ひび割れ抑制システムによるコンクリート 構造物のひび割れ低減と表層品質の向上

細田 暁¹・二宮 純²・田村 隆弘³・林 和彦⁴

¹正会員 横浜国立大学大学院准教授 都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: concrete@ynu.ac.jp

²正会員 山口県土木建築部審議監 (〒753-8501 山口県山口市滝町1-1)
E-mail: ninomiya.makoto@pref.yamaguchi.lg.jp

³正会員 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県周南市学園台3538)
E-mail: t-tamu@tokuyama.ac.jp

⁴正会員 香川高等専門学校准教授 建設環境工学科 (〒761-8058 香川県高松市勅使町355)
E-mail: hayashi@t.kagawa-nct.ac.jp

山口県が構築し施行しているひび割れ抑制システムは、実構造物から得られたデータベースに基づいて、合理的にコンクリート構造物の温度ひび割れを抑制することを可能にしている。本研究では、ひび割れ抑制システムの骨子を説明し、ひび割れ低減の効果を定量的に示した。また、3次元温度応力解析を用いた分析により、山口県の構造物のひび割れ発生強度が高い可能性を指摘した。さらに、ひび割れ抑制システムの重要な柱の一つである施工の基本事項の遵守が、構造物の表層品質の向上に寄与する可能性に着目し、目視評価法、表面吸水試験、構造物から採取したコアの分析結果に基づいて、表層品質向上の効果を定量的に示した。

Key Words : *crack control system, Yamaguchi prefecture, covercrete quality, visual evaluation, surface water absorption test*

1. はじめに

コンクリート構造物には施工中にひび割れが発生する場合があります。ひび割れが部材の性能に及ぼす影響や、ひび割れを抑制する技術などについては、これまでに膨大な研究が行われてきている。特に温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れについては、ひび割れ発生やひび割れ幅の制御について多くの研究が行われてきたが、実構造物で過剰なコストをかけずに合理的にひび割れを制御する手法は確立されているとは言えない。

ひび割れの発生や、ひび割れ幅を事前に精度よく予測する技術が十分には確立されていない中で、平成13年の国土交通省通達「土木コンクリート構造物の品質確保について（国管技第61号、平成13年3月29日）」を契機に、建設現場では、ひび割れの検査が強化されることとなった。その結果、ひび割れに関連して、受発注者間で補修の可否を巡った問題も多く生じており、実務において打開策が必要とされている。

このような状況の中、山口県では、平成17年度からの実構造物での試験施工を経て、構造物の施工時に取得したコンクリート施工のデータである「打設管理記録」をデータベース化し、これを活用したひび割れ抑制システムを構築した¹⁾²⁾。このひび割れ抑制システムにより、山口県では確実に実構造物のひび割れが抑制される方向に向かっている。

ひび割れに大きな関心が集まる中、かぶりの品質については、目視で分かる欠陥や、かぶりの値、リバウンドハンマーで得られる情報以外には、実務で定量的な検査が行われることはこれまでにほとんどなかった。土木学会の「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会」では、コンクリート構造物の「表層」は「コンクリート構造物の中で、養生や環境条件等の影響を受けて性能が変化する可能性がある領域」と定義している³⁾。表層のコンクリートが緻密で物質移動抵抗性が高く、劣化因子の侵入が抑制される場合、コンクリート構造物は耐久的になると考えられるが、構造

物の耐久性を支配するとも言える表層品質は、材料、施工、環境条件の影響を大きく受ける。

山口県のひび割れ抑制システムの構築においては、示方書等に示される施工の基本事項が現場で遵守される仕組みづくりがポイントの一つであった²⁾。施工の基本事項が現場で遵守されるようになった結果、施工の影響を大きく受けるであろう表層品質が大きく向上している可能性がある。

本論文では、山口県のひび割れシステムが確立された経緯とシステムの骨子を説明し、ひび割れの抑制効果を定量的に示す。そして、山口県のひび割れ抑制システムが実施される前後の構造物の表層品質を筆者らが開発した表面吸水試験^{4), 6), 7)}および目視評価法⁸⁾を用いて調査し、表層品質が向上したことを定量的に示す。これらの結果に基づいて、ひび割れ抑制システムが、構造物の総合品質向上施策として有効であることを論じる。

さらに、コンクリート構造物の耐久設計指針（案）¹⁷に従って、「打設管理記録」のデータを活用して算出した耐久性ポイントと、表面吸水試験の結果に相関があることを示し、構造物の表層品質の向上に大きく寄与する施工因子の抽出を試みる。

2. 山口県のひび割れ抑制システムによるひび割れ低減効果

(1) ひび割れ抑制システム構築の経緯²⁾

国土交通省が平成 13 年に出した品質確保に関する通達により、コンクリート構造物のひび割れの検査が厳格になり、山口県においてもひび割れ発生後の責任の所在や、工事成績評定での扱いなど、受発注者間で多くの問題を抱えつつあった。その中で、産官学協働の取組みとして、平成 17 年度に、初期ひび割れを抑制することを目的とし、実構造物を用いた試験施工に着手した。

試験施工開始後に、「施工由来のひび割れ」が激減したことが判明した。筆者らは、「施工由来のひび割れ」を、「不適切な施工により発生するひび割れ」と定義している。その一例が、山口県のボックスカルバートの頂版の底面に構造物軸方向に発生していた非貫通のひび割れである(図-7 にて後述)。沈みひび割れや、不適切な打継ぎや打重ねに起因するひび割れ等も、施工由来のひび割れと呼ぶことができる。産官学の取組みとして注目の集まる中で施工されたことにより、施工の質が向上し、これまで当たり前のように発生していたひび割れの一部が、ほぼ根絶されたのである。施工由来のひび割れを発生させないために「施工の基本事項の遵守」を達成することが重要であるとの認識が、試験施工により得られた。

試験施工から得られた最重要の知見は、「施工由来のひび割れ」が存在することに加えて、施工の基本事項を遵守しても防げないひび割れがあることであり、これを関係者が共通の認識として持ったことが大きな収穫であった。そのようなひび割れを抑制するためには、設計段階で打込み時期を考慮したり、材料的な対策を施すこととなる。この抑制対策を、実構造物のコンクリート施工記録である「打設管理記録」のデータベースを活用して決定する、というのが山口県が構築した PDCA システムである。データベースが蓄積されてくると、それを分析することにより抑制対策が体系化されてくる。

山口県では、平成 18 年度からひび割れ抑制システムの制度運用の試行を開始し、平成 19 年度から本施行して現在に至っている。なお、平成 25 年度の時点で、システムの対象構造物は、有害な温度ひび割れが懸念される山口県発注の新設土木構造物のうちの RC 構造物であり、上部構造物は含まれていない。対象構造物においては、高炉セメント B 種の使用を標準としており、貫通ひび割れについてはひび割れ幅が 0.15mm 以上の場合を補修を要するものとして有害なひび割れとし、0.15mm 未満が無害なひび割れと定義している。

(2) ひび割れ抑制システムの骨子

山口県では、ひび割れ抑制対策の三本柱として、適切な施工時期の選定、確実な施工の実施、材料等による適

図-1 ひび割れ抑制対策の三本柱

図-2 月ごとのひび割れ発生状況（試験施工）

表-1 施工状況把握チェックシート

【施工状況把握チェックシート(コンクリート打込み時)】

事務所名	〇〇土木建築事務所			工事名	県道〇〇線 道路改良工事		工区	1
構造物名	〇〇橋 A1橋台			部位	たて壁		リフト	2
受注者	〇〇建設(株)			確認者	〇〇技師			
配合	27-8-20BB			確認日時	2012/10/11(木) 7:30~13:30			
打込み開始時刻	予定	8:00	実績	9:10	打込み開始時気温	22.0℃	天候	曇のち晴
打込み終了時刻	予定	12:00	実績	13:30	打込み量(m³)	100	リフト高(m)	3.0
施工段階	チェック項目						記述	確認
準備	運搬装置・打込み設備は汚れていないか。						—	○
	型枠面は湿らせているか。						—	○
	型枠内部に、木屑や結束線等の異物はないか。						—	※1
	かぶり内に結束線はないか。						—	○
	硬化したコンクリートの表面のレイトランス等は取り除き、ぬらしているか。						—	○
	コンクリート打込み作業人員(※)に余裕を持たせているか。						8人	○
	予備のバイブレータを準備しているか。						4台中1台	○
	発電機のトラブルがないよう、事前にチェックをしているか。						—	○
運搬	練り混ぜてから打ち終わるまでの時間は適切であるか。						50分	○
打込み	ポンプや配管内面の潤滑性を確保するため、先送りモルタルの圧送等の処置を施しているか。						—	○
	鉄筋や型枠は乱れていないか。						—	○
	横移動が不要となる適切な位置に、コンクリートを垂直に降ろしているか。						—	○
	コンクリートは、打込みが完了するまで連続して打ち込んでいるか。						—	○
	コンクリートの表面が水平になるように打ち込んでいるか。						—	○
	一層の高さは、50cm以下としているか。						50cm	○
	2層以上に分けて打ち込む場合は、上層のコンクリートの打込みは、下層のコンクリートが固まり始める前に行っているか。						—	○
	ポンプ配管等の吐出口から打込み面までの高さは、1.5m以下としているか。						約1.8m	※2
締固め	パイプレータを下層のコンクリートに10cm程度挿入しているか。						—	○
	パイプレータを鉛直に挿入し、挿入間隔は50cm以下としているか。						—	○
	締固め作業中に、パイプレータを鉄筋等に接触させていないか。						—	○
	パイプレータでコンクリートを横移動させていないか。						—	○
	パイプレータは、穴が残らないように徐々に引き抜いているか。						—	○
養生	硬化を始めるまでに乾燥するおそれがある場合は、シートなどで日よけや風よけを設けているか。						—	○
	コンクリートの露出面を湿潤状態に保っているか。						—	○
	湿潤状態を保つ期間は適切であるか。						10日間	○
	型枠および支保工の取外しは、コンクリートが必要な強度に達した後であるか。						—	○
要改善事項等	※1 型枠内部に結束線(3本)が落ちていたため、打込み前に取り除かせた。 ※2 排出口から打込み面までの高さが、明らかに1.5m以上であるため、口頭で注意したところ、是正された。 上記※1、※2については、次回打込み時も施工状況把握を行うことを、工事打合							

