

論文 超高強度コンクリートの高温力学的特性に及ぼす粗骨材最大寸法と細骨材率の影響

尹 敏浩*1・金 圭庸*2・小澤 満津雄*3・兪 在哲*4

要旨: 超高強度コンクリートの調合設計で力学的特性と流動性能を確保するため、結合材と骨材構成の検討が必要である。また、内部組織が緻密な超高強度コンクリートは加熱時に粗骨材の膨張とセメントペーストの収縮によるひび割れが生じて力学的特性低下が発生する。従って、本研究では超高強度コンクリートの高温力学特性の低下に及ぼす粗骨材の最大寸法と構成比による影響を基礎的に検討した。このため、500°Cに加熱された超高強度コンクリートの残存圧縮強度、残存弾性係数と超音波速度を評価した結果、粗骨材が多いほど残存力学特性がさらに低下した。これは粗骨材界面でのひび割れ発生が主要要因と思われる。

キーワード: 超高強度コンクリート, 細骨材率, 粗骨材最大寸法, 火災, 微細ひび割れ, 残存力学的特性

1. はじめに

近年、超高強度コンクリートは、その優れた材料特性から利用が拡大している。特に、高層ビルなどの大型建築物において適用事例が多く、自重と部材断面の低減および、利用空間の拡大が図られている¹⁾。

超高強度コンクリートは100MPa以上の大きな圧縮強度を発現するため調合設計において結合材と使用する骨材の種類や混合割合の検討が必要である²⁾。特に、高温環境下において骨材とセメントペーストの体積変化の違い(図-1)により、ひび割れが生じる危険性がある。このひび割れにより、圧縮強度と弾性係数などの力学的特性が低下する可能性がある³⁾。

加熱を受けたコンクリートで生じる微細ひび割れは、粗骨材とセメントペーストとの界面から生じ、徐々に拡大すると報告されている⁴⁾。写真-1に加熱を受けたコ

ンクリートの内部ひび割れ状況を示す。図より、筆者らが行った加熱実験でも同様な結果を得ている。従って、調合条件によって粗骨材の熱膨張特性が変化する場合、超高強度コンクリートの高温特性を事前に評価する必要があると考えられる⁴⁾。

以上より、本研究ではコンクリートの調合において細骨材率と粗骨材最大寸法を実験因子とし、熱損傷を受けた超高強度コンクリートの残存圧縮強度と残存弾性係数を評価した。加えて、超音波法に着目し、加熱によりコンクリート内部に生じる微細ひび割れと残存力学特性との関係を検討した。

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画及びコンクリートの調合

表-1, 2に本実験の実験計画及びコンクリートの調合

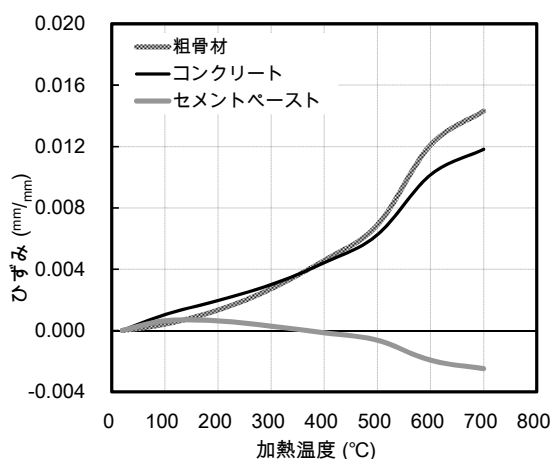


図-1 コンクリート構成材料の熱膨張ひずみ

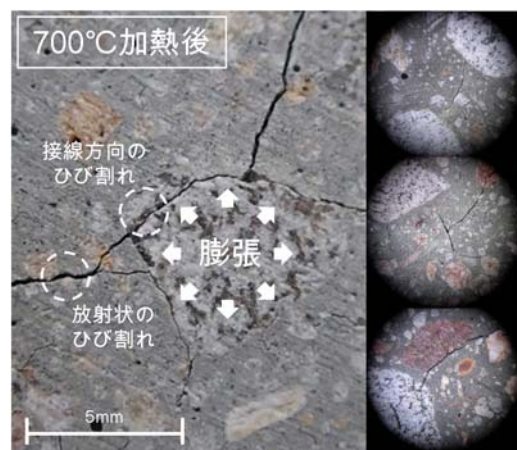


写真-1 加熱を受けたコンクリートのひび割れ発生⁵⁾

*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 工科大学 建築工学科 教授 工博 (正会員)

