

温度ひび割れの抑制対策（案）

1. 材料・配合

（1）セメント種の変更

温度ひび割れ抑制対策として有効な手段に、セメント種の変更があります。中でも効果の大きいセメントは低熱ポルトランドセメント、次いで中庸熱ポルトランドセメントが挙げられます。しかし、地域によっては使用できる生コン工場が限られ、コストも大幅に増加します。

（2）セメント量の低減

①高性能A E 減水剤の使用

高性能A E 減水剤の使用により、水セメント比を一定にして単位水量および単位セメント量を低減することができます。建築工事では単位水量低減を目的に一般的に用いられております。ただし、土木工事では、セメント量が少なすぎると分離傾向が大きくなることから、豆板の発生やポンプ施工時の閉塞などに注意する必要があります。

②フライアッシュの使用

フライアッシュを結合材として用いることで、単位セメント量を低減させて同一強度を得ることができます。一般的には単位結合材（セメント+フライアッシュ）量は同等以上となり、単位水量も低減でき、ワーカビリティも向上します。ただし、耐久性から指定する水セメント比の上限値を満足しようとするとき、水セメント比を水結合材比と読み替えて上限値を満足すると判断しなければ、単位セメント量削減にならないケースが多くあります。このことについては、発注者・設計者・施工者・生コン製造者の理解と合意が必要です。

（3）膨張材の使用

膨張材の使用は温度ひび割れでも外部応力ひび割れ抑制に効果があり、水和熱抑制型は部材寸法が大きい構造物に適しています。ただし、膨張材水和熱抑制型は気温が高いほど凝結が遅延するケースなどがあり、仕上げのタイミング、ブリーディング量の増加、型枠支保工の解体時期などには注意を必要とし、A E 減水剤遅延形との併用には特に注意が必要です。

- ① セメント【橋梁下部工、ボックスカルバート、擁壁】
- ・ 水和熱の発生量が少ない中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントを用いるのは有効である。但し、これらのセメントは強度の発現時期が遅く、強度の保証時期は56日、91日となっており、工程への考慮が必要である。また、プラント設備（セメントサイロ）の増設等の問題点もある。
- ② 混和材および混和剤【橋梁下部工、ボックスカルバート、擁壁】
- ・ フライアッシュをセメントの代替として使用する場合は水和熱の発生を抑制させるのに効果がある。ただし、セメントとの混合割合を大きくすると空気量や強度の発現に影響が出る。高知県ではセメントの内割20%のフライアッシュを使用し、単位セメント量を74 kg/m³、コンクリートの内部温度を10℃程度低減させた事例がある。
 - ・ 高炉スラグ微粉末は「施工時期による抑制」で記載しているが、冬季（低温時）の施工では効果が期待できるが、夏季（高温時）では逆効果となることがある。
 - ・ 混和剤では高性能AE減水剤（流動化剤）の使用も有効である。コンクリートの単位水量を少なくすることにより、セメントの配合量を少なくすることで水和熱の発生を少なくすることができる。
 - ・ フライアッシュと高性能AE減水剤を比較すると、単位セメント量を低減させる効果は代替の割合にもよるがフライアッシュの方が大きく、水和熱の発生が抑えられて温度ひび割れには有効である。
- ③ 膨張材【橋梁下部工たて壁および胸壁、ボックスカルバート】
- ・ 膨張材は、主にコンクリートの自己収縮や乾燥収縮によるひび割れ対策として使用されるが、水和熱低減型もあり部材厚の比較的大きい橋脚の胸壁やボックスカルバートの温度ひび割れにも効果がある。
- ④ 補強鉄筋【橋梁下部工たて壁および胸壁、擁壁】
- ・ 補強鉄筋を追加することにより、ひび割れを分散させたり、ひび割れ幅を小さく抑え、ひび割れが構造物の有害なものにならないように抑制する。最下端の中間帯鉄筋上に鉄筋を追加するのが効果的であるが、鉄筋比がたて壁等で0.3%以上、胸壁で0.5%以上になるように配筋方向に追加する場合もある。この方法は経済的で施工が容易である。（山口県土木建築部：コンクリート構造物品質確保ガイド P53）
- ⑤ ひび割れ誘発目地【橋梁下部工たて壁および胸壁、ボックスカルバート、RC擁壁】
- ・ 温度ひび割れのうち、制御が難しい外部拘束によるひび割れに対しては、ひび割れ誘発目地が最も有効である。鉄筋構造物に使用する誘発目地は止水効果のあるものが

