

6. 変状の原因

6 - 1. ひび割れパターンによる診断

3 - 5. 変状のまとめより、ひび割れは乾燥収縮に起因すると判断されるものが多い。

下部工等、マッシブな部材の変状については、温度応力の影響もあると思われるが、ひび割れのパターンは内部拘束応力による。その場合、脱型後すぐにひび割れが確認されるが、そうした報告はなされていない。このため、温度応力は主要因ではないと判断される。

変状は、プレテンション桁（工場製品）に見られず、現場打ちコンクリートに限定されることから、現地調達が生コンクリートが要因である可能性が高い。

6 - 2. 各種試験による診断

4. 調査・試験より、既設構造物よりコア抜きした試料による試験では、

- ・中性化、塩害、アルカリ骨材反応による変状の可能性は小さい。
- ・コンクリート強度に比して静弾性係数が低い傾向にある（粗骨材のヤング係数が低い場合、こうした傾向を示すことが知られている）。
- ・構造物深部の乾燥収縮はほとんど進行しておらず、乾燥させると大きな収縮ひずみが計測された。

等の結果が得られた。

また、同じ産地の骨材を用いて新しく製造したコンクリートは、大きな乾燥収縮ひずみを示した。

以上より、現地調達したコンクリートは、乾燥収縮ひずみが大きく、強度に応じたヤング係数が発現しない点を除けば、特に問題のないものであった。このことから、変状の原因は大きな乾燥収縮ひずみであり、骨材品質が要因である可能性が高いと判断される。

6 - 3. 解析による診断

5. 解析より、3種類の解析で原因の推定を行った。

断面に一様な収縮を考慮した解析（5 - 2参照）

・山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋の4橋について解析を行った。解析は、変状が顕著な部分を網羅するようモデル化し、施工手順を追った弾性FEMとした。解析には、乾燥収縮と温度応力のみ考慮した。

・コンクリート標準示方書等に示される標準的な物性値を用いて解析を行った場合、山中川東高架橋を除く3橋で、最大発生応力が耐力以下となった。山中川東高架橋も、クリープの影響を簡易的に評価すると、最大発生応力は耐力以下となった。

・乾燥収縮度を、コンクリート標準示方書による標準値（最終値）の1.5～2.0倍にすると、山中川高架橋を除く3橋で最大発生応力が耐力を上回った。山中川高架橋も、死荷重と床版横締めプレストレスの影響を考慮すると、最大発生応力が耐力を上回った。

・自然田高架橋において、一部を実測された物性値（ヤング係数、圧縮強度から推定される引張強度）に置き換え解析を行ったが、最大発生応力は標準的な乾燥収縮度では耐力以下となり、乾燥収縮度を2倍にすると耐力を上回るという結果に変わりはなかった。

・山中川東高架橋の様な外部拘束により生じる比較的大きなひび割れについては、発生部位・ひび割れの方向をある程度、よい精度で表現できた。一方、プレベーム桁の床版ひび割れの様な内部拘束により生じるひび割れは、水和熱によるものについては表現できるが、乾燥収縮（自己収縮）については表現できなかった（断面に一樣に収縮を与えるため）。

クリープ・鉄筋拘束の影響を考慮した解析(5 - 3参照)

・コンクリートの材齢に伴う弾性係数の変化やクリープによる応力緩和をモデル化したT.B.（トロスト・バザン）法を基本とした解析を行った。解析は、山中川東高架橋を対象に施工手順を追ったモデルとし、乾燥収縮と鉄筋拘束の影響を考慮した。

・ の解析と同様、比較的大きなひび割れが生じているP3施工目地近傍に着目し、ひび割れ指数を1とする乾燥収縮度（最終値）を求めた。結果は586 μ となり、コンクリート標準示方書による標準的な乾燥収縮度の1.8倍程度となった。

部材内部の湿度移動に着目した応力解析(5 - 4参照)

・山中川東高架橋を対象に、部材内部の湿度分布差による内部拘束応力の算出を試みた。

・自然田高架橋より採取したコアによる試験結果から、湿度移動に関するパラメータ（収縮係数、フィルム係数、拡散係数）を決定し、解析を行った。結果、変状部近傍に高い引張応力が生じていることが確認された。

・発生する引張応力は解析上、6~8N/mm²と高いレベルとなったが、実構造物に作用する応力はクリープの影響で緩和されると考えられる。一方、ピーク応力の発生時期が乾燥開始から100日程度となったが、解析では構造物の置かれる環境条件を100%再現している訳ではなく、雨露等の影響で乾燥収縮の進行は解析より遅く、従って変状の発生もこれより後であったと思われる。

6 - 4 . その他

例えば、自然田高架橋のプレベーム桁床版については、養生不良によっても同様のひび割れが生じることがある。また、箱桁橋の下床版に数ヶ所見られた橋軸方向のひび割れは、構造的な要因（横方向の検討における下床版配置鉄筋の不足）でも同様の形状を示す。しかし、こうした設計・施工における重大な瑕疵は報告されておらず、原因として排除することとした。

過積載による重荷重の影響も委員会で指摘があったが、道路管理者より舗装の損傷がないとの報告があり、過積載車の交通頻度も不明なことから、主要因として議論を行わない方針とした。また、疲労についても影響を受けている可能性があるが、供用からあまり時間が経過しておらず、現地試験も実施が困難な状況であることから定量評価が難しく、こちらも検討を行わない方針とした。

6 - 5 .まとめ

ひび割れパターン、各種試験、解析による診断結果より、本委員会では変状の原因を以下のとおりと決定した。

【主たる原因は、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる骨材が使用されたことにあり、現行の指針・規格類の体系では、この種の骨材を選別することが不可能であることによる。】

7. 補修方針

本章では、対象構造物に生じている変状の評価と補修方法について検討を行う。

3. 変状 より、補修に対する検討が必要と判断される山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋の上部工を対象とした。

ひび割れの評価と対策は、「コンクリートのひび割れ、補修、補強指針 - 2009 - 」((社)日本コンクリート工学協会)に従うものとした。

以下、「JCI ひび割れ指針」と略する。

7 - 1 . 山中川東高架橋

(1) 橋梁の履歴

平成 13 年～平成 14 年 : 完成

平成 15 年 3 月 31 日 : 供用開始

平成 17、18 年 : 橋梁点検の実施 (近畿技術事務所)

平成 20 年度 : 本委員会の点検と浪速国道事務所発注の

「第二阪和国道橋梁調査検討業務」による詳細点検の実施

履歴より、供用開始後 4 年ほど経過してひび割れ等の変状が確認された。

(2) ひび割れパターン

ひび割れの発生状況は、「第二阪和国道橋梁点検結果 平成 20 年 12 月 4 日」(近畿技術事務所)によるものとするが、着目ひび割れとしては、本報告書でピックアップしている床版部とする。

・ ひび割れパターン

A1～P3 径間の打継部下床版下面付近に主として橋軸方向のひび割れが多数認められた。全体にわたり、上床版及び下床版に橋軸方向、直角方向の方向性をもったひび割れが発生している。

・ ひび割れ幅

打ち継ぎ部下床版下面に発生しているひび割れの大半は 0.2mm 以下であるが、最大で 0.8mm のひび割れも確認されている。全体についても大半は 0.2mm 以下であるが、中には 0.5mm 程度のひび割れも確認されている。

・ ひび割れ深さ

P3 側箱桁内部下の測定結果は、平均で 56mm の深さとなっており、かぶり (設計値 35mm) を上回っている。

・ ひび割れの進展

前回調査 (平成 18 年 2 月) からひび割れ長さの微増が認められたが、ひび割れ幅の変化は認められなかった。

(3) ひび割れ原因の推定

6. 変状の原因より、乾燥収縮に起因すると推測される。

(4) 評価

ひび割れの発生原因の推定結果と発生ひび割れ幅より補修方法を選定する。補修方法の選定にあたっては、「JCI ひび割れ指針」を参考に選定することとする。

「JCI ひび割れ指針」の「表-4.2.1 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響」で、「一般の屋外環境下」と考えた場合、ひび割れ幅が 0.3mm 以下では、評価結果は「小」と判断できる。ひび割れ幅が $0.3\text{mm} < w \leq 0.4\text{mm}$ では評価結果は「中」、それを上回るひび割れは評価結果「大」と判断できる。

表-4.2.1 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響

環境条件	塩害・腐食環境下	一般屋外環境下	土中・屋内環境下	
ひび割れ幅： w (mm)	$0.5 < w$	大 (20 年耐久性)	大 (20 年耐久性)	大 (20 年耐久性)
	$0.4 < w \leq 0.5$	大 (20 年耐久性)	大 (20 年耐久性)	中 (20 年耐久性)
	$0.3 < w \leq 0.4$	大 (20 年耐久性)	中 (20 年耐久性)	小 (20 年耐久性)
	$0.2 < w \leq 0.3$	中 (20 年耐久性)	小 (20 年耐久性)	小 (20 年耐久性)
	$w \leq 0.2$	小 (20 年耐久性)	小 (20 年耐久性)	小 (20 年耐久性)

※評価結果「小」、「中」、「大」の意味は下記のとおり。

小：ひび割れが性能低下の原因となっておらず、部材が要求性能を満足する。

中：ひび割れが性能低下の原因となるが、軽微（簡易）な対策により対処が可能。

大：ひび割れによる性能低下が顕著であり、部材が要求性能を満足していない。

※※カッコ内の数値は耐久性評価結果を保証できる期間の目安としての年数を示しており、(20 年耐久性) はひび割れの評価時点から 15~25 年後程度の耐久性評価結果を保証できる期間の目安として設定したものであり、15~25 年の平均をとって示したものである。

