

論文 養生条件が高強度コンクリートの圧縮クリープに及ぼす影響

黄 義哲*1・金 圭庸*2・南 正樹*3・文 洞載*4

要旨: 本研究では、超高層建築物に適用した 70, 80, 90MPa 級高強度コンクリートについて養生条件 (気乾/封緘) による圧縮強度, 弾性係数, 自己及び乾燥収縮, 圧縮クリープに関する実験を行った。その結果, 封緘養生条件での圧縮強度と弾性係数は, 気乾養生条件に比べて試験体の圧縮強度の水準に関わらずやや高くなった。また, 本研究の範囲で検討した ACI-209 モデルによる高強度コンクリートの圧縮クリープ予測結果は, 実測値と大きな差が見られた。したがって, 圧縮クリープの予測精度を高めることができる高強度コンクリートの終局クリープ係数を実験結果に基づいて, 養生条件によって提案した。

キーワード: 高強度コンクリート, 圧縮強度, 弾性係数, 自己収縮, 乾燥収縮, 圧縮クリープ

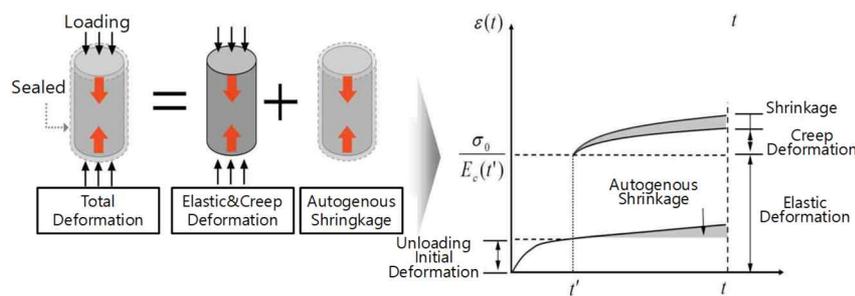
1. はじめに

圧縮クリープは持続荷重を受ける部材で, 荷重による弾性変形が生じた後に, 追加荷重の作用がない場合にも, 時間の経過によって変形が増加する物理的現象である。コンクリートはセメント, 骨材, 水, 混和材料などからなる複合体であり, 内部に空隙があるため不均質材料である。そのためクリープ特性は一般的な均質材料に比べて多様に生じる可能性がある¹⁻⁵⁾。

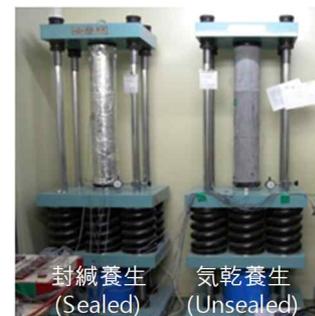
最近, 超高層建築物の需要が増加することによって 80MPa 級以上の高強度コンクリートを使用する建設現場が多くなり, 高強度コンクリート部材の圧縮変形の予測に対する重要性は高くなっている⁶⁾。したがって, 時

間によるコンクリート構造物の変形挙動を予測するために様々なモデルが提案されており, これらのモデルはコンクリートの調合特性と環境の影響を考慮して表現している⁷⁻⁹⁾。

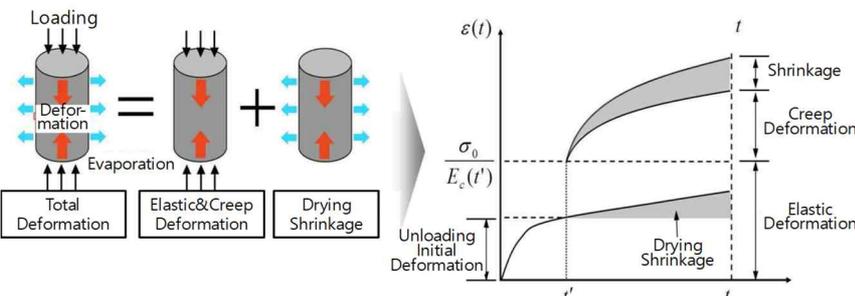
一方, 韓国ではコンクリートの圧縮変形挙動を予測する場合, 主に ACI-209 モデル⁷⁾を採用することが多い。しかし, ACI-209 モデルをに基づくコンクリートの圧縮クリープ予測値は実際のコンクリート構造物の圧縮変形挙動と異なる結果が出ると報告されている^{9,10)}。したがって, 実際の材料や現場の条件を考慮したコンクリートの圧縮クリープ値の予測が必要である。特に高強度コンクリートの場合, 長期材齢になるほど実測値と予測値の