望ましい。せん断力の大きい位置では不適で、誘発目地の断面欠損率は30～50%必要である。山口県では設置間隔はコンクリート温度が低い時期で5.0m、それ以外の時期は3.5mとしている。

⑥ その他のひび割れ低減材【橋梁下部工、ボックスカルバート、擁壁】

- ひび割れ低減材のうちファイバー状のものには、鋼繊維、ポリプロピレン、ガラス繊維などがある。現場で混入する機会が多いが、コンクリートのワーカビリティに影響を及ぼし、コンクリートポンプの閉塞や締固め不足などの弊害が起こる場合があるので、注意が必要である。
- ガラス繊維をネット状にしたタイプは、比較的簡単に設置できるがコンクリートの流動性の阻害になりやすく、コンクリートの締固めは十分に行う必要がある。外部拘束のひび割れ対策として使用する場合、ひび割れは拘束面から開放面に向かって進展するので、拘束面付近では間隔を密にし開放面付近では粗にすると効果的である。

2. 施工

(1) 打設時期

気温の高い時期は、水和熱によるコンクリート内部温度の上昇が大きくなるので、マスコンクリートの施工はできるだけ避ける。(山口県では6月から9月の間は原則としてマスコンクリートの施工を禁止している。)

高炉セメントの潜在水硬性は低温時には反応が遅れるが、高炉セメントは粉末度を大きくしているため、高温時には発熱量が多くなり普通ポルトランドセメントよりもコンクリート内部温度が大きくなるので注意が必要である。

(2) 施工方法

- ・断熱性の高い型枠を使用する。
- ・型枠はなるべく長期間存置する。
- ・気温の高い時期は、打設速度および1リフトの施工範囲、施工高さを検討し、気温のまだ上がらない午前中に打設を完了させるよう計画を立てる。可能であれば、気温の低い早朝よりコンクリートを打設する。
- ・温度上昇が大きいと予想させる場合は、パイプクーリング、プレクーリングを検討する。
- ・打設時のコンクリート温度を上げないように、型枠、鉄筋、ポンプの配管、アジテータ車のミキサーを冷却させる(ミキサーに耐熱塗装をした車両もある。)
- ・打設待ちのアジテータ車は日陰で待機させ、コンクリート温度の上昇を防ぐ。
- ・打設後はできるだけ速やかに遮光ネット、ブルーシート等で日除けをする。
- ・湿潤養生に用いる水は冷水を使用せず、汲み置きしたものを使用する。(コンクリート表面を冷却すると、コンクリート内部との温度差によりひび割れが発生する。)
- ・養生マットは保温性、保水性の高いものを使用する。
- ・コンクリート天端を湛水し、水和熱を利用した温水で養生を行う。(高知県で事例有り)
- ・型枠の解体は気温の高い午後に行い、できれば脱型後もシートや養生マットで保温する。

| 種類 | 材料による方法 |
|------|--|
| セメント | <ul style="list-style-type: none"> ・水和発熱の小さい、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメントを使用 ⇒市販されている高炉セメント B 種は温度依存性によって、水和反応が促進され、発熱速度が増加するケースもあるため、温度応力解析結果などを考慮して使用するセメントを選定する必要あり ・低発熱低収縮型高炉セメント B 種の使用 ⇒高炉スラグの比表面積、置換率、石こう添加量を調整することで発熱速度、自己収縮を低減。また、高炉セメント B 種の特徴である CO2 発生量の削減、ASR の抑制、塩分浸透抵抗性、化学抵抗性も向上。 |
| 混和材 | <ul style="list-style-type: none"> ○高炉スラグ微粉末 ・高炉セメント C 種以上の比較的高い置換率の結合材を使用 ⇒発熱速度などが減少するが、品質は製造会社によって異なるため、あらかじめ試験を行うことで品質確認が必要 ○フライアッシュ ・比較的高い置換率の結合材を使用 ⇒コンクリートのワーカビリティの改善により単位水量の低減に伴い単位セメント量の低減が可能。発熱速度が低下することに加えて、長期材齢による強度増進効果も得られる。ただし品質の差が大きいため事前の確認が必要 ○膨張剤 ・マスコンクリート用の膨張材を使用 ⇒一般の膨張材に水和抑制剤が添加されているため、発熱速度及び収縮を低減可能 |

| | |
|-----|---|
| | |
| 混和剤 | <ul style="list-style-type: none"> ・ AE 減水剤、AE 剤、減水剤、高性能減水剤の使用（促進形を除く） ⇒コンクリートのワーカビリティの改善により単位水量を低減させ、それに伴い単位セメント量を低減可能 ・ 収縮低減剤の使用 ⇒自己収縮の低減効果が認められているものを用いる必要あり |
| 骨材 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 収縮の抑制に寄与する骨材を使用 ⇒主として石灰石が挙げられるが、流通の問題によって汎用的でない |
| 配合 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 単位セメント量の低減 ⇒発熱挙動はセメント量に比例するため ・ 呼び強度の強度値を小さくする ⇒単位セメント量の増加に伴い発熱量等が大きくなるため、できる限り小さくすることが望ましい |
| その他 | <ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリートの打ち込み温度を低下 ⇒部材の発熱量、部材内外の温度差を低減させることが可能 |

