

論文 高温加熱中及び加熱後冷却したコンクリートの超音波速度

黄 義哲*1・金 圭庸*2・崔 景喆*3・小澤 満津雄*4

要旨：高温作用を受けたコンクリートの健全性診断を評価する手法として非破壊検査法のひとつである超音波速度法の利用を検討した。すなわち、加熱中及び加熱後冷却された W/B 55, 33, 19%のコンクリートを対象として超音波速度を測定した。その結果、加熱中コンクリートの超音波速度は、加熱温度が 300℃までは大きな低下は見られなかった。一方、300℃以上になるとコンクリート内部のひび割れの発生と拡大により超音波速度が低下する傾向を示した。従って、300℃以後の温度範囲でコンクリートの健全度モニタリングに超音波速度評価の適用可能性を確かめた。

キーワード：超音波速度，加熱中・後冷却，高強度コンクリート，ひび割れ，力学的特性，モニタリング

1. はじめに

一般的にコンクリートは熱に強い材料として知られている¹⁾。しかし、火災などの高温を受けたコンクリートは構成材料の物理・化学的变化が生じて力学的特性が低下する。また、圧縮強度が高いほど、コンクリートは高温時に爆裂が生じる可能性が高く、力学的特性の低下が大きくなると報告されている^{2,3)}。従って、高温を受けたコンクリートの安全診断が必要である。

既往研究では超音波速度を用いて高温を受けたコンク

リートの圧縮強度推定と内部健全度を評価している^{4,5)}。

しかし、高温時のコンクリートの健全度を検討した例は少ないのが現状である。

そこで、本研究では 30, 70, 110MPa の普通強度から超高強度コンクリートに対して、加熱中及び加熱後冷却したコンクリートの超音波速度を測定した。また、加熱中超音波速度とコンクリートの力学的特性の関係を比較・検討して、加熱中のコンクリート健全度モニタリングに超音波速度評価の適用可能性を検討した。