(a) 封緘養生条件



(a) クリープ評価



(b) 気乾養生条件



(b) 収縮評価

図-1 養生条件による圧縮クリープ変形の概要

図-2 試験の概要

- *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 工科大学 建築工学科 教授 工博 (正会員)
- *3 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 助教授 工博 (正会員)
- *4 大韓民国 ロッテ E&C R&D センター シニアマネージャー (非会員)

表-1 実験計画及びコンクリートの調合

| ID ^{*1} | W/B (%) | Slump flow (mm) | Air (%) | S/a (%) | 単 位 量 ^{*2} (kg/m ³) | | | | | | Fiber content (kg/m ³) | 養生条件 | 評 価 項 目 |
|--------------------------|---------|-----------------|---------|---------|--|-----|-----|----|-----|-----|---|--|---|
| | | | | | W | C | FA | SF | S | G | | | |
| 90N-S 90F-US 90F-S | 23.8 | 650 ± 20 | 1.8 | 45.1 | 155 | 481 | 130 | 39 | 697 | 874 | Nylon 0.570 + Polypropylene 0.455 | 封緘養生 (Sealed) 気乾養生 (Unsealed) | ・圧縮強度 (MPa) ・弾性係数 (MPa) ・自己収縮 ・乾燥収縮 ・圧縮クリープ |
| 80F-S 80F-US | 27.2 | 650 ± 20 | 1.7 | 47.9 | 158 | 443 | 114 | 23 | 768 | 863 | | | |
| 70F-S 70F-US | 29.1 | 650 ± 20 | 1.8 | 48.0 | 163 | 418 | 110 | 22 | 776 | 868 | | | |

*1 試験体の ID : 設計基準強度 - 繊維混入の有無 (F, N) - 養生条件 (封緘/気乾)

*2 W : 水, C : セメント, FA : フライアッシュ, SF : シリカフェーム, S : 細骨材, G : 粗骨材

差が大きくなる傾向があると報告されている⁹⁻¹¹⁾。しかし、一般的にコンクリートの圧縮クリープ試験は6ヶ月以上のデータを取得することが必要であり、実際建設現場で利用できる研究資料はまだ少ない¹²⁻¹⁴⁾。

そこで、本研究は超高層構造物に適用した70, 80, 90MPa級高強度コンクリートに対して養生条件による材料特性と圧縮クリープ変形特性を検討した後、既存の圧縮クリープモデルに基づいて修正モデルを提案したものである。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画および試験体作製

本研究の実験計画及びコンクリートの調合を表-1に示す。設計基準強度70, 80, 90MPa級高強度コンクリートに対して圧縮強度、弾性係数、自己収縮、乾燥収縮、圧縮クリープ係数を評価した。コンクリートの圧縮クリープは、図-1に示すように養生条件によって異なる傾向があり、特に高強度コンクリートは一般強度コンクリートに比べて乾燥収縮が少なく、初期材齢の自己収縮発現が大きいため、養生と強度の条件を考慮して、コンクリートの圧縮クリープを評価する必要がある。

試験体の作製には、密度3.15g/cm³、比表面積3,770cm²/gの普通ポルトランドセメント、密度2.58g/cm³、吸水率1.0%、最大寸法5mmの海砂の細骨材、密度2.66g/cm³、吸水率1.4%、最大寸法20mmの石灰岩砕石の粗骨材で、全ての骨材は表面乾燥状態のものを用いた。また、結合材として密度2.20g/cm³、比表面積3,000cm²/gのフライアッシュと密度2.50g/cm³、比表面積200,000cm²/gのシリカフェームを置換した。