⇒材料の温度を下げる方法で可能となるが、運搬中に温度が上昇するケースがあるため、その対策も必要

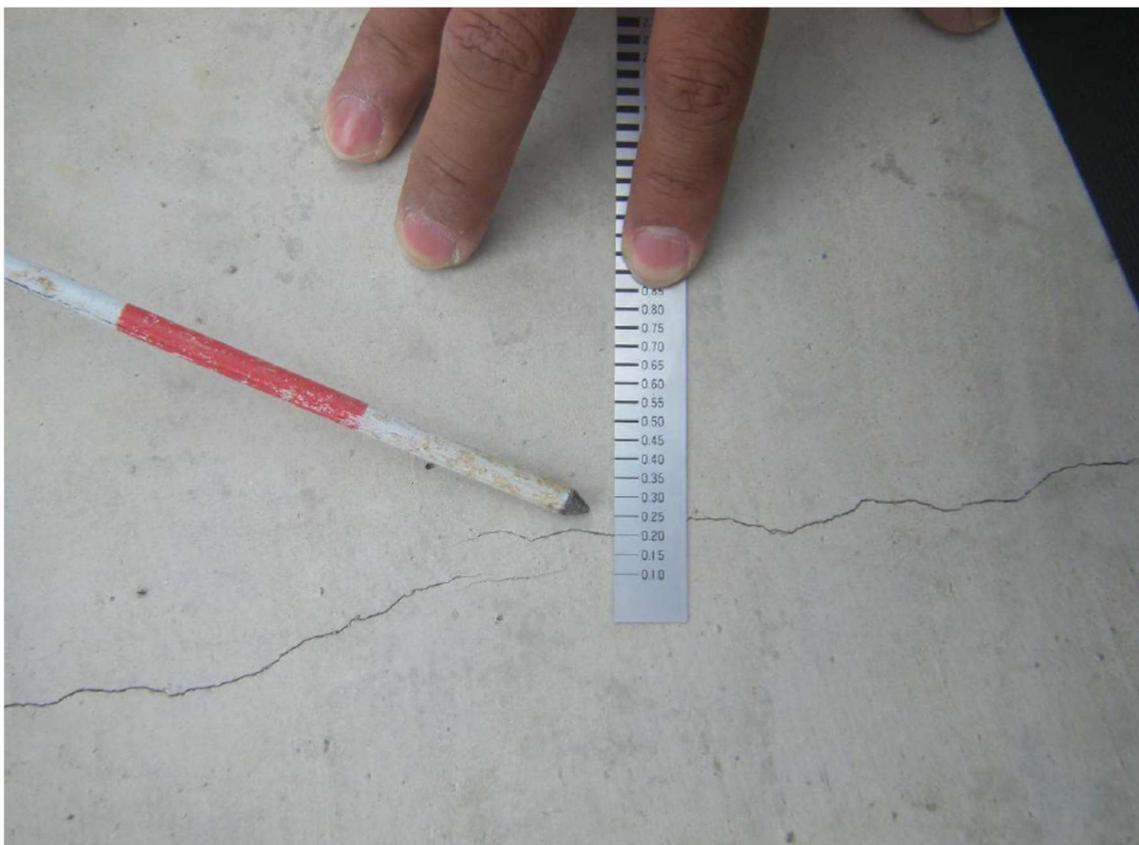
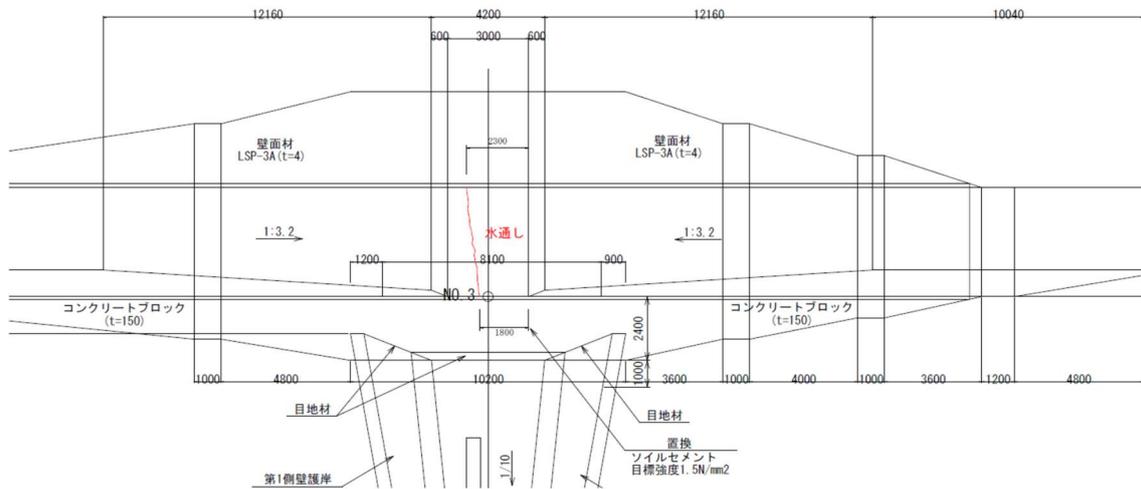
- ・コンクリートの打ち込み時刻及び時期による調整

