

MMST外殻構造の火災時挙動に関する解析的検討（その1）
〔高流動コンクリートの高温特性〕

首都高速道路（株） 正会員 吉川 直志 正会員 津田 浩輝
大成建設（株） 正会員 ○市原 三馨 正会員 佐藤 充弘 馬場 重彰

1. はじめに

MMST（Multi-Micro Shield Tunneling）工法の外殻構造に求められる性能の一つとして、道路部で発生する RABT 火災を想定した火災加熱に対する安全性確保が設定されている。筆者らは実験および解析の両面から安全性を検討し、火災中および火災後の補修時においても MMST 外殻構造が十分な構造安定性を有することを確認してきた¹⁾。一方、外殻構造全体に対する火災加熱の影響や変形状態を検討するには、構成材料にもとづいた温度履歴および応力履歴を考慮した解析手法が有効な手段となる。そこで、MMST 外殻構造を構成する高流動コンクリートの高温特性の基礎データを得ることを目的として、常温から 800℃までの熱間圧縮試験および昇温時において発生する圧縮応力に依存する不可逆的な収縮ひずみである過渡ひずみ（Load induced thermal strain, 以下 LITS）を把握するための試験（LITS 試験）を実施し、そのモデル化を試みた。

2. 試験体の製作

使用材料を表-1、コンクリート配合を表-2 に示す。コンクリートには爆裂防止用として有機繊維（φ0.05mm、長さ10mm）を1.5kg/m³混入した。試験体寸法はφ100mm×h200mmである。養生は現場封緘とし、材齢6～7ヶ月で試験を実施した。

3. 実験方法

載荷加熱方法を図-1 に示す。加熱には電気炉を用い、試験体温度は高さ方向3レベルのコンクリート表面に設置した熱電対により測定し、表面温度2℃/分で昇温させた。試験体の変位は試験体表面に石英棒の一端を押し当て、電気炉外に引き出した石英棒片端の移動量を変位計で計測し、試験体材軸方向および半径方向のひずみに換算した。

熱間圧縮試験では、設定温度に到達後、試験体断面温度の均一化および石英棒の熱膨張の安定を得るために120分間温度一定にしてから漸増載荷した。試験温度は、常温、50℃、100℃、200℃、300℃、350℃、400℃、500℃、600℃ならびに800℃の10水準とした。

LITS 試験では、軸力比を試験変数とし、所定の軸力(軸力比0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4)を載荷した後、コンクリート温度800℃を上限として加熱を行った。

4. 実験結果

4. 1 熱間圧縮試験

高温時の応力-軸方向ひずみ関係を図-2、温度と圧縮強度の関係を図-3、温度と圧縮強度時の軸方向ひずみの関係を図-4、温度とヤング係数の関係を図-5 に示す。ヤング係数は、圧縮強度の1/3での割線剛性として評価した。

応力-ひずみ関係は、常温から400℃までは最大応力近傍まで直線的な初期勾配を有している。500℃以上の領域では、比較的初期の低応力レベル時から直線的な変形状態を有しなくなった。高温時圧縮強度は、常温時に対して100℃で低下、200℃で上昇して300℃では同程度であった。300℃を超えると温度とともに徐々に低下した。高温圧縮強度時のひずみは、常温から200℃までは同程度(0.2～0.3%)であり、300℃以上では温度とともに上昇し、800℃では0.7%であった。高温時ヤング係数は、常温時に対して100℃で上昇して200℃では同程度であった。200℃を超えると温度とともに低下し、800℃では常温時の約20%程度であった。

表-1 使用材料

セメントC：普通ポルトランドセメント(密度3.22g/cm ³)
混和材LS：石灰石微粉末(密度2.71g/cm ³)
細骨材S：君津産山砂(表乾密度2.60g/cm ³)
粗骨材G：上磯産石灰碎石(表乾密度2.69g/cm ³)
混和剤BP：増粘剤(密度1.44g/cm ³)
高性能AE減水剤SP：ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの配合

W/C	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	C	LS	S	G	BP	SP
55.0	4.5	51.5	163	296	304	788	767	0.3	8.1

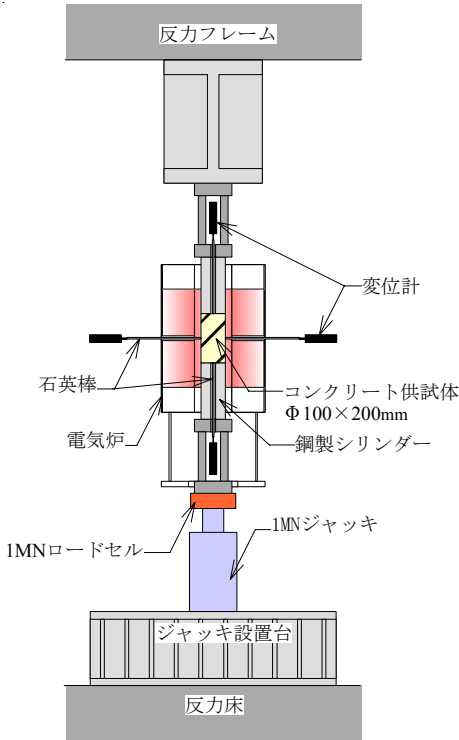


図-1 載荷加熱方法

キーワード MMST, シールドトンネル, 火災, 過渡ひずみ, 応力-ひずみ関係, 高温特性

〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7230

4. 2 LITS 試験

昇温時の材軸方向ひずみと表面温度の関係を図-6 に示す。同図中のひずみは、軸力比 0 の場合には熱膨張ひずみを、荷重が作用している場合には、熱膨張ひずみ、載荷荷重に応じた応力ひずみ、および過渡ひずみの合計を表している。ここで、過渡ひずみとは昇温時において発生する圧縮応力に依存する不可逆的な収縮ひずみである。

