論文　山口県の品質確保システム下で建設されたコンクリート構造物における長期耐久性

林　弘輝[*1]・温品　達也[*2]・吉村　崇[*3]・澤村　修司[*4]

要旨：山口県により構築されたコンクリート構造物の品質確保システムのもとで，多数の構造物が建設され10年以上が経過した。本研究では建設から10年程度経過した山口県の橋台について，温度ひび割れの進展状況を調査し，施工時のデータベースと照合し重回帰分析を行うことで，長期的な温度ひび割れの進展を抑制する条件の有無や影響度を検討した。その結果，長期の温度ひび割れ進展には，打継ぎ間隔や鉄筋比の影響度が高いことが明らかとなった。また，合理的に長期的な外部拘束ひび割れを抑制するには，打継ぎ間隔日数を15日以内とすることや，鉄筋比を0.3%以上にすることが有効であると考えられる。

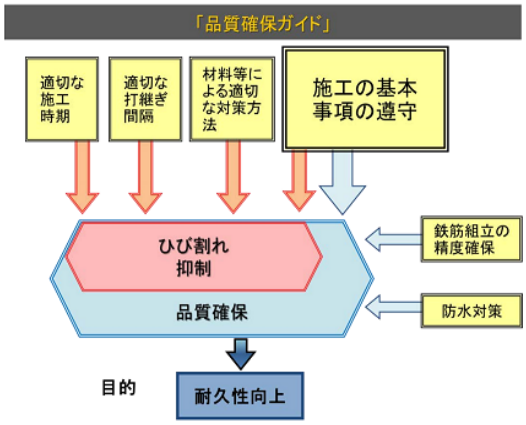
キーワード：温度ひび割れ，橋台，品質確保，耐久性，重回帰分析，標準化偏回帰係数

1. はじめに

従来，コンクリート構造物は一般に耐久性に優れているとされ，半永久的でメンテナンスフリーの材料と考えられていた。しかし，高度経済成長期に大量かつ急速に建設されたコンクリート構造物が早期に劣化していくことで，維持管理におけるひび割れ調査や補修に多くの時間や労力が投入されている。長期的な人口減少が予測されている日本において，構造物の品質を確保し，できる限り長く供用することは重要な課題である。

このような背景から，山口県においては発注者，設計者，施工者，材料製造者，学識関係者などが連携して「品質確保システム（以下　システム）」を構築し，設計や施工由来の初期欠陥を排除したことで，コンクリート構造物の品質が大きく向上した[1)-3)]。**図－1**の山口県品質確保における概略図のように，「施工の基本事項の遵守」という基本となる対策と「ひび割れ抑制」，「防水対策」，「鉄筋組立の精度確保」の3つを加えた対策により，コンクリート構造物の品質確保を図り，耐久性向上を目指している。山口県は，施工状況把握時における着目点をとりまとめた「施工状況把握チェックシート」を作成し[4)]，現場で用いている。このシートには，コンクリート標準示方書［施工編：施工標準］に示される施工の基本事項から，品質確保のために最低限必要と考えた28項目を抽出しており，このチェックシートを活用して監督職員が施工状況把握を行うことで，施工の基本事項の遵守が徹底されることを目指すものである。これは国交省や多くの地方自治体から注目され，このシステムを参考とした建設プロジェクトが全国へ展開されている。また，データベース[5)]には，施工時の記録，建設時に発生した構造物のひび割れやその他の欠陥等も記録・公開されている。以上の取組みにより，産学官が一体となって，設計や施工にこのシステムを反映させ，常に改善させることで，質の高い建設体制を確立したのである。

システムに関する資料や既往の研究[6),7)]において，打込み季節や打継ぎ間隔などが施工直後の短期的な温度ひび割れに影響が大きいことが述べられているが，長期的なひび割れ進展を幅や長さの観点から統一的に調査はされていない。そこで本研究では，システム下で建設された構造物の長期ひび割れ状況を調査し，施工時に蓄積された膨大なデータベースと照合することで，ひび割れ進展をより抑制する条件の有無を検討した。また，本論文で取り上げるものは温度ひび割れ（以下　ひび割れ）のみとし，その他の乾燥収縮ひび割れ，沈みひび割れは対象外として論じる。



図－1　品質確保の概略図[4)]

*1 徳山工業高等専門学校　環境建設工学科　(学生会員)
*2 徳山工業高等専門学校　土木建築工学科　助教　修士（工学）(正会員)
*3 山口県　土木建築部　技術管理課
*4 （一財）山口県建設技術センター　技術課