⇒部材内外の温度差が大きくなることでひび割れリスクが高まるため、時期によって打ち込み時刻を調整

- ・強度管理材齢の延長

⇒管理材齢を長くすることで単位セメント量の低減が可能

砂防ダムの水通し部 3m間に 1 本、幅 0.2mm のひび割れが発生した。

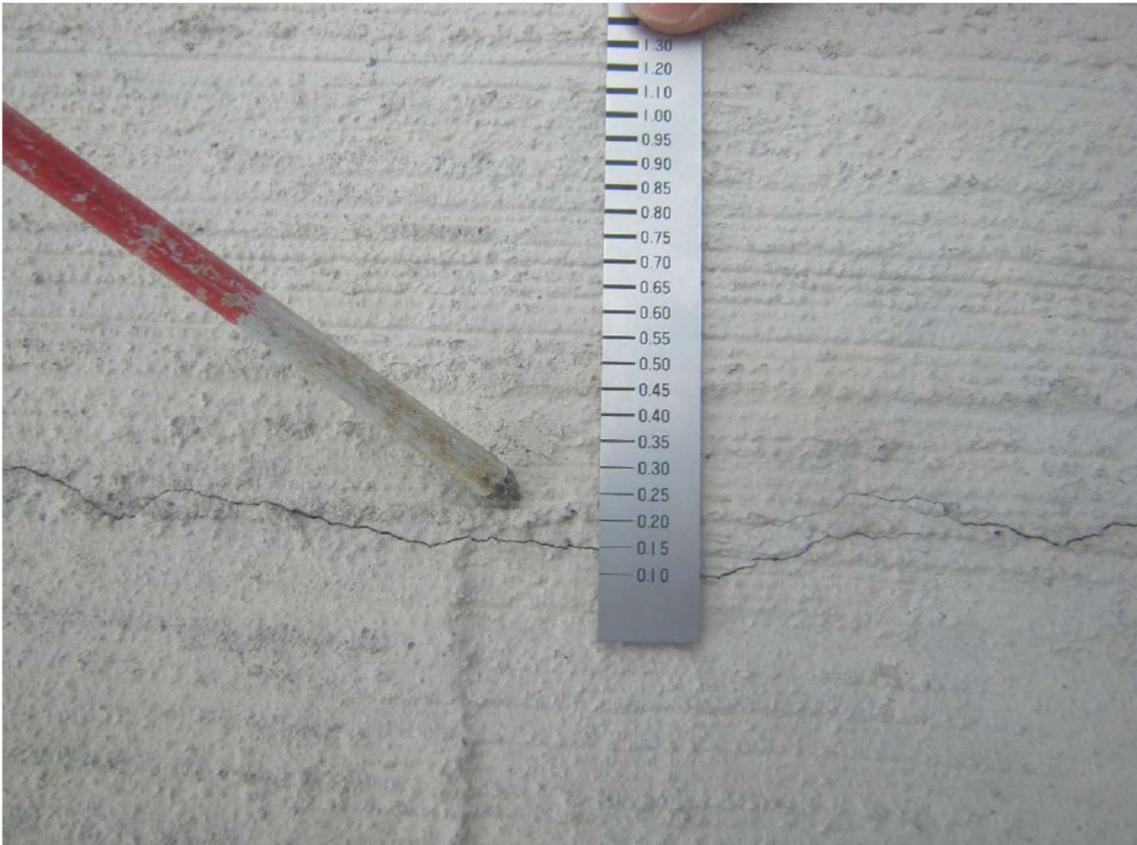
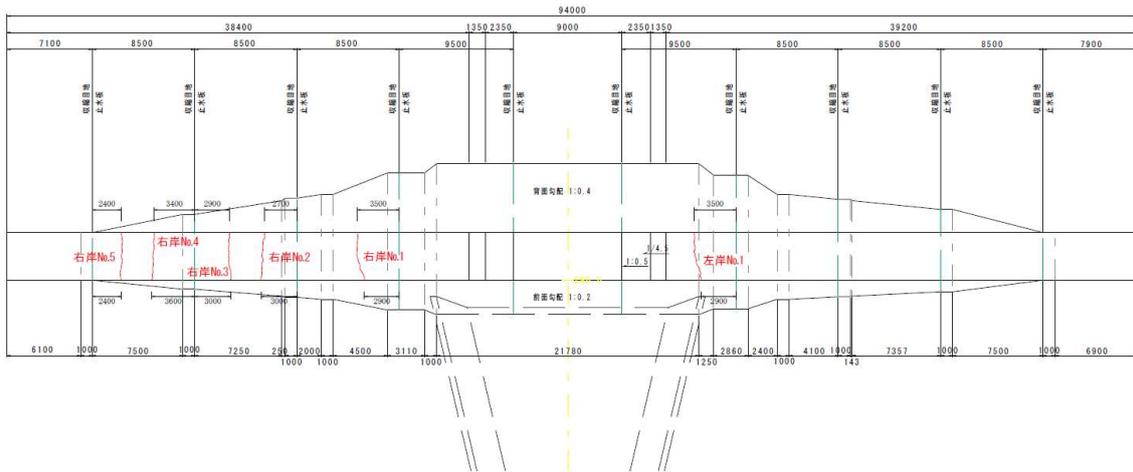