※コンクリート打込み作業人員・・・コンクリートの打込み・締固め作業時の人員のうち、直接作業に携わらない者(監理・主任技術者やポンプ車運転手等)を除いた人員

切な対策を据えている(図-1)。

試験施工等の結果から、夏季に打ち込む場合や、年度末や年末の慌ただしい時期に打ち込む場合にひび割れの発生確率が高い傾向が認められた(図-2)。

そのため、三本柱の一つ目として、設計・発注時に適切な工程を検討すること、施工段階でひび割れ抑制に配慮した工程を検討することを据えている。

三本柱の二つ目は、現場で確実な施工を実施することである。県のシステムとして施工の基本事項の遵守を達成することは容易ではない。達成するための仕掛けの一つとして、「施工状況把握チェックシート」(表-1)を開発した⁹⁾。施工の基本事項は示方書等に詳細に記述されているが、その中から27項目を厳選し、チェックシートの形とした。2.(3)で後述するが、現場でこれらの基本事項が遵守されていない場合は、監督員が改善指示を出し、記録に残す。施工状況把握チェックシートのフォーマットは、山口県のHPで公開されている。監督員が重点的にチェックする項目が施工者にも公表されていることが、基本事項に対する意識の共有、適切な施工計画の作成、施工者の適切な事前準備につながり、施工状況の改善につながる結果となった¹⁰⁾。

山口県では、このチェックシートの他にも、施工の基本を学習できるe-learningの教材の開発と活用、県が主催する講習会の実施などを行っている。

三本柱の三つ目は、材料等による適切な対策方法を採用することである。施工の基本事項を遵守しても、無害なひび割れに抑制できない場合があり、その場合は、施工実

績に基づいて適切な対策を設計段階から検討する。例えばボックスカルバートの場合は、誘発目地による対策を採ることとしており、断面欠損率30~50%程度の目地を、打ち込み時期を考慮して適切な間隔で設置する。橋台のた

図-3 ひび割れ抑制システムのPDCAサイクル

図-4 施工状況把握チェックシートの改善指示件数

チェック項目		H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25上期
		打込みリフト数						
締固め	① バイブレータを下層のコンクリートに10cm程度挿入しているか。	9	8	8	2	1	0	1
	② バイブレータを鉛直に挿入し、挿入間隔は50cm以下としているか。	22	13	10	4	0	1	1
	③ 締固め作業中に、バイブレータを鉄筋等に接触させていないか。	31	19	6	2	0	3	2
	④ バイブレータでコンクリートを横移動させていないか。	10	15	3	2	0	0	0
	⑤ バイブレータは、穴が残らないように徐々に引き抜いているか。	13	29	6	4	1	2	2

図-5 締固め作業に関する改善指示件数の推移

て壁の場合は、ひび割れ幅を抑制するための補強鉄筋の追加が最有力の選択肢である。橋台の胸壁の場合は、補強鉄筋の追加に加えて、膨張材の使用も検討する。現状では、施工実績に基づくひび割れ抑制対策が抑制対策資料として取りまとめられ、対策の検討に活用されている。採用された抑制対策は、施工の記録、ひび割れ発生状況とともに打設管理記録に記載される。抑制対策の効果が毎回の施工において検証され、記録されるシステムである。

山口県のひび割れ抑制システムは、公表を前提とした打設管理記録が施工者により提出され、そのデータベースの分析が新たな設計、施工にフィードバックされるPDCA サイクルシステムである(図-3)。システムの根幹は、打設管理記録のデータベースの精度である。施工の基本事項が遵守された上で、嘘のデータが混じらないことがシステムの生命線である。システムの情報がほとんど公表されていることはシステムの機能を保つために不可欠である。また、打設管理記録の提出は施工者の義務であるが、打込み後の部材のコンクリート温度の計測は施工者に義務付けていない。計測した場合には工事成績評価において評価することとしている。手のかかる作業に対してデータの捏造を防ぐための配慮でもある。

以上に述べたひび割れ抑制システムに関わるほぼすべての資料は、山口県のHPに公開されている。

産官学の取組みとして打設管理記録を含むほとんどの情報を公表していることにより、情報はフェアに共有され、関係者の協働意識の向上に寄与していると考えている。

(3) 施工状況の改善状況

山口県のひび割れ抑制システムにおいて、施工状況把握チェックシートは、施工由来のひび割れを減らす仕掛けの一つとして用いられている。監督員がコンクリートの打込みに臨場して基本事項が遵守されているかチェックし、改善すべき点があれば改善を指示する。チェックシートの集計結果は定期的に公表されている。

図-4 にはひび割れ抑制システムが本試行された平成 19 年度以降の、施工状況把握チェックシートによる改善指示が全く無い打込みリフトの割合の変遷を示した。改善指示の全く無いリフトの割合が明らかに増えており、平成 21 年度以降は 90%以上のリフトで改善指示が全く必要ないという結果となった。

図-5 には、27 項目のチェック項目のうち、システムの運用開始直後には改善指示の比較的多かった、締固めに関する 5 項目について、改善指示が出されたリフトの割合の変遷を示した。平成 21 年度以降は改善指示が出されたリフトが 2%程度以下となっており、基本事項に遵守した締固めがほとんどの現場でなされていることが

図-6 ボックスカルバートのひび割れ発生状況

うかがえる結果となった。

改善指示が出されたリフトの割合が減少した理由として、施工者がひび割れ抑制システムに順応したこと、施工者によっては品質管理に施工状況把握チェックシートを活用していること、などが挙げられる。

このような簡易なチェックシートの開発と活用により、施工の基本事項の遵守が我が国の多くの現場で達成できる可能性がある。発注者の監督業務に役立つだけでなく、監督員と施工者の協働的な対話の促進にも寄与することが分かってきており¹⁰⁾、コンクリート構造物の品質確保への効果を引き続き分析する予定である。

(4) ひび割れ抑制システムによるひび割れ低減効果

ここでは、山口県のひび割れ抑制システムによるひび割れの低減効果を定量的に議論する。

a) 施工実績の分析

図-6 には、ボックスカルバートのひび割れ発生状況を示した。頂版に発生したひび割れはすべて頂版下面に発生した非貫通のひび割れであるが、実構造物での試験施工を開始した平成 17 年度には、頂版下面の非貫通のひび割れが激減していることが分かる。ひび割れが発生した 2 件は、溶接金網、FRP の補強材を配置したものであり、従来どおりの設計で施工した頂版にはひび割れが発生しなかった。図-6 に示したボックスカルバートのデータは、形状寸法が類似したものであり、設計も同様に行われたものであるが、試験施工が行われた平成 17 年度に施工のレベルが向上したことが相違点であると言える。平成 16 年度以前の頂版のひび割れは、特別な補強材を用いずとも、適切な施工により防ぐことのできたひび割れであり、不適切な施工が主原因の「施工由来のひび割れ」と考えている。

ボックスカルバートの側壁の誘発目地以外のひび割れの発生確率には、試験施工の開始前後で大きな差が見られない。山口県のひび割れ抑制システムでは、側壁のひ

図-7 材料等によるひび割れ抑制対策が不要と判断した場合のひび割れ発生率

図-8 材料等によるひび割れ抑制対策を行った場合のひび割れ発生率

ひび割れは誘発目地の設置で防ぐこととしている。施工実績に基づいて、打込み温度が低い時期は 5.0m 程度の間隔で、その他の時期では 3.5m 程度の間隔で誘発目地を設置することとしており、施工の基本事項を遵守することで誘発目地以外への有害なひび割れの発生を防ぐことが可能となっている。

図-7 と図-8 には、山口宇部道路の橋台の建設現場における平成 17 年度から 20 年度までのひび割れ発生状況を示した。図-7 は、設計段階で材料等によるひび割れ抑制対策が不要と判断した場合で、図-8 は材料等によるひび割れ抑制対策を行った場合である。竣工検査時に貫通ひび割れで 0.15mm 以上の有害なひび割れが発生した場合と、0.15mm 未満の無害なひび割れ（ひび割れ無しも含む）に抑えられた場合の割合を示している。

平成 17 年度の試験施工の開始以降、設計段階で材料等によるひび割れ抑制対策を講じない場合に、無害なひび割れに抑制できる確率が非常に向上していることが分かる。施工の基本事項の遵守がシステムとして機能してきたことが理由の一つとして考えられる。また、施工実

績が蓄積されてきたことで、設計段階でひび割れ抑制対策を講じる要否の判断が適切になされるようになってきたことも重要な理由であると考えている。

一方で、設計段階でひび割れ抑制対策を講じる場合は、試験施工の平成 17 年度に比べると、その後は無害なひび割れに抑制できる確率が向上しているが、有害なひび割れが発生する割合も依然として多い。材料等によるひび割れ抑制対策の確立には、今後も施工実績の蓄積と分析が必要であると考えている。

b) 温度応力解析を用いた分析

打設管理記録のデータベースを用いて、3 次元の温度応力解析を実施した¹¹⁾。

打設管理記録のデータベースのうち、橋台たて壁・胸壁で、形状や養生条件の特異な構造物を除いた、67 構造物 158 リフトを分析の対象とした。補強材料としてアラミド繊維、ガラス繊維を用いた構造物は除外した。たて壁 137 リフトの内、ひび割れありが 94 リフト、ひび割れなしが 43 リフトであった。胸壁 21 リフトの内、ひび割れありが 9 リフト、ひび割れなしが 12 リフトであった。