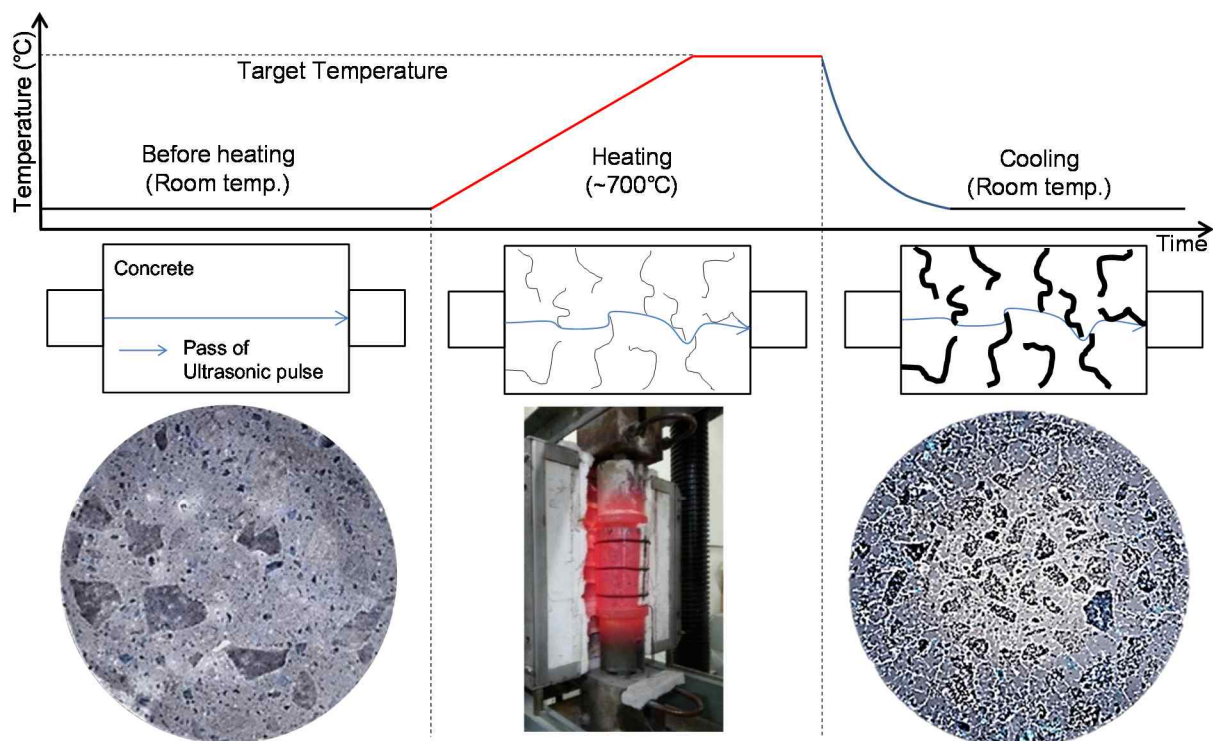


図-1 研究概要

*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)
 *2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 博(工) (正会員)
 *3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 研究員 博(工) (正会員)
 *4 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 博(工) (正会員)

表-1 実験計画及びコンクリート調合

f_{ck}	W/B	Slump Flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m ³)						加熱速度	加熱温度(°C)	評価項目
					W	C	SF	BFS	S	G			
30	55.0	180 ¹⁾	4±1	45.0	185	336	0	0	797	956	1°C/min.	20, 100 200, 300 400, 500 600, 700	・残存圧縮強度 ・熱膨張ひずみ ・超音波速度 (加熱前・中・後)
70	33.0	650 ± 100	2±1		165	475	25	0	755	905			
110	19.0				160	589	126	126	618	741			

1) slump (mm)

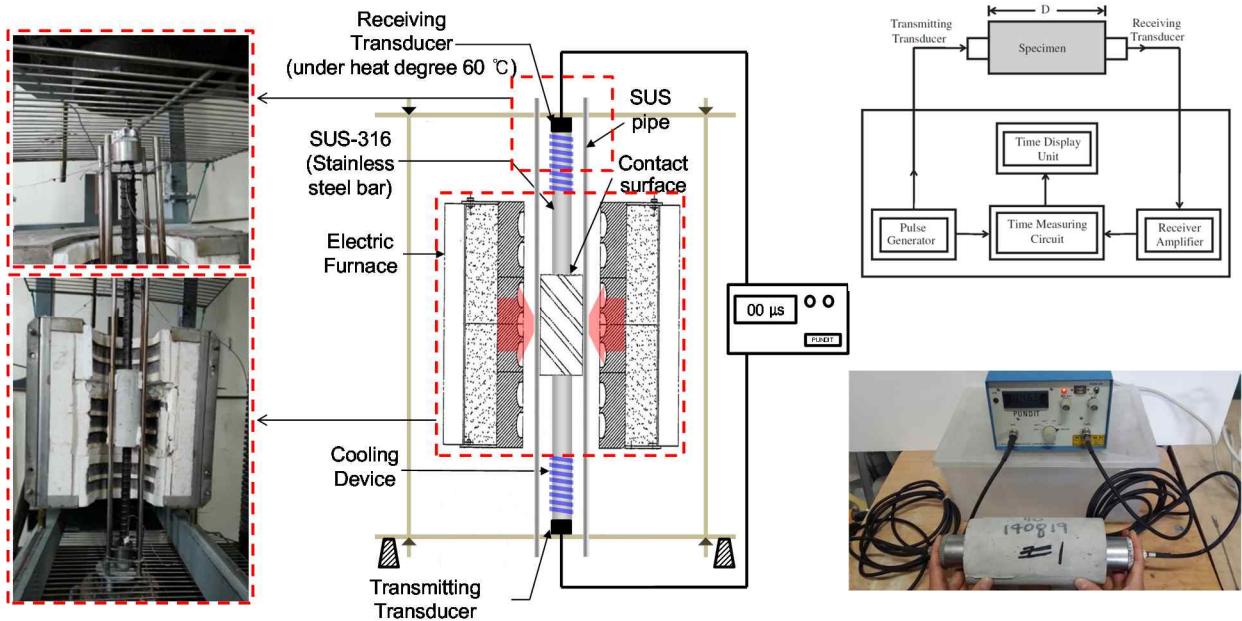


図-2 加熱中、加熱前・後の超音波速度の測定方法

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画及びコンクリート調合

本研究の実験計画及びコンクリート調合を表-1に示す。コンクリートのW/Bを55, 33, 19%の普通強度から超高強度までのコンクリートについて実験を行った。また、加熱温度は20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700°Cの8種類に設定した。評価項目として、残存圧縮強度、熱膨張ひずみ、加熱中及び加熱前・後の超音波速度を評価して分析した。