ひび割れ幅 0.2mm

事例 2

砂防ダムの天端コンクリート右岸に 5 本のひび割れ、左岸に 1 本のひび割れが発生した。
ひび割れ防止のため鉄筋を配置した。

最も大きな幅は右岸 No.1 のひび割れ幅 0.15mm



右岸 No.1 ひび割れ幅 0.15mm

事例 3

施工計画

夏季における高強度のマスキングコンクリートの施工について

～温度ひび割れ対策としてのフライアッシュの活用～

所属技士会名：高知県土木施工管理技士会

会社名： 福留開発株式会社

主執筆者： 生駒和久 現場代理人 資格者証番号 00001283649 号

共同執筆者： 横田昭彦 技術顧問 資格者証番号 00060184673 号

1. はじめに

当該工事は高知南国道路本線高架橋の橋脚工事で、橋脚の躯体部におけるコンクリートの品質向上の取組を紹介する。

高知南国道路は高知市から高知龍馬空港へのアクセス道路で高知県東部への南国安芸道路に接続する重要な路線でもあることから、早期開通を目指して急ピッチで工事を進めている。



図-1 完成写真

工事概要

- (1) 工事名 : 五台山第5高架橋下部外第2工事
- (2) 発注者 : 四国地方整備局土佐国道事務所
- (3) 工事場所 : 高知市五台山
- (4) 工期 : 平成31年1月26日～
令和元年10月31日

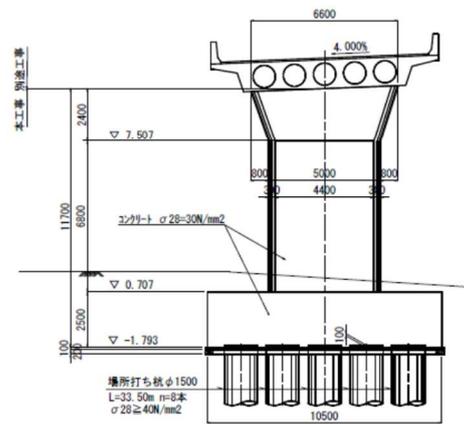


図-2 正面図

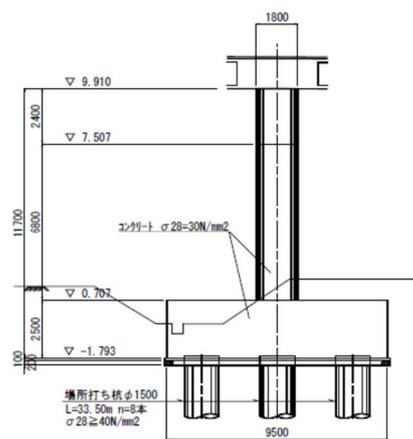


図-3 側面図

2. 現場における問題点

橋脚の底版を含む躯体部はコンクリート打設に不利となる夏季施工となり、品質にかかる問題点として種々の検討を行った。

躯体部のコンクリートは呼び強度が30N/mm²で設計されている。同じ呼び強度のJIS規格品による事前の温度解析では、外気温30℃の場合、コンクリートの内部温度が3日目で80℃程度まで上昇し、表面に発生する引張応力はその時の引張強度を大きく上回ることが予想され、水和熱に起因する内部拘束の温度ひび割れが発生する恐れがあった。