158 リフトのうち、温度測定位置が明確な 37 構造物 99 リフトを対象に、打込み温度と熱伝達率を調整して温度履歴の解析結果と実測値がなるべく一致するような「同定解析」を実施した。

解析ソフトには 3 次元 FEM 温度応力解析が可能な ASTEA-MACS (ver.6.4.4) を用いた。打設管理記録を基に 1/2 モデルを作成し、メッシュ分割・主な物性値・計算モデル等は JCI による「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」¹²⁾（以下、「マスコン指針」と表記）に準拠し、打込み日・セメント種類・配合等は打設管理記録を参照して入力した。自己収縮は考慮しているが、乾燥収縮は考慮していない。第 1 リフトの打込み日の 3 カ月前から地盤の非定常解析を開始し、コンクリート内部の温度が外気温とほぼ平衡状態となる、対象リフトの打込み日から 1 カ月後までの期間を、マスコン指針に示された時間間隔で解析した。これは、打設管理記録のひび割れ調査結果のほとんどがおよそ材齢 1 ヶ月程度のものであることによる。外気温には気象庁発表のデータから、施工場所に最も近い測定点の日別平均気温を用いた。

158 リフトを対象とした「標準解析」では、マスコン指針に示された解析手法に準じ、打込み温度を打込み日の平均気温+5℃として入力し、熱伝達率を打設管理記録の養生条件をもとに、マスコン指針に示されている参考値を参照して決定した。

99 リフトを対象とした「同定解析」では、温度解析の精度を高めるために、コンクリート内部の温度履歴が実測値と近くなるように、打込み温度と熱伝達率を決定した。特にひび割れ指数に大きく影響する、最高温度と

図-9 山口県の構造物の温度ひび割れ発生確率曲線

図-10 温度ひび割れ幅の予測と実測の比較

最高温度到達材齢がなるべく一致するように決定した。最高温度は打込み温度により大きく変化し、最高温度到達材齢は熱伝達率で大きく変化した。なお熱伝達率は打設管理記録における養生期間のみ変更を行い、養生終了後のコンクリート表面はマスコン指針の参考値を参照して $14\text{W/m}^2\text{C}$ で一定とした。

山口県の構造物の「標準解析」と「同定解析」、マスコン指針で検討された壁状構造物の解析結果を用いて、ひび割れ指数を 0.05 刻みの各区間に区分してヒストグラムを作成した。各区間でのひび割れ発生確率をプロットし、各プロットがワイブル分布に適合するとした場合のひび割れ発生確率曲線を図-9 に示す。ひび割れ発生確率曲線は実際のデータが存在する範囲を実線で表し、前後は点線で表している。なお区間内のデータ数が 5 以下の場合、ごく一部の構造物のひび割れ発生がワイブル分布の形状に与える影響が大きくなることから除外した。

マスコン指針のデータは 65 件の既存構造物、724 の部

材を対象に、マスコン指針に示された解析手法に準じた温度応力解析の結果と温度ひび割れ調査結果に関するアンケート結果から求められたものであり、本研究ではそのうち壁状構造物に関する 282 の部材のデータを用いた。

図-9 より、マスコン指針のひび割れ発生確率に比べ、ひび割れ抑制システムのもとで施工された山口県の構造物のひび割れ発生確率の方が低くなっていることが分かる。その差は標準解析では $I_{cr}=0.70$ のときに最大となり 25%、同定解析では $I_{cr}=0.85$ のときに最大となり 20% となった。

山口県の実構造物の温度ひび割れ発生確率がマスコン指針と比べて低くなった要因の一つとして、丁寧な施工により実構造物のひび割れ発生強度が高かった可能性を考えている。

高炉セメントを用いたコンクリートの品質は、施工の影響を受けやすく、高温履歴を受ける場合に引張強度の低下が生じることが報告されている^{13,14)}。山口県のひび割れ抑制システムでは、設計段階において夏場の打込みをなるべく避けて工程を検討することとしている。また、コンクリート中に熱電対を設置しての温度履歴の計測を推奨しており、最高温度に到達以降の温度降下を緩やかにする配慮をすることがひび割れ抑制対策資料に記載されている²⁰⁾。そのため、施工者の努力により型枠存置期間を長くしたり、構造物によっては脱型後に型枠面に乾燥防止のシートを貼り付けるなどの丁寧な対策が行われている。このような体系的な取り組みが、構造物群のひび割れ発生強度を向上させ、ひび割れ発生確率を小さくする要因となったと推察している。

さらに、同定解析の温度ひび割れ発生確率曲線では、曲線の勾配が大きくなっている。ひび割れ指数で 1 以上の領域にも点線でワイブル分布に従うとした場合の曲線を描いたが、データは存在せず、ひび割れ指数が 1 を超える領域ではひび割れ発生確率はほぼゼロになると推察される。一般にひび割れ発生は大きなばらつきを伴う現象とされているが、本研究では、橋台のたて壁・胸壁で形状の類似した部材を分析の対象としたことや、3.(3) で詳述するように、施工の基本事項の遵守により施工に起因する不具合が抑制されたこと等により、曲線の勾配が大きくなったと考えている。またひび割れ発生確率曲線の勾配の増加は、マスコン指針の解析手法の有効性と、打設管理記録のデータの精度の高さを間接的に証明しているとも考えている。

マスコン指針では実物大実験の結果を基に、以下の温度ひび割れ幅予測式が示されている。

$$w_c = \left(\frac{-0.071}{p} \right) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (1)$$

ここに、 w_c : 最大ひび割れ幅、 p : 鉄筋比、 I_{cr} : 最小

表-2 試験施工におけるひび割れ発生状況

発生したひび割れの幅 (mm)		0		0より大きく 0.15mm未満		0.15mm以上	
構造物種類		Box	橋台	Box	橋台	Box	橋台
部材		側壁 頂版	たて 壁	側壁 頂版	たて 壁	側壁 頂版	たて 壁
材料等による抑制 対策	高炉B						
	追加対策なし	11	1	2	1	1	0
	高性能AE減水剤	1	0	0	0	0	1
	膨張材	1	0	1	0	0	1
	溶接金網	2	-	-	2	-	-
	FRP繊維	0	-	-	2	-	-
	アラミド繊維	1	-	-	0	-	-
	PP短繊維	1	-	-	0	-	-
	普通						
	追加対策なし	1	1	1	0	0	0
材料等による抑制 対策	溶接金網	3	-	-	0	-	-
	早強	1	-	-	0	-	-
	低熱	1	2	1	0	0	0

図-11 橋台たて壁における鉄筋比とひび割れ幅の関係
(温度計測を行ったリフトのみ)

ひび割れ指数である。

標準解析と同定解析で得られた最小ひび割れ指数を用いて、この予測式による最大ひび割れ幅を算定した。標準解析は 83 リフト、同定解析では 49 リフトが予測式の適用範囲内であった。

最大ひび割れ幅の予測値と実測値を比較した結果を図-10に示す。マスコン指針の実物大の試験では、ある程度の相関が見られるものの、標準解析では9割程度、同定解析では8割程度のデータにおいて実測値が予測値よりも小さく、山口県の実構造物では予測値に比べて温度ひび割れ幅が抑制されている傾向が認められた。

既往のひび割れ幅算定式では山口の構造物のひび割れ幅を高い精度で予測することはできないとの報告¹⁹⁾があり、山口県のデータベースに基づく算定式も提案されている¹⁶⁾。ひび割れ幅算定の手法については今後も検討の余地が大きい。

実測値が予測値を下回る傾向の理由として、施工の基本事項の遵守による拘束引張応力の低減、高いひび割れ発生強度によるひび割れ発生の防止、補強鉄筋の追加によるひび割れの分散、などが考えられる。

(5) 打設管理記録のマクロな分析から得られた知見

打設管理記録のデータベースのマクロな分析による、

使用材料、鉄筋比がひび割れに及ぼす影響についての知見を紹介する。

表-2 には、平成 17 年度の試験施工におけるセメント種類ごとのひび割れ発生状況の件数と割合を示した。ボックスカルバートでは、当初の高炉セメントで材料的な追加対策をしない場合でも、0.15mm を超える有害なひび割れは発生していないことが分かる。一方で、橋台の場合は、当初の設計の配筋のままでは、材料的な対策を施しても有害なひび割れが発生している場合が認められる。数は少ないものの、低熱セメントを用いた橋台では、ひび割れを防止する効果は顕著に見られた。しかし、ひび割れの発生は許容し、有害でないひび割れに抑制することを目標とする山口県のシステムにおいては、低熱セメントの使用は効果が大き過ぎると判断された。費用対効果および環境負荷低減効果を勘案して、山口県ではひび割れ抑制対策の対象構造物では、高炉セメント B 種を用いることを標準とし、橋台では必要に応じて追加鉄筋の配置や膨張材を使用することとしている。

図-11 には、平成 25 年 3 月 11 日現在のデータを用いて、橋台のたて壁で温度計測がなされたリフトについて、鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係を示した。この図において、鉄筋比 0.35% で 0.25mm のひび割れが生じたリフトは、4.3m とリフト高が高く、7 月に打込まれ、打込み温度が 22℃で最高温度が 70.5℃と比較的高かった。また、鉄筋比が 0.47% で 0.20mm のひび割れが生じたリフトは、4.5m とリフト高が高く、打込み温度は 12℃であったが最高温度は 52℃と温度上昇が比較的大きかった。これら特異なものを除くと、最大ひび割れ幅が 0.15mm を下回るためには、鉄筋比を 0.3%程度以上にすることが望ましいことがこの実績より分かる。