2.2 使用材料

本研究の使用材料は比表面積 3,200cm²/g、密度 3.15g/cm³の普通ポルトランドセメントを用い、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。密度 2.50g/cm³、比表面積 200,000cm²/gのシリカフェウムと密度 2.90g/cm³、比表面積 6,000cm²/gの高炉スラグを用いた。細骨材は密度 2.65g/cm³、吸水率 1.0%の海砂を使って、粗骨材は密度 2.62g/cm³、吸水率 0.8%及び最大寸法 20mmの花崗岩砕石を用いた。

2.3 試験体の作製及び養生方法

本実験で用いたコンクリート試験体は「KS F 2403 コンクリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ、φ100

×200mmの円柱形試験体とした。養生はコンクリートを24時間後に脱型し、28日間標準水中養生を行った後、温度 20±2°C、相対湿度 60±5%で材齢 300日まで気乾養生を行った。

2.4 試験方法

(1) 加熱装置及び方法

本実験で用いた試験装置は載荷と加熱を同時に行うために、2,000kN級の載荷装置に電気加熱炉を設けた。また、加熱中の試験体のひずみは上・下部加力治具の中心で設置したφ10mmの石英管と外部に設置した変位計を用いて測定した。加熱は試験体内・外部の温度差が5°C以下の同一なレベルに上昇するように上・下部の加力治具をRILEMで提案している1°C/min.の速度で加熱し、試験体に熱を伝達する間接加熱方式を採用した⁶⁾。

(2) 超音波速度の測定

コンクリート試験体の超音波速度は加熱前と加熱中及び加熱後に常温まで冷却した状態で測定した。測定方法の概要を図-2に示す。加熱前・後では「KS F 2371 コンクリートの圧縮強度推定のための超音波パルス速度試験方法」に準じて測定した。加熱中にコンクリート超音波速度の測定は熱による探触子の損傷を防ぐため

に棒形の STS-316(SUS-316)を用いてコンクリートに超音波パルスを透過させて測った。加熱中の探触子温度は60℃以下に保持した。

超音波速度は公称周波数 54kHz, 精密度 0.1μs の一対の探触子で構成された PUNDIT(portable ultrasonic non-destructive digital indication tester)を用いて測定し, 超音波速度は, 以下の式(1)によって算定した⁷⁾。

$$V_p = \frac{L}{T} \quad \text{式(1)}$$

ここで, V_p : 超音波速度 (km/sec)

L : コンクリート試験体の長さ (mm)

T : 超音波が試験体を透過した時間 (μs)

超音波はコンクリート内部の状態によってコンクリートを透過する時間が異なるため, コンクリート内部が健全な状態の場合には, 超音波がコンクリートの反対側に伝達できるパスが短くなり, 透過時間が短くなる。しかしながら, コンクリートが高温を受ける場合には, 図-1のように内・外で発生するひび割れや空隙によって超音波のパスが長くなり, 超音波速度が低下することになる。

3. 実験結果及び考察

3.1 加熱後冷却したコンクリートの力学的特性と超音波速度

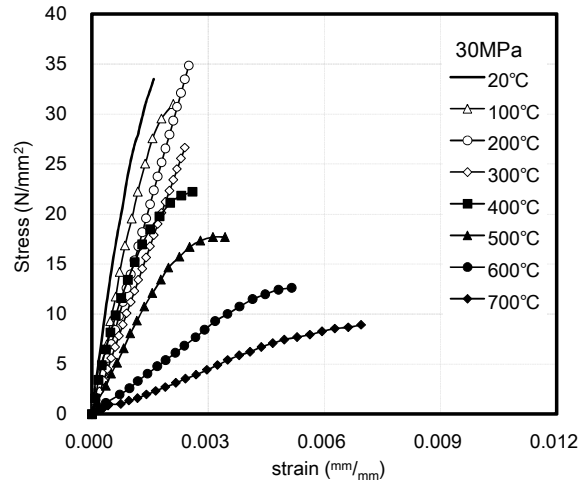
図-3 に加熱した後コンクリートの応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの圧縮強度に関わらず加熱温度が高くなるほどコンクリートの最大応力は小さくなり, 最大応力でのひずみは急に増加する傾向を示した。