2. ひび割れ調査

(1) 調査対象構造物

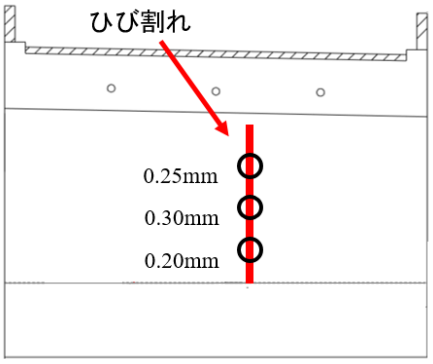
本研究では，山口県において比較的に建設数が多い橋梁構造物群を対象とし，建設から 10 年を超える平成19~21 年度にかけて建設された橋台の調査にあたった。選定理由は，10 年前に橋台数 188 基，約 500 リフトと多くの構造物が建設されており，長期間の耐久性を考える上で重要な材齢に達しかつ，十分な調査対象数が得られると考えたためである。1 基の調査に 1 日を要するため，安全に調査可能で，施工初期にひび割れ補修が行われていない橋台を選定して，50 基 64 リフトの調査を行った。また，本研究では定量的にひび割れ進展を抑制する条件の有無を検討するため，施工時のひび割れがなく，10 年後もひび割れがない構造物も調査対象としている。

(2) 調査手法

コンクリート構造物の品質や耐久性を把握するために，多くの評価方法が提案されている[8]。本研究では，クラックスケールと巻尺を用いてひび割れの幅や長さを測定した(**写真－1**)。この方法は**図－2**に示すように，ひび割れの長さ方向において4等分する点3カ所のひび割れ幅をクラックスケールで測定し，その3点の平均値をひび割れ幅とするものである。長いひび割れは，脚立や梯子を使うなどして同様に幅を測定した。ひび割れ長さについても巻尺の使用や施工当時の図面との照合により測定した。なお，ひび割れを目視により測定する際，測定したひび割れ幅にばらつきが生じる可能性を考慮し，画像照合によるひび割れ幅補正の必要性について検証を行った。これは，ひび割れ部をクラックスケールと共に撮影し，クラックスケールの基準長とひび割れ幅をエクセルのピクセル比によって算出したものである(**図－3**)。実測値と補正値の検証として，初期に測定した数基の橋台において，目視によるひび割れ幅の測定と画像照合による測定誤差が0.03mm以内であったため，クラックスケールを使用して目視により測定したひび割れ幅の測定値精度が問題ないとして、実測値を採用することとした。

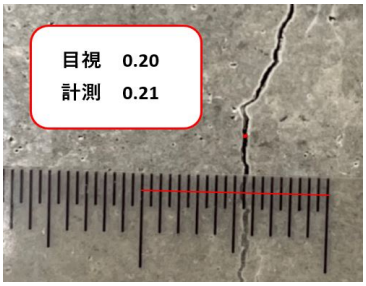
測定した50基における橋台の施工条件を**表－1**に示す。打継ぎ間隔や鉄筋比，構造物幅は条件の範囲が広く，ひび割れとの関係性をはかる上で十分であると判断した。既設コンクリートの拘束によるひび割れを考慮するために本研究では，第2リフト以降のリフト高を対象としており，また，鉄筋比は橋台直角方向の断面積に対する鉄筋の断面積とした。

写真－1　ひび割れ幅と長さの測定



(0.25 + 0.30 + 0.20) / 3 = 0.25 mm

図－2　ひび割れ幅測定の概要図



図－3　ひび割れ幅画像処理図

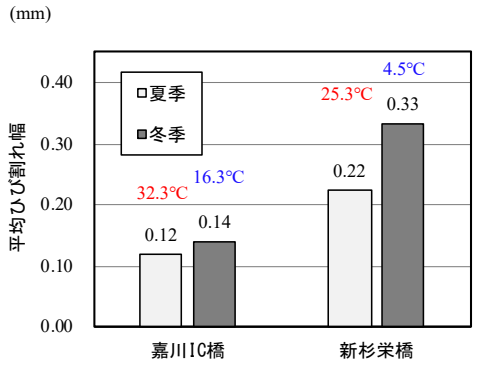
一般的にコンクリートは，外気温の影響を受け，長期にわたり膨張収縮を繰り返すため，計測時期によってひび割れ幅の変動が生じると考えられている。そこで，本研究では，夏季と冬季で同一橋台のひび割れ調査を行い，計測時期におけるひび割れ幅の補正の要否も併せて検討した。