山口県では、これらのデータを活用して、新設する構造物に有害なひび割れが発生しないよう、適切な鉄筋比を設定する等の対策を検討している。

3. ひび割れ抑制システムによる表層品質の向上

山口県のひび割れ抑制システムでは、施工状況把握チェックシート等を活用した、施工の基本事項の遵守を達成する仕組みが基盤となっている。この仕組みにより、施工の影響を大きく受ける構造物の表層品質が向上している可能性が考えられる。システムの運用前後の構造物に対して、目視評価法、表面吸水試験による品質の評価を行い、システムによる表層品質向上の効果を分析する。一部の構造物からはコアを採取して、表層品質の分析を行う。システム運用後の構造物については、打設管理記録のデータ等を活用して、「コンクリート構造物の耐久設計指針(案)」¹⁷⁾(以下、「耐久設計指針(案)」)

による施工要因の影響の分析を試みる。

(1) 調査対象構造物と調査項目

表-3に、調査対象構造物と調査項目の一覧を示す。ひび割れ抑制システムの運用前後の橋台、ボックスカルバートの側壁を選定し、目視評価、表面吸水試験、コアを採取しての分析を実施した。耐久設計指針で分析を行う構造物については、打設管理記録のデータに加え、施工等に関わった業者へのヒアリングを行ってデータを収集

し、3.(4)で検討する耐久性ポイントの計算に使用した。

表面吸水試験については、2011年の夏と冬に2回計測した構造物と、12月のみに計測した構造物がある。

嘉川IC橋の2つのリフトには、ひび割れ抑制を目的としたガラス繊維が補強材として使われている。

四十八瀬川橋のたて壁の2つのリフトでは、型枠脱型後に型枠面に散水し、乾燥防止を目的としたマスカテープで保護されている。

いくつかのたて壁では膨張材が使用されている。

表-3 表層品質を調査した構造物の一覧（カッコの数字は推定）

構造物名	構造形式	ひび割れ抑制システム	打込み時期 (年・月・日)	セメント種類	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	呼び強度 (N/mm ²)	打込み面養生期間 (日)	型枠存置期間 (日)	養生方法	目視評価		表面吸水試験 調査日	コア分析	
											調査日	調査人数	調査日	採取日	採取リフト
流通IC橋A2	橋台たて壁	前	2002	高炉B種	54.5	-	24	-	-	-	2012/12/27 午前	9	2011年 8/12月	2010年 7月	地上部
来福台1号橋A1	橋台たて壁	前	1996	(高炉B種)	-	-	(21)	-	-	-	2012/12/27 午前	9	-	-	-
唐樋橋A1	橋台たて壁	前	1998	(高炉B種)	-	-	(21)	-	-	-	2012/12/27 午後	10	-	-	-
寄江高架橋A1	橋台たて壁	前	1998	(高炉B種)	-	-	(21)	-	-	-	2012/12/27 午後	11	-	-	-
嘉川IC橋A1 No.2 リフト	橋台たて壁	試行運用中 (補強材：ガラス繊維)	2007 4.3	高炉B種	54	162	27	10	24	打込み面：養生マット＋散水	-	-	2011年 12月	2010年 7月	2L
嘉川IC橋A1 No.3 リフト	橋台たて壁	試行運用中 (補強材：ガラス繊維)	2007 5.7	高炉B種	55	165	27	10	22	打込み面：養生マット＋散水	2014/4/5	6	2011年 8/12月	-	-
朝田ICランプ橋A1 No.2リフト	橋台たて壁	後	2010 3.19	高炉B種	55	-	27	5	31	打込み面：湿潤＋保温	2014/4/5	6	-	-	-
朝田ICランプ橋A2 No.2&3リフト	橋台たて壁	後	2010 4.6および4.16	高炉B種	54	-	27	14	-	打込み面：冠水	2014/4/5	6	-	-	-
高井大橋A1 No.2リフト	橋台たて壁	後	2009 2.12	高炉B種	55	161	27	12	26	打込み面：養生マット＋ブルーシート＋散水	2012/12/27 午後	9	2011年 8/12月	-	-
四十八瀬川橋A2 No.2リフト	橋台たて壁	後	2007 1.25	高炉B種	54	163	27	9	40	型枠面：散水後マスカテープ、打込み面：散水	-	-	2011年 12月	2010年 7月	2L
四十八瀬川橋A2 No.3リフト	橋台たて壁	後	2007 2.15	高炉B種	54	163	27	14	19	型枠面：散水後マスカテープ、打込み面：散水	-	-	2011年 8/12月	-	-
四十八瀬川橋A2 No.4リフト	橋台胸壁	後	2007 2.22	高炉B種	54	163	27	14	12	打込み面：養生マット	-	-	2011年 12月	-	-
松坂橋A1 No.2 リフト	橋台たて壁	後	2007 2.26	高炉B種＋膨張材	-	-	27	7	8	打込み面：養生マット＋散水	-	-	2011年 8/12月	-	-
松坂橋A1 No.3 リフト	橋台たて壁	後	2007 3.14	高炉B種＋膨張材	-	-	27	10	21	打込み面：養生マット＋散水	-	-	2011年 8/12月	-	-
金田ため池A1 No.2リフト	橋台たて壁	後	2007 3.30	高炉B種	55	162	27	12	8	打込み面：養生マット湿潤	-	-	2011年 8/12月	-	-
金田ため池A1 No.3リフト	橋台たて壁	後	2007 7.12	高炉B種＋膨張材	55	162	27	12	8	打込み面：養生マット湿潤	-	-	2011年 12月	-	-
流通IC付近Box	側壁	前	2004	高炉B種	54	-	24	-	-	-	2014/4/5	6	2011年 8/12月	2010年 7月	3ブロック
唐樋橋No.1 Box	側壁	前	1998	(高炉B種)	-	-	(21)	-	-	-	2012/12/27 午後	11	-	-	-
唐樋橋No.2 Box	側壁	前	1998	(高炉B種)	-	-	(21)	-	-	-	2012/12/27 午後	11	-	-	-
林道Box	側壁	試験施工中	2005	高炉B種	-	-	24	-	-	-	2014/4/5	6	-	-	-
NランプBox	側壁	後	2008	高炉B種	54	162	27	ボックスごとに異なる			2014/4/5	6	2011年 8/12月	2010年 7月	8ブロック
瀬々川Box	側壁	後	2007	高炉B種	53	161	27	ボックスごとに異なる			-	-	2011年 12月	-	-

(2) 表層品質の調査方法

a) 目視評価法による評価

ひび割れ抑制システムの運用前後の構造物に対して、目視評価法による評価を行った⁸⁾。目視評価法は、施工者の現場での品質管理、品質改善の手法として開発された^{18), 19)}が、ここでは、システムによる品質の向上を定量的に分析することに活用する。なお、本手法は、簡易で特別な道具を必要とせず、コンクリート表面に不具合が生じた場合でも、経験の豊富な技術者であれば不具合の

原因を推察できるため、次の打込みで品質を改善するための対策を講じやすいという特徴を有しており、復興道路のコンクリート構造物の品質確保においても活用されている²⁰⁾。

表-4に、目視評価に用いた評価項目と評価基準を示す。構造物の表面に生じる不具合を項目別にグレーディングにより評価することで、定量的な評価を可能にした手法である。本研究では、山口県のひび割れ抑制システムの運用の前後での品質の差を定量的に示すことを目的

表4 目視評価の項目と判定基準

評価基準 評価項目	一般的に「良」とされる範囲				不適合
	4点	3点	2点	1点	-
(1) 沈みひび割れ	・ピーコン近傍にも沈みひび割れがない	・目視調査範囲のピーコンの概ね1/5以上に沈みひび割れが発生 ・ピーコン直径の3倍以上の長さの沈みひび割れが発生	・目視調査範囲のピーコンの概ね1/2以上に沈みひび割れが発生 ・ピーコン直径の5倍以上の長さの沈みひび割れが発生	・2点の状態よりも劣る	構造物のオーナーから不具合と判定される状況で補修を要するもの
(2) 表面気泡	・5mm以下の気泡がほとんどない (目安: 概ね50個以下/m ²)	・5mm以下の気泡が認められる (目安: 概ね50個以上/m ²)	・10mm以下の気泡が認められる (目安: 概ね50個以上/m ²)	・2点の状態よりも劣る	
(3) 打重ね線	・近接では打重ね線が認められるものの、約10m離れた遠方からは認められない	・約10m離れた遠方から、打重ね線が認められる	・約10m離れた遠方から、打重ね線がはっきりと認められる	・2点の状態よりも劣る	
(4) 型枠継ぎ目のノロ漏れ	・調査対象範囲にノロ漏れがほとんど認められない	・調査対象範囲の概ね1/10以上にノロ漏れが認められる	・調査対象範囲の概ね1/3以上にノロ漏れが認められる	・2点の状態よりも劣る	
(5) 砂すじ	・調査対象範囲に砂すじがほとんど認められない	・調査対象範囲の概ね1/10以上に砂すじが認められる	・調査対象範囲の概ね1/3以上に砂すじが認められる	・2点の状態よりも劣る	

に、表-4に示す5項目で評価を行った。

各評価項目を4段階に分け、それぞれを4, 3, 2, 1点とした。各評価項目について4段階の写真をカラーでA4一枚に印刷し、表-4に示す判断基準の参考となる文章を写真とともに示した。目視評価の参加者は、現場での筆者からの説明を受けた後、この資料を持って、構造物の表面状態と照らし合わせながら評価を行った。評価方法と結果の詳細は、参考文献を参照されたい⁸⁾。

b) 表面吸水試験による評価

筆者らの開発した表面吸水試験^{4), 5), 7)}により、構造物の吸水抵抗性を評価した。表面吸水試験の試験方法の概要は以下である。内径80mmの円形の吸水カップをコンクリート面に設置し、吸水カップの中心位置において、計測開始時に300mmの水頭が作用するように、短時間(10秒以内)で注水を行い、吸水による時々刻々の水頭の減少を高感度圧力センサにより連続的に計測する。水頭を与えるためのシリンダの内空断面積に水頭の減少量を乗じて吸水量を算出する。本手法では注水開始から10秒時点を計算上の0秒として評価し、計測結果からは、任意の時刻の吸水速度が得られる。本研究では、これまでの研究により、養生方法等の施工要因やコンクリートの配合等の表層品質に与える影響を評価できることが分かっている、計測を開始してから10分経過した時点での瞬間的な吸水速度(10分時点での表面吸水速度)を表層品質の指標として用いた。