常温~300℃の温度範囲で 70 と 110MPa コンクリートは 30MPa コンクリートに比べて脆性的な破壊挙動を示した。また, コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど最大応力でのひずみが大きくなった。これは高温によって生じたセメント水和物の熱分解と内部微細ひび割れのためであると判断される。

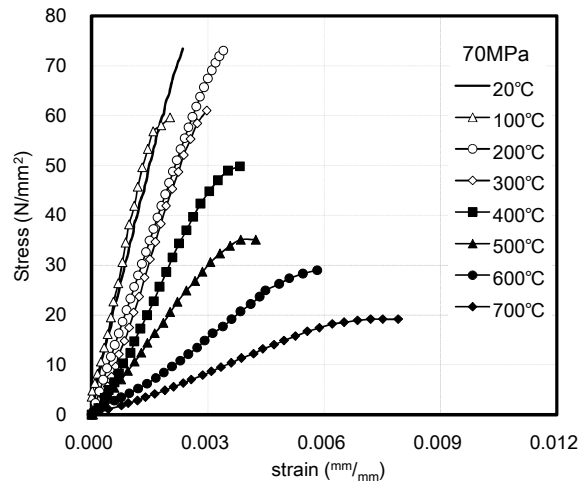
図-4 に加熱後コンクリートの残存圧縮強度比を示す。加熱温度 100℃では 30, 70, 110MPa コンクリートが各々常温圧縮強度に比べて約 90, 85, 70%の残存圧縮強度を示し, コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど圧縮強度低下率が大きくなる傾向を確かめた。

また, 加熱温度 200℃では 30, 70, 110MPa コンクリートが各々107, 101, 100%の残存圧縮強度を示し, 加熱温度 100℃の残存圧縮強度より大きい値を示した。これは加熱時の高温作用により, コンクリート内部の未水和セメントの水和が活発になるためと考えられる⁸⁻¹⁰⁾。

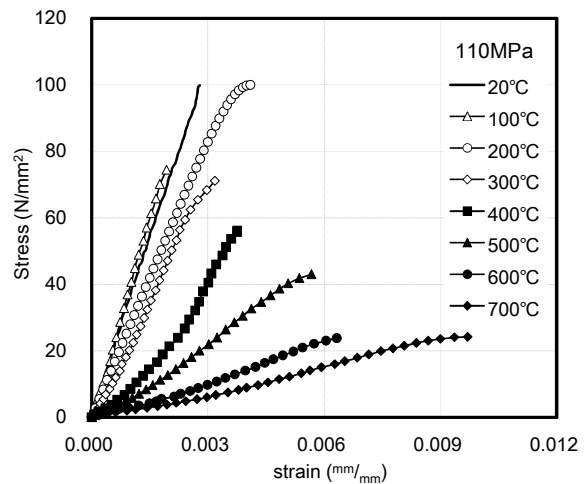
300℃以上の加熱温度ではコンクリートの圧縮強度に関わらず, 残存圧縮強度比が持続的に低下する傾向が見