「JCI ひび割れ指針」 81 頁より

(5) 補修補強の要否の判定

オーナーによる期待延命期間を20年以上と設定し、「JCI ひび割れ指針」の「表-5.2.1 評価Iに基づく判定法(鋼材腐食に対する耐久性の観点)」より判定すると、

- ・部材への影響「大」・「中」では、ひび割れの補修が必要
 - ・部材への影響「小」では、ひび割れの補修が不必要
- (ただし、定期的なひび割れ調査が必要)

との判定結果を得る。

表-5.2.1 評価Iに基づく判定表(鋼材腐食に対する耐久性の観点)

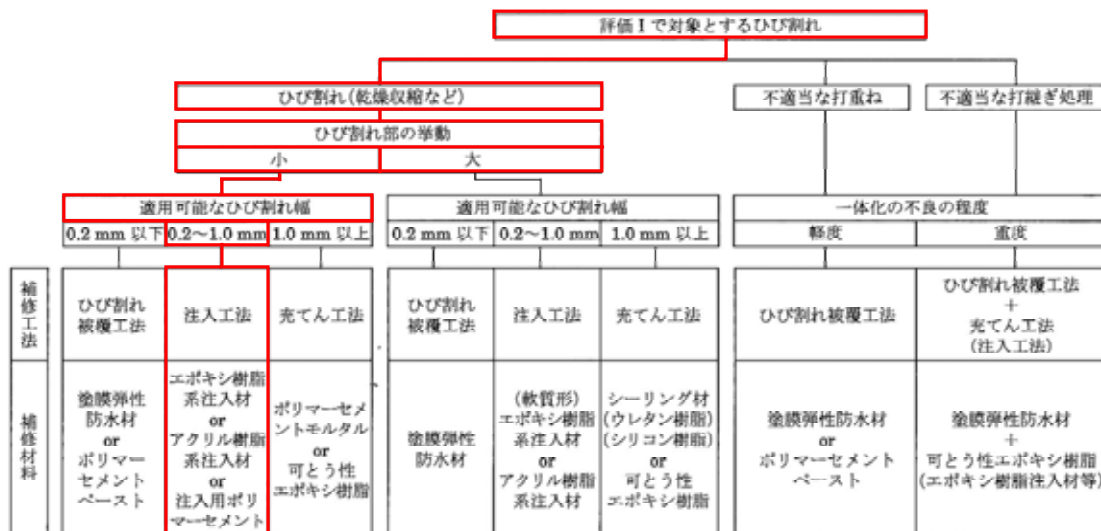
部材性能への影響	オーナーによる期待延命期間		
	10年未満	10~20年	20年以上
小 (20年耐久性)	補修不要	補修不要	補修不要 (定期的なひび割れ調査を実施)
中 (20年耐久性)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要、定期的なひび割れ調査を実施)	補修必要
大 (20年耐久性)	基本的には補修必要 (場合によっては補修不要)	補修必要	補修必要 (補強、解体・撤去、建替えを含む)

「JCI ひび割れ指針」 103 頁より

(6) 補修方法の選定

「JCI ひび割れ指針」の「解説図-6.2.4 ひび割れ補修の選定例」を参考に補修工法を選定する。

- ・ひび割れ幅が0.3mmを超えるひび割れは、部材性能への影響「中」で補修が必要であり、補修方法は「注入工法」を選定する。



※「評価Iで対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水と熱によるひび割れなど、竣工から数年内には収束すると考えられるひび割れをさす。

解説図-6.2.4 ひび割れの補修工法の選定例

「JCI ひび割れ指針」 121 頁より

(7) 交差道路上の安全対策

山中川東高架橋の P2～P3 径間は交差道路が存在し、将来の剥落による第三者被害を防止する観点から、シート系の表面被覆工を予防的に行ってもよい。この場合の対象は主桁外周部とする。

シート系の材料には以下の種類があるが、現地条件を勘案の上、最も適切なものを選定する。

- ・ ガラス繊維系
- ・ ビニロン系
- ・ ポリエチレン系



写真7 - 1 P2～P3 径間



写真7 - 2 シート系の表面被覆の例

7 - 2 . 山中川高架橋

(1) 橋梁の履歴

- 平成 13 年～平成 14 年 : 完成
- 平成 15 年 3 月 31 日 : 供用開始
- 平成 17、18 年 : 橋梁点検の実施（近畿技術事務所）
- 平成 20 年度 : 本委員会の点検と浪速国道事務所発注の
「第二阪和国道橋梁調査検討業務」による詳細点検の実施
履歴より、供用開始後 4 年ほど経過してひび割れ等の変状が確認された。

(2) ひび割れパターン

ひび割れの発生状況は、「第二阪和国道橋梁点検結果 平成 20 年 12 月 4 日」(近畿技術事務所)によるものとするが、着目ひび割れとしては、本報告書でピックアップしている床版部およびウェブとする。

・ ひび割れパターン

下床版下面に橋軸方向のひび割れが認められ、全体にわたり、上床版及び下床版に橋軸方向、直角方向の方向性をもったひび割れが発生している。また、ウェブ側面には主として橋軸方向のひび割れが発生している。

・ ひび割れ幅

下床版下面に発生しているひび割れの大半は 0.2mm 程度である。ウェブ側面には 0.1mm 程度の細かなひび割れが発生している。

・ ひび割れ深さ

P12 側横桁について実施した結果によると、ひび割れ深さは平均で 69mm となっており、かぶり深さ（実測値平均 55mm）を上回っている。

・ ひび割れの進展

前回調査（平成 18 年 2 月）から新規ひび割れの発生はほとんど認められず、ひび割れ幅の変化も認められなかった。

(3) ひび割れ原因の推定

6. 変状の原因より、乾燥収縮に起因すると推測される。

(4) 評価

ひび割れの発生原因の推定結果と発生ひび割れ幅より補修方法を選定する。補修方法の選定にあたっては、「JCI ひび割れ指針」を参考に選定することとする。

「JCI ひび割れ指針」の「表-4.2.1 鋼材腐食の観点からのひびわれの部材性能への影響」で、「一般の屋外環境下」と考えた場合、ひび割れ幅が 0.3mm 以下では、評価結果は「小」と判定できる。ひび割れ幅が $0.3\text{mm} < w \leq 0.4\text{mm}$ では評価結果は「中」と判定できる。

表-4.2.1 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響

環境条件		塩害・腐食環境下	一般屋外環境下	土中・屋内環境下
ひび割れ幅： w (mm)	$0.5 < w$	大 (20年耐久性)	大 (20年耐久性)	大 (20年耐久性)
	$0.4 < w \leq 0.5$	大 (20年耐久性)	大 (20年耐久性)	中 (20年耐久性)
	$0.3 < w \leq 0.4$	大 (20年耐久性)	中 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)
	$0.2 < w \leq 0.3$	中 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)
	$w \leq 0.2$	小 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)

※評価結果「小」、「中」、「大」の意味は下記のとおり。

小：ひび割れが性能低下の原因となっておらず、部材が要求性能を満足する。

中：ひび割れが性能低下の原因となるが、軽微（簡易）な対策により対処が可能。

大：ひび割れによる性能低下が顕著であり、部材が要求性能を満足していない。

※※カッコ内の数値は耐久性評価結果を保証できる期間の目安としての年数を示しており、(20年耐久性)はひび割れの評価時点から15～25年後程度の耐久性評価結果を保証できる期間の目安として設定したものであり、15～25年の平均をとって示したものである。

「JCI ひび割れ指針」 81 頁より

(5) 補修補強の要否の判定

オーナーによる期待延命期間を20年以上と設定し、「JCI ひび割れ指針」の「表-5.2.1 評価に基づく判定法（鋼材腐食に対する耐久性の観点）」より判定すると、

- ・部材への影響「中」では、ひび割れの補修が必要
- ・部材への影響「小」では、ひび割れの補修が不必要

（ただし、定期的なひび割れ調査が必要）

との判定結果を得る。

表-5.2.1 評価Iに基づく判定表（鋼材腐食に対する耐久性の観点）

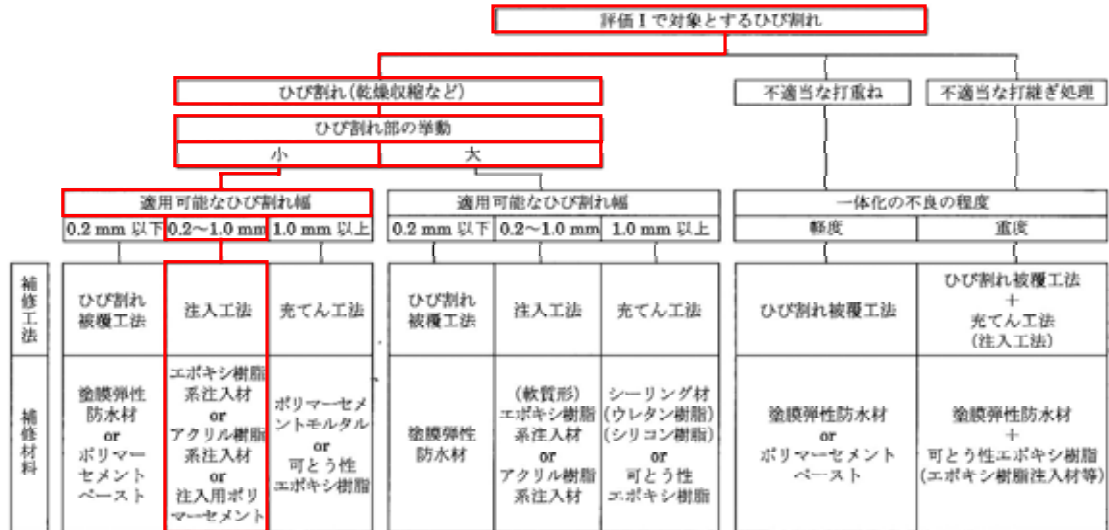
部材性能への影響	オーナーによる期待延命期間		
	10年未満	10～20年	20年以上
小 (20年耐久性)	補修不要	補修不要	補修不要 (定期的なひび割れ調査を実施)
中 (20年耐久性)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要、定期的なひび割れ調査を実施)	補修必要
大 (20年耐久性)	基本的には補修必要 (場合によっては補修不要)	補修必要	補修必要 (補強、解体・撤去、建替えを含む)