*3 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 工博 (正会員)

*4 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 実験計画

W/B (%)	S/a (%)	G _{max} (mm)	加熱条件	評価項目
20	40	10	常温(20℃)	<ul style="list-style-type: none"> 温度履歴 残存圧縮強度 残存弾性係数 残存超音波速度
15	60	20	500℃で1h保持	
			500℃で3h保持	

表-2 コンクリートの調合

W/B (%)	S/a (%)	G _{max} (mm)	Air (%)	単位重量 ¹⁾ (kg/m ³)																
				W	C	B	SF	AG	PP	S	G									
											20	10								
20	40	20	1.5	155	558	140	39	39	0.92	908	605	658	282							
		10									-	940								
	60	20									438	188								
		10									-	626								
15	40	20									0.3	692	186	103	52	1.84	766	510	554	238
		10																-	792	
	60	20																370	158	
		10																-	528	

1) W:水, C:セメント, B:高炉スラグ, SF:シリカフェーム, AG:無水石膏, PP:ポリプロピレン繊維, S:砂, G:砂利

表-3 使用材料の物理的性質

材料	物理的性質
セメント (C)	低熱ポルトランドセメント 密度: 3.22g/cm ³ , 比表面積: 3,400cm ² /g
高炉スラグ (B)	密度: 2.91g/cm ³ , 比表面積: 3,990cm ² /g
シリカフェーム (SF)	密度: 2.22g/cm ³ , 比表面積: 200,000cm ² /g
無水石膏 (AG)	密度: 2.90g/cm ³ , 比表面積: 3,550cm ² /g
細骨材 (S)	川砂 密度: 2.58g/cm ³ , 吸水率: 2.21%
粗骨材 (G)	硬質砂岩砕石 密度: 2.67g/cm ³ , 吸水率: 0.61%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤
爆裂防止繊維 (PP)	Polypropylene 繊維 長さ: 13mm, 縦横比: 650

を示す。対象は 120 と 150MPa 級超高強度コンクリートとした。W/B は 20 及び 15%とした。細骨材率は 40 と 60%とし、粗骨材の最大寸法は 10 と 20mm とした。