(a) 30MPa



(b) 70MPa



(c) 110MPa

図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

られた。特に, 加熱温度 700℃では常温圧縮強度に比べて 30, 70, 110MPa コンクリートが各々32, 28, 24%の残存圧縮強度を示した。

図-5 に加熱を受けたコンクリートの圧縮強度実測値

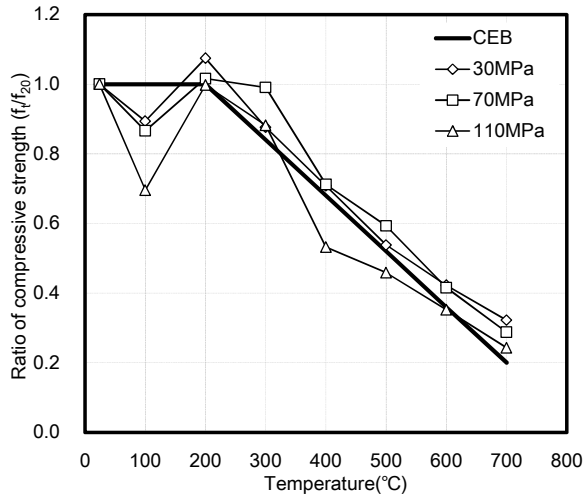


図-4 コンクリートの残存圧縮強度比

と超音波速度による圧縮強度推定値の関係を示す。コンクリートの圧縮強度レベルに関わらず、常温超音波速度は類似な値(4500km/s程度)を示し、加熱温度が高くなるほど超音波速度は低下する傾向を示した。

また、既往研究⁵⁾で超音波速度によるコンクリートの圧縮強度推定式と比較した結果、常温での普通強度コンクリートの圧縮強度は測定値と推定値が類似な結果を示したが、加熱温度が高く、高強度コンクリートほど圧縮強度の実測値と推定値に大きな差を示した。

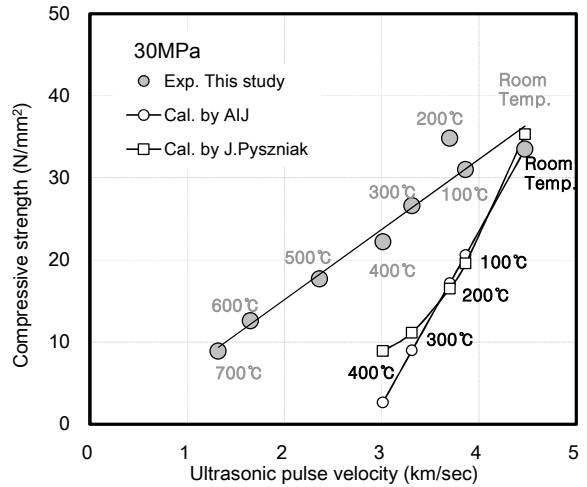
これは既往研究⁵⁾での圧縮強度推定式が健全状態の普通強度コンクリートを対象としているため、高温作用を受けたコンクリートの内部に生じる微細ひび割れ及び空隙の影響を反映していないためであると考えられる。

3.2 加熱中コンクリートの超音波速度

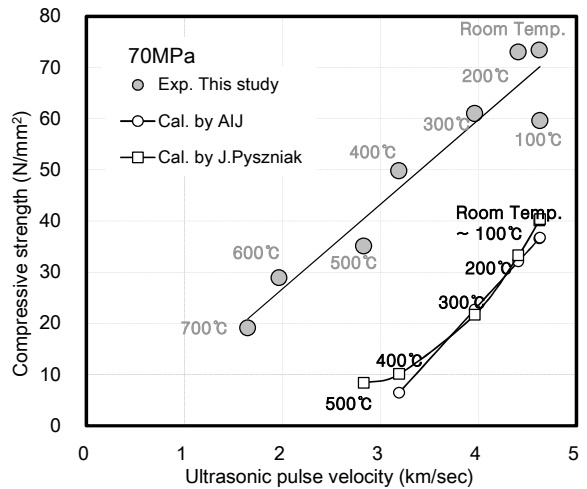
図-6 に加熱中及び加熱後の超音波速度と温度の関係を示す。加熱後冷却したコンクリートではコンクリート圧縮強度に関わらず、加熱温度が高くなるほど超音波速度が低下する傾向を示した。しかし、加熱中に測定したコンクリートの超音波速度は加熱後冷却したコンクリートの超音波速度と異なり、コンクリートの圧縮強度レベルに関わらず加熱温度 300°Cまでほぼ一定であったが、300°C以後の加熱温度では低下する傾向を示した。

これについては図-7 に示すように加熱中の圧縮強度が 100°Cで一度低下し、300°C付近で回復するためであると考えられる。既往の文献¹¹⁾では加熱に伴う熱膨張応力の影響であると説明している。