「JCI ひび割れ指針」 103 頁より

(6) 補修方法の選定

「JCI ひび割れ指針」の「解説図-6.2.4 ひび割れ補修の選定例」を参考に補修工法を選定する。

- ・ひび割れ幅が 0.3mm を超えるひび割れは、部材性能への影響「中」で補修が必要であり、補修方法は「注入工法」を選定する。



※「評価Ⅰで対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水和熱によるひび割れなど、竣工から数年内には収束すると考えられるひび割れをさす。

解説図-6.2.4 ひび割れの補修工法の選定例

「JCI ひび割れ指針」 121 頁より

7 - 3 . 自然田高架橋・菟砥川高架橋(プレビーム桁)

(1) 橋梁の履歴

平成 13 年～14 年	: 完成
平成 15 年 3 月 31 日	: 供用開始
平成 17、18 年	: 橋梁点検の実施(近畿技術事務所)
平成 19 年	: 橋梁ドクタ - による現地診断(自然田高架橋)
平成 20 年度	: 本委員会の点検と浪速国道事務所発注の 「第二阪和国道橋梁調査検討業務」による詳細点検の実施

履歴より、供用開始後 4 年ほど経過してひび割れ等の変状が確認された。

(2) ひび割れパターン

ひび割れの発生状況は、「第二阪和国道橋梁点検結果 平成 20 年 12 月 4 日」(近畿技術事務所)によるものとするが、着目ひび割れとしては、本報告書でピックアップしている床版部とする。

・ ひび割れパターン

自然田高架橋(P22～P23)と菟砥川高架橋(P35～P36)の桁間の床版下面には亀甲状のひび割れが認められた。つぎに、両高架橋の張出し床版では、主に橋軸直角方向のひび割れが認められ、中間床版でみられる様な亀甲状を呈してない。

・ ひび割れ幅

桁間の床版に発生している亀甲状のひび割れの大半は幅が 0.1mm 以下であるが、ウェブ近辺に発生している橋軸直角方向のひび割れには一部最大で 0.35mm のものも認められた。

・ ひび割れ深さ

自然田高架橋ではプレビーム桁の測定は実施されていない、菟砥川高架橋では P36 側床版で実施されているが、設計値(85mm)のかぶりにたいして 78.5mm の測定結果を得ている。

・ ひび割れの進展

前回調査(平成 17 年、18 年)から今回調査(平成 20 年)の結果、わずかに新規ひび割れが認められたが、前回調査で確認されたひび割れ幅の変化は認められなかった。

(3) ひび割れ原因の推定

6. 変状の原因より、乾燥収縮に起因すると推測される。

(4) 評価

ひびわれ発生原因の推定結果と発生ひび割れ幅より補修方法を選定する。補修方法の選定にあたっては、「JCI ひび割れ指針」を参考に選定することとする。

ひび割れ発生原因は想定外の乾燥収縮に起因したものと推定されることから、ひび割れ

の評価種類は「評価Ⅰ」と判断できる。「評価Ⅱ」では、鋼材腐食に対する耐久性を要求性能とした場合の、ひび割れの部材性能への影響程度を「大」「中」「小」で評価する。

「JCI ひび割れ指針」の「表-4.2.1 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響」で、「一般の屋外環境下」と考えた場合、ひび割れ幅が 0.3mm 以下では、評価結果は「小」と判定できる。ひび割れ幅が 0.3mm を超える場合で、評価結果は「中」の判定になる。

表-4.2.1 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響

環境条件		塩害・腐食環境下	一般屋外環境下	土中・屋内環境下
ひび割れ幅： w (mm)	$0.5 < w$	大 (20年耐久性)	大 (20年耐久性)	大 (20年耐久性)
	$0.4 < w \leq 0.5$	大 (20年耐久性)	大 (20年耐久性)	中 (20年耐久性)
	$0.3 < w \leq 0.4$	大 (20年耐久性)	中 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)
	$0.2 < w \leq 0.3$	中 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)
	$w \leq 0.2$	小 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)	小 (20年耐久性)

※評価結果「小」、「中」、「大」の意味は下記のとおり。

小：ひび割れが性能低下の原因となっておらず、部材が要求性能を満足する。

中：ひび割れが性能低下の原因となるが、軽微（簡易）な対策により対処が可能。

大：ひび割れによる性能低下が顕著であり、部材が要求性能を満足していない。

※※カッコ内の数値は耐久性評価結果を保証できる期間の目安としての年数を示しており、（20年耐久性）はひび割れの評価時点から15～25年後程度の耐久性評価結果を保証できる期間の目安として設定したものであり、15～25年の平均をとって示したものである。

「JCI ひび割れ指針」 81 頁より

(5) 補修補強の要否の判定

期待延命期間を 20 年以上と設定し、「JCI ひび割れ指針」の「表-5.2.1 評価Ⅰに基づく判定表（鋼材腐食に対する耐久性の観点）」より、本橋に発生したひび割れについて判定すると、

- ・部材性能への影響「小」では、ひび割れの補修が不要
- ・部材性能への影響「中」では、ひび割れの補修が必要（ただし、定期的なひび割れ調査が必要）

との判定結果を得る。

表-5.2.1 評価Ⅰに基づく判定表（鋼材腐食に対する耐久性の観点）

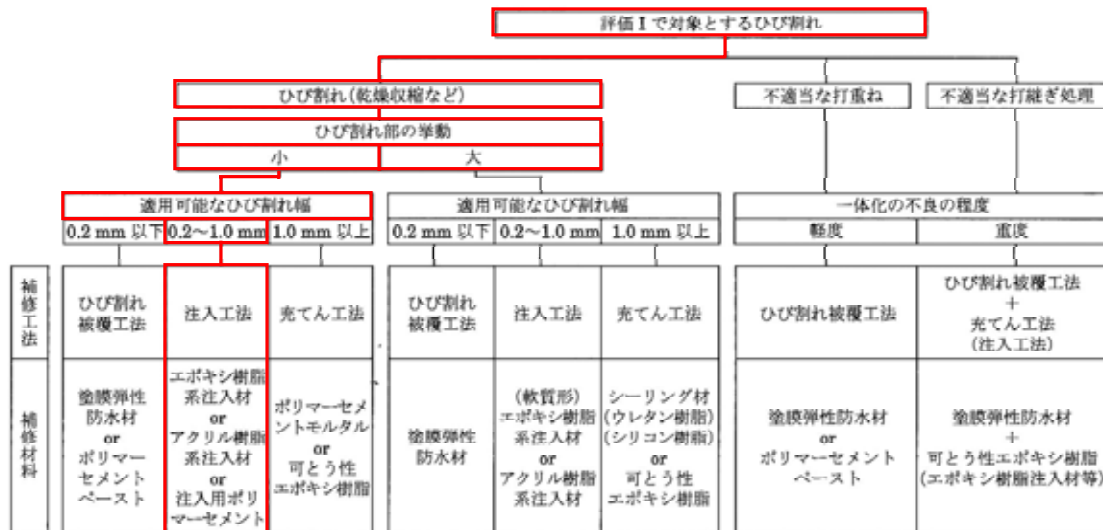
部材性能への影響	オーナーによる期待延命期間		
	10年未満	10～20年	20年以上
小 (20年耐久性)	補修不要	補修不要	補修不要 (定期的なひび割れ調査を実施)
中 (20年耐久性)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要、定期的なひび割れ調査を実施)	補修必要
大 (20年耐久性)	基本的には補修必要 (場合によっては補修不要)	補修必要	補修必要 (補強、解体・撤去、建替えを含む)

「JCI ひび割れ指針」 103 頁より

(6) 補修方法の選定

「JCI ひび割れ指針」の「解説図-6.2.4 ひび割れ補修の選定例」を参考に補修工法を選定する。

- ・ひび割れ幅が 0.3mm を超えるひび割れは、部材性能への影響「中」で補修が必要であり、補修方法は「注入工法」を選定する。



※「評価 I で対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水和熱によるひび割れなど、竣工から数年内には収束すると考えられるひび割れをさす。

解説図-6.2.4 ひび割れの補修工法の選定例

「JCI ひび割れ指針」 121 頁より

なお、自然田高架橋と菟砥川高架橋に発生している大半のひび割れは幅 0.2mm 以下のため、部材性能への影響「小」で、「補修不要」(定期的なひび割れ調査の実施)となる。

