

コンクリートの養生条件が温度ひび割れに及ぼす影響についての検討

03A3706 梅田 啓吾
03A3730 林 数樹
指導教員 牧角 龍憲

1. はじめに

コンクリート構造物の水和熱によって起こる温度応力やひび割れ現象は、構造物の構造形式、境界条件、施工に使用される材料、施工方法、養生条件、気象などの様々な条件により影響を受ける。この温度応力による温度ひび割れは構造物の耐久性に大きな影響を与える。そこで、ひび割れが発生しやすい壁式橋脚を対象にして、養生条件を種々変化させた場合の2次元 FEM 温度応力解析を行い、温度ひび割れの発生を最小限に抑える養生方法について検討した。

2. 研究目的

マッシュ（分厚い）な壁状コンクリート構造物の施工において、型枠の種類、脱型時期および脱型後の被覆条件などが温度ひび割れに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。コンクリート表面から外気への熱伝達条件を変化させた FEM 応力解析を行い、各条件による温度ひび割れ指数最小値の変化について検討した。ここで温度ひび割れ指数は次式で求められ、値が 1 以下の場合ひび割れ発生確率は 50%以上になり、値が小さいほど発生確率が高くなる。

$$\text{温度ひび割れ指数} = \frac{\text{コンクリートの引張強度}}{\text{温度応力}} \quad (1)$$

3. 検討内容

壁式橋脚においては、壁の第 1 リフト目に温度ひび割れが発生する確率が高いため、図-1 に示すような代表的な橋脚の第 1 リフトまでを対象にして、すなわち構造条件は一定にして、熱伝達率条件の他に施工時期（夏期、冬期）および単位セメント量も変化させて材齢一ヶ月までの温度解析を行った。

4. 解析条件

解析に用いた条件を表-1～表-7 に示す。ただし、フーチングについてはすべてのケースにおいて同じ条件とし、脱型 7 日とし、型枠の熱伝達率は 8W/m²C、散水養生の熱伝達率は 8W/m²C、コンクリート露出面の熱伝達率は 14 W/m²Cとする。

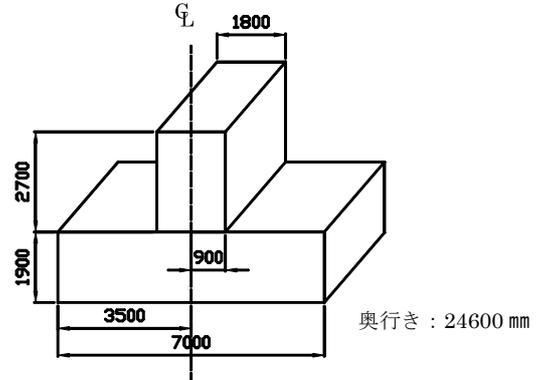


図-1 解析対象の構造物

表-1 初期温度および打設温度

| | | 夏 | 冬 | 温度固定 | 備考 |
|------------|-------|------|------|------|---------------------|
| 初期温度 | 岩盤 | 25°C | 10°C | あり | 下端部のみ固定(岩盤の初期温度と同じ) |
| 初期温度(打設温度) | フーチング | 30°C | 10°C | なし | - |
| | 壁 | 30°C | 10°C | なし | - |

表-2 打設日、脱型日および解析終了日

| | 夏 | | 冬 | |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| フーチング | 8月1日 打設 | | 1月10日 打設 | |
| | 8月8日 脱型 | | 1月17日 脱型 | |
| 壁 | 8月15日 脱型 | | 1月24日 脱型 | |
| | 5日後 脱型 | 8月20日 脱型 | 5日後 脱型 | 1月29日 脱型 |
| | 7日後 脱型 | 8月21日 脱型 | 7日後 脱型 | 1月31日 脱型 |
| | 10日後 脱型 | 8月22日 脱型 | 10日後 脱型 | 2月3日 脱型 |
| | 14日後 脱型 | 8月23日 脱型 | 14日後 脱型 | 2月7日 脱型 |
| 解析終了日 | 9月15日 | | 2月24日 | |