また、超高強度コンクリートの爆裂を防止するためにポリプロピレン繊維を 0.1~0.2vol%混入した。既存の研究ではこの混入率範囲は常温と加熱後の力学的特性に

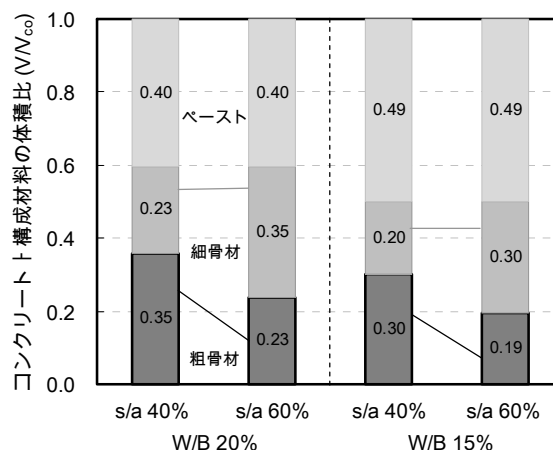


図-2 コンクリートを構成する材料の容積比

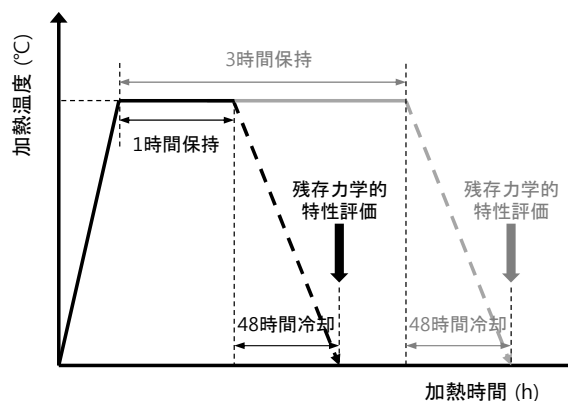


図-3 残存力学的特性評価方法

及ぼす影響が殆どないと報告している⁶⁾。加熱後の力学特性を評価するため温度条件は常温と 500℃とし、温度保持時間は 1 時間と 3 時間の 3 水準とした。

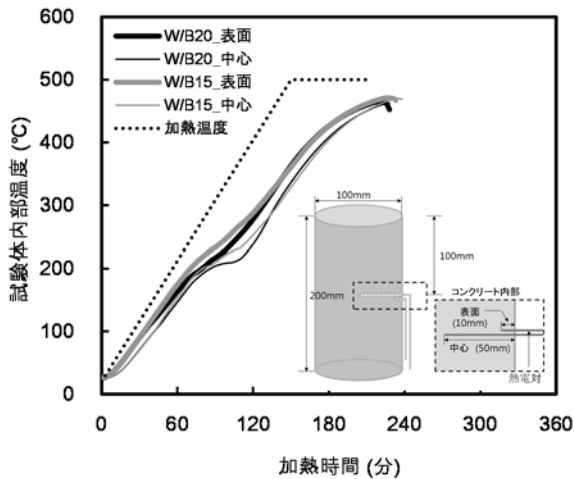
図-2 に構成材料の容積比を示した。W/B が 20%の場合、s/a は 40%と 60%とし、粗骨材体積比は各々 35 と 23%とした。W/B が 15%の場合、s/a は 40%と 60%で粗骨材体積比は各々 30 と 19%とした。

2.2 使用材料

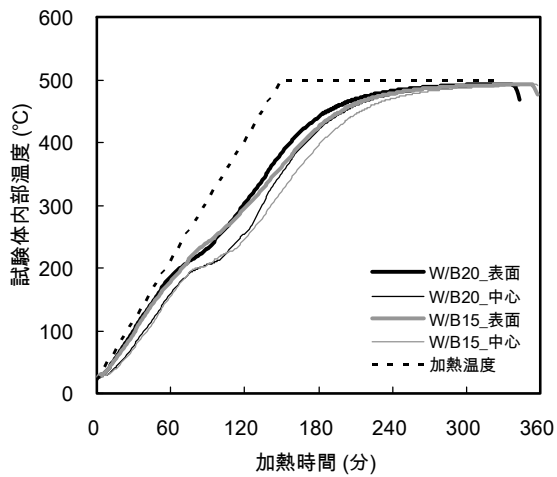
表-3 に本実験で使用した材料一覧を示す。本実験では超高強度コンクリートで生じる水和熱を制御するために低熱ポルトランドセメント(密度: 3.22g/cm³)を使用した。混和材はシリカフェーム(密度: 2.22g/cm³、比表面積 200,000cm²/g)と高炉スラグ(密度: 2.91g/cm³)及び無水石膏(密度: 2.90g/cm³)を用いた。細骨材は川砂(密度: 2.58g/cm³, 吸水率 2.21%)を用いた。粗骨材は硬質砂岩砕石(密度: 2.67g/cm³, 吸水率 0.61%)を用いた。爆裂防止繊維はポリプロピレン繊維(L:13mm, ϕ : 20 μ m)を用いた。

2.3 試験体製作及び養生方法

超高強度コンクリートは練り混ぜた後、各調合別にスランプフローと空気量を測った。その結果、全ての調合



(a) 最高温度 500°C で 1 時間保持



(b) 最高温度 500°C で 3 時間保持

図-4 コンクリート構成材料の熱膨張ひずみ

でスランプフローは 650 ± 50 mm, 空気量は $1.5 \pm 0.3\%$ を満たした。 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱型供試体を作製後, 24 時間後に脱型し, $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中で 14 日間養生した。その後, 相対湿度 $60 \pm 5\%$, 温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温恒湿室で 60 日間養生した。

