

初期ひび割れの抑制対策（案）

令和3年7月2日

近未来コンクリート研究会
初期ひび割れ抑制技術協議会（C 協議会）

目 次

1.	はじめに	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(1)
2.	温度ひび割れの抑制	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(2)
2. 1	温度ひび割れの発生メカニズム		
2. 2	設計面での抑制対策（配筋、誘発目地など）		
2. 3	材料・配合面での抑制対策		
2. 4	施工面での抑制対策		
3.	沈下ひび割れの抑制	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(8)
3. 1	沈下ひび割れの発生メカニズム		
3. 2	沈下ひび割れの抑制対策		
4.	まとめ	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(10)
	参考資料		
	事例紹介	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(11)

1. はじめに

コンクリートの収縮に伴う初期ひび割れは、コンクリート自体の収縮しやすい特性により生じる。しかしながら、多くの場合は積極的に抑制対策を講じることなく施工に至り、ひび割れの発生後に補修をすることが行われている。

初期ひび割れは、コンクリートの収縮が拘束されることにより生じる。収縮するのはコンクリートの材料としての特性であり、自己収縮（硬化収縮）、乾燥収縮、温度変化に伴う温度収縮が挙げられる。

初期ひび割れの発生を抑制するには、収縮の小さいコンクリート材料の使用のほか、施工面での対策、さらには設計段階での検討が必要と考えられる。初期ひび割れに対しては、コストを掛ければひび割れの防止は可能であるが、従前の計画、積算では防止は困難であることが多い。初期ひび割れを抑制することは、ひび割れに対する調査や補修などの維持管理コストの低減の他に、構造物の耐久性の向上にもつながり、コンクリート構造物の長寿命化に寄与できると考えられる。また、初期ひび割れを補修した場合においても、補修部位の観察が必要になる場合があり、長期の供用期間においては耐久性上の弱点となることも懸念される。

このようなことから、初期ひび割れの発生を抑制することは、コンクリート構造物の長寿化および維持管理コスト低減の観点から、極めて意義が大きいものと考えられる。

本協議会は 2018 年 6 月より、産官学の参加により初期ひび割れの合理的な抑制技術について協議し、初期ひび割れを抑制する方策を提案することを目的に活動を行った。本書は、その検討結果を「初期ひび割れの抑制対策（案）」として取り纏めたものである。なお、本書で対象とした初期ひび割れは、温度ひび割れと沈下ひび割れとした。

2. 温度ひび割れの抑制

2. 1 温度ひび割れの発生メカニズム

コンクリートは、使用するセメントの強度発現により構造体として機能する。使用するセメントは硬化初期に発熱し、部材の厚さが大きいと放熱するより発熱が大きく、部材の内部に熱が蓄熱され、そのため温度上昇に伴い膨張する。この発熱は表面との温度差により内部拘束温度応力となり、表面は引張力となり、これが引張強度を超えるとひび割れが生じる。これを内部拘束温度ひび割れと呼ぶ（図-1 参照）。このひび割れは表面のみに発生し、表面を保温することで容易に防止することが可能である。

内部に蓄熱された温度は型枠表面から次第に放熱し、外気温に近い温度まで自然に冷却され、その時に温度収縮が生じるが、既設構造物が存在するとそれに拘束されて、引張力が発生し、その時点で引張強度を超えるとひび割れが生じることになる。このひび割れを外部拘束温度ひび割れと呼ぶ（図-2 参照）。外部拘束温度ひび割れは、貫通するひび割れであり、先の打込まれた既設物に拘束され、工程上の都合から抑制は困難とされている。

いずれもセメント（結合材）の発熱に伴うため、温度ひび割れと呼ばれる。セメントが水和反応をすることにより強度が発現するため、避けられないものと考えられるが、水和発熱速度を遅くすると放熱に時間が掛かり、部材内部の温度上昇が抑えられ、応力の発現は抑制される。しかし、施工面では強度発現は工期に影響をするため、温度ひび割れの抑制は困難となるのが一般的である。材料・配合・施工面での対応が望まれるが、設計時点からの対策が功を奏する場合が多い。

表面ひび割れ (内部拘束卓越)