表-3 材料特性値

| | 熱伝達率(W/m ² C) | 密度(kg/m ³) | 比熱(W/m ² C) |
|--------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 岩盤 | 3.45 | 2400 | 0.8 |
| コンクリート | 2.7 | 2350 | 1.15 |

表-4 材料の強度特性

| | ヤング係数(N/mm ²) | 圧縮強度(N/mm ²) |
|--------|---------------------------|--------------------------|
| 岩盤 | 4000 | - |
| 高炉セメント | - | 24 |

表-5 外気温

| | |
|-------|--------|
| 夏の外気温 | 28.9°C |
| 冬の外気温 | 7.4°C |

表-6 FEM 応力の材料特性値

| | |
|-------|---------|
| ポアソン比 | 0.16 |
| 線膨張係数 | 0.00001 |

表-7 断熱温度上昇量および温度上昇速度に関する定数

| | 夏(打設温度30°C) | | 冬(打設温度10°C) | |
|---------|-------------|----|-------------|------|
| 単位セメント量 | α | Q | α | Q |
| 300 | 1.382 | 45 | 0.493 | 47 |
| 340 | 1.522 | 49 | 0.549 | 51.4 |

(1) FEM 温度解析の操作方法

- ①メッシュ分割する際、温度差が激しくなると予想される所はメッシュを細かくし図-2 の様にする。
- ②材料特性値を表-3 より入力する。
- ③解析終了日は表-2 より入力し、タイムステップの設定は2時間間隔とする。
- ④熱伝達率は岩盤、フーチングを一定とし、壁の条件を様々に変化させて入力する。
- ⑤断熱温度上昇量の計算や温度解析データの保存をしたのち温度解析を行う。

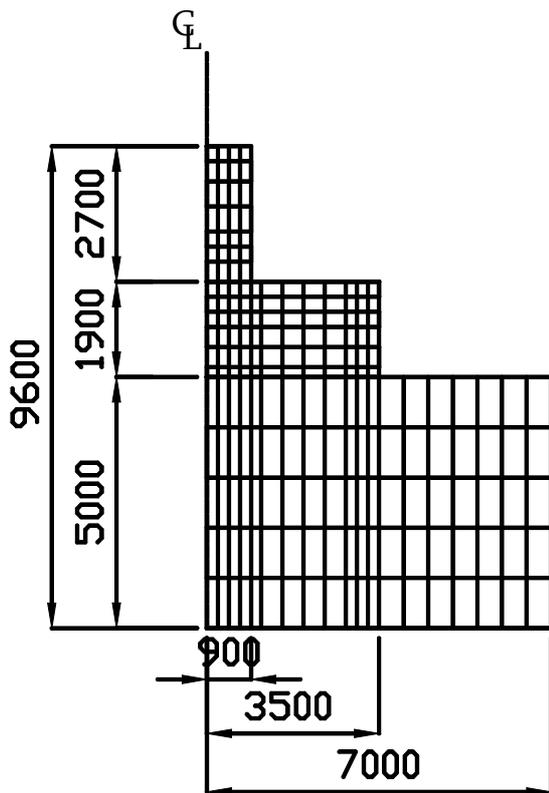


図-2 温度解析の寸法と要素分割図 (奥行き:24600 mm)

(2) FEM 応力解析の操作方法

- ①FEM 温度解析で使用したメッシュを読み込む。
- ②拘束される箇所を入力する。その際、縦軸を X 方向、横軸を Y 方向で固定する。
- ③岩盤、フーチング、壁の材料の強度特性を表-4 より入力する。フーチングと壁は同じコンクリートを使用しているため、同じ特性値を入力する。
- ④応力解析データの保存をし、FEM 応力解析を行う。