しかし、橋梁上部工であることを鑑み、「表面含浸工法」を予防的に行ってもよい。本工法は、コンクリート表面にシラン系および珪酸塩系表面含浸材を塗布・含浸させることにより、コンクリート表層部の組織を改質する。表面被覆工法のようにコンクリート表面に被膜層を設けないため、構造物の外観を大きく変化させることなく、短期間に施工が可能な特長を有する。

7 - 4 .まとめ

山中川東高架橋、山中川高架橋、自然田高架橋、菟砥川高架橋の上部工について、「コンクリートのひび割れ、補修、補強指針 - 2009 - 」（(社)日本コンクリート工学協会）に従い、変状の評価と補修の要否について検討した。

結果は4橋とも共通で、以下のとおりとなった。

- ・ひび割れの主たる原因は乾燥収縮に起因すると考えられるため、ひび割れの評価種類は「評価」と判定される。
- ・鋼材腐食の観点から一般の屋外環境下では、ひび割れ幅が0.3mmを超える場合、部材性能への影響は「中」となり、0.3mm以下では「小」となる。
- ・「評価」において、鋼材腐食に対する耐久性の観点から、オーナーによる期待延命期間が20年以上の場合、部材性能への影響が「中」は「補修必要」、「小」は「補修不要」となる。
- ・以上より、指針に従うとひび割れ幅が0.3mmを超える場合は補修が必要で、0.3mm以下は補修が不要と判定されるが、実際の補修の要否については、変状が生じている部分の状況を考慮して決定する必要がある。
- ・補修は「注入工法」が選定される。

その他

- ・山中川東高架橋は、主桁外周部にシート系の表面被覆工を予防的に行ってもよい。
- ・プレキャスト桁の床版ひび割れは、表面含浸工法を予防的に行ってもよい。

8. 再発防止策

8 - 1. 基本方針

コンクリート構造物においては、構造物の要求性能を満足できるように、乾燥収縮ひずみおよび乾燥による収縮ひび割れ幅を制御しなければならない。

【解説】

乾燥収縮ひずみの制御の目的は、乾燥収縮ひずみ、または、乾燥収縮ひび割れによって構造物の性能が損なわれないよう乾燥収縮ひずみを制御することによって、構造物が要求性能を満足できるようにすることである。

許容応力度設計法の下でも、一定の乾燥収縮や温度変化などのひずみ量を想定して、設計段階で照査を行う場合がある。しかし、実際に施工段階になってみないと分からない点が多く、事前の解析を行っても実際の施工条件の違いが十分に考慮できず解析結果の精度に疑問が残り、労力に見合った成果が得られないのが実情である。このような理由等から、乾燥収縮ひずみが設計で大きく取り上げられることは希で、乾燥収縮によるひび割れの対策は、施工に任せるのが一般的であった。しかし、骨材事情の変化等、コンクリートを製造する環境が変化する中で、構造物に求められる高い信頼性に応え、また、将来起こりえる不測の事態を少しでも抑えるためには、設計において乾燥収縮ひずみの影響をより理論的に考慮する必要性が高まっている。

これまでの設計において乾燥収縮ひずみは、断面に一様に生じる現象として、その影響が検討されてきた。しかし、乾燥による収縮挙動は、熱による収縮挙動と同様に、拡散方程式によって説明が行える現象である。温度収縮では、コンクリート中を熱が移動することによって、その結果としてコンクリートに変形が生じる。これに対して、乾燥収縮では、コンクリート中を水分が移動することによって、その結果としてコンクリートに変形が生じる。いずれの変形も、そのメカニズムは同じで、コンクリート中を物質が移動することによって生じる現象である。従って、乾燥による収縮挙動が正しく理解され、解析に必要な物性値が与えられ、さらに、乾燥収縮ひび割れ幅を制御する技術の蓄積が行われれば、温度ひび割れ制御と同様な、より高度なひび割れ制御も可能である。

土木学会コンクリート標準示方書には、乾燥による収縮ひび割れによって剛性低下を生じる部材のたわみや振動、乾燥収縮ひずみの及ぼす曲げひび割れ幅、乾燥収縮ひずみによるプレストレス力の減退等を照査する予測式が示されている。現状でも、実際の構造物で生じる乾燥収縮ひずみの大きさを正確に設定することができれば、限られた範囲ではあるが、有害な乾燥による収縮ひび割れをコンクリート構造物に発生させない設計を行うことは可能である。

コンクリート構造物のひび割れは、熱による収縮および乾燥による収縮が原因で生じる

他に、セメントの水和による収縮（自己収縮）によっても生じる。熱およびセメントの水和による収縮は、水セメント比が小さい場合に大きく、乾燥による収縮は、水セメント比が大きい場合に大きくなる。また、熱および乾燥による収縮挙動は、コンクリート断面の内部と外部において収縮差があるのに対し、セメントの水和による収縮挙動は断面に一樣に発生する。従って、熱および乾燥以上に、セメントの水和による収縮挙動が原因で生じるひび割れは、貫通ひび割れに至る恐れがある。収縮を生じさせる原因によって、コンクリートの収縮挙動は異なり、ひび割れを発生させる影響の大きさおよび発生の時期も異なる。乾燥が原因のひび割れ制御を行うことで、熱またはセメントの水和が原因のひび割れを招く恐れもある。コンクリート構造物の耐久性を確保するためのひび割れ制御を行う場合には、熱、乾燥およびセメントの水和、全ての原因に対する収縮挙動を把握し、それが原因で生じるひび割れを抑制する対策を計画、設計および施工の各段階で講じる必要がある。

本マニュアルでは、限界状態設計法に従った乾燥収縮ひずみの影響に対する制御計画、施工計画、施工および検査の流れを示すとともに、より地域の現状に合わせた乾燥による収縮ひび割れ制御のための作業手順を示す。

8 - 2 . 乾燥による収縮ひび割れ制御の流れ

乾燥による収縮ひび割れの制御は、制御計画、施工計画、施工および検査の流れで行い、下記の手順で実施することを原則とする。

構造物の要求性能に応じて乾燥収縮ひずみが影響を及ぼす性能に対する制御の限界値を定める。

目標達成のための材料・配合・施工の仕様を設定する。

適切な手法により乾燥収縮ひずみの予測を行い、制御の目標に対する照査(検証)を行う。

照査(検証)の結果に基づき、材料・施工の仕様を決定する。

材料・施工の仕様に基づき適切な施工管理のもとにコンクリートの製造および施工を行う。

コンクリート構造物が要求性能を満たすことを検査により確認し、検査結果によって適切な措置を講じる。

【解説】

乾燥による収縮ひび割れの制御の基本は、構造物に要求される性能を確保するために必要な制御指標（例えば、部材のたわみ量、曲げひび割れ幅、ひび割れ発生応力）を設定し、その目標を達成するための設計・施工面での考慮事項（例えば、乾燥収縮ひずみの特性値、部材断面厚、鉄筋量、養生期間）を検討・設定し、必要に応じて、これらの条件に基づいた事前解析を行い、考慮事項の効果を確認する。実際の工事では、設定された条件で施工を行い、制御目標を達成できるように施工管理を行い、必要に応じて適切な対応を行う。

について：構造物が所有すべき乾燥収縮ひずみが影響を及ぼすと考えられる性能（例え

ば、たわみ量、曲げひび割れ幅) に対して、発注者の意図、構造物の重要度、関連する法規格、学協会基準・規準類等を総合的に判断し、限界値を設定する。

について：学協会等で発行されている標準仕様書・指針類、過去に建設された類似構造物で得られた実験データ・解析結果、乾燥収縮ひずみの影響を熟知した専門技術者に蓄積された知識・経験等を参考に、当該現場の条件を勘案して、乾燥収縮ひずみ制御の目標を達成するための材料・配合・施工計画を設定する。

について：設定された材料・配合に基づき、乾燥収縮ひずみの特性値を設定する。乾燥収縮ひずみの特性値とは、乾燥期間が無限大の場合における乾燥収縮ひずみであり、コンクリート部材の形状や寸法に関係無く同じ値となる、コンクリートに固有の値である。供試体により求められる乾燥収縮ひずみと、実際の構造物に生じる乾燥収縮ひずみの差を考慮するために、適切な材料係数を定め、乾燥収縮ひずみが影響を及ぼすと考えられる性能の照査に用いる設計乾燥収縮ひずみを下記の式より求める。

$$\text{設計乾燥収縮ひずみ} = \text{材料係数} \times \text{乾燥収縮ひずみの特性値} \cdots (1)$$

材料係数には、部材寸法の影響、構造物の置かれる環境の天候、温度および湿度、養生期間等の影響が考慮されなければならない。

照査を満足しない場合は、収縮低減剤または膨張材等の使用または材料の変更等を検討し、再度、乾燥収縮ひずみの特性値を設定し、照査を実施する。

について：照査の結果に基づき、材料、配合、施工の仕様を決定する。

について：当初の計画では照査が満足せず、乾燥収縮ひずみに対して、何らかの収縮低減対策を実施しなければならない場合には、その効果を確実に達成するために、養生期間の延長等を考慮に入れた施工計画を立てる。また、乾燥収縮の小さなコンクリートを使用する場合でも、新旧コンクリートの打ち継ぎ部においては既設側の拘束により新設側にひび割れが生じやすい。通常、対象とする部材がマッシブな場合には、水和熱の温度降下に伴う収縮により施工中にひび割れの発生が露呈するため対処も容易であるが、乾燥収縮を主要因とする場合には供用後にひび割れが発生する場合があります。こうした外部拘束によるひび割れは一般的に部材を貫通することが多く、耐久性上の問題も大きい。このため、収縮ひび割れの対策においては、使用材料を含む施工方法全般を勘案した検討を実施することが望ましい。