また、高強度コンクリートの耐火性能を確保するために、表-2に示すように、2種類の繊維を1:1で混合し、

表-2 繊維の物理的特性

| | 長さ (mm) | 直径 (μm) | アスペクト比 | 密度 (g/cm ³) | 引張強度 (MPa) | 伸長 (%) | 弾性係数 (GPa) | 融点 (°C) |
|---------------|---------|---------|--------|-------------------------|------------|--------|------------|---------|
| Nylon | 12.49 | 23.8 | 524.8 | 1.14 | 903.2 | 18.9 | 5.0 | 219.9 |
| Polypropylene | 19.17 | 37.0 | 518.1 | 0.91 | 611.4 | 21.7 | 5.8 | 167.7 |

コンクリートの全体積に対して0.1vol.%となるよう添加した。本研究では、繊維の有無による高強度コンクリートの力学的特性と圧縮クリープ特性を確認するために設計基準強度90MPa級コンクリートについては繊維無混入条件を追加した。

2.2 試験方法

圧縮強度と弾性係数はKS F2405「コンクリートの圧縮強度試験方法」とKS F2438「コンクリート円柱供試体の静弾性係数およびポアソン比試験方法」に準じて行った。また、自己収縮と乾燥収縮はKS F 2586「セメントペースト、モルタル、コンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法」とKS F 2424「モルタルやコンクリートの長さ変化試験方法」に準じて行った。

圧縮クリープ試験用試験体は、KS F 2453「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準じてφ150×300mmで作製し、打設直後から24時間後、気乾養生条件の試験体は脱型して材齢7日まで20±2°Cの温度条件で湿潤養生し、載荷材齢である28日まで相対湿度50±10%の条件で気乾養生を行った。また、封緘養生条件の試験体は脱型直後ビニールラップとアルミニウムテープで密封して養生した。

圧縮クリープ試験の載荷量は材齢28日の圧縮強度の40%に設定し、載荷後2年間測定した。圧縮クリープ試験により測定した総変形量から荷重載荷直後の瞬間弾性変形量と収縮変形量を差し引いて、圧縮クリープ変形量を計算した。本研究では、荷重載荷直後の瞬間弾性変形率と載荷荷重と初期接線弾性係数を利用して導出された圧縮クリープ係数に基づいて分析・検討した。圧縮クリープ係数導出のための式(1)は以下の通りである⁷⁾。

$$\epsilon_{\sigma} = f_c(t') \left[\frac{1}{E_a(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_a} \right] \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{σ} : 作用応力によるコンクリート瞬間変形率及びクリープ変形を含む全体変形率

$f_c(t')$: 材齢 t' 日のコンクリート圧縮応力(MPa)

E_a : 加圧材齢の初期接線弾性係数(MPa)