3つのボックスカルバートでは、品質のばらつきについて統計的な分析も行うため、なるべく多くの箇所での測定を行った。日射の影響を受けやすい端部のボックスも含み、すべてのボックスで測定を行った。

橋台では、リフトごとに10分時点での吸水速度を求めるため、可能な範囲で測定点を増やし、6点以上の計測とした。

なお、表面吸水試験の計測位置は各構造物の各リフトの下端から1.5m程度以下である。

c) コアを採取しての分析

表-3に示すように5つの構造物からコアを採取して分析した^{21), 22)}。ひび割れ抑制システムの検討が始まった以降の構造物が3つと、システム前の構造物が2つである。コアの直径は、Nランプボックスと四十八瀬川橋 A2 では100mmで、それ以外の構造物では75mmであった。

本論文では、実構造物での中性化深さとコアの促進中性化による内部の品質の評価の結果について報告する。

各構造物から3本のコアを採取した際に、削孔部にフェノールフタレインを噴霧して中性化深さを測定した。それぞれの孔において4点で計測して平均値を求め、3つの孔での中性化深さの平均値を採用した。コアを採取した箇所は、日常的に雨水等の水の影響を受けない箇所である。

各構造物から採取したコアに対して、促進中性化試験を行った。現場で採取されたコアはポリエチレンフィルムで封をした。フィルムを開封後、約3か月間、室内(20℃60%R.H.)に静置し、コアの初期の含水状態の差の影響が小さくなるための配慮を行った。その後、構造物表面部に当たる、既に中性化した部分を除去した後、両端面をエポキシ樹脂で被覆した。

温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度10%の槽内で中性化を促進し、所定の測定日(0, 1, 2, 4, 6, 9, 12週)においてコアの深部より1.5cmを乾式切断した後に、1.0%フェノールフタレイン溶液を切断面に噴霧し、呈色域から中性化深さを測定した。切断した残りの供試体については、切断面をエポキシ樹脂で被覆し、引き続き中性化促進を継続させた。中性化速度係数を算定には、中性化深さ5mm以上の測定点のみを用い、それらの点を一次式で最小二乗近似した際の傾きを中性化速度係数として採用した。

(3) 表層品質の調査結果

a) 目視評価の結果

図-12に、橋台の目視評価の結果を示した。この図においては、各橋台について全評価者の評価値を評価項目ごとに単純平均したものを示している。

どの評価項目においても、ひび割れ抑制システムの開始後の橋台の評価値が高い傾向が認められる。多くの調査者が、ひび割れ抑制システムの前後で橋台の品質の違いを明らかに目視で認識しているという感想を口にしていたが、目視評価法によりその違いを定量的に検出できることが明らかとなった。

山口県のひび割れ抑制システムには、構造物の表面に生じる施工による不具合を低減する効果があることが確認された。これは、施工の基本事項が遵守される仕組みが構築されたことによるとと思われる。

ひび割れ抑制システムの開始後の橋台では、沈みひび割れと打重ね線についてはほぼ満点を示している構造物もあり、施工の基本事項の遵守による効果が明瞭に見られている。一方で、表面気泡、ノロ漏れ、砂すじについては、それらの橋台においても3.5点程度に留まっており、これらの評価項目で最上レベルに近づけるにはさらなる施工上の工夫が必要であると言える。

図-13には、ボックスカルバートの調査結果を示した。ひび割れ抑制システムの運用前の平成10年に施工の唐樋ボックスは全体的に低い評価値を示している傾向が見られ、3点を大きく下回る項目もみられる。しかし、同じくシステム運用前の流通IC付近ボックスは、システムの開始後のNランプボックスに比べて顕著に低い値が出ているわけではない。流通IC付近ボックスについては現在の山口県のシステムでの誘発目地間隔と同じ仕

図-12 目視評価の調査結果 (橋台)

図-13 目視評価の調査結果 (ボックスカルバート)

表-5 10分時表面吸水速度の統計値 (ボックスカルバート)

名称	種別	測定 点数	平均値 (ml/m ² /s)	標準 偏差 (ml/m ² /s)	尖度	歪度
流通IC付近 (システム前)	全体	34	0.188	0.118	0.40	0.88
	選択 ^{*1}	16	0.209	0.121	-1.09	0.16
Nランプ (システム後)	全体	62	0.222	0.117	0.98	1.00
	選択 ^{*2}	50	0.224	0.115	1.41	1.01
	選択 ^{*3}	24	0.179	0.082	-1.12	0.18
瀬々川 (システム後)	全体	48	0.092	0.058	-0.29	0.41

*1 第1,6ブロックを除外

*2 第1,8ブロックを除外

*3 第1,2,7,8ブロックを除外

様であり、ひび割れ抑制システムの運用前ではあるが、その当時なりにひび割れに配慮して施工されていたために、目視評価によるコンクリートの品質も低くなかったのではないかと推察している。

b) 表面吸水試験の結果

ボックスカルバートの測定結果⁴⁾について、表-5に計算された統計値を、図-14に相対度数分布を示す。

ひび割れ抑制システムの運用後に建設された瀬々川ボ

図-14 ボックスカルバートの表面吸水試験の結果

ックスは平均値と標準偏差が最も小さかった。微細なひび割れやセパレータの孔の付近の沈みひび割れなども目視ではほとんど観察されず、丁寧な施工がなされた様子が伺え、表面吸水試験の結果と一致していた。

Nランプボックスは、全長約80mの8ブロック全体では、尖度1.0、歪度1.0となった。データ群が正規分布であるときには計算される尖度、歪度は0の値を示す。尖度が正の値をとるにしたがい正規分布よりも中央に多く集中することを示す。歪度は正の場合には平均値よりも右側に全体が分布することを示す。そこで、日射や風の影響を受けると考えられる端部ブロックを除外して中央の4ブロックのみで検討した結果、表-5にみられるとおり表面吸水速度の尖度-1.1、歪度0.2と絶対値が低下し、平均値、標準偏差も小さくなった。ボックスカルバート内の環境は均一ではなく、日射や乾燥の影響により、端部付近の側壁の品質が低下したものと考えている。

ひび割れ抑制システムの開始前の流通IC付近ボックスは、表面吸水速度の平均値と標準偏差が瀬々川よりは明らかに大きいものの、Nランプとは大きな差は無かった。また、両端のボックスを除くと、Nランプとは逆に平均値と標準偏差が大きくなる傾向が認められた。

調査したボックスカルバートの表面吸水速度の平均値は大きくて0.2ml/m²/s程度であった。この値は、Levittの提案した10分時点での表面吸水速度を用いた良好な品質の評価基準のしきい値である0.25²³⁾よりも小さい。また、水セメント比が50%の高炉セメントを用いたコンクリートが28日間の型枠存置を行った場合に、材齢3か月で0.2ml/m²/s程度の表面吸水速度を示している⁴⁾ことから、調査したボックスカルバートの品質は全体的に高いと言える。この理由の一つとして、ボックスカルバートにおいては、端部を除いて、環境作用の影響が橋台などに比べて比較的小さく、相対的に品質が高くなる傾向にあることが挙げられる²⁴⁾。また、前述した通り、今回調査した流通IC付近ボックスは、ひび割れ抑制システムの運用前の構造物ではあるものの、誘発目地間隔が現行のシス

*1: 夏季の瀬々川ボックスでは吸水ゼロ, *2: 流通 IC 橋台では, 沈みひび割れ等の欠陥部を避けて実施

図-15 表面吸水試験の結果 (ひび割れ抑制システムの運用の前後)

図-16 中性化深さの測定結果

図-17 コア内部と実構造物表面の中性化速度係数

テムと同じ仕様であり, それなりにひび割れに配慮して施工されたことも影響していると考えている。

図-15に, 2011年の夏と冬に計測したボックスカルバートと橋台の10分時点での表面吸水速度を示した。夏はすべての構造物では計測していない。ただし, 瀬々川ボックスでは夏の計測では全く吸水をしない結果となった。6点以上の計測値の平均値を示している。

夏と冬で同一の箇所計測したわけではないので, 品質のばらつきの影響も含むが, Nランプボックスでは夏と冬の違いが大きかった。ひび割れ抑制システム運用後の瀬々川ボックスは顕著に小さい表面吸水速度を示し, 夏場には全く吸水をしなかった。夏は湿度が高く, 端部以外は日射の影響を受けないためにコンクリートの含水

率が高かったことも影響している可能性がある。

橋台については, ひび割れ抑制システム運用前の流通IC橋台に比較して, 全体的にひび割れ抑制システム運用後の構造物は高い吸水抵抗性を示した。なお, 流通IC橋台については, 明らかに目視で認識できる沈みひび割れ等の欠陥部を避けて吸水試験を行っており, 目視で健全と判断される部分の吸水抵抗性をグラフに示している。沈みひび割れ等の欠陥がある箇所計測を行うと, 水漏れが生じ, 適切な計測を行うことができなかったことから, 流通IC橋台の全体の吸水抵抗性は図-15に示される値よりも低いことを付記しておく。ひび割れ抑制システムの運用後の橋台の表面吸水速度は, 0.3 ml/m²/s 程度程度を下回る場合がほとんどであり, Levittの提案