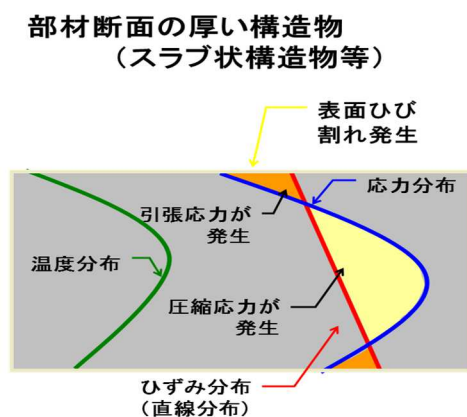


図-1 内部拘束温度ひび割れの概念

貫通ひび割れ (外部拘束卓越)

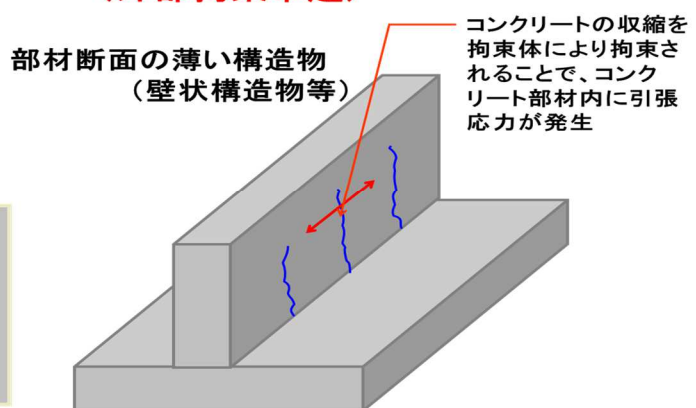


図-2 外部拘束温度ひび割れの概念

2. 2 設計面での抑制対策

温度ひび割れは事前予測が可能であり、土木学会コンクリート標準示方書では、まず設計段階で検討したうえで、材料や配合が確定した施工段階で再検討するように示されている。しかし、材料や配合は施工現場と施工時期が決まらなると定めることができないため、設計段階ではあまり検討されていないのが実状である。しかし、ひび割れ幅までは分からないとしても、予想通りの位置にひび割れが入るということは、施工面での不備とはいえないと考えられ、設計での対応が望まれる。

A-1 補強鉄筋【適用構造物:橋梁下部工のたて壁および胸壁、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、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できる。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）とされているが、ひび割れ幅の抑制にはなるものの、ひび割れの防止とはならず、むしろひび割れ本数が増加する。許容ひび割れ幅以下にすることが可能となるが、現実には、許容ひび割れ幅に基準値が示されないため、施工者負担で補修を強いられることが多い。設計者側の対応が望まれる。

A-2 ひび割れ誘発目地【適用構造物:橋梁下部工のたて壁および胸壁、ボックスカルバート、擁壁】

温度ひび割れのうち、制御が難しい外部拘束による温度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。また、鉄筋コンクリート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としているが、どの程度の温度上昇で、どの程度の部材に場合かも示されていないため、誘発目地の中間にひび割れが生じる可能性もあることに注意が必要である。

なお、部材厚さが小さい場合は、乾燥収縮に伴う収縮ひび割れが生じる場合もあり、この場合は誘発目地間隔をさらに小さくすることが望ましい。誘発目地の設置は、設計段階で定めなければならないことにも留意が必要である。

2. 3. 材料・配合面での抑制対策

一般に、レディーミクストコンクリート（以下、生コンクリート）を使用する場合が多く、使用材料および配合は生コンクリート工場で使用している材料および配合となる場合が多い。しかし、協議事項で変更を指示することも可能であり、最適な材料および配合の選定ができることを知っておきたい。たとえば、一般的には、①使用骨材（普通か軽量）②粗骨材の最大寸法、③スランプ（またはスランプフロー）、④呼び強度、⑤セメントの種類、などから条件に合う組み合わせを選定することになるが、単位水量や単位セメント量の上限や、空気量なども指定することができる。セメントの種類も指定できるが、生コン工場のサイロの都合などから、指定できないものもあり、それでも変更したい場合は高額な費用負担となり、当初の積算と合わないことになる。費用対効果を考慮しなければならない。