5. コンクリートの熱的特性のモデル化

高温時の応力-ひずみ関係の形状は Popovics 式³⁾を高温時に発展させた、式(1)を用いた。応力-ひずみ関係のモデルと実験結果を図-2 に示す。同図より、良好なモデルが得られた。

$$\sigma_c(\varepsilon_c, T) = \sigma_B(T) \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}(T)} \times \frac{n_1(T)}{n_1(T) - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cl}(T))^{n_2(T)}} \quad \cdots (1)$$

ここに、 $\sigma_c(\varepsilon_c, T)$: 温度 T , ひずみ ε_c での応力, $\sigma_B(T)$: 温度 T での圧縮強度, ε_c : 応力ひずみ,

$\varepsilon_{cl}(T)$: 温度 T での最大圧縮時のひずみ, $n_1(T), n_2(T)$: 温度 T での定数

熱膨張ひずみは、軸力比 0 の LITS 試験結果から回帰式(2)の $\alpha(T)$ を算定した。モデルと実験結果を図-6 に示す。

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T) \times T \quad \cdots (2) \quad \text{ここに、} T: \text{温度} (^{\circ}\text{C}), \alpha(T): 8.0 \times 10^{-6} T^2 + 4.1 \times 10^{-3} T + 3.7 \text{ (} 1/^{\circ}\text{C)}$$

過渡ひずみは式(3)⁴⁾を採用した。式(3)中の k 値は常温から 400℃までの値を近似し、3.72 とした(図-7)。

$$\varepsilon_{tr} = k \times \varepsilon_{th} \times (\sigma / \sigma_B(20)) \quad \cdots (3) \quad \text{ここに、} \varepsilon_{tr}: \text{過渡ひずみ, } \sigma: \text{存在圧縮応力, } \sigma_B(20): \text{常温時の圧縮強度,} \\ \varepsilon_{th}: \text{熱膨張ひずみ, } \sigma / \sigma_B(20): \text{存在軸力比}$$

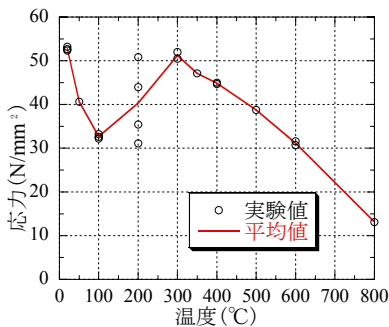


図-3 温度-圧縮強度関係

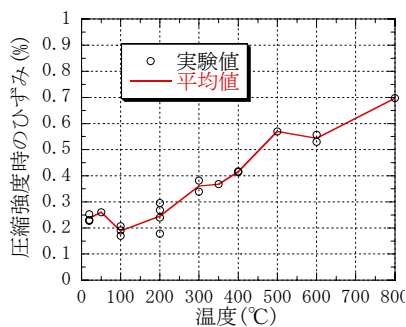


図-4 温度-圧縮強度時のひずみ関係

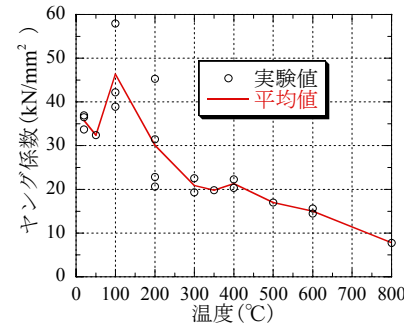


図-5 温度-ヤング係数関係

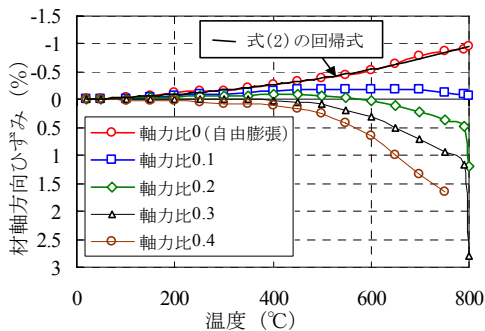


図-6 昇温時の材軸方向ひずみと表面温度

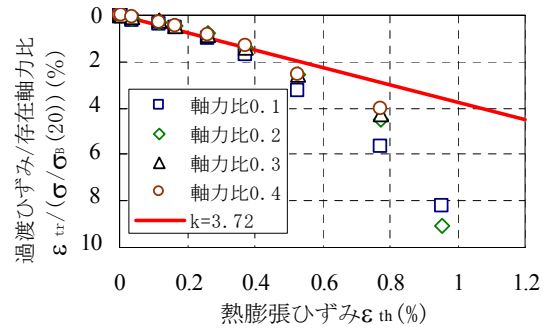


図-7 過渡ひずみのモデル化

6. まとめ

火災時における MMST 外殻構造の力学的挙動を解明するため必要となる高流動コンクリートの高温時の圧縮強度、ヤング係数等の性状を明らかにすることができた。さらに、精度良いモデル化を構築できた。

参考文献

- 1) 相川智彦 他: MMST 工法への適用を考慮した有機繊維混入コンクリートの耐火性検討 (その 1~その 3), 土木学会 第 61 回年次学術講演会講演概要集 (平成 18 年 9 月), pp. 799-804
- 2) 相川智彦 他: MMST 外殻構造の耐火性検討 (その 1~その 3), 土木学会 第 62 回年次学術講演会講演概要集 (平成 19 年 9 月), pp. 1197-1202
- 3) Sandor Popovics et al, "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete," Cement and Concrete Research, Vol.3, pp. 583-589, 1974
- 4) 豊田康二他: 普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究 (その 4. 過渡ひずみの定式化), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 2002 年 8 月, pp. 33-34