3. 調査結果と考察

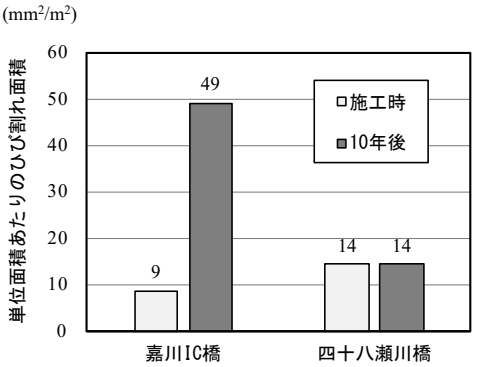
嘉川IC橋と新杉栄橋の平均ひび割れ幅を夏季と冬季で比較したものを**図－4**に示す。調査時の外気温差は，嘉川IC橋が16.0℃で平均ひび割れ幅は0.02mm増加してお

表－1　調査対象構造物の施工条件

	打継ぎ間隔 (日)	スランプ (cm)	外気温 (℃)	打込み温度 (℃)	鉄筋比 (%)	構造物幅 (m)	リフト高 (m)	養生期間 (日)
範囲	5 - 88	7.0 – 9.5	3.0 – 29.5	7.0 – 31.0	0.06 – 0.64	3.1 – 22.4	1.2 – 5.4	3 - 17



図－4　計測時期における平均ひび割れ幅の比較



図－5　2 構造物のひび割れ進展状況

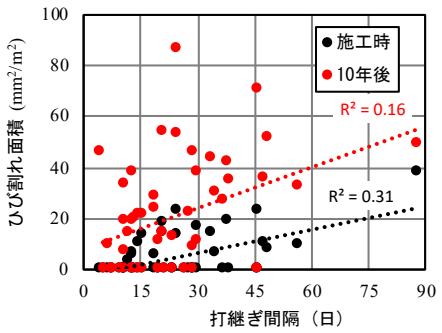
り，新杉栄橋が20.8℃で0.10mm増加している。このグラフが示すように，夏季から冬季にかけて温度差が大きくなることで，ひび割れ幅も拡大していることが確認できた。しかし，現段階では主な傾向をつかむまでのデータが得られてない可能性が高いため，気温によるひび割れ幅への影響を小さくする観点から本研究では，9月から11月の期間に限定して調査を実施し，計測時期におけるひび割れ幅の補正を行わないこととした。

図－5は嘉川IC橋と四十八瀬川橋の橋台における単位面積当たりのひび割れ面積拡大・進展状況を施工直後から1年以内（以下　施工時）と供用10年経過時で比較したものである。双方とも，システム下で同年に建設された供用10年の構造物であるものの，進展状況に大きな差が見られた。このような差が生じる要因を明確にするべく，各構造物のひび割れ幅と単位面積当たりのひび割れ面積を各施工条件と比較し，耐久性に影響する条件について考察を行った。

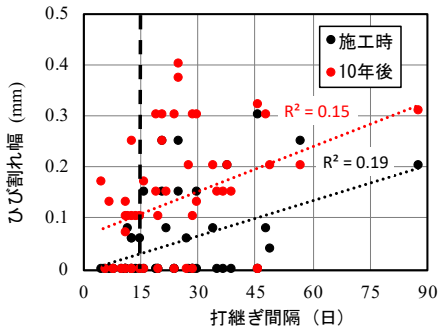
3.1 施工条件とひび割れ調査結果の比較

(1) 打継ぎ間隔

図－6 (a) に打継ぎ間隔と比較した施工時および 10 年後における単位面積当たりのひび割れ面積，図－6（b）にひび割れ幅を示す。ひび割れ面積とは，単位面積当たりのひび割れ面積であり，各リフトの表面積でそのリフトにおけるひび割れ面積の合計を除した値である。施工時のひび割れ面積は，打継ぎ間隔が 3~60 日間にかけて 30mm²/m² 以下に抑制されているにも関わらず，施工 10 年後では 20mm²/m² 以上のひび割れ面積に増大した橋台が多くあった。ひび割れ幅についても，システムの補修基準である初期ひび割れ幅 0.15mm[4]より大きいひび割れを有するものが，施工時では 10 リフトにも関わらず，施工 10 年後では 24 リフトと 2 倍以上に増えている。しかし，システムが目安として掲げる，打継ぎ間隔 15 日以内であれば，0.15mm を超えるひび割れは施工時に発生しておらず，施工 10 年後でもわずかであることが分かった。また，ひび割れ面積および幅と打継ぎ間隔の関係の線形近似における決定係数(R^2)は，0.15~0.31 程度であった。