(3) 補足

- ・施工場所は福岡県とする。
- ・セメントは高炉セメント B 種を使用する。

6. 解析結果と考察

6.1 型枠の熱伝達率の影響

(1) 目的

型枠の熱伝達率を変化させる事により、脱型前と脱型後での温度ひび割れ指数最小値がどのように影響するか検討する事を目的とする。

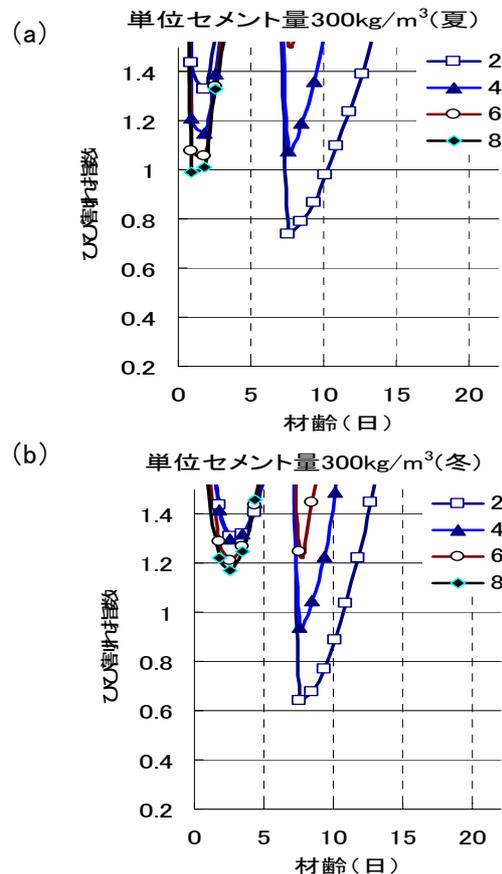
(2) 解析の設定条件

型枠の熱伝達率を 2, 4, 6 および 8 W/m²°C とした場合について検討した。散水養生の熱伝達率 8 W/m²°C, 脱型後のコンクリート露出面の熱伝達率は 14 W/m²°C で一定とする。

脱型日は、すべて材齢 7 日とする。

(3) 解析結果と考察

図-3 に型枠の熱伝達率、すなわち保温性を変化させた時のひび割れ指数の経時変化を示す。一般に用いられる合板型枠の熱伝達率は 8 W/m²°C であり、その場合には、図-3 (C) にみられるように脱型前にひび割れ指数が 1 以下になりひび割れが発生する可能性が高い。そこで、シート被覆などによって型枠の熱伝達率を変えた結果、図にみられるように脱型前のひび割れ発生を抑制する効果があることが解った。しかしながら、型枠の保温性が高まるほど脱型後にひび割れが発生する確率が高くなる傾向がみられた。



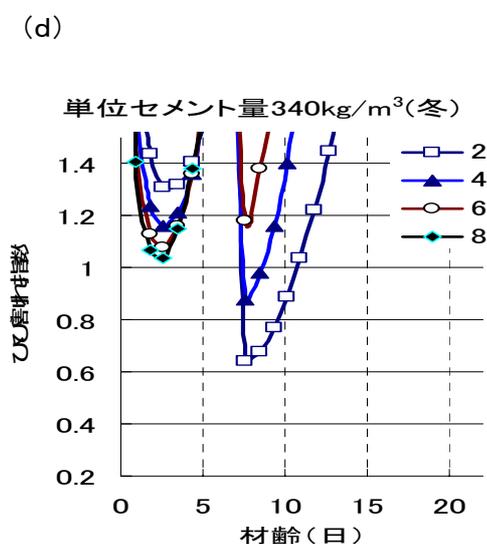
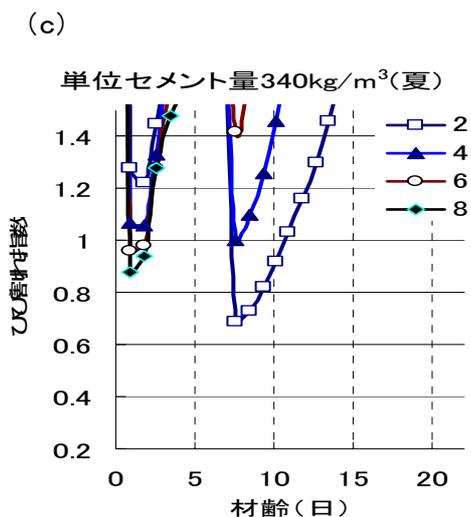