について：施工後には制御の効果を検査し、検査不合格の場合は必要に応じて対応措置をとる。制御の計画、施工および検査の結果は、記録に残す。

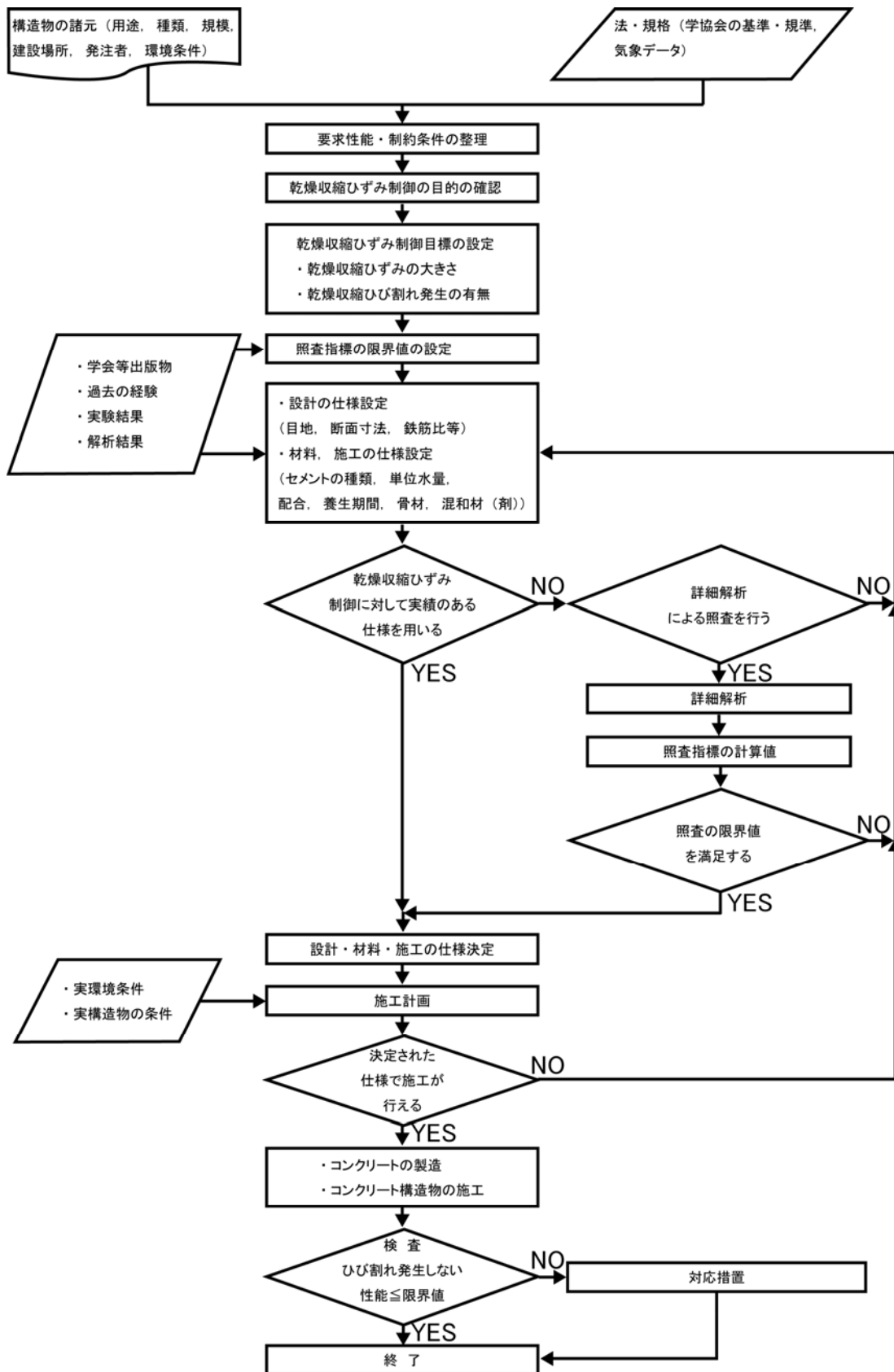


図8 - 1 . 乾燥による収縮ひび割れ制御の流れ(基本フロー)

8 - 3 . 具体的な作業手順の提案

8 - 3 - 1 . はじめに

収縮ひび割れの制御は、図8 - 1に示すフローに従い実施するが、フローではこれまでにない新たな材料選定および品質検査のスキームを提案しており、全国ベースに適用することが必要十分かどうか、明確ではない。

しかし、

- ・第二阪和国道では建設された一部の構造物に実際にひび割れが発生しており、こうした問題を放置した場合には維持管理の面で問題があること。

- ・周辺地域はもとより、他地域のコンクリートにも第二阪和国道でひび割れが確認された一部の構造物と同一の産地、あるいは同じ性状を示す骨材が使用される可能性があり、そうした骨材を使用して製造されたコンクリートは収縮が大きくヤング係数が小さい（標準からの乖離が大きい）ため、無対策のままでは設計の前提が崩れてしまう恐れがあること。等の理由から、対策の実施は急務であると考えられる。このため、現行の枠組みの中で運用可能な、より具体的な作業手順を示すこととした。

作業手順をフローとして整理したものを図8 - 2に示す。フローは、第二阪和国道の既設構造物を対象に調査・試験・解析を実施した結果に基づき、使用材料に起因する収縮が構造物の性能に悪い影響を与えない様、暫定的に取りまとめたものである。また、耐久性に不具合が生じた場合、補修対策などを行うにしても社会的な影響度が高いコンクリート製の上部構造を主たる対象としている。

乾燥収縮の基本的なメカニズムには不明な点があり、しかも、乾燥収縮は骨材の性質、環境によっても大きく変わる。従って、フローに従い収縮ひび割れを制御する場合には、フローを構築した前提条件を十分理解し、使用材料の特性や構造物の種類・重要性・周辺環境に見合った適切な対策を実施する必要がある。以上に加え、解説文中に示した特性値等は暫定的な数値としていることから、図8 - 2は暫定フローという名称にした。

8 - 3 - 2 . 対策の効果

対策の効果は、以下のようなものである。

- ・大きな収縮を示すコンクリートが使用されることによりひび割れ発生リスクが増大するが、このような不具合のリスクを材料選定の段階で合理的に摘み取っておくことができる。

- ・大きな収縮を示すコンクリートが使用されることにより、実際に生じるであろう乾燥収縮の値が設計値から大きく乖離してしまい、設計の前提が崩れかねないことを防止できる。

- ・コンクリートのヤング係数に範囲を設定することにより、間接的にコンクリートに用いられる骨材の品質を確保するとともに、配合に無理が生じないよう（すなわち、無碍に単位セメント量が大きくなって温度応力や自己収縮が大きくなる不具合が発生しないよう）

にできる。

一方で、解決できなかった問題点として、以下があげられる。

・本来は、設計と施工の間の情報の伝達、さらには柔軟な設計変更を可能とする照査システム、あるいは品質検査スキームを試案として提案できれば良かったが、それについては、乾燥収縮だけに留まらずシステム全体に関わることになるので、ここでは、理想版として思想を示すに止まった。

8 - 3 - 3 . 対策フロー 解説1)