$\phi(t, t')$: 初期変形率に対するクリープ変形率の比

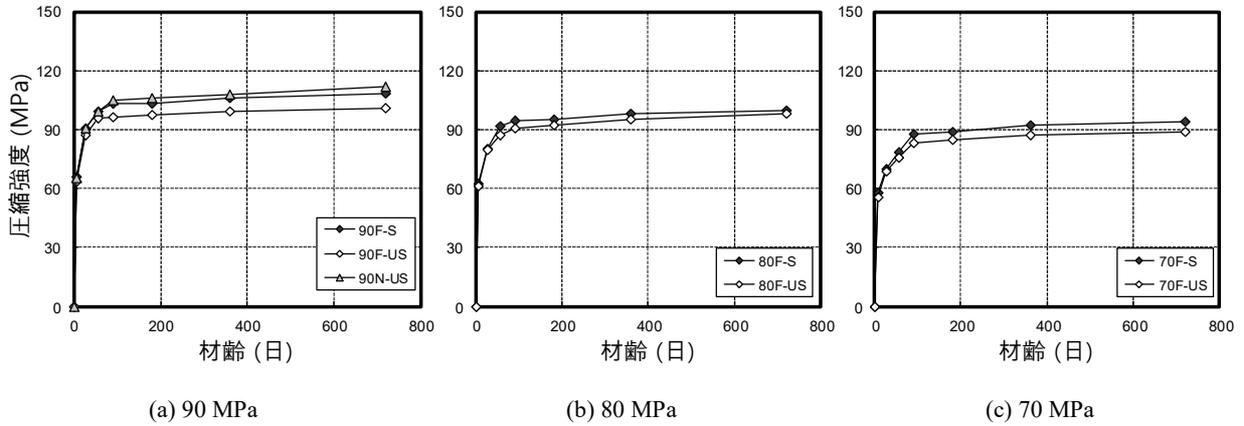


図-3 圧縮強度測定結果

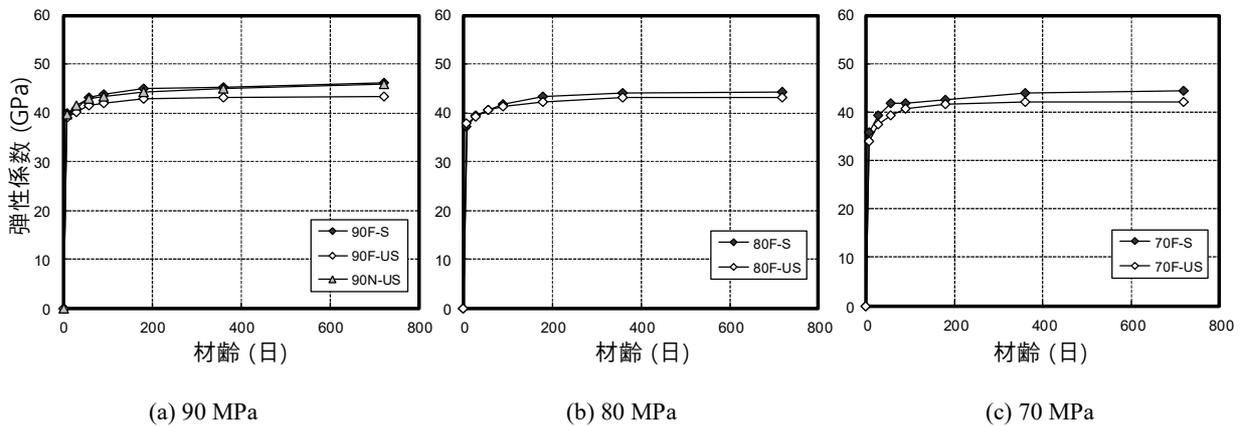


図-4 弾性係数測定結果

ACI-209⁷⁾で提示する圧縮クリープ係数は式(2)及び(3)のように、荷重載荷時の材齢と環境要因によって決定される終局クリープと荷重載荷後の時間に伴う圧縮クリープの発生を表現する式の積で表現される。終局クリープ v_u は、それぞれの影響因子 γ_c が 1 以下の値で表現され、ここで補正係数 2.35 を乗じて導出するので、それ以上の

$$v_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} v_u \quad (2)$$

$$v_u = 2.35 \times \gamma_c \quad (3)$$

ここで、 t : 荷重載荷以後時間 (day)

v_t : 終局クリープ係数

v_u (Ultimate Creep coefficient)

γ_c : 相対湿度, スランプ, 空気量などの影響要因係数

v_t : 時間による圧縮クリープ係数

表-3 ACI-209 の適用条件 (γ_c)

| f_{ck} | 載荷材齢 (日) | Slump flow (mm) | S/a (%) | Air (%) | 相対湿度 (%) |
|----------|----------|-----------------|---------|---------|----------|
| 90N | 28 | 660 | 45.1 | 1.6 | 50 |
| 90F | 28 | 640 | 45.1 | 1.8 | 50 |
| 80F | 28 | 635 | 47.9 | 1.7 | 50 |
| 70F | 28 | 635 | 48.0 | 1.7 | 50 |

値を超えていない特性がある。また、ACI-209 の γ_c の適用条件を表-3 に示した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度と弾性係数

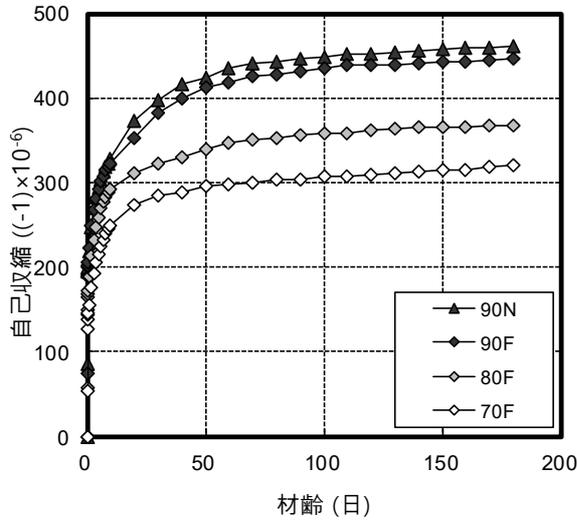
設計圧縮強度、養生条件、繊維混入の有無によるコンクリートの圧縮強度の評価結果を図-3 に示す。材齢 28 日の圧縮強度の場合、封緘養生条件の 90F, 80F, 70F 試験体は気乾養生条件の 90F, 80F, 70F 試験体に比べて約 2~4%高くなった。また、材齢 720 日の場合は封緘養生条件の方が約 3~7%程度圧縮強度が高いことが分かった。