(a)単位面積当たりのひび割れ面積

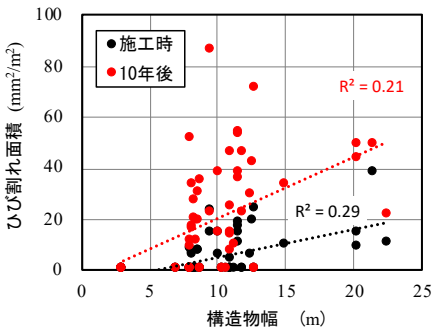


(b)ひび割れ幅

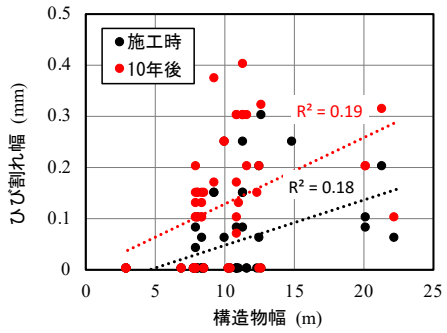
図－6　打継ぎ間隔とひび割れの関係

(2) 構造物幅

図－7 に，構造物幅とひび割れの関係を示す。施工時のひび割れ面積は，22m で最大値の 38mm²/m² に到達している。一方，施工 10 年後のひび割れ面積は構造物幅が 7m を超えたあたりで 50mm²/m² 以下に抑制されているものと，80mm²/m² 近くまで拡大しているものに分かれている。これらは，鉄筋比や各リフトの打継ぎ間隔など，他の要因が関係している可能性が高いと考える。施工時のひび割れ幅は，構造物幅 9m 以上よりひび割れ幅

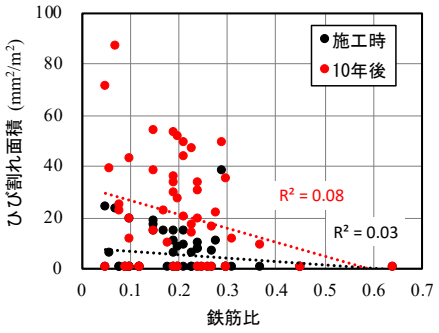


(a)単位面積当たりのひび割れ面積

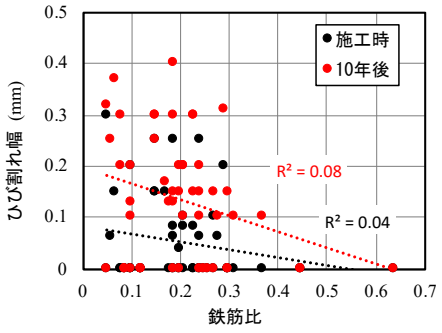


(b)ひび割れ幅

図－7　構造物幅とひび割れの関係



(a)単位面積当たりのひび割れ面積



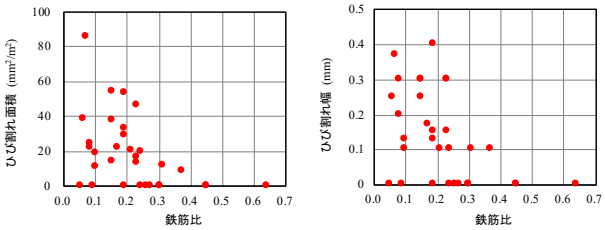
(b)ひび割れ幅

図－8　鉄筋比とひび割れの関係

0.15mm を超えるケースが発生しており，13m で最大値の 0.30mm を示した。また，幅 20m 以上の構造物は 4 基中 3 基が 0.15mm 以下であった。施工後 10 年後ひび割れ幅は施工時と比べ，0.2mm を超える橋台が増加した。また，ひび割れ面積および幅と構造物幅の関係の線形近似における決定係数(R^2)は，0.18~0.29 程度であった。

