示す。Lシリーズのコンクリートは、加熱温度の高いほど、W/C比の大きい調合ほど総細孔量が大きくなつた。しかし、SL30供試体の場合は、加熱温度の上昇に伴い総細孔量が若干低下した。この原因は明らかではないが、細骨材SLSの影響によるものと考えられ、骨材製造時に使用しているパーライト微粉末が測定結果に影響を及ぼしたものと推察する。

4.まとめ

本実験の結果、以下のことがわかつた。

- (1) 加熱温度が高いほど圧縮強度は低下する。
圧縮強度残存比で比べると、水セメント比の大きいものの方が加熱温度に伴う強度低下の割合は小さく、加熱温度600℃でも常温の圧縮強度の40%以上を残存できた。
- (2) ヤング係数も圧縮強度と同様加熱温度が高いほど低下する。ヤング係数残存比で比べると、水セメント比の大きいものほど加熱温度に伴う強度低下の割合は小さく、加熱温度600℃でも常温のヤング係数の20～40%を残存できた。
- (3) 人工軽量細骨材の相違は、残存比で比較すると圧縮強度、ヤング係数に差を認められない。
- (4) 高温加熱後の動弾性係数とヤング係数の相關性は高い。
- (5) 最大応力度におけるひずみは、加熱温度200℃以上において増加が小さく、普通骨材を使用したコンクリートと大きく異なる。

参考文献

- 1) 例えば稻垣準二他：超軽量・高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の構造性能（その1）～（その3），日本建築学会大会学術梗概集，C-2 構造IV，pp. 355-

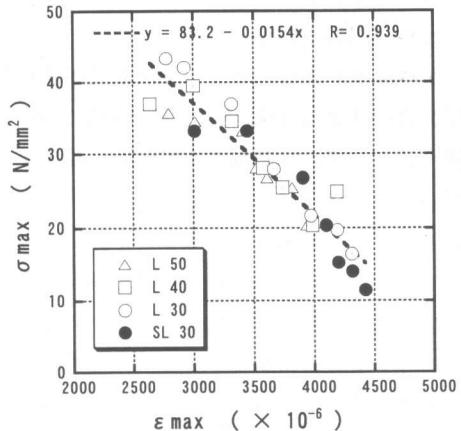


図-10 \(\sigma_{max}\) と \(\epsilon_{max}\)

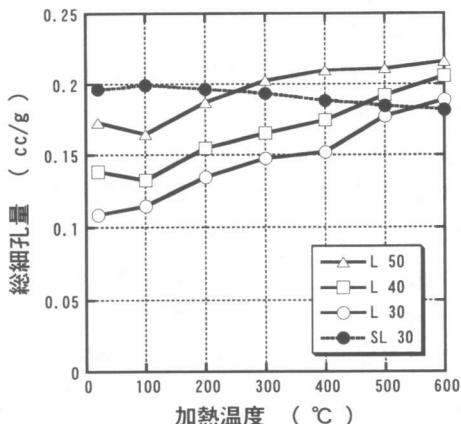


図-11 総細孔量

- 356, pp. 83-84, 1997. 9, pp. 479-480, 1998. 9
 2) 一瀬賢一他：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 535-540, 1997
 3) 例えば Castillo, C. and Durrani, A.J.: Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, vol. 87, No. 1, pp. 47-53, 1990. 1
 4) 古村福次郎：高温度におけるコンクリートの力学的性質に関する研究(その2)，日本建築学会論文報告集，第173号，pp. 17-24, 1970. 7