繊維混入の有無による圧縮強度を比較するために 90 MPa コンクリートを対象に比較した結果、既往研究¹⁵⁾と類似の結果として、圧縮強度が約 3%減少する傾向が見られた。

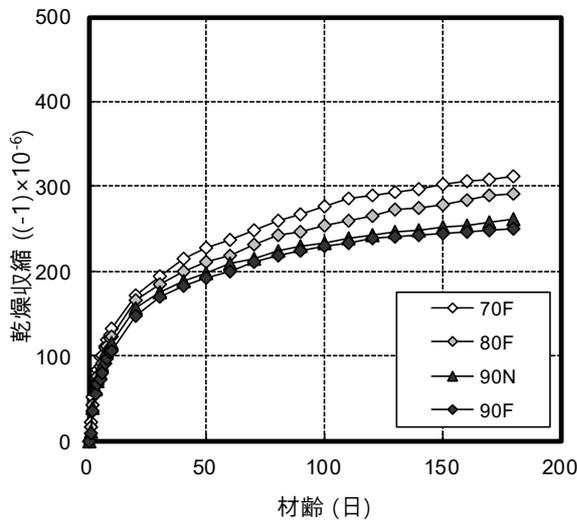
また、図-4 に高強度コンクリートの弾性係数の測定結果を示す。材齢 28 日では、封緘養生条件の弾性係数は気乾養生条件の試験体に比べて 1~4%高くなり、材齢 28 日を基準に、繊維混入による弾性係数の差は 3%であり、圧縮強度の場合と同じ力学的特性が得られた。

3.2 自己収縮と乾燥収縮

圧縮強度による高強度コンクリートの自己収縮と乾燥



(a) 自己収縮



(c) 乾燥収縮

図-5 収縮評価結果

収縮の測定結果を図-5 に示す。また、収縮を正すために、図の収縮の単位 (-1) を乗じて表現した。本研究では、初期材齢の収縮挙動を比較・検討するために、材齢 180 日まで評価した。その結果、コンクリートの圧縮強度が高いほど

自己収縮も増加し、特に材齢 7 日以内に約 70%以上の自己収縮が生じた。自己収縮は初期材齢、すなわち荷重が載荷される前にその進行の大部分が終了するため、自己収縮が支配的な封緘養生条件の圧縮クリープは、収縮による影響が少ないと判断される。

しかし、乾燥収縮の場合、材齢 90~100 日では全体の乾燥収縮変形の約 70%の変形が生じており、コンクリートの圧縮強度が高いほど乾燥収縮が小さくなることが分かった¹⁶⁾。

