

MMST 外殻構造の火災時挙動に関する解析的検討 (その3)

〔応力変形挙動〕

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 外殻構造では道路供用時の火災加熱 (RABT 火災を想定) に対して、火災中および火災後の補修時に外力に対して十分な耐力を有することを確認している^{1),2)}。

一方、MMST 外殻構造全体の火災時挙動を実験的に把握することは困難であり、解析的手法により評価することが有効な手段である。そこで、MMST 外殻構造の火災時における応力変形挙動を解析的に把握することを目的として、火災中の温度、応力状態にもとづいた一方向連成の弾塑性熱応力変形解析を実施した。その際、前報に示した MMST 工法に使用するコンクリートの高温特性、実験結果にもとづき得られた断面内温度分布結果を反映させて解析を実施した。

2. 解析モデル

解析モデルおよび断面形状の一例を図-1 に示す。MMST 外殻構造は鋼殻部(SRC 構造)と鋼殻部の接続部(RC 構造)から構成される複合構造である。MMST 外殻構造の支持条件は引張テンションカットの地盤バネによってモデル化した。本解析では、長期荷重(土圧+水圧)を載荷し、火災は道路部での火災加熱を想定し同図に示す範囲とした。

3. 解析条件

熱応力解析には、材料および幾何学的非線形を考慮した弾塑性解析手法を用いた^{3),4)}。なお、断面内温度は、前報で示したフィッティング解析手法を用いて得られた値を採用した。

3. 1 コンクリートの力学特性

全ひずみを式(1)とし、応力ひずみ、熱膨張ひずみおよび過渡ひずみを考慮した。

$${}_c\varepsilon_{total} = {}_c\varepsilon_c + {}_c\varepsilon_{th} + {}_c\varepsilon_{tr} \cdots (1)$$

ここに、 ${}_c\varepsilon_{total}$: コンクリートの全ひずみ、 ${}_c\varepsilon_c$: コンクリートの応力ひずみ、 ${}_c\varepsilon_{th}$: コンクリートの熱膨張ひずみ、 ${}_c\varepsilon_{tr}$: コンクリートの過渡ひずみ

応力ひずみ、熱膨張ひずみおよび過渡ひずみは、前報で示したように、MMST 外殻構造で使用するコンクリートについて得られた値を採用した。また、応力-ひずみ関係は、最高受熱温度におけるデータにもとづいて決定した。

3. 2 鋼材および鉄筋の力学特性

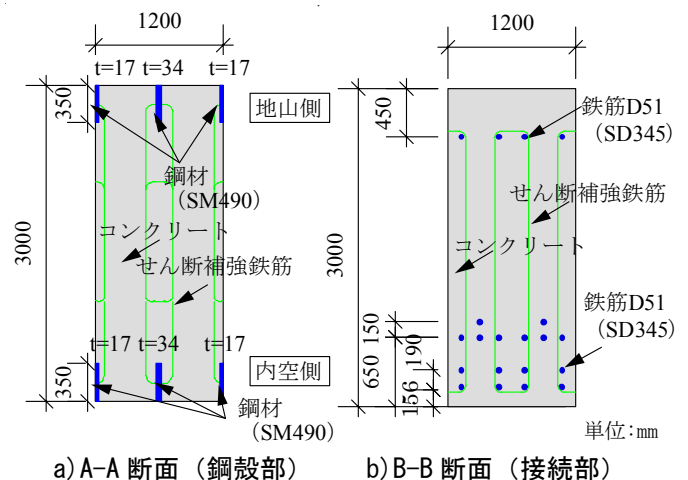
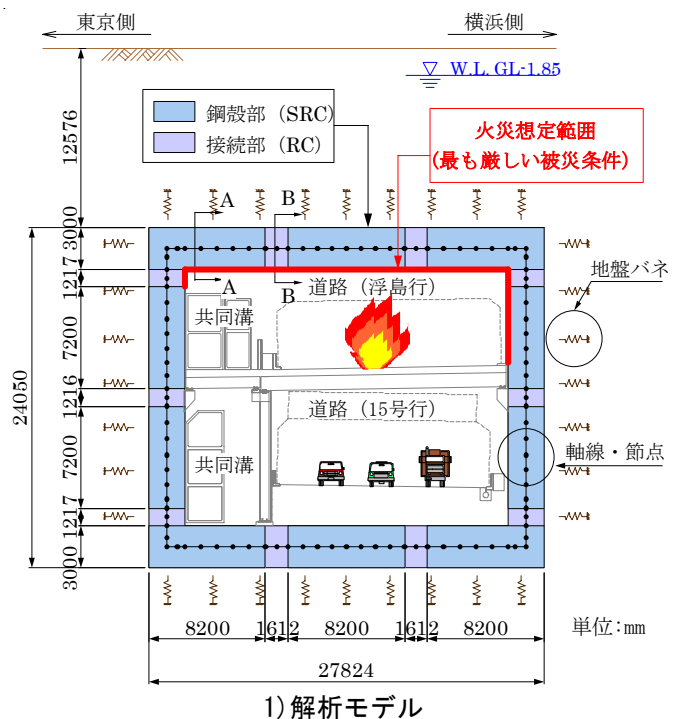
全ひずみを式(2)とし、鋼材および鉄筋では応力ひずみ、熱膨張ひずみを考慮した。