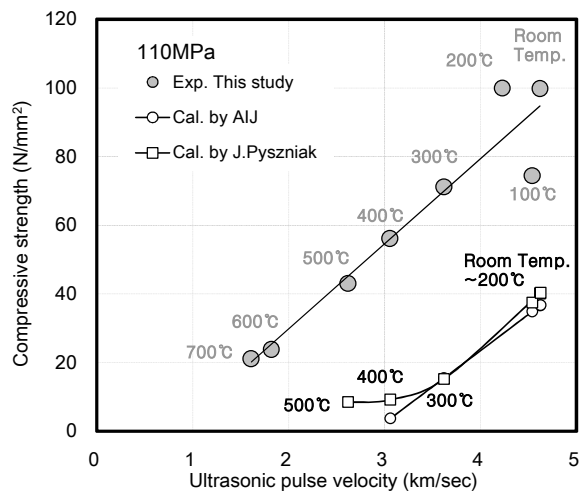
加熱を受けたコンクリートは高温によって内部に微細ひび割れが生じ、超音波速度が小さくなるが、300°Cまでは加熱に伴う熱膨張によって微細ひび割れの幅が小さくなるためであると考えられる。このために超音波速度の低下が起こらないと考えられる。一方、加熱後に冷却した状態で測った超音波速度は温度低下により、微細



(a) 30MPa



(b) 70MPa



(c) 110MPa

図-5 超音波速度によるコンクリート圧縮強度の推定値とコンクリート圧縮強度の測定値の関係

ひび割れの幅が拡大され、超音波速度が低下すると考えられる^{12,13)}。

また、300°C以後の加熱温度では持続的に超音波速度

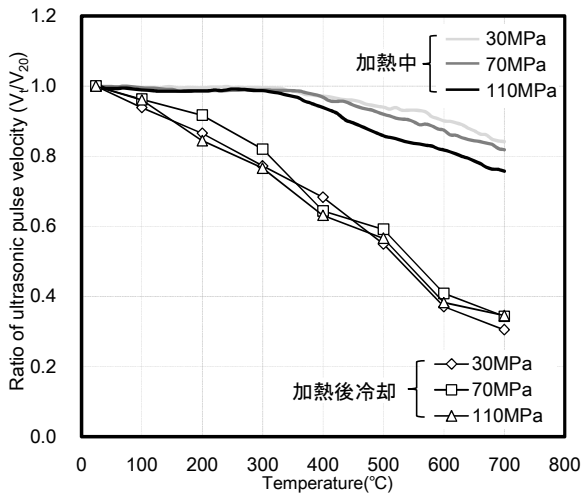


図-6 加熱中及び加熱後の超音波速度

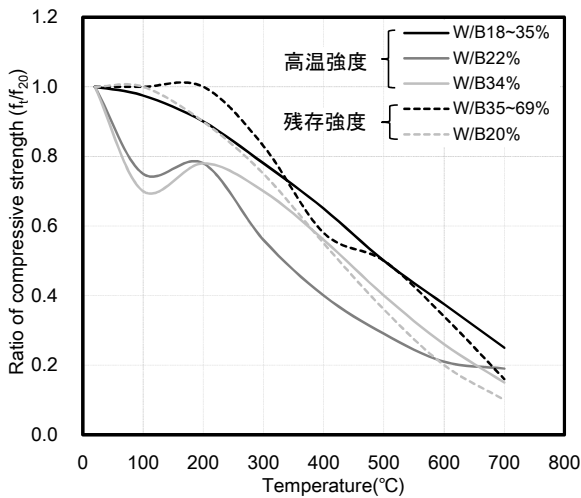


図-7 高温及び残存圧縮強度比の比較

が低下し、高強度コンクリートであるほど加熱による超音波速度の低下が大きくなることを確かめた。

図-8 に加熱による熱膨張ひずみ、水蒸気圧力、透気係数の関係を示した。加熱温度によるコンクリートの熱膨張ひずみは加熱温度が高くなるほど増加して、300°C 以後の加熱温度でひずみが急に増加する傾向を示した。加熱温度 700°C で 30, 70, 110MPa コンクリートは各々 0.14, 0.12, 0.10 の熱膨張ひずみを示した。従って、圧縮強度が大きくなるほど熱膨張ひずみが小さくなる傾向が確かめた。