(3) 鉄筋比

図－8 に鉄筋比とひび割れの関係を示す。施工時のひび割れ面積における鉄筋比 0.3%以下にあたる構造物は，鉄筋比 0.06%の 23mm²/m² から鉄筋比 0.3%の 0mm²/m² までのように，概ね減少傾向にあることを確認した。また，鉄筋比 0.3%以上ではひび割れが生じていなかった。施工 10 年後では，鉄筋比 0～0.3%でひび割れ面積 0～86 mm²/m² であり，施工時と比べ拡大している。一方，鉄筋比が 0.4%以上の構造物はデータが少ないものの，ひび割れが生じていない。施工時のひび割れ幅については，鉄筋比 0.3%以下の構造物 44 リフト中 9 リフトが補修基準である 0.15mm 以上のものであったが，鉄筋比 0.3%以上の橋台 5 リフトは全て初期ひび割れが発生していないことが分かった。施工 10 年後では，鉄筋比 0.3%未満の構造物のひび割れ幅は，44 リフト中 22 リフトが 0.15mm を超え，鉄筋比 0.3%以上のひび割れ幅はひび割れ幅 0.15mm 以下に抑制される傾向にあった。また，ひび割れ面積および幅と鉄筋比の関係の線形近似における決定係数(R^2)は，0.03~0.08 程度であった。



図－9　標準的な施工条件における構造物の鉄筋比とひび割れの関係（施工 10 年後）

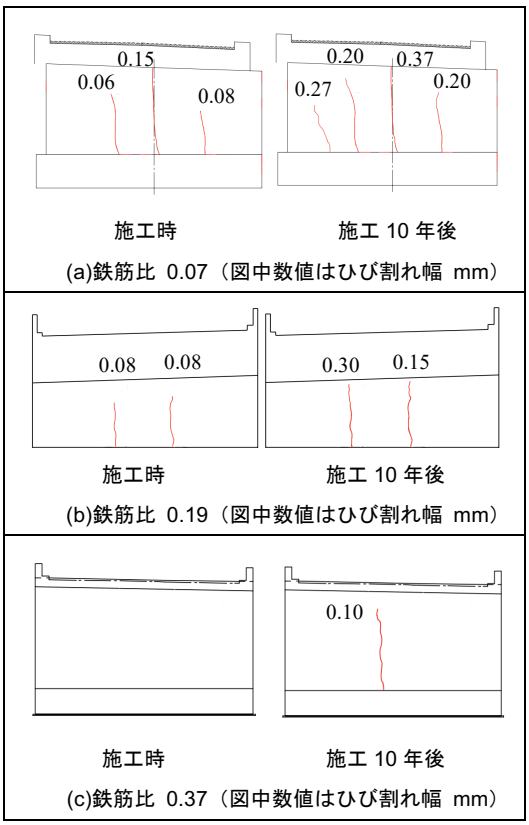
鉄筋比がひび割れに与える影響をさらに考察するため，**図－9** に橋台の構造物幅 5~15m と打ち込み間隔 5~30 日の条件に絞った構造物との比較を施工 10 年後のひび割れ面積とひび割れ幅で行った。条件の選定理由は，調査を行った比較的多くの構造物がこの条件下で建設されており，山口県に存在する橋梁構造物群のサイズと施工条件等を考慮した平均的な橋台の条件と判断したためである。ひび割れ面積について，**図－8** と同様に鉄筋比 0.07%程度において調査構造物中の最大のひび割れ面積である 86mm²/m² を示し，鉄筋比 0.45%にかけて減少し，それ以上の鉄筋比においてはひび割れが生じていなかった。ひび割れ幅についても，鉄筋比 0.1%弱から鉄筋比 0.45%まで減少している傾向にある。さらに，鉄筋比 0.25%以降からはどの構造物も補修基準である 0.15mm を下回っていることがわかった。以上より，鉄筋比 0.3%程度からひび割れの進展を抑制できる傾向が認められ，

構造物の幅や高さを変更せず，打継ぎ間隔の短縮も困難な場合，合理的に長期的な外部拘束ひび割れを抑制するには，鉄筋比を 0.3%以上とすることが有効であると考えられる。

図－10 に鉄筋比の違いにおける新旧ひび割れ分布図を示す。(a)の鉄筋比 0.07%の構造物において，施工時に幅約 0.06~0.15mm のひび割れが 3 個所発生し，10 年後にはひび割れ幅 0.14mm 以上の進展拡大，また，新規のひび割れが 1 個所発生した。鉄筋比 0.19%の構造物において，10 年後に新規のひび割れは発生していないものの，既存のひび割れが進展拡大する結果となった。鉄筋比 0.37%の構造物において，施工時にひび割れは発生せず，10 年後に新規のひび割れが 1 個所発生した。