するしきい値等を勘案しても、W/Cが55%程度の構造物としては、吸水抵抗性の高い構造物が建設されていると判断できる。

なお、ひび割れ抑制システム運用後の構造物の品質の差については、打設管理記録を活用した分析を3.(4)で行う。

c) コアの分析結果

図-16 に中性化深さの測定結果を示した。土木学会のコンクリート標準示方書による中性化深さの計算値と、実測値との比較を示した。計算においては、水セメント比を 55%とし、高炉セメントの高炉スラグ微粉末の置換率は 40%と仮定した。また、材料安全係数 γ_c は 1.0 とし、 γ_{db} は 1.15 とした。

N ランプボックスでは中性化深さがゼロであった。若材齢であったことと、ボックスカルバートで日射等の影響を受けにくい環境の要因もあるかもしれないが、システム運用前のボックスカルバートから採取したコアと比べて、高い中性化抵抗性を示した。

橋台においても、システム運用前の橋台の中性化深さが最も大きく、四十八瀬では中性化深さが非常に小さく、施工において丁寧な養生がなされたこと等の効果が表れているものと思われる。

ボックスカルバートのコアは、橋台のコアに比べて中性化深さが小さい傾向が見受けられる。また、流通 IC 橋台の中性化深さは、環境の影響を表す β を 1.6 とした場合の示方書での計算値よりも大きく、各構造物を調査した材齢で計算値と比較した場合に最も中性化抵抗性が劣る結果となった。

中性化深さの調査結果からも、ひび割れ抑制システムによる品質向上が確認できたと考えている。

図-17 には、コアの促進中性化試験から得られた中性化速度係数と、コアの側面で計測した中性化深さから算出した実構造物の中性化速度係数の関係を示した。ひび割れ抑制システム前のボックスカルバートと橋台で、コア内部の中性化速度係数が大きい傾向が見られ、ひび割れ抑制システムの後の構造物のうち、N ランプボックスと四十八瀬川橋では実構造物の表面からの中性化抵抗性が高い。N ランプボックスは日射の影響を受けにくいこと、四十八瀬川橋は脱型後に乾燥抑制の養生を行っていることも寄与していると推察している。

ひび割れ抑制システム開始後の構造物のコア内部の中性化速度係数が小さいことは、材料供給者も積極的に関与した協働による品質確保の取組みの中で良質のコンクリートが製造され、施工されたことも一因である可能性が考えられる。

採取したコアに対しては、透気試験、酸素拡散試験等の物質移動抵抗性に着目した分析も行われ、橋台、ボックスカルバートそれぞれにおいて、ひび割れ抑制システ

ムの運用後の構造物のコアが高い物質移動抵抗性を示した²⁹⁾。

(4) 耐久性ポイントによる分析

a) 耐久性ポイントの算出方法

土木学会による耐久設計指針(案)¹⁷⁾は、数値化しにくい耐久性への各種影響要因をポイント化し、構造物の耐久設計を設計、施工、材料、人的要因などの総合的観点をもって行うことを促す仕組みである。構造物の耐久性に関係する要因の影響を定量的に評価した耐久性ポイント $T_p(I, J)$ の積み上げにより算出される耐久指数 T_p が、環境指数 E_p を上回ることによって耐久性を照査できる。

本研究では、耐久性ポイント $T_p(I, J)$ のうち、表層品質に関係すると思われるポイントを抽出し、それらの和を算出し、表面吸水試験の結果との相関を調べることにした。具体的には、表-6に示すように、耐久性に影響を及ぼす項目を8種類に大別したIからコンクリート材料(I-4)、コンクリート(I-5)、コンクリート工(I-6)に関する耐久性ポイントを算出した。

表-6に示すポイントには、施工時の気温やコンクリート温度の影響が直接考慮されていない。耐久設計指針(案)では、設計ひび割れに関する耐久性ポイントの中で温度ひび割れ指数が考慮されており、このポイントに温度の影響が含まれる。しかし、耐久設計指針(案)でのこのポイントは、温度ひび割れそのものが構造物の耐久性を損ねる影響を考慮したものであると考えられ、ここでの検討ではかぶりの品質を検討するため、このポイントは考慮しないこととした。

表-6に示す耐久性ポイントの計算には、山口県の打設管理記録を用いた。コンクリート材料、打込みの状況(ポンプ車のホッパーへコンクリートを投入する場所に元請け技術者を常駐しているかなど)、技術者資格等については、実際の工事に携わった施工者や、材料供給者にヒアリングを行って情報を収集した。

コンクリート工に関する耐久性ポイント $T_p(6,3,4)$ の算出に必要な、1箇所の打込み口からの最大打込み速度(m^3/h)がポイントの総和に及ぼす影響が大きいことが分かり、ボックスカルバートの壁部材についていくつかの計算方法があることが判明したので、本研究での計算方法を詳述する。

山口県での標準的なボックスカルバートの壁部材を施工する場合には、壁部材と上床版を連続して打ち込む。2つの壁部材を並行して、施工計画で決められた層厚で打ち重ねて行くため、ポンプ車からの筒先はそれぞれの壁を行き来する。従って、1台のポンプ車から見れば吐出量の半分ずつが、ボックスカルバートのそれぞれの壁に供給されることになる。耐久性ポイントで算出すべきは、1台のポンプ車からの吐出速度ではなく、1箇所の打

表-6 各構造物の耐久性ポイント

大項目	小項目			耐久性ポイントの算定式	構造物・リフト名										
I	J	K	小項目の技術的な説明	$T_p(I,J)$	金田 A1第2	金田 A1第3	四十八 瀬A2 第2	四十八 瀬A2 第3	四十八 瀬A2 第4	高井 A2第2	嘉川 A2第2	嘉川 A2第3	Nラン プBox 第8	瀬々川 Box第6	
4	1	1	乾燥収縮や硬化収縮の小さいセメント 一般のセメント	10 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	1	細骨材の吸水率(%): $D_{21}(\%)$ 粗骨材の吸水率(%): $D_{22}(\%)$	$2*(2-D_{21})+4*(1-D_{22})$ (8~10)	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	3.0	2.0	2.0	1.9	0.9	
	3	1	標準粒度の範囲からはずれている場合 一般の場合	-5 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	1	膨張材 シリカフェューム 乾燥収縮低減剤	10またはTp(2,2)で考慮 10 10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	
		2	AE剤を使用する・使用しない	0・15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma T_p(4,J)$ コンクリート材料に関する耐久性ポイント					2.5	12.5	2.4	2.4	2.4	3.0	2.0	2.0	1.9	0.9	
5	1	1	スランプ: $E_{10}(\text{cm})$ コンクリートの充填性に及ぼす部材形状・寸 法の影響を考慮する係数: E_{11}	$2*(E_{10}-10)+$ $E_{11}*(1-E_{10}/30)$ (30~30)	-3.3	-0.7	4.2	-3.1	-1.0	0.8	-0.1	-1.0	-3.1	-9.8	
		2	材料分離抵抗性を考慮する係数 E_{12} , 一般に0.06とする	$5-E_{12}*(E_{10})^2$ (5~25)	1.2	-1.0	-0.4	1.2	1.6	0.1	0.7	1.2	-0.4	2.1	
	2	1	水セメント比: $E_2(\%)$	$55-E_2$ (20~15)	0	0	1	1	1	0	1	1	1	2	
	3	1	単位水量: $E_3(\text{kg}/\text{m}^3)$	$0.5*(160-E_3) : E_3 \leq 160$ $1.0*(160-E_3) : E_3 > 160$ (10~25)	-0.8	-0.8	-1.5	-1.5	-1.5	-1.2	-2.0	-2.0	-2.0	-1.1	
	4	1	全塩化物イオン量: $E_4(\text{kg}/\text{m}^3)$	$5-0.5*(10*E_4)^2$	4.9	4.9	4.8	4.8	4.9	5.0	4.8	5.0	5.0	5.0	
	5	1	JIS工場でない場合	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	自動計量記録装置	4											
			練混ぜ性能の特別に良いミキサ	2											
			骨材貯蔵設備に上屋が設置	2											
細骨材表面水率管理 $\pm 0.5\%$	4		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	14		
細骨材の表面水率管理 $\pm 1.0\%$	2														
トルクによるコンシステンシー管理	4														
$\Sigma T_p(5,J)$ コンクリートに関する耐久性ポイント					12	12	18	12	15	15	14	14	10	12	
6	1	1	施工主任技術者 特A A B C	25 15 5 -10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
		2	1	生コンの受入れ場所に元請技術者が非常駐	-5	-5	-5	0	0	0	0	-5	-5	-5	0
	2		計量印字記録によって配合を現場到着時に 直ちに確認	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
	3	1	工事指揮者が打込み場所に常駐しない	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		2	リフトの高さ: $F_{32}(\text{m})$	Tp(5,1)で考慮	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		3	自由落下高さ: $F_{33}(\text{m})$	$2*(1.5-F_{33})$ (0~5)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		4	1箇所の打込み口からの最大打込み速度: $F_{34}(\text{m}^3/\text{h})$	$20-F_{34}$ (10~10)	0.1	3.5	5.3	3.3	10	3.2	-0.7	-1.0	10	10	
		5	工場で型枠振動機 現場で型枠振動機と内部振動機を併用 内部振動機による通常の締固め 内部振動機による締固めを行わない	10 5 0 -25	0	0	5	5	5	0	5	5	0	5	
			1	被膜養生剤 通常の表面仕上げ タンピングを行わない(はり、柱) タンピングを行わない(スラブ部材等)	5 0 -5(はり・柱) -15(スラブ)	0	0	5	5	5	0	0	0	0	0
	4	2	普通セメント $F_{42} \leq 5$	$2*(F_{42}-5)$											
			$F_{42} > 5$	($F_{42}-5$)											
			早強セメント $F_{42} \leq 3$	$3*(F_{42}-3)$											
			$F_{42} > 3$	$1.5*(F_{42}-3)$	1	1	3	3	3	3	3	3	0	3	
	3	2	高炉・フライアッシュ $F_{42} \leq 7$	$2*(F_{42}-7)$											
			$F_{42} > 7$	($F_{42}-7$)											
			F_{42} :養生期間(日)												
養生しない	-20(寒中)・-15(暑中)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
5	1	打継目の施工	Tp(1,7)で考慮	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
$\Sigma T_p(6,J)$ コンクリート工に関する耐久性ポイント					6.1	9.5	28	26	33	16	12	12	15	33	
耐久性ポイントの総和					21	34	49	41	50	34	29	28	27	46