2.4 試験方法

図-3 に示すように各々の試験体は材齢 75 日で常温と最高温度 500°C で 1 時間保持, 最高温度 500°C で 3 時間保持の 3 つの条件で加熱した。加熱速度は $3.3^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。また, 熱電対を試験体の表面から 10mm と 50mm に設置して加熱中の試験体内部の温度履歴を評価した。加熱した試験体は常温で 48 時間自然冷却した後, 残存圧縮強度, 残存弾性係数及び超音波速度を評価した。

3. 実験結果及び考察

3.1 温度履歴 (500°C)

図-4 に 500°C 加熱で保持時間を 1hr と 3hr とした場合の供試体中心と表面部の温度履歴を示す。図より, 1hr 保

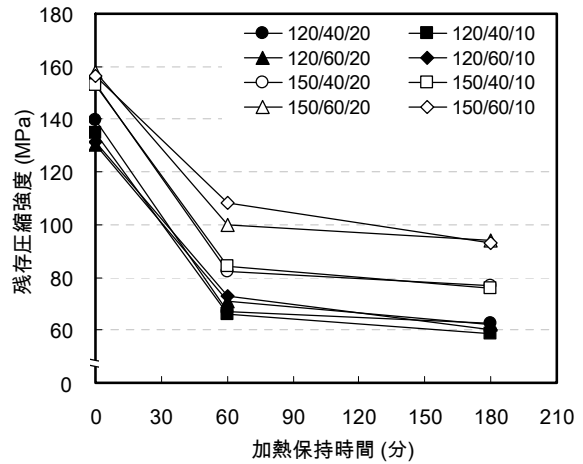


図-5 加熱保持時間による残存圧縮強度

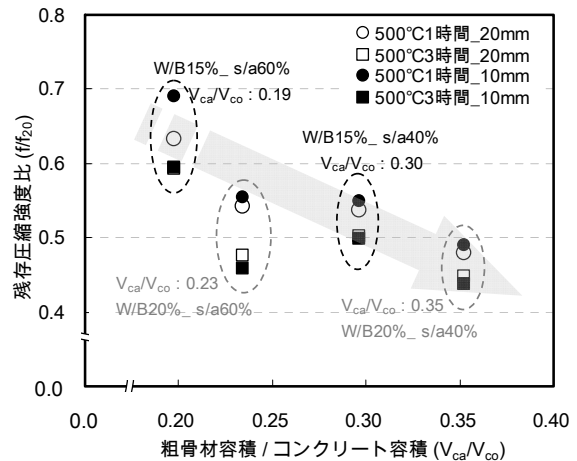


図-6 粗骨材容積と残存圧縮強度比の関係

持した場合, W/B が 20% と 15% の試験体中心部の温度は各々 462°C , 470°C であった。3hr 保持した場合の供試体中心温度は W/B と関わらず約 492°C であった。

3.2 残存圧縮強度

図-5 に 500°C 加熱における残存圧縮強度と加熱保持時間の関係を示す。圧縮強度は 3 つの試験体の平均値であり, 試験体間のばらつきは $0.6 \sim 8.1$ MPa の範囲であった。凡例は $f_c/s/a-G_{\text{max}}$ である。図より, 常温での圧縮強度は W/B が 20% の場合, $131 \sim 139$ MPa の範囲であり W/B が 15% の場合は $153 \sim 158$ MPa の範囲となった。常温では細骨材率と最大寸法の影響は少なかった。

W/B が 20% の試験体は 1hr 保持と 3hr 保持を比較すると残存圧縮強度に大きな差が無かった。細骨材率の影響について, 加熱保持時間が 1hr のケースでは s/a が 40% の試験体は 66MPa であり, s/a が 60% の試験体は約 72MPa を示した。細骨材率が増加するほど残存圧縮強度が大きくなった。3hr のケースでは s/a の違いによる影響は少なく 61MPa 程度であった。これは, 加熱時間が長く