気乾養生条件の場合、乾燥収縮が圧縮クリープに及ぼ

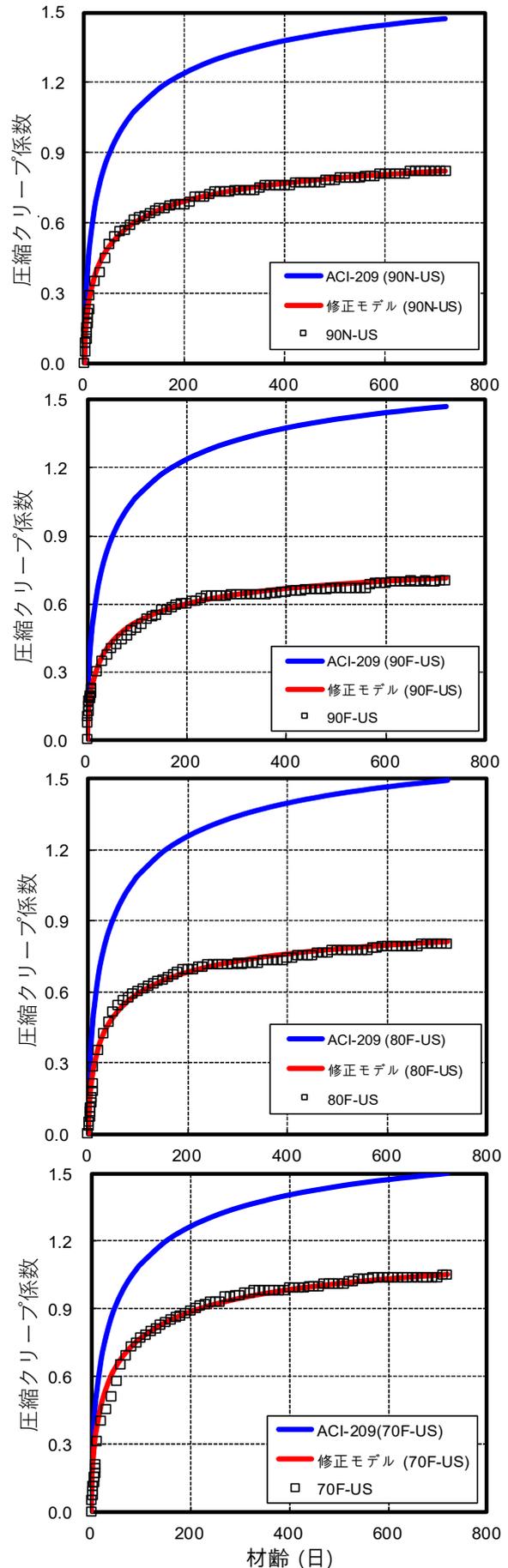


図-6 圧縮クリープ係数 (気乾養生条件)

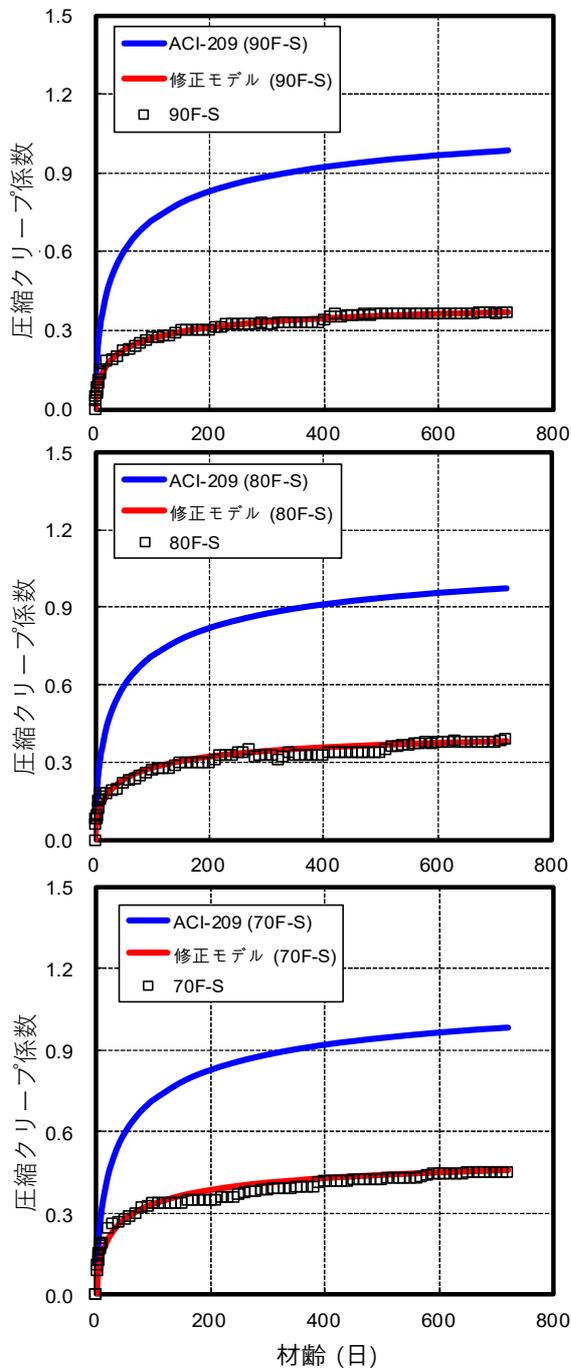


図-7 圧縮クリープ係数 (封緘養生条件)