B-0 配合の基本

初期ひび割れを抑制するためには、単位水量および単位セメント量を低減させることが基本である。適切な材料を用いることにより、コンクリートのワーカビリティを向上させながら単位水量を低減することは、単位セメント量を低減できることになり、自己収縮および水和熱を低減でき、初期ひび割れの抑制につながる。なお、過度の単位水量を低減すると、施工性に影響を与えるため、ひび割れの抑制には、単位セメント量を単位粉体量として粘性を確保して施工性を確保しつつ、セメント（結合材）の水和発熱の抑制を行うことが望ましい。

B-1 発熱の少ないセメントの使用【橋梁下部工、ボックスカルバート、擁壁】

低熱ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、水和発熱の小さい高炉セメントの使用が望ましい。

その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る。しかし、これらのセメントは、一般に強度の発現が遅く、強度の保証時期は56日、91日とすることが必要であり、工程への影響が考えられる。また、地域によっては使用できる生コン工場が限られることや、プラント設備（セメントサイロ）の増設が必要な場合など、コストも増加する場合がある。

また、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り、自己収縮が大きくなるため、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がある。低発熱低収縮型高炉セメントB種は、

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、自己収縮を低減できるが、強度発現が遅れることに注意が必要である。高炉セメント B 種は、CO₂発生量の削減、ASR の抑制、塩分浸透抵抗性、化学抵抗性が向上するなどの特性があり、初期ひび割れは生じ易いが、有効に活用することが望まれる。

B-2 フライアッシュの使用【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、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つながり、その結果として単位セメント量の低減が可能となり、水和熱の発生を抑制させる効果がある。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生じる。また、発熱速度は低下するが、長期材齢による強度増進効果も得られる。なお、品質の差が大きいため事前の確認が必要である。

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（参考資料参照）。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、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する。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。この点については、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ある。

B-3 高炉スラグ微粉末の使用【橋梁下部工たて壁および胸壁、ボックスカルバート】

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することにより、発熱速度が低減できるが、高炉スラグ微粉末の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って品質を確認することが必要である。なお、冬季（低温時）の施工ではブリーディングが増加し、夏季（高温時）では自己収縮が増加する場合もあるので注意が必要である。

B-4 膨張材の使用【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。マスコンクリート用の膨張材（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。また、外部拘束温度応力の抑制にも効果があり、水和熱抑制型は部材寸法が大きい構造物に適している。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することが可能である。た

だし、膨張材の使用は、コストが増加となる上、水和熱抑制型の膨張材は、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、特にA E減水剤遅延形との併用には注意が必要である。

B-5 高性能AE減水剤、流動化剤の使用

高性能A E減水剤や流動化剤の使用は、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、水和熱の発生を少なくすることができる。建築工事では単位水量低減を目的に一般的に用いられることが多いが、単位水量の低減は、必ずしも乾燥収縮率の低減にはつながらず、適度な単位水量を確保しつつ乾燥収縮率の小さくなる材料の選定が望まれる。土木工事では、水和熱の低減のために単位セメント量（単位結合材量）が少なくなることが望ましく、単位水量の低減が目的とはならないので、高性能AE剤の使用などで施工性を確保することが望ましい。単位セメント量が少なすぎると材料分離傾向が大きくなり、豆板の発生やポンプ施工時の閉塞などにつながるため、単位粉体量を増加しつつ発熱を抑制することが必要である。

なお、フライアッシュの使用と高性能A E減水剤の使用による単位セメント量の低減効果を比較すると、フライアッシュ代替の割合にもよるが、一般にフライアッシュを使用した方が効果は大きく、温度ひび割れには有効であることが多い。

B-6 収縮低減剤の使用

収縮低減剤は、そのメカニズムから乾燥収縮の低減効果は認められるが、温度応力の低減効果があるわけではない。乾燥収縮を抑制することでひび割れ低減効果が期待できる場合は、混和剤として収縮低減剤を用いることが有効な場合もある。