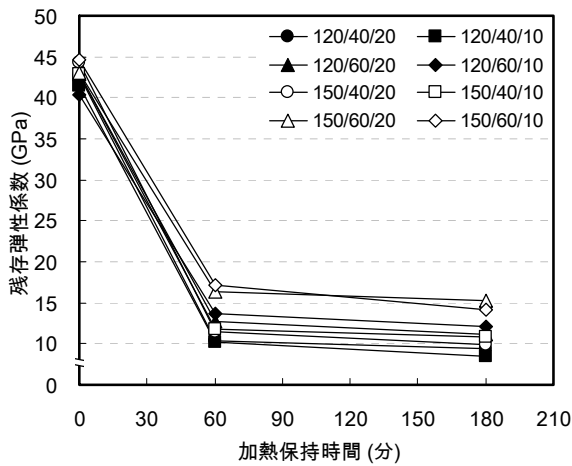


図-7 加熱保持時間による残存弾性係数

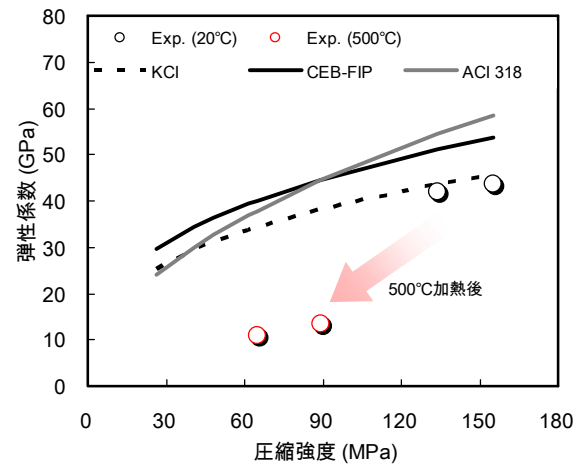


図-9 高温による圧縮強度と弾性係数の関係

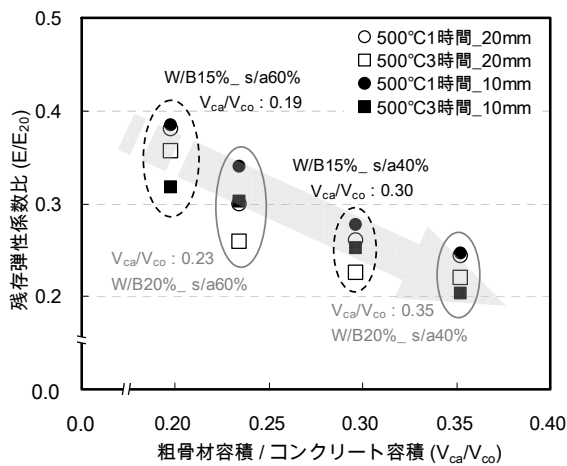


図-8 粗骨材容積と残存弾性係数の関係

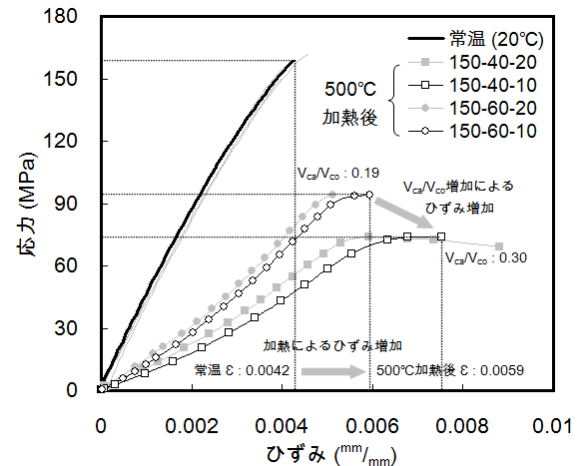


図-10 高温による応力とひずみの関係 (W/B15%)

なると中心部の温度が高くなること(図-4)によりセメント水和物の熱分解と材料の熱膨張量が大きくなり、内部にひび割れが生じたためと考えられる^{3,5)}。

W/B が 15% の試験体の残存圧縮強度は W/B が 20% の試験体に比べて大きくなったが、加熱保持時間の影響については、W/B20% のケースと類似な傾向を示した。すなわち、1hr 保持のケースと 3hr 保持のケースでは G_{max} の影響による残存圧縮強度の差は小さかった。1hr 保持のケースでは s/a が 40% と 60% で比較すると残存圧縮強度はそれぞれ 83MPa と 104MPa であった。s/a が大きくなると 21MPa 程度の圧縮強度が大きくなった。3hr 保持のケースでも同様に傾向を示した。すなわち、s/a の増加により残存圧縮強度は 27MPa 程度大きくなった。