図-18 耐久性ポイントの和と表面吸水速度の関係

図-19 耐久性ポイントの内訳

図-20 1箇所の打込み口からの最大打込み速度がSWATと耐久性ポイントの和の相関に与える影響

込み口での打込み速度である。

したがって、本研究においては、ボックスカルバートの壁の打込み速度（1箇所の打込み口からの最大打込み速度）を、次のように算定した。打ち込んだ高さを、壁部材と上床版の打込みにかかった総時間で割ると、時間当たりの打ち上がり高さが得られる。総時間のうち、壁

部材の打込みにかかる時間が大半を占めるため、この時間当たりの打ち上がり高さが、実質的に壁部材の打ち上がり高さとはほぼ等しいと考えた。調査を行ったのは二つの側壁の一つであるので、時間当たりの打ち上がり高さに片側の壁部材のみの打込み面積をかけて、 $Tp(6,3,4)$ を算出した。

橋台のたて壁、胸壁の打込み速度は、打込み総量を打込みにかかった時間で除して $Tp(6,3,4)$ を算出した。

四十八瀬川橋A2橋台では、脱型後に型枠面を乾燥防止用のマスキングテープで保護したと記録にあり、この効果は $Tp(6,4,1)$ で考慮した。

b) 耐久性ポイントの和と表面吸水試験の結果との相関

表-6に、耐久性ポイントの計算結果の一覧を示した。金田ため池A1橋台の第2リフトでは膨張材が使用されていた。各構造物の施工主任技術者のポイントは、ヒアリングにより資格と経験年数を問合わせ、耐久設計指針（案）の解説にしたがって算出した。レディーミクストコンクリートの受入れ時の品質管理についてもヒアリングにより得られた情報に基づいてポイントを付けた。

図-18に、表-6で計算した耐久性ポイントの和と、各構造物で計測した表面吸水試験の結果の関係を示した。相関係数は-0.704であり、サンプル数10であるため、危険率5%で負の相関があることが分かった。ひび割れ抑制システムの運用後の構造物は全体的に高い品質を示しているが、その中でも、コンクリート材料、コンクリート、コンクリート工に関わる耐久性ポイントの和が大きい構造物において高い吸水抵抗性を示すことが分かった。

調査対象中で最も高い吸水抵抗性を示した瀬々川ボックスでは、元請け技術者が品質の高いコンクリートとするために打込み可能な範囲で1cmでもスランブを小さくする努力を行っていた。この努力は、耐久設計指針（案）においては $Tp(5,1,1)$ により充填性が低いと評価され、耐久性ポイントを大きく減ずる結果となり、そのため回帰直線の下側に位置したと分析できる。

耐久性ポイントの和が28程度で、表面吸水試験の結果が下位2つであった嘉川A2の2つのリフトでは、ひび割れ抑制のためのガラス繊維が用いられており、ガラス繊維がかぶり内に配置されていた。

図-19に各構造物での耐久性ポイントの内訳を示した。コンクリートについてのポイントには差がほとんどなく、コンクリート材料についても膨張材が用いられた金田第2リフトのみに差が見られ、他はほとんど同じでポイントも小さい。ポイントに差が生じた原因はコンクリート工にあり、最もポイントに差が付いた項目が1箇所の打込み口からの最大打込み速度であった。最大打込み速度に関する耐久性ポイントを省いて相関係数を求めたところ、-0.704（危険率5%で有意）から-0.521へと相関性が大幅に低下し、最大打込み速度が表面吸水抵抗性に与える

影響が大きいことが示された(図-20)。耐久設計指針(案)の解説には「1箇所からのコンクリートの打込み速度が大きいと、作業中の現場雰囲気が慌ただしくなるが、逆にゆっくりと打ち込む場合には落ちついた作業状況となることを積極的に評価した。(中略)打込み場所における締固め機械器具、棒形内部振動機の種類や数量を直接に評価することも考えられるが、本指針では、優れた工事指揮者が作業現場に常駐し、打込み速度を制限すれば、適切な様態が達成できると判断して、このように定めた。」と記されており、施工の影響を受けやすい表層の品質の向上に打込み速度が大きく影響したものと思われる。また、コンクリート工で高得点が付いた四十八瀬、瀬々川では、レディーミクストコンクリートの受入れ、型枠パイププレートによる締固め、型枠面の乾燥防止などで得点が積み重ねられていた。

耐久設計指針(案)と表面吸水試験の組み合わせで分析を重ね、必要に応じて耐久設計指針(案)の内容の改善にフィードバックすることにより、耐久的な構造物を構築するための設計、施工に活用される有用な知見が得られるものと期待できる。

4. 構造物の品質確保におけるひび割れを抑制することの意義

山口県で構築したひび割れ抑制システムで明らかとなったように、施工の基本事項が遵守されれば発生しない「施工由来のひび割れ」が存在する一方で、設計段階から抑制の検討を行なうべきひび割れが存在する。よって、ひび割れの発生やひび割れ幅のみをもって、材料の品質や施工の良否を判定する指標とすることはあてはまらない。発注者、コンサルタント、施工者、材料供給者と役割が分かれていることが一般的な現在の建設システムにおいて、各プレーヤーが各自の役割を適切に果たすことが、構造物の品質確保につながる。その中で、ひび割れは我々にコンクリートの品質に関わる多くの情報を与えてくれる指標であると考えている。以下に、施工時に発生するひび割れが示唆することについて考察し、ひび割れを抑制することの意義について考える。

(1) 施工の質を表すひび割れ

例えば、山口県のボックスカルバートでは、頂版の下面に発生した軸方向の非貫通のひび割れは、施工由来のひび割れであると判断された。構造物の設計や材料の仕様を変更せずに、ひび割れ抑制システムの運用開始後には大きく減少していることから、意識の高まった施工者の努力により発生が防止されたものと考えられる。また、目視評価でシステムによる低減が確認された沈みひび割

れや打重ねに起因するひび割れも、施工由来のひび割れに含めることができる。

施工状況把握チェックシートを活用した、山口県で構築された施工の基本事項が遵守されるシステムは、人間が構築したものであるため、システムが機能し続ける保証はない。今後、施工由来のひび割れが発生したとすれば、施工の基本事項を遵守する仕組みにほころびが生じている可能性を示唆していると受け取る必要があろう。

(2) 建設条件の難易を示すひび割れ

図-6 に示したように、ボックスカルバートにおいては、試験施工の開始後の平成 17 年度に、側壁でのひび割れ発生率が 16%程度、頂版でのひび割れ発生率が 6%程度であった。一方で、図-8 に見られるように、材料等によるひび割れ抑制対策を行った場合(ボックスカルバートは含まず、橋台たて壁・胸壁がほとんど)では、ボックスカルバートの側壁よりも鉄筋比が高い場合がほとんどであるにもかかわらず、ひび割れ発生率が高い。山口県の構造物の表面吸水試験による調査結果(図-15)からは、ボックスカルバートに比較して、ひび割れ発生率の高い橋台において、表層品質が低い傾向が認められた。

山口県のボックスカルバートの側壁と橋台において、使用されているコンクリートに大きな差はない。施工者の意識にも大きな差異があるとは思えない、というのが実際の施工関係者の証言である。部材の形状や配筋に違いはあり、打ち上がり速度や締固め方法に多少の違いはある可能性はある。しかし、施工の基本事項が遵守されるシステムが構築されている山口県において、ボックスカルバートと橋台の違いの一つと考えられるのが環境条件である。

山口県のボックスカルバートでは、側壁と頂版を同時に施工する場合がほとんどであり、構造物のごく端部を除いて、側壁の内側が脱型後に直接雨水や日射にさらされることはない。一方で、橋台のコンクリートは、直接雨水や日射にさらされる場合がある。部材がさらされる環境の違いが、ひび割れや表層品質の違いに表れている可能性がある。表-3 に示したように、ひび割れ抑制対策以降に施工された N ランプのボックスカルバートでは、8 ブロックのうち、端部に近いブロックで明らかに表面吸水の抵抗性が低かった。この結果も、環境条件の表層品質への影響を示唆していると考えている。

また、ひび割れの程度には、既設部材による外的拘束の程度と関連する建設条件の困難さが表れている場合がある。筆者らは、高炉セメントを使用した外的拘束の程度の異なる壁構造物において、温度ひび割れが多く発生した壁の方が、表面吸水試験による吸水抵抗性が劣った事例を報告している⁴²⁾。この事例においては、高炉セ

メントを用いた場合の粗骨材周囲の微視的温度応力による微細ひび割れが外的拘束による引張応力を受けて顕著になり²⁶⁾、吸水抵抗性に影響したと考察した。建設条件が、ひび割れと表層品質の双方に影響することを示唆する一つの事例である。

(3) ひび割れ抑制を通じた品質確保

ひび割れの抑制が構造物の耐久性に寄与することは論を俟たないが、目に見える指標としての施工時に発生するひび割れを抑制することが、結果的にかぶりの品質を高めることにつながるが本研究で明らかになった重要な知見である。ひび割れの幅が多くの変因の影響を受けることも念頭に置いて、ひび割れ抑制を通じて構造物の品質が総合的に向上するよう、設計、施工、検査のプロセスを含む品質確保のシステムを適切に構築する必要がある。