また、筆者らの既往研究^{14,15)}の加熱中コンクリートの内部水蒸気圧力と加熱後冷却したコンクリートの透気係数評価結果でも 300°C 以上の加熱温度から水蒸気が排出され圧力が急に低下し、透気係数は常温での値に比べて約 100 倍以上の値になる結果を示した。これは 300°C 以上の加熱温度でコンクリート内部の微細ひび割れが急に増加するためであると判断される。

図-9 に 700°C まで加熱後冷却したコンクリートの断

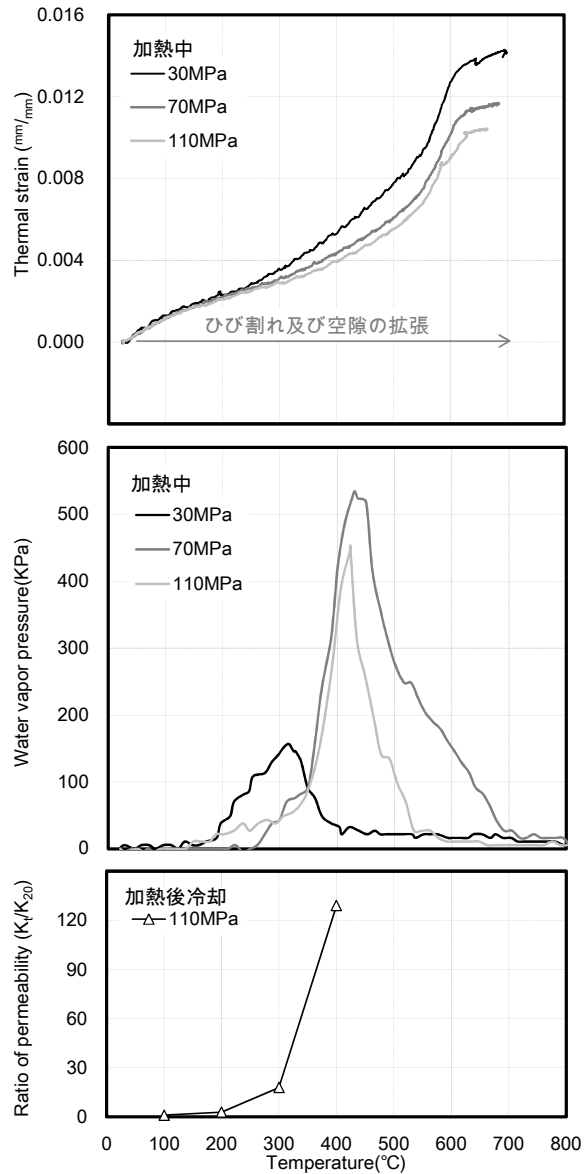


図-8 高温によるコンクリートの熱膨張ひずみ・水蒸気圧力・透気係数

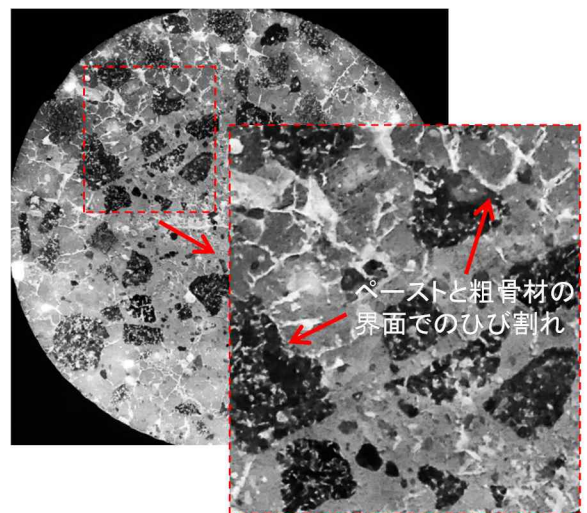


図-9 加熱後冷却されたコンクリートの断面 (700°C)

面を示す。ペーストと粗骨材の界面でひび割れが観察できた。コンクリートは高温による内部のひび割れ発生によって力学的特性が低下すると共に、加熱中コンクリートの超音波速度が低下したと考えられる。