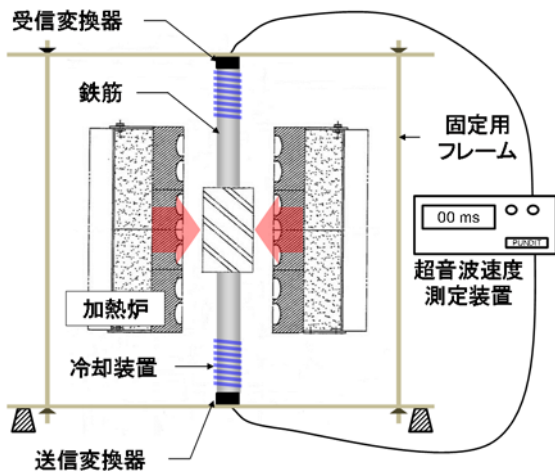
上記の結果からコンクリート中で粗骨材容積が残存強度に与える影響が大きいと仮定し、残存強度とコンクリート中の粗骨材容積(V_{ca}/V_{co})について整理した。図-6 に 500°C 加熱による残存圧縮強度比と粗骨材容積との関

係を示す。図より、1hr 保持のケースは V_{ca}/V_{co} が 0.19 の時、残存圧縮強度は 0.66 となり、 V_{ca}/V_{co} が 0.35 では残存圧縮強度比 0.48 となった。 V_{ca}/V_{co} が大きくなると残存圧縮強度は低下することがわかる。3hr 保持のケースにおいても V_{ca}/V_{co} が 0.19 から 0.35 に大きくなると残存圧縮強度比は 0.59 から 0.44 に低下する傾向を示した。

以上より、加熱を受けた超高強度コンクリートの残存圧縮強度はコンクリート中の粗骨材容積比から大きな影響を受けることが分かった。この理由として、コンクリート中の粗骨材容積が大きくなると、加熱時に粗骨材に生じるひび割れの影響及びひび割れが発生しやすい粗骨材とセメントペースト界面の面積が大きくなるためであると考えられる。

3.3 残存弾性係数

図-7 に 500°C 加熱における残存弾性係数と加熱保持時間の関係を示す。常温の弾性係数は W/B20% 場合は 40~42GPa であり、W/B15% の場合は 43~45GPa の範囲と



(a) 測定装置の概要

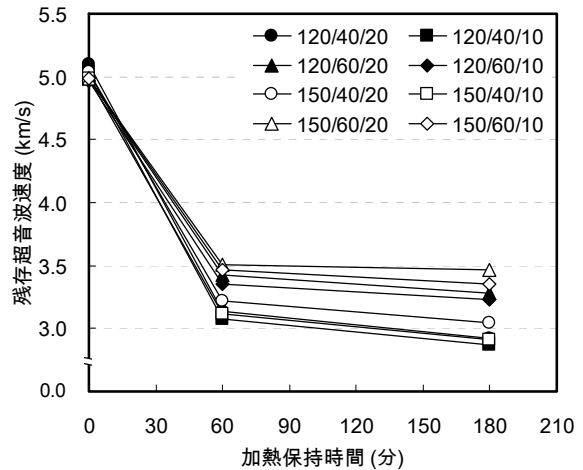
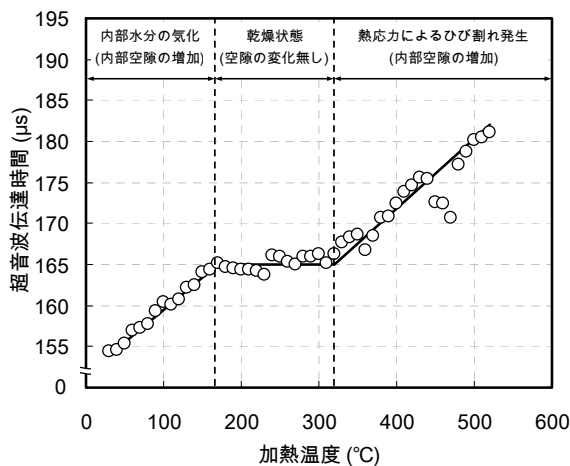