B-7 繊維系材料のひび割れ低減材の使用【橋梁下部工、ボックスカルバート、擁壁】

繊維系材料のひび割れ低減材には、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。

B-8 石灰石骨材の使用

収縮の抑制に寄与する骨材として石灰石が挙げられるが、産地や種類により、収縮に差があることや流通面でコスト上昇につながることに注意が必要である。

2. 4 施工面での抑制対策

生コンクリートの材料・配合面に対応できる場合も多いが、施工面でも温度ひび割れを抑制できる点もある。

C-1 打設時期の検討

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とよい。たとえば、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としているが、実際には工期上の都合から困難な場合も少なくない。発注側の対応が望まれる。

C-2 施工方法(型枠、打込み、養生、管理材齢など)の検討

施工計画で温度ひび割れを抑制できる場合がある。

- ① 断熱性の高い型枠を使用し、部材内外の温度差を低減させる。
- ② 型枠はなるべく長期間存置する。
- ③ 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。
- ④ 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、ブレードクーリングを検討する。
- ⑤ 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、アジテータ車のドラムを冷却させる（ドラムに耐熱塗装をした車両もある。）
- ⑥ 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。
- ⑦ 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。
- ⑧ 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リスクが高まる。）
- ⑨ 養生マットは保温性、保水性の高いものを使用する。
- ⑩ 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。（参考資料参照）
- ⑪ 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。
- ⑫ 強度管理材齢を長くすることで単位セメント量を低減することが可能となる。

3. 沈下ひび割れの抑制対策

3. 1 沈下ひび割れの発生メカニズム

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に伴い、コンクリートが沈下（沈降）する。図-3に示すように、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。また、写真-1に示すように、コンクリート側面もセパレータのコーン付近にひび割れが生じる場合がある。

このような沈下に伴うひび割れは、沈下ひび割れ（沈みひび割れ）と呼ばれている。この沈下ひび割れの対策としては、鉄筋上部に生じる場合は、一定の時間が経過した後にタampingをしてひび割れを塞ぐことが提案され、ひび割れは無害化できる。また、高さの違いがある部材では、図-4に示すように、梁下で一旦打ち止めて、沈下が取まったところに上部を打設することで沈下ひび割れを防止することが過去の経験から行われている。

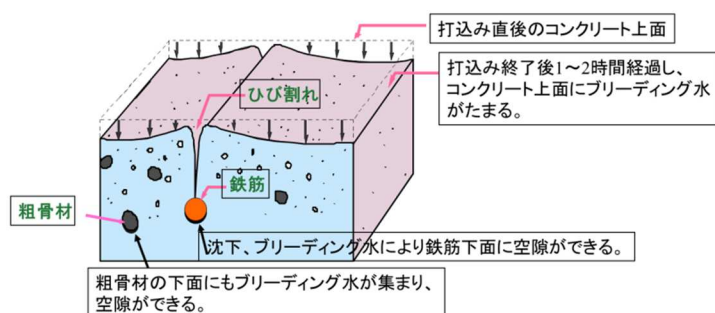


図-3 沈下ひび割れの発生概念

写真-1 型枠面に生じる沈下ひび割

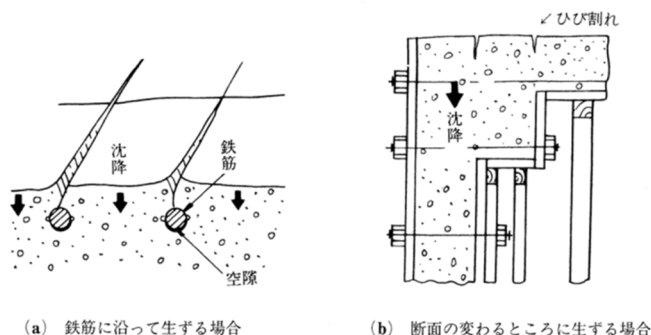


図-4 沈下ひび割れの事例

3. 2 沈下ひび割れの抑制対策

沈下ひび割れの対しては、施工で抑制できるもの（鉄筋上部に発生する沈下ひび割れなど）と施工では対応できない場合（型枠面の生じる沈下ひび割れ）がある。基本的には沈下の原因となるブリーディングの抑制が望ましいが、ブリーディングが全く生じないコンクリートは上面仕上げがやりにくくなり、プラスチックシュリンケージが生じやすくなるため、コンクリート上面が乾燥しないような状況とするか、一定のブリーディングを容認するかの対策が必要となる。