図-3 型枠の熱伝達率を変化させた場合の経時変化

6.2 コンクリート露出面の熱伝達率の影響

(1) 目的

脱型した後でのコンクリート露出面の熱伝達率を変化させる事により、温度ひび割れ指数最小値がどのように影響するか検討する事を目的とする。

(2) 解析の設定条件

型枠の熱伝達率は $8 \text{ W/m}^2\text{C}$ 、散水の熱伝達率 $8 \text{ W/m}^2\text{C}$ で一定とし、脱型後のコンクリート露出面の熱伝達率は変化させ検討する。

(3) 解析結果と考察(FEM 応力解析)

表-9 に脱型日とコンクリート露出面の熱伝達率を変化させた場合の最小ひび割れ指数を示す。一般に用いられるコンクリート露出面の熱伝達率は $14 \text{ W/m}^2\text{C}$ であり、脱型 5 日、脱型 7 日でもコンクリー

ト露出面の熱伝達率を上げると最小ひび割れ指数は大きく下がった。また、外気の気温が冷たい冬季にコンクリート露出面の熱伝達率を上げると温度差が激しくなり、最小ひび割れ指数は大きく下がると思われたが、夏期の下がり具合とあまり変わらなかった。

| 脱型日 | 単位セメント量 (kg/m^3) | 季節 | 露出面の熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{C}$) | | |
|-----|-----------------------------|----|-------------------------------------|------|------|
| | | | 5 | 14 | 20 |
| 5日 | 300 | 夏 | 2.58 | 1.39 | 1.16 |
| | | 冬 | 2.37 | 1.17 | 0.97 |
| | 340 | 夏 | 2.38 | 1.3 | 1.1 |
| | | 冬 | 2.12 | 1.1 | 0.93 |
| 7日 | 300 | 夏 | 3.67 | 2.32 | 1.68 |
| | | 冬 | 3.23 | 1.57 | 1.28 |
| | 340 | 夏 | 4.44 | 1.91 | 1.47 |
| | | 冬 | 3.09 | 1.52 | 1.22 |

表-8 脱型日とコンクリート露出面の熱伝達率を変化させた場合の最小ひび割れ指数

6.3 脱型日を変化させての影響

(1) 目的

脱型時期を長くする事により、温度ひび割れ指数最小値にどのような影響を及ぼすのかを検討する事を目的とする。

(2) 解析結果と考察

表-8 に脱型日とコンクリート露出面の熱伝達率を変化させた場合の最小ひび割れ指数を示す。冬期にコンクリート露出面の熱伝達率が $20 \text{ W/m}^2\text{C}$ の時に脱型 5 日にすると最小ひび割れ指数が 1 以下になりひび割れが発生する確率が高くなる。そこで、冬期のように外気の温度が低い場合は、コンクリート露出面をシート被覆などによって熱伝達率を抑える必要がある。もしくは、脱型日を遅くすることによりひび割れ発生確率を抑制する効果があることが解った。また、脱型 10 日、脱型 14 日とすると、最小ひび割れ指数は脱型 7 日よりさらに上がり、コンクリート露出面の熱伝達率が 5, 14, $20 \text{ W/m}^2\text{C}$ において、2 以上になる。

6.4 施工時期が及ぼす影響

(1) 目的

施工する時期が夏期と冬季で温度ひび割れ指数最小値にどのような影響を及ぼすのかを検討する事を目的とする。

(2) 解析結果と考察

表-9 より、脱型日 5 日、7 日では夏期の方が最小ひび割れ指数は高かった。しかし、脱型日 10 日、14 日になると冬期の方が最小ひび割れ指数は高かった。そこで、季節によって脱型日を変化させることによりひび割れ発生確率を抑制することが可能となる。