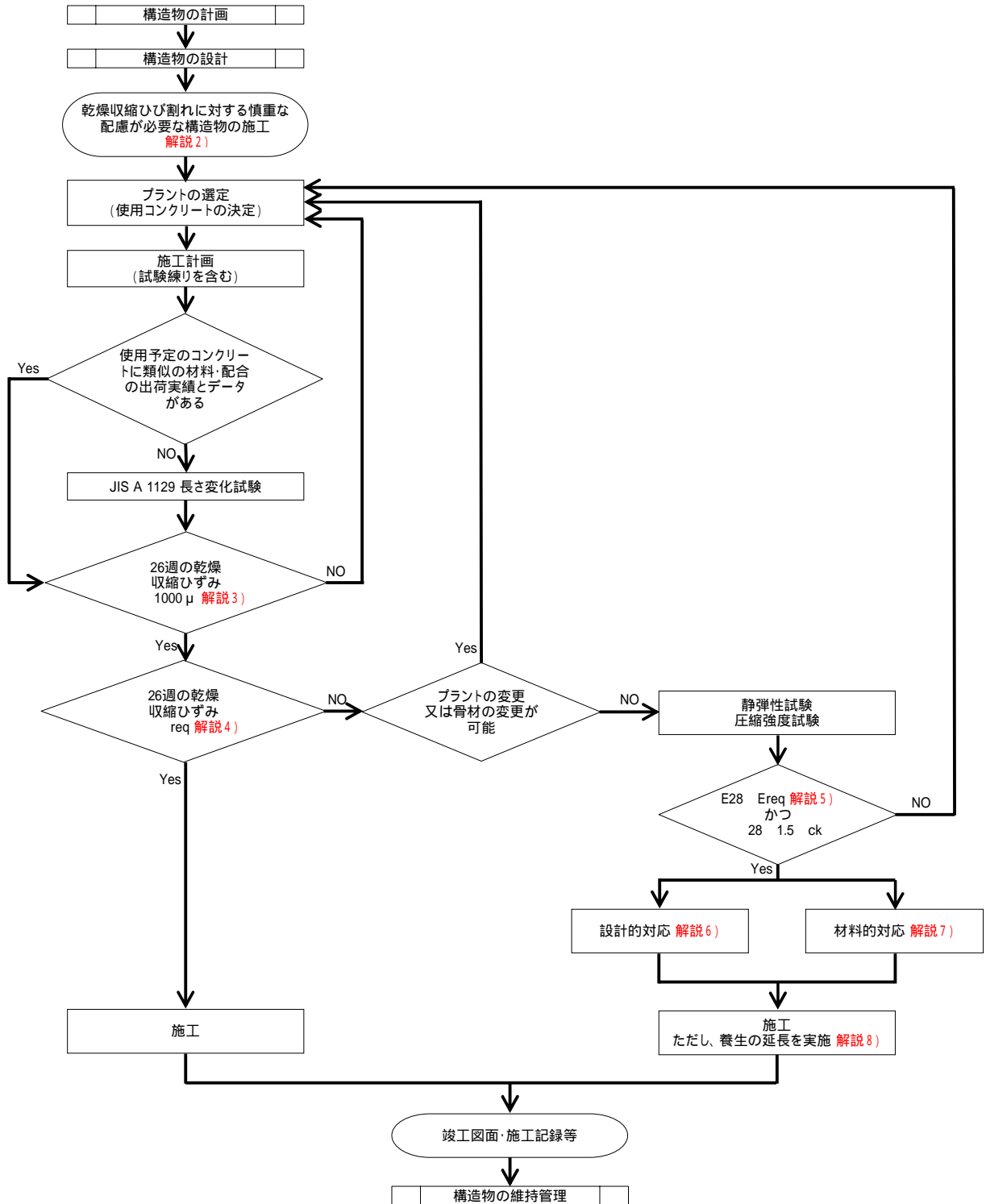


図8 - 2 . 第二阪和国道の検討結果に基づく暫定フロー

本フローは、第二阪和国道の既設構造物で発生した変状に対する調査・解析等の検討結果に基づく暫定フローである。

【解説1】

第二阪和国道の既設構造物で発生した変状に対する調査・解析等の検討結果に基づく暫定フローとする。

フローは大きなひび割れを回避することを目的としている。

温度ひび割れ等は別途、検討する必要がある。

フローに従う場合の条件や留意点について述べる。

フローは、第二阪和国道の既設構造物で発生した変状に対する調査・試験・解析結果に基づき構築したものである。6章で述べたとおり、大きな乾燥収縮性状を示す骨材の使用が変状の主たる原因と考えられるため、第二阪和国道の近傍で同一産地の骨材が使用される場合はもちろんのこと、他地域においても同種の骨材や同じ性状を有する骨材が使用される場合には、基本的に適用可能な内容となっている。また、フローはすでに発注された工事の施工段階における検討について取りまとめたものであり、新設の構造物については、計画・設計の段階において考慮すべき事項もあると考えられる。さらに、解説中に示した収縮ひずみの特性値等については、今後の研究により新しい知見が得られるまでの暫定的な数値としている事情もある。以上により、図8-2は暫定フローと称することとした。

このフローを広く適用する場合には、フローを構築した前提条件を十分理解し、使用材料の特性、構造物の種類と重要性、構造物が置かれる環境に見合った適切な対策を実施する必要がある。

乾燥収縮が原因で生じる恐れのある不具合（ひび割れ、支承や伸縮装置の破壊、出来形不良）のうち、ひび割れ、特に構造物の性能に大きな影響を与えるひび割れの回避を目的としている。

対象は乾燥収縮としており、水和熱、その他原因（ASR、塩害）による影響についても必要に応じ検討を行い、構造物の安全性については総合的な見地から判断を行う必要がある。

【解説2】

フローは基本的に、コンクリート道路橋(上部工)を対象としている。

フローは乾燥収縮に対し鋭敏で、かつ重要な構造物に適用するものとする。

乾燥収縮に対する配慮は、構造物の重要度が高い場合に特に必要となる。また、完成後の補修の容易さや景観性、交差物件に対する配慮なども考慮されるべき事項である。

本委員会は第二阪和国道の一部の構造物に対する損傷検討を主目的としており、その性質上、コンクリート道路橋の上部工に特化した対策シナリオを構築しフロー化した。下部工も重要構造物に違いないが、乾燥収縮で生じたひび割れにより所要の性能が低下する可能性は低く、補修の容易さもあって検討対象から基本的に除外している。

乾燥収縮の影響は、使用材料、環境、構造形式、断面形状、施工方法、着目部位により異なる。例えば PC 上部工においては、[参考3]に示す設計実例より、構造形式・径間数により乾燥収縮に対する安全性が大きく変化することが見て取れる。例えば単純桁の場合、収縮ひずみの大小が橋体の安全性に与える影響は一般的に小さく、従って全ての橋梁に本フローを厳密に適用するかどうかについては、総合的な見地からの判断が必要になると思われる。

また下部工についても、ラーメン橋脚の水平梁の様に、乾燥収縮の影響を受けやすい重要部位についてはフローに従って材料選定を行うことが望ましい。また、柱部の新旧コンクリートの打ち継ぎ目にはひび割れが生じやすく、ひび割れのスケールが大きくなると美観上問題となるケースが多いため、そうした場合にもフローの適用を検討すべきと考えられる。

【解説3】

コンクリート標準示方書による受け入れ基準から、収縮ひずみの上限は $1,000 \mu$ とする。

本フローで取り扱うコンクリートの乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129(コンクリートの長さ変化試験：以下 JIS 試験と略記)における 26 週の測定値で 1000μ を上限とし、これを上回る収縮性状を示すコンクリートは、混和材料の添加等により収縮ひずみを減じることが可能であっても使用しないこととした。これは、2007 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編:検査標準] 5章 レディーミクストコンクリートの受入れ検査(204 頁)に、「・・・試験から求めた測定値に対する判定基準は収縮量が 1000μ を超えないことを確認することを標準としてよい。この基準値は、水中養生 7 日後 6 ヶ月の乾燥条件における収縮量である。」の記載があり、これに従ったものである。

【解説4】

特性値とは、健全なコンクリートと考えられる限界の最終乾燥収縮ひずみである。なお、乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥後26週の値を持って最終値としてよい。

特性値以下は無対策とするが、初期欠陥の防止には当然、努める必要がある。

特性値は当面、 8×10^{-4} としてよい。

適切な方法により早期判定を行ってよい。

自己収縮についてはフローで取り扱っていない。

乾燥収縮ひずみの特性値は、乾燥期間が無限大における収縮ひずみ、すなわち、最終乾燥収縮ひずみを指す。ただし、JIS に示される試験方法に従い、乾燥収縮ひずみの最終値を求める場合には、土木学会コンクリート標準示方書に従い、乾燥後 26 週の値をもって最終値としてよい。

ある乾燥材齢における実測値が、設定した特性値を下回っている場合には、通常のコンクリートとして取り扱ってよいこととした。ただし、特性値を下回っていても、ひび割れ等の変状が必ずしも回避できる訳ではなく、必要に応じ水和熱に起因する収縮ひび割れ等について検討・対策を行い、初期欠陥の防止に努める必要がある。また、乾燥収縮に対しても100%の安全を保證する訳ではなく、適切な施工や十分な養生を行うのはもちろんのこと、施工中はコンクリートの状態を常に監視し、異常の早期発見に努める必要がある。

骨材事情がよく、乾燥収縮に関連する諸問題が現在よりも少なかった1970年代のコンクリートは、 800μ を越える乾燥収縮ひずみがほとんど発生していない（【参考1】参照）。従って、乾燥収縮ひずみの特性値（ req ）は 8×10^{-4} とし、健全なコンクリートにおいて考えられる限界の値と定めた。ただし、今後の研究により新しい知見が得られるまでの暫定的な数値とする。

今回、測定精度により特性値を 8×10^{-4} という表現にしており、収縮ひずみはおおよそ 850μ までが許容される。5-4で山中川東高架橋を例に解析した結果では、JIS試験における 800μ と 850μ （解析では 880μ ）の差は、表層部の応力では有意な差となり現れている。しかし、【参考5】の解析結果でも明らかのように、こうした内部拘束による応力は表層部から部材中心に向かって急激に減少するため、断面全体に平均的に発生する応力としては差が小さいものになる。以上により、 800μ と 850μ の差は、表層部の微細ひび割れを議論する上では無視できない可能性があるが、部材断面を貫通するようなひび割れを議論する場合には大きな影響を与えるものではないと判断される。

実構造物における乾燥収縮ひずみは、部材の寸法、環境条件、鉄筋比等に影響を受ける。乾燥収縮ひずみの特性値が 800μ で、相対湿度70%の条件下に置かれるコンクリート部材の供用開始後30年における乾燥収縮ひずみのFEM解析を行った結果を【参考2】に示す。部材厚が700mmで、鉄筋比が1.5%の部材の乾燥収縮ひずみは、おおよそ 350μ である。実環境下における雨露の影響等も考慮に入れれば、特性値が 800μ のコンクリートを用いた実構造物の乾燥収縮ひずみは、道路橋示方書に示される設計乾燥収縮度（通常 $150 \sim 200\mu$ ）にほぼ一致するものと考えられる。