図-12 加熱保持時間による残存超音波速度



(b) 加熱中の超音波伝達時間

図-11 加熱中の超音波伝達時間の測定実験

なった。両ケースともに弾性係数は粗骨材の最大寸法と細骨材率の影響は少なかった。500°C 加熱のケースでは W/B に関係なく 8~17GPa の範囲となり、常温の弾性係数の 20~40%程度となった。

弾性係数においても圧縮強度のケースと同様に細骨材率が大きくなるほど残存弾性係数は増加する傾向が見られた。次に、図-8 に 500°C 加熱による残存弾性係数比と粗骨材容積(V_{ca}/V_{co})との関係を示す。図より、 V_{ca}/V_{co} が 0.19 から 0.35 に大きくなると、残存弾性係数比は 0.38 から 0.20 に小さくなった。この傾向は残存圧縮強度と同様となった。

図-9 に高温による圧縮強度と弾性係数の関係を示す。既往の予測式による常温時の力学関係から同等の圧縮強度においても高温加熱したコンクリートの弾性係数が常温の弾性係数よりもっと小さい。すなわち、高温によるコンクリートの耐力低下は圧縮強度に比べ弾性係数が大幅に低下する。これについては、図-10 に高温加熱したコンクリートのひずみと応力の関係から最大応力

でのひずみが高温により大きくなるためと思われる。

これは常温時の応力による最大ひずみに加え高温加熱に伴うコンクリートに熱膨張ひび割れが多く発生し、相対的に最大応力でのひずみが更にもっと大きくなるためだと考えられる。本研究の範囲で W/B15%試験体を 500°C 加熱した場合の最大応力でのひずみは常温時の 0.0042 より大きい 0.0059 を見られた。また、 V_{ca}/V_{co} が大きくなれば最大応力でのひずみは大きくなった。

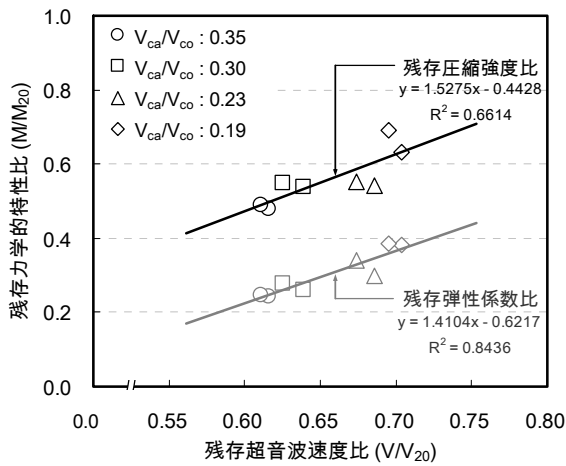
3.4 残存超音波速度

図-11 に本実験とは別に筆者らが行った加熱中コンクリートの超音波伝達時間を測定する実験の概要と結果を示した。加熱による超音波の送信子と受信子の損傷を防ぐために試験体の上・下部に冷却装置を設けた鉄筋を接触させて超音波を伝達した。その結果、鉄筋の影響があるため測定された伝達時間を定量的な評価に活用することはできなかったが、加熱温度が増やすほど超音波の伝達時間も増加する傾向を確かめた。

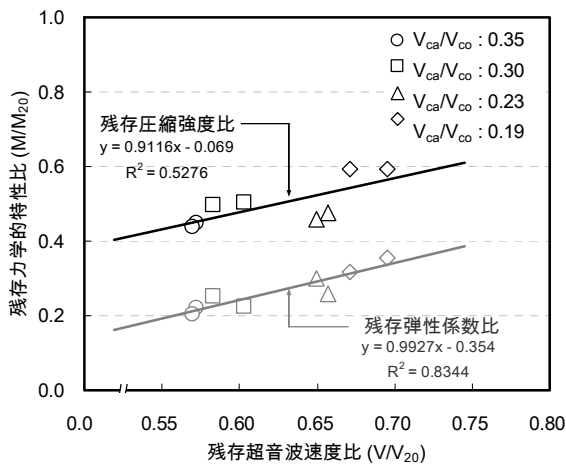
従って、加熱を受けたコンクリート内部ひび割れの密度と超音波速度が密接な関係があると判断して、超音波速度を評価して残存力学的特性との関係を検討した。