$${}_s\varepsilon_{total} = {}_s\varepsilon_c + {}_s\varepsilon_{th} \cdots (2)$$

ここに、 ${}_s\varepsilon_{total}$: 鋼材の全ひずみ、 ${}_s\varepsilon_c$: 鋼材の応力ひずみ、 ${}_s\varepsilon_{th}$: 鋼材の熱膨張ひずみ

高温時力学的特性は、文献 4), 5) に準じた。なお、継手鉄筋 D38 (SD345) の応力-ひずみ関係は SM490 に準じることとした。

また、加熱冷却時の応力-ひずみ関係は、受熱温度が 600℃以下では強度の回復が確認されている⁶⁾ことから、600℃以下ではその時点の温度にもとづき、600℃を超える場合には最高受熱温度にもとづいて決定した。



2) 断面形状の一例 (1 リング分)

図-1 解析モデルと断面形状の一例

キーワード MMST, シールドトンネル, 熱応力解析, 変形挙動

連絡先 〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安 1-2-4 オルトヨコハマ・ビジネスセンター3F TEL045-439-0754

4. MMST 外殻構造の熱応力解析結果

MMST 外殻構造の変形図を図-2、モーメント分布を図-3、頂版の軸力および側壁頂版側のせん断力の経時変化を図-4に示す。頂版のたわみ量は、加熱当初には頂版断面内での温度差（温度勾配）により急速に進むが、温度差が徐々に緩やかになるとともに進行具合が遅くなり、頂版中央位置では最大で 38mm、火災加熱後には 22mm であった。

頂版は熱膨張により伸び出すが、側壁により伸び出しが拘束されることにより、モーメントは常温時に対し端部で増加し中央部で減少、軸力は増加する。頂版端部の最大モーメントおよび最大軸力は常温時の約 1.3 倍であった。