3.2 重回帰分析

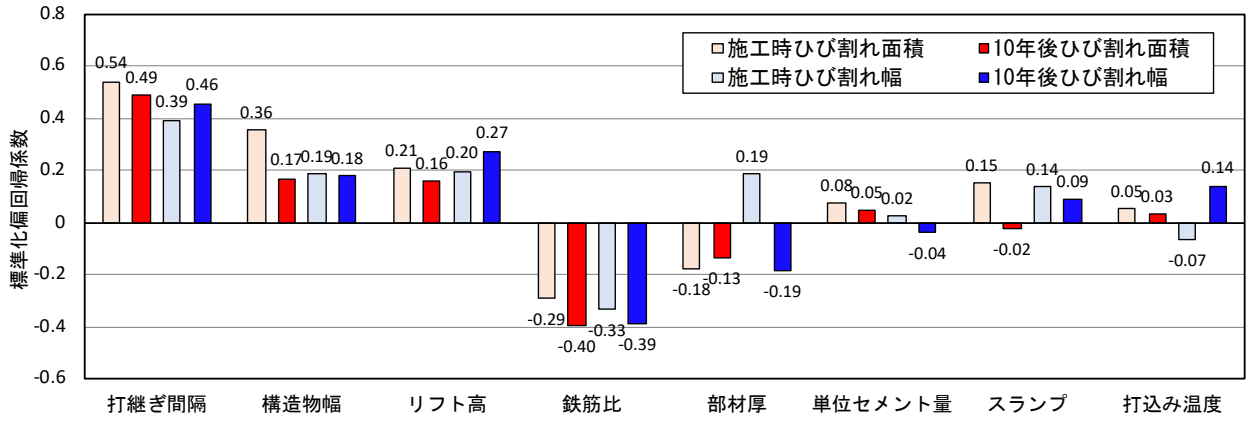
コンクリートのひび割れ発生に対する各施工要因の影響度は複雑に相互作用しているものと考えられ，1 つの施工条件とひび割れ面積･幅を単純に比較しただけは，その施工条件の影響度の推定が困難である。そこで，ここでは重回帰分析を用いて，ひび割れに対する個々の施工条件の影響度を検討した。本研究では，重回帰分析における目的変数を「施工時ひび割れ幅」，「10 年後ひび割れ幅」，「施工時ひび割れ面積」，「10 年後ひび割れ面積」とし，説明変数を「打継ぎ間隔」，「構造物幅」，「リフト高」，「鉄筋比」，「部材厚」，「単位セメント量」，「スランプ」，「打込み温度」の 8 つに設定することで，それぞれの関連強さを示す標準化偏回帰係数を算出した。目的変数であるひび割れを，施工条件中の打継ぎ間隔や鉄筋比など，1 つの説明変数で予測する単回帰の分析に対し，重回帰分析は予測したいすべての施工条件を説明変数として設定でき，目的変数との関連強さを解明することができる。標準化偏回帰係数は各変数の単位に依存しない係数となるため，説明変数が目的変数に影響している度合いを比較することができる. 相関係数と同様の解釈で，0 は影響が無い状態となり，－1 または 1 に近づくほど



図－10　鉄筋比の違いにおける新旧ひび割れ分布図

目的変数であるひび割れの増大または抑制に対する影響度が大きいことを意味する。

図－11 に重回帰分析による各施工条件の標準化偏回帰係数を示す。まず，リフトの打継ぎ間隔において，施工時と 10 年後ともにひび割れ発生への影響が大きいことが分かる。10 年後ひび割れ面積の係数は 0.49 と施工時の 0.54 より低いが，10 年後ひび割れ幅については，0.46 が施工時ひび割れ幅 0.39 に対して高い値となった。したがって，打継ぎ間隔はひび割れ面積の観点からみると，初期ひび割れへの影響が長期のひび割れへの影響よりも概ね大きく，ひび割れ幅の観点からみると小さいことがわかった。



図－11　重回帰分析による各施工条件の標準化偏回帰係数

構造物幅は施工時ひび割れ面積の係数が 0.36 と最も高く，その他影響は 0.20 未満であった。リフト高は 10 年後ひび割れ面積の係数は 0.16 と施工時の 0.21 より低いが，10 年後ひび割れ幅については，0.27 が施工時ひび割れ幅 0.20 に対して高い値となった。