す影響が大きいと判断され、これはコンクリートの水分の蒸発に影響を受ける。コンクリートの圧縮強度が高いほど圧縮クリープに及ぼす乾燥収縮の影響は相対的に減少すると考えられる。

一方、繊維を混入した場合、自己収縮及び乾燥収縮が約2~4%低減した。このような収縮低減効果は、繊維によるコンクリートマトリックスの拘束と水分移動の抑制の影響であると報告されている⁹⁾。

3.3 圧縮クリープ係数

圧縮強度と養生条件による高強度コンクリートの圧縮クリープ係数を図-6及び図-7に示す。実測結果と ACI-

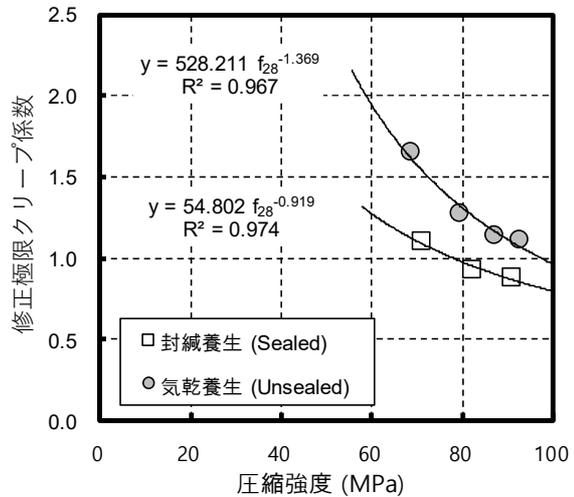


図-8 終局クリープ係数の修正モデル (28日材齢)

209 モデルの結果及び修正した ACI-209 モデルを使用した予測結果を提示した。

封緘養生条件の実験による 90F-S, 80F-S, 70F-S 試験体の圧縮クリープ係数は材齢 720 日に各々 0.36, 0.39, 0.45 であった。気乾養生条件の試験体の圧縮クリープ係数は、封緘養生条件の試験体と比較して約 2.0~2.3 倍高くなり、90MPa コンクリートの場合、気乾養生条件で繊維混入により約 15% 圧縮クリープ係数が減少することが分かった。

一方、ACI-209 モデルを用いた分析結果、コンクリートの圧縮クリープ係数は実測値に比べて気乾養生条件では約 2.2~2.6 倍、封緘養生条件では約 1.4~2.1 倍高く評価されていることが分かった。高強度コンクリート部材の収縮変形の解析に ACI-209 モデルを適用する場合には、高強度コンクリートの収縮変形特性を考慮した圧縮クリープを考慮すべきであると判断される。

したがって、本研究では ACI-209 モデルの終局クリープ係数値である 2.35 に対して、高強度コンクリートの変形特性の評価結果に基づいて、圧縮強度と養生条件を考慮した終局クリープ係数の修正モデルを式(5), (6), (7)及び図-8 に示した評価式として提案する。

$$v_u' = \alpha \times \gamma_c \quad \text{式(5)}$$

$$\alpha_1 = 528.21(f_{28})^{-1.369} \quad (\text{気乾養生}) \quad \text{式(6)}$$

$$\alpha_2 = 54.802(f_{28})^{-0.919} \quad (\text{封緘養生}) \quad \text{式(7)}$$

ここで、 v_u' : 修正された終局クリープ係数 (予測提案モデル)

$\alpha_{1,2}$: 修正された定数 (圧縮強度を反映)

f_{28} : 28 日の圧縮強度 (MPa)

提案式は本研究の範囲内で適用が可能であり、使用材料、調合、環境条件などを考慮して汎用性の検討が必要であると思われます。また、追加の研究を計画しており、過去の研究と今後の研究と一緒に比較して適用可能性を