まずは構造物の設計段階で、ひび割れの発生を許容するかどうか、また許容する場合は補修を必要とする有害なひび割れの判定基準を明確に定める必要がある。ひび割れ幅の限界値に対して、実構造物のひび割れ幅の検査時に、どのような検査手法で、どのような判定基準で可否を判定するかについても、今後議論が活性化することを望みたい。山口県では、ひび割れ幅の計測方法についての研究も行われ、日夜変動や季節変動が大きいことが報告されている²⁷⁾。また、JCIのマスキングコンクリートのひび割れ制御指針¹²⁾においては、設計段階でひび割れの発生を許容しないとした場合でも、実構造物で0.05mm程度以下のヘアクラックであれば、検査で合格とするように推奨している。ひび割れの発生を許容する場合は、ひび割れ幅は多くの変因を受けてばらつくことを念頭に置いて、設計段階で適切な目標値を設定したり、目標値と検査時の管理値の関係を明確にするなど、今後も議論を深めていく必要がある。

ひび割れの発生、ひび割れ幅には施工のプロセスの多くが影響を及ぼす。山口県では施工状況把握チェックシートを活用して施工の基本事項が遵守されるシステムを構築した。仮に設計段階で想定していない過大なひび割れが発生した場合でも、施工が確実になされているのであれば、過大なひび割れの発生は施工者の責任ではない、という考え方が可能である。山口県では、図-4や図-5で示したように施工の基本事項の遵守がシステムとして達成されてきていることを受け、2013年4月より、補修を必要とするひび割れが発生した場合でも、施工が適切に行われていることが確認された場合は、工事成績評価において減点をしないように変更した。

山口県では、ひび割れ抑制システムを構築した結果、表層品質が向上することとなった。施工時に発生するひび割れという目に見える簡易な指標を適切に活用して、

施工の基本事項が遵守される仕組みの構築とともに構造物の品質を総合的に向上させる方向性は、構造物の品質確保のみならず、工事成績評価等の建設マネジメントの問題の議論を前進させる上でも有効であると考えている。

5. まとめ

施工状況把握チェックシート等を活用して施工の基本事項の遵守を達成する仕組みを基盤とした山口県のひび割れ抑制システムによる、ひび割れの抑制効果と表層品質の向上効果について分析し、以下の知見を得た。

- (1) 施工の基本事項の遵守を達成する仕組みが構築されたことにより、山口県のボックスカルバートの頂版の非貫通ひび割れや沈みひび割れ等の「施工由来のひび割れ」が大幅に減少した。
- (2) 設計段階で補強鉄筋の追加等の材料によるひび割れ対策が不要と判断した場合の有害なひび割れの発生率が減少傾向にあり、データベースに基づくひび割れ抑制システムの有効性が示された。一方で、設計段階で材料によるひび割れ対策を行った場合の有害なひび割れの発生率はさらに低減できる可能性があり、ひび割れ抑制対策の確立には、施工実績の蓄積と分析が必要であることを示した。
- (3) 3次元温度応力解析を活用した分析により、山口県のひび割れ抑制システムの対象構造物は、品質のばらつきが小さく、実構造物のひび割れ発生強度が高いと考察した。
- (4) 目視評価法、表面吸水試験により、ひび割れ抑制システムにより表層品質が向上している傾向を示した。コアを採取しての分析からも、システムによる表層品質の向上を支持する結果が得られた。
- (5) コンクリート構造物の耐久設計指針(案)と表面吸水試験を組み合わせた検討により、施工要因が表層品質に与える影響について分析を行った。コンクリートの打込み速度の低減が吸水抵抗性の向上に影響することが明らかとなった。
- (6) 施工時に発生するひび割れという目に見える簡易な指標を適切に活用して、施工の基本事項が遵守される仕組みの構築とともに構造物の品質を総合的に向上させる方向性が、構造物の品質確保のみならず、工事成績評価等の建設マネジメントの問題の議論を前進させる上でも有効であることを論じた。

謝辞：本研究の実施にあたり、土木学会コンクリート委員会の「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム小委員会」の委員の皆様との議論が大変参考になりました。また、山口県の構造物の調査の実施に際し

て、山口県の森岡弘道氏、国重典弘氏（故人）、小田村真一氏を始めとする皆様に多大なご支援をいただきました。温度応力解析を用いた分析については、大野又稔氏（当時横浜国立大学院生）、耐久設計指針（案）を用いた分析については、青木勇人氏（当時横浜国立大学院生）の協力により実施しました。目視評価法による分析については、坂田昇博士（鹿島建設）との議論が大変参考になりました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 国重典宏，田村隆弘，二宮 純，森岡弘道：山口県における「コンクリートひび割れ抑制システム」について，コンクリート工学，Vol.49，pp.91-95，2011.
- 2) 細田 暁，田村隆弘，二宮 純：山口県のひび割れ抑制システムによる各プレーヤーの技術力の向上，土木技術，67巻10号，pp.33-38，2012.
- 3) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，No.80，2008.
- 4) 林 和彦，細田 暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013.
- 5) 林 和彦，Usman AKM AL，細田 暁：埋込みセンサーを用いたコンクリートの表面吸水試験における水分移動の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1789-1794，2013.
- 6) 林 和彦，細田 暁，Usman AKMAL，藤原麻希子：コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1804-1809，2012.
- 7) 林 和彦，細田 暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011.
- 8) 細田 暁，坂田 昇，田村隆弘，二宮 純：目視評価を活用した山口県のひび割れ抑制システムによる表層品質向上の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1837-1842，2013.
- 9) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書改訂資料ー基本原則編・設計編・施工編ー，pp.357-359，2013.
- 10) 森岡弘道，二宮 純，細田 暁，田村隆弘：地方自治体におけるコンクリート構造物のチェックシートを活用した品質確保の取組み，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1327-1332，2013.
- 11) 大野又稔，細田 暁：山口県の実構造物のデータベースの温度応力解析による分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1288-1293，2012.
- 12) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2008.
- 13) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会，333 委員会，No.2，2010.
- 14) Son, H. N. and Hosoda, A.: Detection of Microcracking in Concrete Subjected to Elevated Temperature at Very Early Age by Acoustic Emission, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 201-211, June 2010.
- 15) 稲津貴和子，田村隆弘，澤村修司：山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1337-1342，2011.
- 16) 田村隆弘，稲津貴和子，国重典宏：実構造物のデータベースを用いた初期ひび割れ幅の予測式に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1331-1336，2011.
- 17) 土木学会：コンクリート構造物の耐久設計指針（案），コンクリートライブラリー82，1995.
- 18) 坂田 昇，渡邊賢三，細田 暁：コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法，コンクリート工学，Vol.50，No.7，pp.601-606，2012.
- 19) 渡邊賢三，坂田 昇，温品達也，柳井修司：目視評価に基づくコンクリートの表層品質評価方法と品質向上に資する取組み，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1354-1359，2012.
- 20) 細田 暁：目視評価法を活用したコンクリート構造物の品質向上マネジメント，建設物価，No.1143，pp.10-15，2014.
- 21) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム小委員会第二期（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，2012.
- 22) 細田 暁，林 和彦，半井健一郎，李 春鶴，石田哲也，高橋佑弥，松田芳範：山口県の構造物から採取したコアの物質移動抵抗性に関する分析，構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム小委員会第二期（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，pp.667-674，2012.
- 23) Concrete Society Working Party: Permeability Testing of Site Concrete - A Review of Methods and Experience, *Concrete Society Technical Report*, No. 31, pp. 1-95, 1987.
- 24) 吉田早智子，細田 暁，林 和彦，内田晃一：表面吸水試験および透気試験による山口県の構造物の表層品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1823-1828，2011.
- 25) Akmal, U., Hosoda, A., Hayashi, K. and Motoshige, N.: Inspection of Cover Concrete of an Actual Structure by Surface Water Absorption Test, *Proceedings of the 9th International Symposium on High Performance Concrete - Design, Verification and Utilization*, Rotorua, New Zealand, C9-1, 2011.
- 26) 細田 暁，高橋智亮，HA Ngoc Son: 外部拘束が高炉スラグ微粉末含有コンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響の AE 法による分析，セメント・コンクリート論文集，No.65，pp.290-297，2011.
- 27) 澤村修司，田村隆弘，二宮 純，森岡弘道，櫻井敏幸：コンクリート構造物とひび割れと気温の相関について，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，V-402，pp.803-804，2010.
- 28) コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料（第 1 回改訂版），山口県 HP，2007.10

(2013.12.10 受付)

EFFECTS OF CRACK CONTROL SYSTEM ON REDUCING CRACKS AND IMPROVING COVERCRETE QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES

Akira HOSODA, Makoto NINOMIYA, Takahiro TAMURA and Kazuhiko HAYASHI

The Crack control system developed by Yamaguchi prefecture has been operated since 2007. Under this system, appropriate concrete construction following standard specifications was achieved utilizing a check sheet to grasp construction conditions. In this research, the effects of this crack control system were analyzed both in terms of reducing thermal cracks and improving the covercrete quality of concrete structures. The covercrete quality of concrete structures was investigated by the visual evaluation method and Surface Water Absorption Test (SWAT) developed by the authors.

Through application of this system, the incidence of cracks caused mainly by poor construction, such as non-penetrating cracks in the top slabs of box culverts and settlement cracks, was drastically reduced. Analysis with 3D thermal stress simulation found that the concrete structures constructed with this system have less quality variance and higher cracking strength than normal structures.

The improvement of covercrete quality by this system was proved both by the visual evaluation method and SWAT. The analysis of core specimens also proved the effectiveness of this system.

The effects of construction factors on covercrete quality were analyzed by the investigation combining the “Recommendations for Durability Design of Concrete Structures - Draft” and SWAT. It was suggested that the concrete placing rate, quality control when receiving of ready-mixed concrete, compaction by form vibrators, and curing after form removal might improve the resistance of covercrete against water absorption.

The significance of controlling cracks in quality assurance of concrete structures was discussed, and it was emphasized that cracks should be appropriately utilized as visual indices to improve the total quality of structures.