鉄筋比は施工時ひび割れ面積への係数が-0.29，施工時ひび割れ幅が-0.33 に対し，10 年後のひび割れ面積・幅は-0.40 と-0.39 であり，打継ぎ間隔と違い，長期的なひび割れ抑制への影響度が増大していることが明らかとなった。

その他要因である部材厚，単位セメント量，スランプ，打込み温度はどれも±0.20 未満であり，その他要因と比べひび割れ発生の影響度が小さいと考えられる。また，正と負の相関が混合しているケースもみられるため，これらの要因については，ひび割れ調査をさらに継続することで，ひび割れへの影響有無を今後検討したい。

以上より，長期の温度ひび割れ進展には，打継ぎ間隔や鉄筋比の影響度が高いことが明らかとなった。特に，打継ぎ間隔は施工時と 10 年後共に最高値の係数を示したため，ひび割れ抑制において最も影響度が高いことが分かった。また，鉄筋比は 10 年後の影響度が高いことを確認した。本研究より打継ぎ間隔をシステムが掲げる 15 日以内とすることで，ひび割れ幅が 0.15mm より小さくなる傾向を確認した。一方，品質のよいコンクリートを施工するにあたっては多くの手順が必要であり，すべての施工リフトにおいて打継ぎ間隔を 15 日以内とすることは，難しいものと考えられる。また，構造物幅を温度ひび割れ対策のために小さくすることは現実的でなく，ひび割れ誘発目地の設置についても，構造的な要求性能などにより採用が難しい場合も考えられる。したがって，打継ぎ間隔や構造物の形状を過度に制限せず，合理的に長期的な外部拘束ひび割れを抑制するために，鉄筋比を 0.3%以上にすることは温度ひび割れ抑制の観点から合理的な対策であると考えられる。

4. 結論

システム下で建設された構造物に対して，調査による長期的な温度ひび割れを抑制する条件の有無を検討した。調査・考察をおこなった様々な条件が異なる橋台 50 基の構造物において，得られた結論を以下に示す。

(1) 重回帰分析による標準化偏回帰係数において，打継ぎ間隔とひび割れの関係は施工時と 10 年後共に最高値を示したため，コンクリート構造物の耐久性上有害とされる外部拘束ひび割れ抑制において最も影響度が高い要因であると考えられる。

(2) 鉄筋比の標準化偏回帰係数において，打継ぎ間隔と違い，長期的なひび割れ抑制への影響度が増大していることが明らかとなった。

(3) 打継ぎ間隔について，施工時と施工 10 年後共に 15 日以内で打ち継ぐことで，概ねひび割れ幅は 0.15mm を超えないことが分かった。

(4) 鉄筋比と施工時または 10 年後ひび割れの関係は，鉄筋比 0.3%に満たない構造物において拡大進展が確認され，0.3%以上の鉄筋比を有する構造物は抑制されていることを確認した。打継ぎ間隔や構造物の形状を過度に制限せず，合理的に長期的な外部拘束ひび割れを抑制するには，鉄筋比を 0.3%以上にすることが有効であると考えられる。

参考文献

1) 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り組み，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1327-1332，2013

2) 二宮純，森岡弘道，細田暁，田村隆弘：山口県の実構造物のデータベースを活用したひび割れ抑制設計，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1153-1158，2015

3) 田村隆弘，細田暁，中村秀明，二宮純：データベースを核としたコンクリート構造物の品質確保に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.22-30，2013

4) 山口県技術管理，コンクリート構造物品質確保ガイド 2020 : http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a18000/hibiware/hibiwareyokusei.html
（閲覧日：2020 年 12 月 21 日）

5) （一財）山口県建設技術センターコンクリート施工記録データ : https://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html
（閲覧日：2020 年 12 月 21 日）

6) 山口県技術管理，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）: https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a18000/hibiware/hibiwareyokusei.html
（閲覧日：2020 年 12 月 21 日）

7) 中谷俊晴，田村隆弘，二宮純，細田暁：山口県コンクリート施工記録データに基づいた壁状構造物の初期ひび割れの発生に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1147-1152，2015

8) 温品達也：実構造物の表層品質を対象とした非破壊試験による耐久性の検証，コンクリート工学，Vol.55，No.6，pp.537-543，2017