側壁は頂版の熱膨張によりモーメントおよびせん断力が増加する。側壁頂版側のせん断力は常温時に対し最大で 1.3 倍であった。

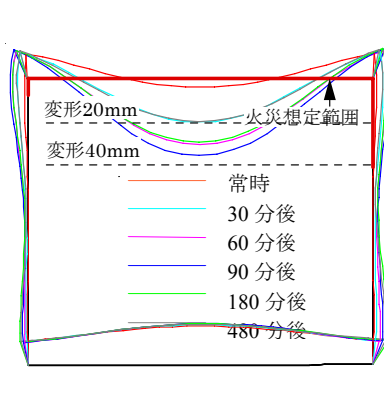


図-2 変形分布

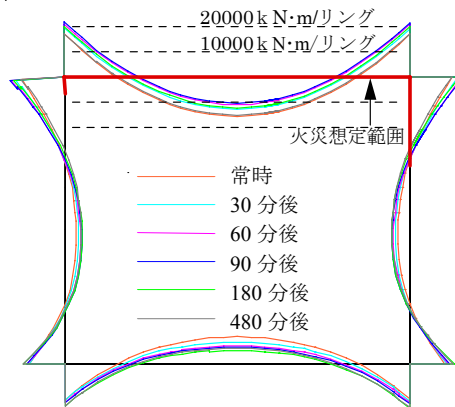


図-3 モーメント分布

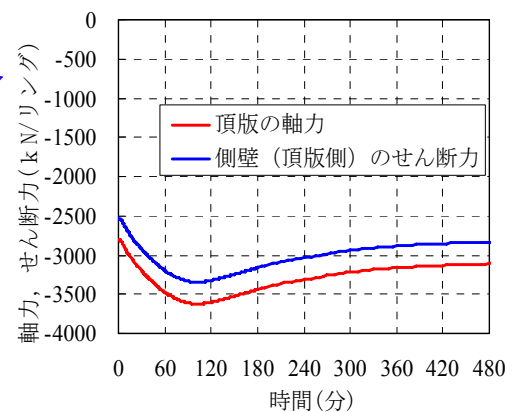


図-4 軸力とせん断力の経時変化

軸力は圧縮を（-）として表示

5. 頂版の高温時残存耐力の試算

頂版の火災時安全性を定量的に評価するため、火災時残存耐力の算出を試みた。まず、時間 t での頂版端部のモーメントをそれぞれ $M_1(t)$, $M_2(t)$, 中央位置でのそれを $M_3(t)$ とすると、単位長さ当りの作用荷重 w に対して式(3)が成立する⁷⁾。

$$M_1(t) + M_2(t) + 2M_3(t) = wL^2 \cdots (3) \quad \text{ここで、} L \text{ は頂版スパンの } 1/2$$

ここでは、頂版の終局状態に対する作用荷重の比を曲げ耐力残存率 $\alpha(t)$ (式(4)参照)と定義する。つまり、この曲げ耐力残存率が 1 となった時点で崩壊状態を意味することになる。

$$\alpha(t) = wL^2 / \{M_{p1}(t) + M_{p2}(t) + 2M_{p3}(t)\} \cdots (4) \quad \text{ここで、} M_{p1}(t), M_{p2}(t), M_{p3}(t) : \text{時間 } t \text{ での頂版両端部および中央部の曲げ耐力}$$

高温時の曲げ耐力は、1) 圧縮縁が圧壊ひずみに到達、2) 応力ひずみに関して平面保持を仮定、3) コンクリートおよび鋼材の応力-ひずみ関係は時間 t のデータにもとづいて決定、の条件から作用軸力と釣り合う中立軸位置を収束計算により求め、その時点での抵抗モーメントとして算出した。

曲げ耐力残存率の算定結果は、火災開始から 480 分時点まで 0.42~0.44 であり、崩壊に対して十分な安全性が確認された。なお、火災加熱を受けると断面内が高温になるものの、作用軸力の増加により曲げ耐力の上昇が考えられることから、480 分時点まで曲げ耐力残存率の値にほとんど変化はなかった。

6. まとめ

MMST 外殻構造に使用されるコンクリートから得られた高温時構成則、実験結果を反映させた断面内温度分布を用いて弾塑性熱応力変形解析を行い、MMST 外殻構造の火災時挙動を検討した。その結果、MMST 外殻構造は RABT 火災による火災加熱を受けても崩壊せず、火災に対する構造安定性を有することが確認された。また、頂版中央位置でのたわみ量は 38mm 程度であり、MMST 外殻構造全体への影響は小さいと言える。

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) Becker, J., Bresler, B.: "FIRES-RC A Computer Program for the Fire Response of Structure - Reinforced Concrete Frames," Report No. UCB FRG 74-3, University of California Berkley, July, 1974
- 4) 上杉英樹・小池浩：高層鉄骨架構の熱応力解析（その 1）区画火災を受ける超高層鉄骨架構の熱応力解析手法，日本建築学会構造系論文報告集 第 381 号，pp. 73-80，1987 年 11 月
- 5) EUROCODE4: "Design of Composite Steel and Concrete Structures," Part 1-2 Structural Fire Design, 1994.2
- 6) 日本建築学会：建物の火災診断及び補修・補強方法，2004 年 3 月
- 7) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ No. 63，2004 年 10 月