使用予定と同じ材料・配合によるコンクリートの収縮ひずみについて、生コン工場が実測データを有していない場合にはJIS試験を実施することになるが、26週での測定結果を待って使用の可否を判断する場合には、工程に深刻な影響を与える場合も生じる。そこで、早期の測定値から26週における収縮ひずみを適切な方法により予測してもよいこととした（【参考4】）。しかし、早期判定においては、判定の時期が早ければ早いほど予測値に大きなばらつきが生じるため、材齢に応じある程度の安全率を設定することはやむを得ない。このため、本来、26週で特性値以下の収縮ひずみしか示さないコンクリートでも、4週で予想した場合には「健全でない」と判断される可能性が高くなる点に注意が必要である。なお、早期判定を行った場合でも、最終的な確認はJIS試験による測定値を基に行わなければならない。

コンクリートの乾燥収縮ひずみは JIS 試験により測定を行うが、測定値には自己収縮ひずみの一部が含まれている。一般的な構造物の場合、自己収縮ひずみは小さく、本フローではその取り扱いについて言及しないが、W/C が 40%以下になると無視できなくなる場合があるので注意を要する。

【解説 5】

収縮ひずみが特性値を上回った場合、コンクリートのヤング係数が基準値以上であることを確認し、粗骨材の品質を確保することとする。

コンクリートの圧縮強度が、呼び強度の1.5倍以内である条件下において、ヤング係数の基準値が標準値の80%以上とする。

コンクリートの乾燥収縮ひずみと骨材のヤング係数には密接な関係があることが知られている。ヤング係数の小さい骨材を使用したコンクリートは、乾燥収縮ひずみが大きくなるに従い、圧縮強度に応じたヤング係数が発現しなくなる傾向がある。

一般に、ヤング係数の小さい粗骨材は組織が緻密でなく自身の乾燥収縮も大きいため、そのような粗骨材を使用したコンクリートは異常な収縮性状を示す恐れがある。従って、特性値を上回る収縮ひずみを示すコンクリートを使用せざるを得ない場合には、静弾性試験によりコンクリートのヤング係数を測定し、設定した基準値（ E_{req} ）と対比することで粗骨材の品質を間接的に確認することとした。

【参考 7】によると、通常のコンクリートはコンクリート標準示方書、道路橋示方書に示されるヤング係数の標準値に対し、概ね 80%以上の値となっている。一方、第二阪和国道で実際に変状が生じているコンクリートから採取したコアで試験を行うと、発現強度に対するヤング係数はほとんどが示方書に示される標準値の 80%以下となり、一部 70%を割り込むものも存在した。従って、材齢 28 日における圧縮強度に対するヤング係数の基準値（ E_{req} ）は、示方書に示される標準値の 80%とし、それを下回らないことを確認することとした。このように、一定のヤング係数を確保することにより、過大な乾燥収縮ひずみや自己収縮ひずみの発生を防止できるものと考えられる。

大きな乾燥収縮性状を示すコンクリートにおいて、ヤング係数の基準値をクリアするためにコンクリートの強度を高めようとする、必要以上にセメント量が増大し、水セメント比が小さくなる結果、水和熱や自己収縮によるひび割れの危険性が高まり品質上好ましくない。従って、28 日における圧縮強度は、レディーミクストコンクリート全国統一品質管理監査基準に準拠し、呼び強度の 1.5 倍以下であることを確認することとした。なお、施工工程上の理由から、早期材齢の強度を確保するために、構造物の設計基準強度よりも大きな呼び強度のコンクリートを用いる場合もあり得る。このような場合では、富配合のコンクリートが用いられることにより、温度応力や自己収縮による拘束応力が発生し、ひび割れにつながることも想定されるので、配合選定にあたって十分な検討が必要である。

【解説6】

設計的対応については現在、具体的な検討手法が十分に確立しているとは言い難いが、コンクリート標準示方書等の規準を参考に要求性能の確保に努める必要がある。

道路橋示方書における乾燥収縮の取り扱い、部材がその軸方向に一樣に収縮すると仮定した弾性理論による外力評価のみである。また、乾燥収縮によるひび割れの発生は「完全に防ぐことは困難である」としているが（道路橋示方書・同解説 コンクリート橋編 1.2 用語の定義）具体的な検討方法については触れられていない。

コンクリートの乾燥収縮の影響として、設計上考慮する外力としての評価、すなわち不静定力やプレストレスの低下に関する検討だけではなく、橋軸方向に発生するひび割れや、内部拘束が卓越する場合のように方向性がないひび割れについても、検討を要する場合がある（[参考5]）。また、乾燥収縮の影響を厳密に評価する場合には、配置される鉄筋の影響も考慮する必要がある（[参考6]）。現在、こうした場合において、適切な検討手法が十分に確立しているとは言い難い面がある。また、乾燥収縮の影響は施工条件にも大きく依存するところがあり、設計段階でどの程度、施工条件をふまえた検討が実施できるか、状況によっても異なると思われる。

設計的な対応を考える場合、具体的な検討手法はまだ十分には確立していないが、設計段階・施工段階で十分整合性のある方法にするとともに、構造物に求められる性能に応じた、柔軟に安全係数を設定することが重要であると思われる。

【解説7】

材料的対応は、混和材料の添加、単位水量低減、セメント種類の変更であるが、試験練りを要するため工程への配慮が必要である。

現在、実施可能な材料的対応として、以下の方法がある。

- ・ 混和材料による収縮ひずみの低減：収縮低減剤、収縮低減型 AE 減水剤、膨張材の使用
 - ・ 配合の見直し：単位水量の低減
 - ・ セメント種類の変更：低熱セメントの使用
- （ ・ 骨材の変更：石灰石に変更する、石灰石の混合率を高くする ）

骨材の変更については、収縮ひずみが特性値を上回った場合、最初に検討すべき事項としてフローを整理している。

何れの方法でも再度試験練りを実施し、JIS 試験により乾燥収縮ひずみを確認する必要があることから、工事の工程を考慮した有効な対策方法について検討する必要がある（[参考8]参照）。

なお、材料的対応における収縮低減剤の使用については、4 - 4 - 2 (3) 5)凍結融解試験 (JIS A 1148) に示す様に、製品によっては耐凍害性が低下する場合がある。耐凍害性は通常、

相対動弾性係数や質量変化を指標として評価するが、劣化に対する明確な閾値が存在せず判断が困難な一面がある。しかし、性能の低下が生じる可能性があることは事実であり、寒冷地での使用にあたっては注意が必要である。

【解説8】

対策の実施後でも、健全なコンクリートと同等の品質とする保証がなく、付加的な品質向上策として養生期間の延長を図ることとする。

乾燥収縮ひずみが特性値を上回った場合、設計対応または材料的対応を行うことになるが、対応が必要十分であったかについては、構造物の完成後、一定の期間が経過しないと分からない。特に、大きな収縮性状を示すコンクリートの場合、粗骨材の品質に問題がある場合が多く、粗骨材を入れ替える対策以外については、対策の実施後に予期せぬ変状を示す可能性もある。従って、ベースとなるコンクリートの収縮性状が大きい場合には、対策後も健全なコンクリートと区別し、養生の延長による付加的な品質向上策を図ることとした。

【参考9】は、以下の条件で、養生期間の異なる供試体の収縮ひずみを比較測定した結果である。

- ・ 使用材料：普通ポルトランドセメント、川砂、砂岩系砕石、水道水
- ・ 養生温度：20 の標準養生
- ・ 乾燥期間中の温度： 20 ± 1 、湿度： 65 ± 5

これによると、養生期間3日のコンクリートに対し、乾燥収縮ひずみが7日間養生で93%、14日間養生で88%に低減する。また、養生期間を長くすることで、硬化したコンクリート表層部の緻密化が図られ、耐久性の観点からも有利となる。

ただし、養生日数の延長は工程に与える影響が大きく、例えばおよそ11日サイクルでコンクリートを打設していくカンチレバー施工への全面的な適用は困難と考えられる。しかし、箱桁内部で後打ちされる横桁については型枠を存置することが可能であり、また既設床版の散水養生や、養生シート等による表面保護も延長が可能である。従って、工程に与える影響を考慮の上、強く拘束を受けたり乾燥しやすい部材にはできるだけ養生期間を長く取る等の措置が望まれる。

9. 委員会活動

9 - 1. 活動記録

第1回委員会(H20.12.4 於:土木学会会議室)

- ・橋梁概要、点検概要について
- ・調査・試験方法について

幹事会(H20.12.17 於:土木学会会議室)

- ・委員会資料の取りまとめと解析について
- ・次年度予算について
- ・委員会構成の変更

幹事会(H21.1.23 於:京都大学)

- ・調査試験方法に対する委員会意見取りまとめ
- ・第2回委員会資料の確認

第2回委員会(H21.1.27 於:現地、関空日根野ステーションホテル)

- ・現地で橋梁の損傷状況を確認

幹事会(H21.1.27 於:関空日根野ステーションホテル)

- ・調査試験方法の方針について協議

幹事会(H21.2.9 於:京都大学)

- ・調査試験方法案の策定

第3回委員会(H21.2.13 於:土木学会会議室)

- ・調査試験方法の決定
- ・解析結果の中間報告
- ・収縮試験の結果と新しい試験方法の提案

新しい収縮試験の現地指導(H21.2.24 於:現地)

- ・綾野委員による供試体作成、養生方法の指導
(供試体は岡山大学にて計測を実施)

幹事会(H21.3.9 於:浪速国道事務所)

- ・今年度成果取りまとめについて
- ・次年度の業務内容について

幹事会(H21.3.13 於:京都大学)

- ・第4回委員会資料の確認

第4回委員会(H21.3.18 於:土木学会会議室)