沈下ひび割れ抑制対策は以下の通りとなる。

D-1 材料による抑制対策

1) セメント

早強セメントなど凝結の早いセメントが有利である。高炉セメントは、潜在水硬性があり、低温時には反応が遅れるので不利となるが、発注者が耐久性の面から高炉セメントを指定している場合があり、その場合はブリーディングの発生を抑制する対策が必要である。

2) 混和材および混和剤

- ① 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、ポゾラン反応であるため、低温時には反応が遅れる傾向があるので、一概に有利とは言えない。
- ② 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。
- ③ ブリーディングを低減させる効果のある混和剤が市販され、効果が認められている。

D-2 施工方法による抑制 対策

- ① 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/h程度で施工する。
- ② コンクリートの締固めは入念に行う。
- ③ 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。
- ④ 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。再振動のタイミングが遅れると、沈下ひび割れが生じたままとなる。また、この時期はコンクリートの粘性が高く、振動機の引き抜いた跡が残りやすいため、振動機はゆっくりと引き抜かなければならない。
- ⑤ コンクリートの上面仕上げは、凝結時間をみて、1～2時間後に確認を行い、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。

4. まとめ

温度ひび割れの発生を抑制するには、設計段階での検討が必要で、そのうえ生コンクリートの製造および施工面での対応が必要となる。設計段階では、コンクリートの製造や施工の詳細が不明な点も多いが、基本的なコンクリートの仕様が判っているはずであり、仮の設定で温度ひび割れの発生の可能性は分かるはずである。その結果をもとに、ひび割れの発生する可能性から許容ひび割れ幅を設定するか、誘発目地の設置を検討するなど、ひび割れの制御を目的とした提案がなされることが望ましい。

コンクリートの製造時には、使用材料や配合の選定で温度ひび割れが有害と判断されれば、コストを掛けてもひび割れを抑制するべきである。また、ひび割れ発生後に補修をした方が安価であるかを検討し、製造時の判断を行い、施工時には、できるだけ抑制する対策を講じることが望まれる。

このように、発注者、設計者、製造者、施工者が連携して対応することが必要である。

沈下ひび割れの抑制に対しては、施工で対応できることは施工時に行うとして、施工で対応できないブリーディングの発生を抑制する材料・配合面の対応を行うことが望まれ、レディーミクストコンクリートの JIS に規定を設けられることを提案したい。

【参考文献】

1) 十河茂幸ほか：現場で役立つコンクリート名人養成講座改訂版、日経 BP 社、2008 年 10 月

2) (一社) 全国土木施工管理技士会連合会編：令和元年度 第 24 回土木施工管理技術論文報告集、2020 年 6 月

参考資料 事例紹介

第24回土木施工管理技術論文報告集（最優秀賞）

施工計画

夏季における高強度のマス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

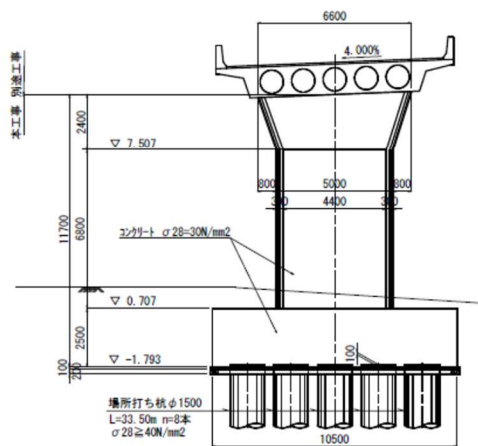


図-2 正面図

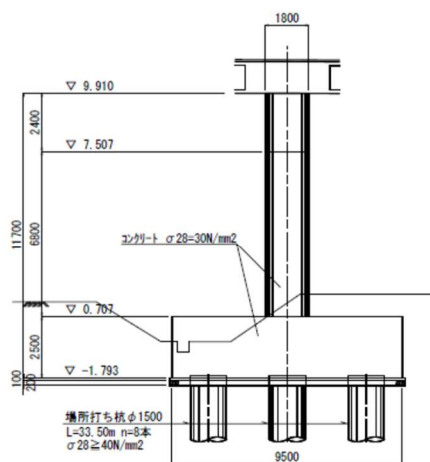


図-3 側面図

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に限られること、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 はポゾラン反応で硬化するが、ポゾ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)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位粉体量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)
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