図-3 より型枠においては、脱型前は夏期にひび割れが起こりやすく、脱型後は、脱型前とは逆に冬季はひび割れが起こる確率が高く、そして、変化も大きい。しかし、脱型後では季節によっての変化はあまりない傾向がみられた。

6.5 単位セメント量の影響

(1) 目的

単位セメント量がひび割れにどのような影響をもたらすのかを比較し、適しているのかを検討することを目的とする。

(2) 解析結果と考察

図-3~5 より、型枠の比較でもコンクリート露出面での比較でも全体的に単位セメント量は 340 kg/m³ より 300 kg/m³ の方がひび割れ発生確率は低くなる傾向がみられた。

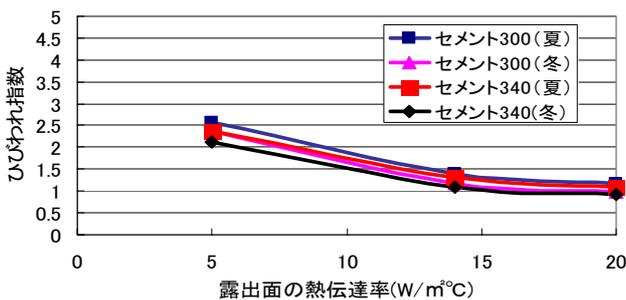


図-4 脱型 5 日での単位セメント量の比較

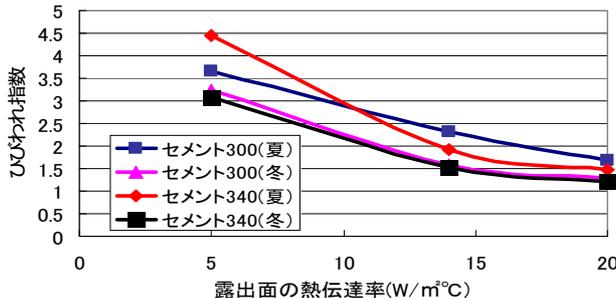


図-5 脱型 7 日での単位セメント量の比較

| 単位セメント量(kg/m ³) | 季節 | 脱型日(日) | 露出面の熱伝達率(W/m ² °C) | | |
|-----------------------------|----|--------|-------------------------------|------|------|
| | | | 5 | 14 | 20 |
| 300 | 夏 | 5日 | 2.58 | 1.39 | 1.16 |
| | | 7日 | 3.67 | 2.32 | 1.68 |
| | | 10日 | 9.15 | 4.09 | 3.28 |
| | | 14日 | 20 | 20 | 12.6 |
| 300 | 冬 | 5日 | 2.37 | 1.17 | 0.93 |
| | | 7日 | 3.23 | 1.57 | 1.28 |
| | | 10日 | 13.3 | 3.71 | 2.81 |
| | | 14日 | 20 | 20 | 12.6 |
| 340 | 夏 | 5日 | 2.38 | 1.3 | 1.1 |
| | | 7日 | 4.44 | 1.91 | 1.47 |
| | | 10日 | 8.55 | 3.84 | 3.04 |
| | | 14日 | 20 | 20 | 12.1 |
| 340 | 冬 | 5日 | 2.12 | 1.1 | 0.93 |
| | | 7日 | 3.09 | 1.52 | 1.22 |
| | | 10日 | 13.1 | 3.66 | 2.78 |
| | | 14日 | 20 | 20 | 20 |

表-9 単位セメント量と施工時期を変化させた場合の最小ひび割れ指数

7. まとめ

以上の解析結果により、型枠では熱伝達率 6 W/m²°Cが望ましく、脱型後にひび割れ発生確率が急激に高くなる問題点に関しては、コンクリート露出面の熱伝達率を低くすることで補える。そして、季節に合った脱型時期を選択することによりひび割れ発生確率を低くする方法で補ってもよい。単位セメント量を少なくするとひび割れ発生確率が低くなる。