

山岳覆工コンクリートの若材齢時の圧縮強度推定に関する解析的検討

(株)奥村組 ○正会員 Rajib Kumar Biswas 正会員 齋藤 隆弘 正会員 松本隆太郎

1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートでは、脱型時期を判定するための強度推定に積算温度が用いられる場合が多い。しかしながら、若材齢時における異なる温度条件下でのコンクリートの積算温度と強度の関係を把握した事例は少なく、既存の方法では脱型時のコンクリートの圧縮強度推定の精度が保証されない可能性がある。本報では、若材齢時の圧縮強度試験およびセメントの水和をモデル化した解析に基づき、若材齢時のコンクリートの圧縮強度と積算温度との関係を把握するとともに、異なる温度履歴における解析で算出した圧縮強度と実測値との整合性を確認した。

2. 実験概要

著者らは、水セメント比（以下、W/C）=0.5においてコンクリートの若材齢時の圧縮強度推定に関する検討を実施した¹⁾。本報ではそれに加え、W/C=0.4のケースの検討を実施した。コンクリートの若材齢時の圧縮強度試験（供試体寸法：Φ100mm×200 mm）を材齢5 時間から 21 時間まで実施した。実験ケースは、練上がり温度を20℃、材齢21時間までの封かん養生の温度を20, 30, 40, 50℃とした。コンクリートの温度は、温度測定用の供試体中央部に配置した熱電対を用いて測定した。コンクリートの配合を表 1 に示す。

また、若材齢時の圧縮強度の推定指標として、積算温度を用いている。積算温度の算出式を式 1 に示す。

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad \cdots \cdots \text{式 1}$$

ここに、M：積算温度（℃・hr）、t：時間（hr）、T：コンクリート温度（℃）、T₀：基準温度

3. 解析概要

若材齢時の状態変化を再現するための数値解析に材料－構造連成応答解析システム「DuCOM－COM3」を用いた。解析モデルを図 2 に示す。解析モデルは、実験で用いた供試体と同程度の寸法の10cm×10cm×20cmとした。また、配合および養生条件は実験と同様とした。本解析コードでは、セメントの水和反応とそれに基づく、水和熱および空隙への水和物の充填をモデル化することで、若材齢時の圧縮強度の推定を可能にしている

2). 圧縮強度 f_c の推定式を式 2 に示す。

$$f_c = f_{\infty} \{1 - \exp(-\alpha D_{\text{hyd.out}}^{\beta})\} \quad \cdots \cdots \text{式 2}$$

ここに、f_∞：水和物の完全充填時の強度、α, β：材料定数

D_{hyd.out}：初期毛細管空間に対する水和物が占める体積比率

4. 実験結果および解析結果

コンクリート供試体の温度履歴を図 2 に、圧縮強度試験結果を図 3 に示す。養生環境の温度と水和熱の影響により、各供試体の温度が上昇し、ピークを迎えた後、徐々に温度が低下し、養生温度に漸近する。この温度履歴

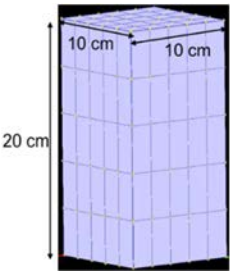


図 1 DUCOM-COM3の解析モデル

表 1 コンクリートの配合 (W/C=0.4)

スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	最大粗骨 材寸法 (mm)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)	
					水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	高性能AE減 水剤	AE剤
35~50	4.5±1.5	40	52.2	25	169	423	766	946	3,500	7
備考 W：水道水、C：普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³ 比表面積 3,080cm ² /g S：細骨材(長良川水系 川砂)表乾密度2.59g/cm ³ 、G：粗骨材(長良川水系 砂利)表乾密度2.62g/cm ³										