検証する予定です。

4. まとめ

超高層構造物に適用した 70, 80, 90MPa 級高強度コンクリートに対して養生条件による圧縮クリープ特性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 高強度コンクリートの圧縮強度と弾性係数は、封緘養生条件の方がやや高く、繊維混入の方がやや低いことから高強度コンクリートの圧縮強度と弾性係数に養生条件と繊維混入が及ぼす影響は少ないことが分かった。
- (2) 気乾養生条件はコンクリート試験体の乾燥収縮に及ぼす影響が大きく、乾燥収縮は圧縮クリープに直接的な影響を及ぼす。コンクリートの圧縮クリープ検討時、乾燥収縮の影響を考慮する必要があると考えられる。
- (3) ACI-209 モデルを用いた高強度コンクリートの圧縮クリープ係数の検討結果、実測値に比べて気乾養生条件では約 2.2~2.6 倍、封緘養生条件では約 1.4~2.1 倍高く評価された。
- (4) 70, 80, 90 MPa 級高強度コンクリートの収縮特性と圧縮クリープ評価結果を用いて、ACI-209 モデルの終局クリープ係数を導出する評価式を提案することができた。

謝辞

本論文は 2019 環境省の財源に韓国環境産業技術院 (KEITI) の支援を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。(No. 2019002750003)

参考文献

- 1) Bažant, Z. P., & Baweja, S.: Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage 1. statistics and sensitivity. *Materials and structures*. Vol.28, No.7, 415-430, 1995.
- 2) Jonasson, J. E., & Persson, B.: Creep. In *Design Handbook*. The Consortium for Research of HPC Structures. Technical University of Luleå Luleå. 2-7, 1998.
- 3) Persson, B.: Hydration and strength of high performance concrete. *Advanced Cement Based Materials*, Vol.3, No.3-4, 107-123, 1996.
- 4) Persson, B.: Self-desiccation and its importance in concrete technology. *Materials and Structures*, Vol.30, No.5, 293-305, 1997.
- 5) Persson, B.: Correlating laboratory and field tests of creep in high-performance concrete. *Cement and concrete*

Research, Vol.31, No.3, 389-395, 2001.

- 6) Kim SW, Koh KT, Song YC, Park HS.: Estimation method of drying shrinkage and creep in concrete structures. *Korea Concrete institute*. Vol.17 No.4, pp.25-33, 2005.
- 7) ACI Committee 209.: Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures, *ACI manual of concrete practice*. American Concrete Institute, Detroit, 1999.
- 8) CEB-FIP, CEBFIP.: Model code for concrete structures. *Bulletin D'Information*, 1990.
- 9) Moon JH.: Evaluation of creep models with the consideration of concrete's strength level. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. Vol.14, No.4, pp.154-159, 2010.
- 10) Pan, Z., Lü, Z., & Fu, C. C. Experimental study on creep and shrinkage of high-strength plain concrete and reinforced concrete. *Advances in Structural Engineering*, Vol.14, No.2, pp.235-247, 2011.
- 11) Oh BH, Lee MG, Yoo SW, Baik SH.: A study on the strength and drying shrinkage crack control characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete. *Korea Concrete institute*. Vol.8, No.6, pp.151-161, 1996
- 12) Kim WS, Cho HW, Oh JK, Yom KS. : Measured and predicted column shortening of a tall reinforced concrete building. *Korea Concrete institute*. Vol.11, No.3, pp.161-170, 1999.
- 13) Kim, G. Y., Kim, H. S., Miyauchi, H., Kim, J. J., Koo, K. M., & Moon, H. J.: Influence of Spalling Resistance Fiber and Surface Drying Condition on the Shrinkage Properties of High Strength Concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. Vol.28, No.10, pp.81-88, 2012.
- 14) Ko, J. H., Yoo, S. Y., Koo, J. S., Moon, H. J., Kim, J. J., & Park, S. J.: An experimental study to apply for high-rise construction according to various technical properties of ultra high-strength concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. Vol.28, No.1, pp.85-92, 2012.
- 15) Han, C. G., Yang, S. H., Han, M. C., & Pei, C. C.: Spalling prevention of high strength concrete with 60–100 MPa of the compressive strength corresponding to addition of polypropylene fibre. *Arch Inst Korea*, Vol.24, pp.91-98, 2008.
- 16) Vardhan, K., Siddique, R., & Goyal, S. Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol.228, 2019.