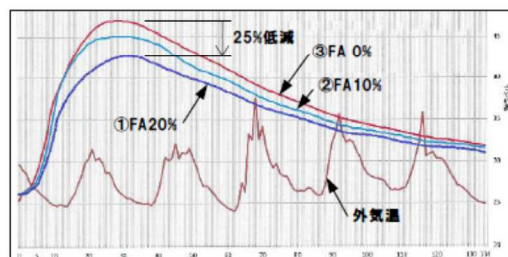
まず水結合材比を決定する試験練りを行い、28 日強度で目標強度 35N/mm² を得られる水結合材比

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%	42.7℃ (29h)	上昇量 16.5℃
	② FA 10%	45.1℃ (28h)	上昇量 18.9℃
	③ FA 0%	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。

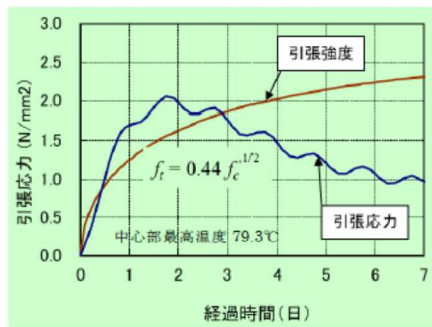


図-5 配合による応力解析 (FA 無し)

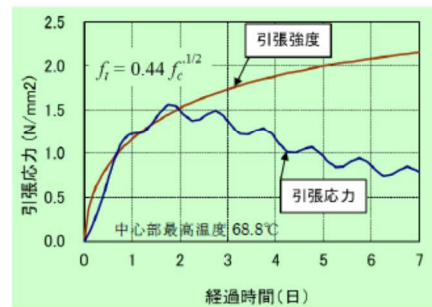


図-6 配合による応力解析 (FA20%)

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℃であったのに対し、計測された最高温度は 67.8℃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。

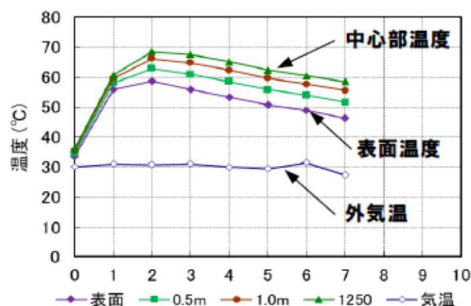


図-7 コンクリート温度測定結果

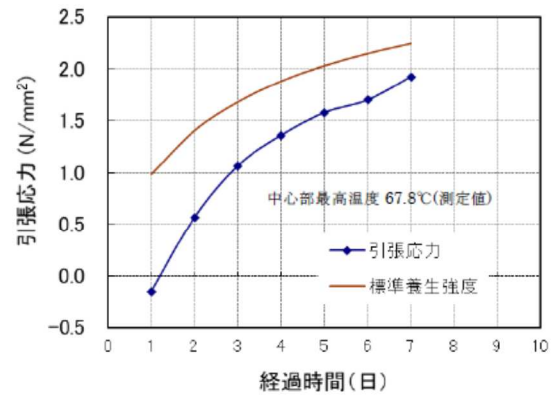


図-8 実測温度による応力解析

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とともに、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℃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。

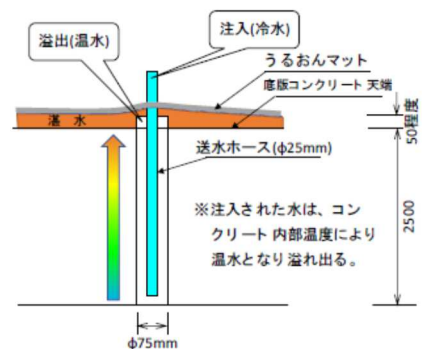


図-9 湛水養生概要



図-10 湛水養生状況

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バイブ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バイブレーター（φ 50 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、小径の棒状バイブレーター（φ 30 mm）を 30 cm 間隔で入念に締固めを行った。



図-11 小径バイブ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、湛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、小径のバイブ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。