キーワード 覆工コンクリート、積算温度、若材齢、加温養生、FEM解析

連絡先 〒300-2612 茨城県つくば市大砂387 奥村組 技術本部技術研究所 TEL 029-865-1521

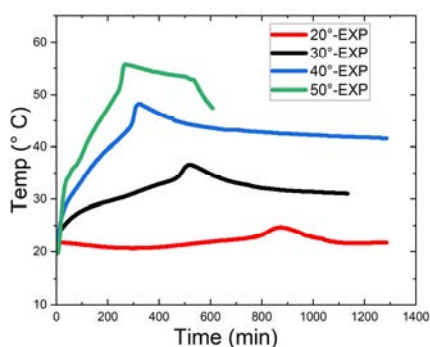


図2 コンクリート供試体の温度履歴

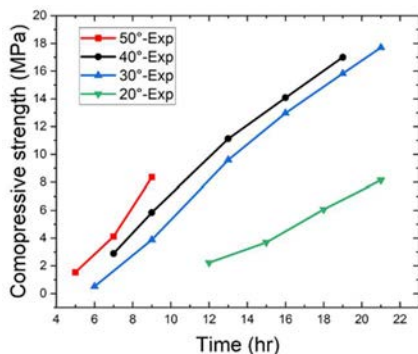


図3 圧縮強度試験結果

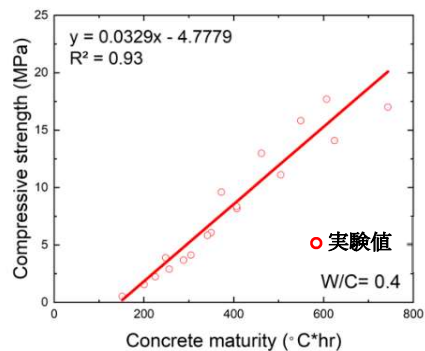


図4 若材齢時の圧縮強度試験結果

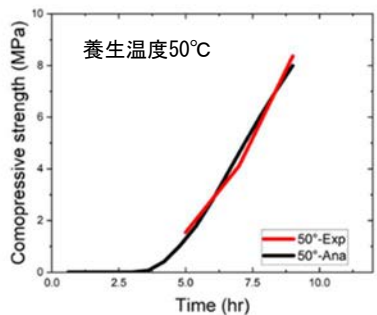
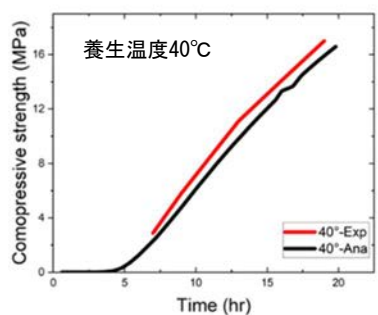
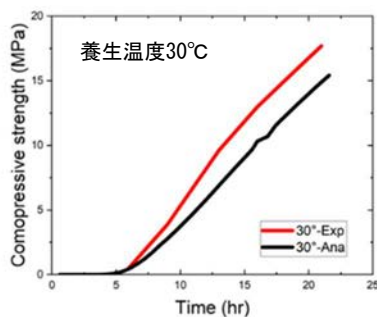
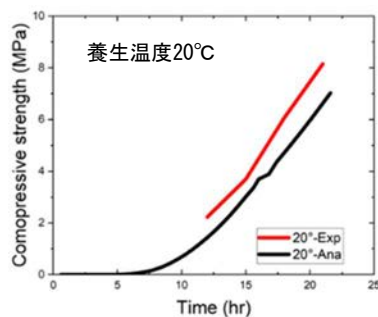


図5 実験結果と解析結果の比較

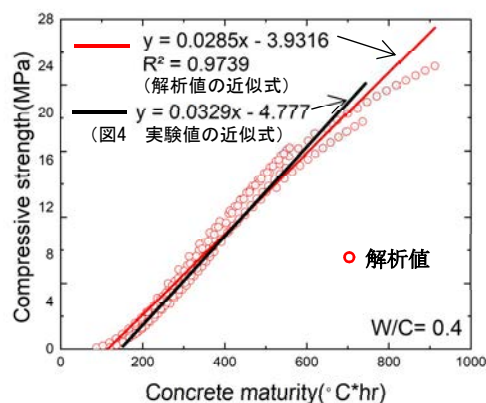


図6 W/C=0.4における解析上の圧縮強度と積算温度の関係

歴がセメントの水和反応に影響を与えることで、各養生温度においてコンクリートの強度発現状況が異なる結果となっている。

図4にW/C=0.4の若材齢時の圧縮強度試験結果と積算温度の関係を示す。積算温度式(式1)の T_0 を7°Cとした場合、圧縮強度と積算温度にほぼ線形な関係が得られることがわかる。

図5に供試体の圧縮強度の実験値と式2による解析値の比較を示す。養生温度が20°Cおよび30°Cの場合、実験値の方が10~20%程度解析値を上回っているが、養生温度40°C、50°Cでは一致している。このことから、W/C=0.4における解析による圧縮強度推定の精度は、養生温度が20°C~30°Cの場合は、実測値よりやや低い安全側の結果を示し、40°C以上の高温で養生する場合は、十分な精度が確保できると考えられる。

図6に解析において式2から算出された圧縮強度と解析で算出された積算温度の関係を示す。ここで積算温度式(式1)における T_0 は実験と同様に7°Cとした。解析結果においても、圧縮強度と積算温度に明確な線形関係が確認され、その近似式は実験により得られた近似式と概ね一致することを確認した。

5. おわりに

今回の実験と解析では、セメントの水和をモデル化した解析による若材齢時の圧縮強度と積算温度の関係が、実験値とほぼ同様の結果となることを確認した。今後、W/C=0.6の場合の実験値と解析値の比較、高炉セメントを用いた場合の検討等を実施する予定である。

【参考文献】

- 1) 遠藤ら: 積算温度を用いた覆工コンクリート脱型時の圧縮強度推定に関する検討, 土木学会第74回年次学術講演会 VI-251, 2022
- 2) K. Maekawa et al: Multi-scale modeling of structural concrete, CRC press, 2008