3. 工夫・改善点と適用結果

3-1 フライアッシュの活用

五台山第5高架橋下部工の施工に当たり、コンクリートの水和熱を低減させる方法を検討した。低熱セメント、中庸熱セメントの使用も考えられたが、強度が補償される材令が56日、91日となり工程に影響を及ぼすことやプラントの設備面から製造できる生コン工場が限られること、コンクリートの価格等から使用は見合わせた。

高知県ではフライアッシュ（以下FAという）をセメントの代替（内割）として、水セメント比を水結合材比に読み替えてJIS規格を取得している生コン工場が多数ある。そのほとんどの工場がセメントの10%をFAに置き換えた配合で、JIS規格品として公共工事にも使用している。FAはポズラン反応で硬化するが、ポズラン反応はほとんど発熱しないという特徴がある。このことを踏まえ、本工事ではJIS規格品よりも多いセメントの20%をFAに置き換えた配合でコンクリートの水和熱を低減させる方法を提案した。

表-1 試験練り配合表

| NO. | 配合 | 混和剤構成 | 水結合材比 (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 単位C量 (kg/m ³) | 単位粉体量 (kg/m ³) | 骨材率 (%) |
|-----|------------|---------|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------|
| ① | 30-12-20BB | FA内割20% | 50.9 | 163 | 257 | 321.2 | 45.2 |
| ② | 30-12-20BB | FA内割10% | 47.8 | 164 | 309 | 343.3 | 43.9 |
| ③ | 30-12-20BB | FA無し | 50.5 | 167 | 331 | - | 45.2 |

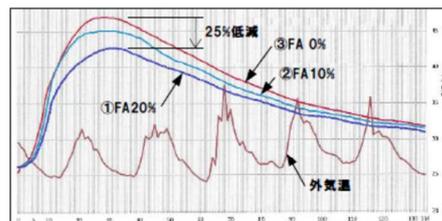
まず水結合材比を決定する試験練りを行い、28日強度で目標強度35N/mm²を得られる水結合材比

50.9%を決定した。

続いて、

- ① 水結合材比50.9%とし、FAを内割で20%使用した配合
- ② 呼び強度30N/mm²のFAを内割で10%使用した配合（JIS規格品）
- ③ 呼び強度30N/mm²のFAを使用しない配合（JIS規格品）

を同じ日に試験練りした。それぞれの配合での単位セメント量は①257 kg/m³、②309 kg/m³、③331 kg/m³となっており、FA内割20%とFA無しでは74 kg/m³の差があった。



| 最大温度 | ① FA 20% | ② FA 10% | ③ FA 0% |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 42.7℃(29h) 上昇量16.5℃ | 45.1℃(28h) 上昇量18.9℃ | 47.0℃(27h) 上昇量21.6℃ |

図-4 簡易断熱温度上昇の測定結果

それぞれの配合の圧縮強度供試体を用いて、発泡スチロールを利用した簡易の断熱状態での温度上昇の測定を行った。最大温度上昇量はそれぞれ①16.5℃、②18.9℃、③21.6℃となり、FA内割20%のコンクリートはFA無しのコンクリートの約75%に低減できることが判明した。また、呼び強度が28日で発現することを確認して採用した。

3-2 応力解析と温度測定によるモニタリング

施工に先立ち簡易なプログラムで、コンクリートの水和熱による躯体中心部と型枠内部の温度上昇量を解析し、その温度差による応力解析を行った。図-5と図-6において放物線状の曲線はコンクリートの引張強度、波状の線はコンクリートに生ずる引張応力を示す。図-5はFA無しの配合で発生する引張応力が引張強度を大きく超えていることが判る。図-6はFA内割20%の配合で発生する引張応力はほぼ引張強度と等しい。

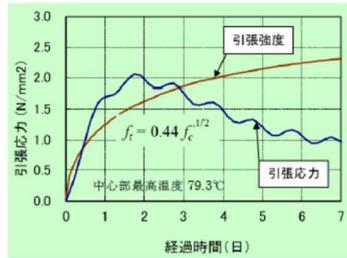


図-5 配合による応力解析 (FA無し)