4. まとめ

本研究では加熱中及び加熱後冷却したコンクリートの超音波速度を評価した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 超音波速度による既存の圧縮強度推定式は、コンクリートの圧縮強度が大きくて、加熱を受ける場合には適用することが困難であると判断される。
- (2) 加熱中測った超音波速度が急に低下する温度と加熱によってコンクリートで生じる膨張ひび割れ及び空隙が急に増加する温度は類似な範囲であることを確かめた。
- (3) 加熱中及び加熱後冷却したコンクリートは類似な圧縮強度を示したが、超音波速度は加熱後冷却したコンクリートの方が小さい結果であった。これは冷却する場合、加熱による膨張応力がなくなるのでコンクリート内部の微細ひび割れが拡張されたためであると考えられる。
- (4) 加熱中測ったコンクリートの超音波速度を用いて、コンクリートの力学的特性の低下挙動を継続的に評価することが可能なので、高温を受けたコンクリートの健全度モニタリングに適用可能性があると考えられる。

謝辞

本研究は 2015 年度韓国政府(教育科学技術部)の財源による韓国研究財団の支援を受けて遂行された研究(NR F-2015R1A2A2A01007705)の結果であり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Franssen, J. M. and Dotreppe, J. C., "Fire Test and Calculation Methods for Circular Concrete Columns," Fire Technology, Vol. 39, Issue 1, 2003, pp. 89-97.
- 2) G. Y. Kim, Y. S. Kim, T. G. Lee, "Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19, s128-s133.
- 3) 尹敏浩, 金圭庸, 小澤満津雄, 兪在哲, "粗骨材の種類によるコンクリートの高温力学的特性評価", コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1, 2014, pp. 94-99.
- 4) Hong Seong-Uk, Cho Young-Sang. (2011.1). A Study on the Estimation of the Compressive Strength of Concrete

Structures using Ultrasonic Pulse Velocity Method and Rebound Hardness Method. JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction, 27(1), 19-26.

- 5) Kim Moo-Han, Choi Se-Jin, Kang Suk-Pyo, Kim Jae-Hwan, Jang Jong-Ho. (2002.8). A Study on the Application of Non-Destructive Testing Equation for the Estimation of Compressive Strength of High Strength Concrete. JOURNAL OF THE KOREA INSTITUTE OF BUILDING CONSTRUCTION, 2(3), 123-130.
- 6) RILEM TC 129-MHT 「Part 3 - Compressive strength for service and accident conditions」, Material and structures, vol.28, 1995, pp. 410-414
- 7) MALHOTRA, V. Mohan; CARINO, Nicholas J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition. CRC press, 2003, pp.8-1~8-19
- 8) 安部武雄, 大塚貴弘, 小林 裕, 道越 真太郎, "高温度における普通強度コンクリートの力学的特性", 日本建築学会構造系論文集, 第 615 号, 2007, pp.7-13.
- 9) American Concrete Institute, "State-of-the Art Report on High-Strength Concrete", ACI 363R-92, 1992.
- 10) Kim, G. Y., Kim, M. H., Kim, Y. S., and Park, C. G., "Test Method for Mechanical Properties of Heated Concrete by Heat Transfer Method," Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2007. 7, pp.759~764.
- 11) 日本建築学会, "構造材料の耐火性ガイドブック", 2009, pp.40-54.
- 12) Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., and Furumura, F., Strength, Elasticity and Thermal Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperatures, ACI American Concrete Institute, Special Publication, 1972, SP-34, pp. 377-406.
- 13) Hammer, T. A., "High-Strength Concrete Phase 3, Compressive Strength and E-Modulus at Elevated Temperatures, Fire Resistance," Report 6.1, SINTEF Structures and Concrete, STF 70 A95023, 1995, pp.18-57.
- 14) Gyeong-Cheol Choe, Tae-Gyu Lee, Jeong-Soo Nam, Byung-Keun Park, Gyu-Yong Kim. (2012.10). Evaluation of Spalling Property and Water Vapor Pressure of Concrete with Heating Rate. Journal of the Korea Concrete Institute, 24(5), 605-612.
- 15) 崔景喆, 金圭庸, 朴奎衍, 金武漢, "急速と低速加熱によるコンクリートの内部水蒸気圧力及び爆裂特性", コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No.1, 2013, pp. 1165-1170.