図-12 に常温と 500°C 1hr 保持及び 3hr 保持のケースにおける超音波伝播速度(以下、US)と加熱保持時間の関係を示す。超音波速度は常温まで冷却した後に PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) を用いて円柱形試験体の両端から超音波伝達時間を測定した。常温の超音波伝播速度は試験体の種類に関わらず 5km/s であった。

また、500°C で 1hr 保持ケースと 3hr 保持ケースでは 3.0km/s から 3.5km/s となり US は低下することが分かる。W/B が 20%の供試体を 3hr 保持した場合で比較すると s/a が 40%では 3.2km/s となり、s/a が 60%のものは US が 3.5km/s である。s/a が大きくなると US が大きくなる傾向にある。W/B が 15%のケースでも同様な傾向を示した。



(a) 1時間加熱保持



(b) 3時間加熱保持

図-13 残存超音波速度と残存力学的特性の相関関係

超音波計測の結果からも残存圧縮強度と残存弾性係数と同様な傾向が確認できた。

図-13に残存圧縮強度および残存弾性係数と超音波伝播速度比の関係を示す。超音波速度比(US_{500}/US_{20})は常温の US_{20} 伝播速度と 500°C 加熱時の伝播速度(US_{500})の比をとったものである。図より、加熱保持時間が長いほど試験体の温度が高くなり残存力学的特性は小さくなった。また、 V_{ca}/V_{co} が増加するほど US_{500}/US_{20} は小さくなり、残存圧縮強度と残存弾性係数も同じ傾向を見られた。超音波速度と残存力学的特性は相関関係があることが確認できた⁷⁾。以上より、超音波法を用いることで火災後のコンクリート構造物の残存力学性能を評価することができると思われる。

4. まとめ

粗骨材最大寸法と細骨材率による超高強度コンクリー

トの加熱後の残存力学的特性を評価した結果、次のようにまとめることができる。

- (1) 超高強度コンクリートの爆裂が生じていない低速加熱に 500°C まで加熱した後の力学的特性を評価した結果、粗骨材の最大寸法による影響は殆どなかった。しかし、粗骨材の容積が大きくなる場合、残存力学的特性がさらに低下する傾向が明らかに確かめた。
- (2) 500°C に加熱した後の残存圧縮強度と残存弾性係数における弾性係数が圧縮強度より大幅に低下したことは、コンクリートの内部に生じたひび割れのためにひずみが大きくなったことであると思われる。
- (3) 超高強度コンクリートの加熱による内部ひび割れ発生と力学的特性の低下は超音波速度を測って評価ができるし、超音波速度は粗骨材の容積に応じたひび割れが生じる傾向をよく反映したものと判断される。

謝辞

本論文は教育科学技術部と韓国研究財団の地域革新人力養成事業(2012H1B8A2025606)の支援を受けて遂行された。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Amr, S.E., "Mechanical, Durability and Microstructural Characteristics of Ultra-High-Strength Self-Compacting Concrete Incorporating Steel Fibers," Materials and Design, V.30, 2009, pp. 4286-4292.
- 2) Cheng, F.P., Kodur, V.K.R., and Wang, T.C., "Stress-Strain Curve for High Strength Concrete at Elevated Temperatures," Journal of Materials in Civil Engineering, V. 16, No. 1, pp. 84-90.
- 3) Schneider U., "Behaviour of Concrete at High Temperatures," Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, 1982
- 4) AIJ Committee, "Guide Book for Fire-Resistive Performance of Structural Materials" Architectural Institute of Japan, 2009
- 5) 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, p. 94-99.
- 6) Kim, Y.S., "A Study on the Evaluation of Fire Resistance Properties of Reinforced High-Strength Fiber Concrete Columns," Dr. Eng. thesis, Chungnam National University; Republic of Korea: 2010
- 7) Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., Liu, J.Y., "Evaluation Residual Compressive Strength of Concrete at Elevated Temperatures Using Ultrasonic Pulse Velocity," Fire Safety Journal, V. 44, 2009, pp. 121-130.