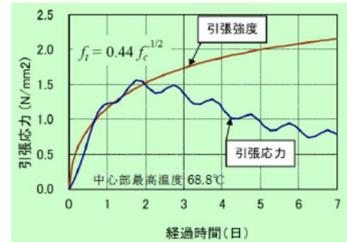


図-6 配合による応力解析 (FA20%)

実際の施工においては躯体中央部、型枠表面、コンクリート天端に熱電対を設置し、気温と共に温度のモニタリングをした。応力解析の過程で算出された躯体内部の最高温度は 68.8°Cであったのに対し、計測された最高温度は 67.8°Cであり、FA による発熱はほとんどないことが判った。

簡易な温度解析プログラムを改良し、測定したコンクリートの内部温度と表面温度からリアルタイムで表面に発生している引張応力を推定し、養生方法を変更する判断材料として利用した。このモニタリングは施工の目安としては大変役に立った。

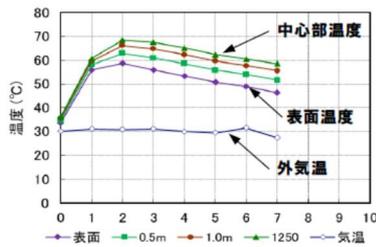


図-7 コンクリート温度測定結果

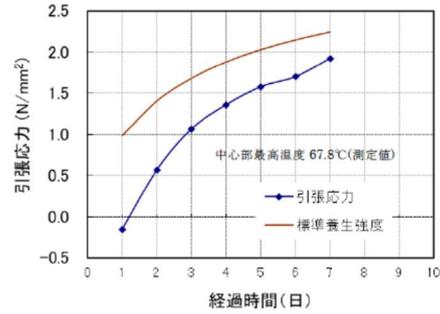


図-8 実測温度による応力解析

3-3 養生の工夫

図-6 の応力解析ではコンクリート表面の引張応力に対し引張強度に余裕が無かったので、コンクリートの表面を保温することにした。養生方法はコンクリートの内部温度を下げるのと同時に、コンクリート内部の熱を利用して表面を保温し、コンクリート内部と表面の温度差を少なくして引張応力を小さくするようにした。

躯体足場で使用するスパイラル管を活用し、そのうち 12 箇所へ注入ホースを設置した。それぞれの管内に冷水を注水し、コンクリート内部で温められた冷水は温水となってコンクリートの天端に溢れ出し、その温水を湛水することで表面を保温した。温水は外気で冷却されやすいため、その上にウレタン系の「うるおんマット」を敷設し冷却を防いだ。コンクリート内部で温められた温水の温度は 42°C 程度であった。冷水の注入は内部温度がピークとなった打設後 3 日までを行い、その後は湛水のみで養生を行い、7 日後に内部温度の降下を確認し型枠を解体した。

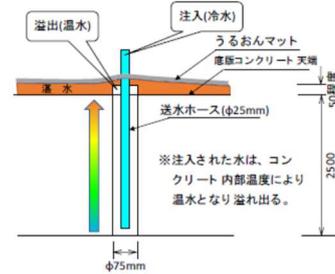


図-9 湛水養生概要



図-10 澁水養生状況

3-4 表層部（かぶり部）の品質確保の工夫

橋脚の主筋は D38 の太径鉄筋が用いられ、主筋中央部までのかぶり厚は 160 mm であり鉄筋と型枠の最小のあきは約 100 mm であった。そのため組み立てた鉄筋の内側からの棒状パイプレーター（棒状パイプレーター）の締固めでは、振動がかぶり部に伝わりにくく締固め不足となり、豆板（ジャンカ）やコールドジョイント、沈みひび割れ等の初期欠陥を生じる恐れがあった。通常、マスコンクリートでは太径の棒状パイプレーター（φ50 mm）を 50 cm の間隔で挿入して締固めを行うが、かぶり部で使用すると鉄筋や型枠に接触し、コンクリートの品質に悪影響を及ぼす恐れがある。今回の工事ではかぶり部の品質を確保するため、小径の棒状パイプレーター（φ30 mm）を 30 cm 間隔で入念に締固めを行った。



図-11 小径パイプレーターによる締固め

3-5 適用結果

結果、真夏における高強度のマスコンクリートの施工にもかかわらず、フライアッシュを有効活用し、澁水養生や温度測定によるモニタリングを

行うことにより温度ひび割れは発生しなかった。また、小径のパイプレーターを使用する事により、表層部（かぶり部）は緻密性を確保した。FA の特徴として長期強度の伸びが大きく、長期間において表面の緻密性が改善されるので、品質の良い構造物となり、長寿命化にも寄与できたと思われる。

当該工事では、JCI 四国支部の品質確保委員会によるチェックシートを用いた施工状況の把握や表層品質目視評価、表面吸水試験（SWAT）、表層透気試験（トレント法）を行ったが、どれも評価は良好の判定結果を得られた。

FA コンクリートの試験練りは水結合材比を決定するための試験練りと、決定された配合での試験練りの 2 種類を行ったので、準備等も含めて 2 ヶ月半あまり時間を要した。今後の使用にあたっては、工事の工程を踏まえて注意が必要である。



図-12 表面吸水試験（SWAT）

4. おわりに

本工事は、高強度のマスコンクリートを夏季に施工という、品質の確保が難しい工事であったが、今回はフライアッシュコンクリートを使用することで温度ひび割れの発生を防止できた。今後は、構造物の設計時点で施工時期も含め検討をしていただき、発注時点でフライアッシュ等の使用を明示していただきたい。

フライアッシュの活用については高知高専の横井克則教授、温度応力の解析については高知工科大学の島弘教授のご指導を仰ぎ、その他たくさんの方から助言をいただき無事に完成させることができました。最後に、当該工事の施工に当たりご協力をいただいた関係者の皆さまに深く感謝し、御礼申し上げます。

(参考) 沈下ひび割れ対策

1. 打設時期

・気温の低い時期は、ブリーディングが長時間にわたって継続する。単位水量の多いコンクリートはブリーディングによる水の上昇のために、コンクリートが沈下する。コンクリート上面近傍に鉄筋等がある場合は、コンクリートの沈下が鉄筋等で拘束されるため、打設後に鉄筋等に沿ったひび割れが発生する。同様にコンクリート側面もセパレーターコーン付近にひび割れが生じる。

2. 材料等による抑制

①セメント

・早強セメントなど硬化の早いセメントが有利である。高炉セメントの潜在水硬性は低温時には反応が遅れるので不利となるが、海水への抵抗性等で指定されている場合があるので注意が必要である。

②混和材および混和剤

・フライアッシュは粒子が球状でワーカビリティがよくなり、単位水量を減らすことができる。しかしながら、ポゾラン反応は低温時には遅れる傾向があるので、一概に有利とは言えない。

・混和剤では高性能A E減水剤（流動化剤）の使用も有効である。コンクリートの単位水量を少なくすることにより、ブリーディング量を減らすことができる。

・ブリーディングを低減させる効果のある混和剤も市販されているが、かなり効果は期待できる。添加後はエントラップドエアの減少に伴いコンクリート中の空気量が減少するので注意が必要である。（現場添加）

3. 施工方法による抑制

・打設速度を遅くする。特に気温の低い時期は打ち上がり高さを1m/時間で施工する。構造物によっては1時間当たり10 m³以下となる場合もある。

・コンクリートの締固めは入念に行う。

・打設中にコンクリート表面に浮き出たブリーディング水はこまめに除去する。（沈下ひび割れ対策として最も重要）

・コンクリート打設後、適切な時期に内部振動機により再振動を行う。

※再振動の時期はコンクリート表面の浮き水が引いた後に行う。また、硬化中のコンクリ

ートに悪影響を与えないように、内部振動機は小型のものを使用し、鉄筋位置を避けて再振動をする。

・コンクリートの天端仕上げ1時間後に天端の確認を行い、ひび割れが発生していれば木ゴテでタンピングをし、再仕上げを行う。

ブリーディング制御の対策

1. ブリーディングが生じにくい材料で施工：例えばスランプ8cm 以下や高性能AE 減水剤等で単位水量を抑制するなど。
 2. 丁寧に締め固めて、ブリーディングを集積し、各層で処分する事で不具合の原因である自由水を少なくし、沈降クラック等のリスクを抑制する。
 3. 締め固めたあとに、自由水が移動した跡を再振動で遮断させて緻密性を向上させる。再振動を行う時期については、振動によりコンクリートの流動性が戻る状態の範囲で、できる限り遅い時間。
 4. 養生については、脱枠強度を確認できたら速やかに脱枠し湿潤養生を行う。
- ブリーディングが大量発生したが、対応せずそのまま打ち重ねた現場例



ブリーディングを全て廃棄し丁寧に締め固めた躯体の例

同じ年度に同じ監理技術者・下請けで上記を徹底しただけで不具合は無くなりました。