- ・詳細点検結果
- ・コア抜き調査(中間報告)
- ・コア抜き試料による収縮試験結果(速報)
- ・クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果
- ・次年度の取組み

- 幹事会 (H21.6.11 於:浪速国道事務所)
- ・平成 21 年度の検討内容とスケジュールの確認
幹事会 (H21.7.2 於:岡山大学)
- ・部材内部の湿度移動に着目した解析方法について
幹事会 (H21.7.3 於:京都大学)
- ・平成 21 年度活動方針の委員長説明
- ・第 5 回委員会資料の確認

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 第 5 回委員会 (H21.7.17 於:土木学会会議室) ・試験結果報告 ・解析結果報告 ・変状部の評価と補修工法の選定 |
|--|

- 幹事会 (H21.8.4 於:浪速国道事務所)
- ・再発防止策の方針確認
幹事会 (H21.8.11 於:京都大学)
- ・第 6 回委員会資料の確認
- ・再発防止策の委員長説明
幹事会 (H21.8.25 於:国際建設技術研究所)
- ・対策フローについて

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 第 6 回委員会 (H21.8.27 於:土木学会会議室) ・解析結果報告 ・補修方法まとめ ・再発防止策としての対策フロー |
|---|

- 幹事会 (H21.9.9 於:浪速国道事務所)
- ・追加解析について
- ・対策フローについて
幹事会 (H21.9.11 於:京都大学)
- ・対策フローについて
幹事会 (H21.9.17 於:オリエンタル白石)
- ・追加解析について

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 小委員会 (H21.9.25 於:建設交流会館) ・追加解析について ・対策フローについて |
|---|

- 幹事会 (H21.10.16 於:岡山大学)
- ・対策フローについて
幹事会 (H21.10.20 於:浪速国道事務所)
- ・対策フローについて
- ・第 7 回委員会資料の確認
幹事会 (H21.10.22 於:京都大学)
- ・第 7 回委員会資料の確認

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 第 7 回委員会 (H21.10.27 於:土木学会会議室) ・対策フロー ・解析結果報告 ・試験練りによる各種試験結果 (中間報告) |
|--|

- 幹事会 (H21.11.18 於:国際建設技術研究所)
- ・対策フローについて

幹事会(H21.11.20 於:オリエンタル白石)

・対策フローについて

小委員会(H21.12.4 於:土木学会会議室)

・対策フローについて

・第8回委員会資料の確認

幹事会(H21.12.15 於:京都大学)

・第8回委員会資料の確認

幹事会(H21.12.17 於:大阪兵庫生コンクリート工業組合)

・収縮ひずみのデータに関するヒアリング

第8回委員会(H21.12.22 於:土木学会会議室)

・対策フロー

・解析結果報告

・試験練りによる各種試験結果(中間報告)

・変状の原因について

幹事会(H22.2.8 於:岡山大学)

・湿度移動解析と内部拘束応力の算定について

幹事会(H22.3.5 於:岡山大学)

・湿度移動解析と内部拘束応力の算定について

・21年度委員会報告書について

幹事会(H22.3.18 於:京都大学)

・21年度委員会報告書の確認

幹事会(H22.3.23 於:近畿地整本局)

・21年度委員会報告書の確認

第9回委員会(H22.3.26 於:土木学会会議室)

・H21年度報告書について

・今後の展望

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第1回)

議事概要

1. 日 時：平成20年12月4日(木) 9:00~11:00

2. 場 所：土木学会関西支部会議室

3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長

井上委員、田口委員、森田委員

山本幹事、和田幹事、山本幹事、小林幹事

(オブザーバー13名)

欠席者：河野委員、河井幹事

4. 議事概要

1) 委員会内規・委託研究実施計画書について

2) 全体スケジュール

3) 橋梁概要、点検概要

・点検結果では、全体的にひび割れ幅はあまり大きくないものの本数が多く、橋梁ごとにパターンが違う。

・H17、18年度の段階で錆汁、遊離石灰が生じており、ひび割れの発生はそれ以前と考えられる。

・現場打ち部分が損傷しており、工場製作の部分は健全である。

・山中川高架橋 横桁の水平ひび割れは配置鉄筋との相関を調べる。

4) 調査・試験方法

・載荷試験については議論すべき点が多いが、剛性の低下でたわみが大きくなっていないことを確認できればよいという考えもある。試験を行なうか否かは委員会で議論し決定。載荷試験の実施が困難な場合には、応力頻度測定に切り替えることも可能。

・骨材の収縮量と弾性係数、ペーストの収縮量と弾性係数の4つが収縮に影響するので、近傍の骨材でもよいから試験を行なうべきである。

・コンタクトゲージ等によるひび割れの継続調査が必要である。

・コア採取箇所については国交省で整理し、委員会に諮る。

5. 資 料： 委員会内規、実施計画書(委員会、特定事業幹事の構成)

業務フロー、委員会開催予定

第二阪和国道パンフレット

橋梁点検結果概要

調査・試験方法概要

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第2回)

議事概要

1. 日 時：平成 21 年 1 月 27 日(火) 10:00~17:00
2. 場 所：現地視察(第二阪和国道 対象 6 橋) (10:00~14:30)
閑空日根野ステーションホテル 会議室 (15:00~17:00)
3. 出席者：宮川委員長
河野委員、井上委員、綾野委員、木村委員(渡辺委員の代理)
田口委員、森田委員
山本(剛)幹事、和田幹事、山本(貴)幹事、小林幹事
(オブザーバー13名)
欠席者：松井副委員長、渡辺委員

4. 議事概要

- 1) 新委員の招聘
 - ・渡辺委員(土木研究所)、綾野委員(岡山大学)
- 2) 現地調査結果
 - ・金熊寺川、山中川東の支承の変形量が大きい。これより橋全体の挙動が推定できるのではないかと。
 - ・過積載の影響を受けたように見受けられるひび割れもあるが、舗装の損傷からすると可能性は低い。
 - ・部材内部では乾燥収縮が進行していないことが多く、既設構造でもコア抜き試料から収縮試験を行なうことが可能。
 - ・残存プレストレス量を調査する必要がある。
 - ・床版のひび割れは収縮の可能性が大きい。
 - ・部分的に構造ひび割れの的なものも見受けられる。
 - ・山中川東の橋軸方向ひび割れは経過観察が必要。
 - ・安全性について問題があるという程度の損傷ではないが、使用性・第三者影響性・耐久性には問題がある。基本的なところから取組み、原因の推定と最終的にどうなるかを考えるべき。
 - ・凍結防止剤は頻繁には使用しないが、塩害による付属物の劣化に留意すべき。
 - ・代表的な部位について、ひび割れの状況を前回調査時と比較し整理する。
 - ・ひび割れが貫通しているかどうか調べる。
- 3) コア抜きについて
 - ・当初コア抜き位置は、橋種、コンクリート規格、使用プラント、健全度を考慮し 38 箇所を選定、それぞれ 3 試料ずつコアを採取する。得られた試料を用いて行なう試験は 11 種類。
 - ・これに対し、プラント・骨材の区分でさらに絞込みを行い、コア抜きを減らす方針とする。幹事会で検討後、委員長判断とすることで合意。
 - ・収縮度の測定は JIS 試験のほか、部材深部より採取したコアについても実施する。
 - ・土木学会で収縮の解析を実施する。

5.資料： 第1回議事録(案)
委員会・幹事会の変更について
委員会スケジュール(修正)
コア採取の基本方針と位置・本数
生コン打設状況について
コア抜きに対する委員会意見

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第3回)

議事概要

1. 日 時：平成21年2月13日(金) 10:00~12:00

2. 場 所：土木学会関西支部会議室

3. 出席者：宮川委員長

井上委員、綾野委員、木村委員(渡辺委員の代理)

沢田委員(田口委員の代理)、森田委員

山本(剛)幹事、森内幹事(和田幹事の代理)、小林幹事

(オブザーバー8名)

欠席者：松井副委員長、河野委員、田口委員、和田幹事、山本(貴)幹事

4. 議事概要

1) コア抜き等の最終方針

・コア採取箇所は損傷部10箇所、健全部10箇所とする(コア総本数は63本)。

・圧縮強度試験・静弾性試験は全ての採取箇所で行なう。

・単位重量試験、岩種判定、骨材試験、配合推定はプラントと骨材の組み合わせで区分される9箇所で行なう。

・コア抜き試料を用いて行なう収縮試験は、上下部工2箇所ずつで行なう。

・同じ産地の骨材を使用しているコンクリートを購入し、JIS 乾燥収縮試験とJCI 自己収縮試験を実施する。

・以上の内容を委員会で承認した。

2) コア抜き試料による収縮試験について

・綾野委員より、試験の手順と実施例について説明がなされた。

・コア抜きから試料の養生方法までの手順は、綾野委員に現地で指導してもらう。

3) 骨材の性状と収縮性状について

・別工事で、同じ産地の骨材について種々試験を実施しており、結果を報告。

・骨材の吸水率試験、微粒分量試験、安定性試験、すりへり試験は、別産地の骨材に比べ許容値に対する安全率が低い傾向を示すが、全てJIS規格は満足する。

・静弾性係数は、示方書による標準値の2/3程度しか発現しない。

・標準的な配合であるが、設計基準強度に対し相当高い強度発現を示す。

・早期強度を高めるためにセメント量を増やすようなことがあれば、耐久性に悪影響を及ぼす。ただし、強度を下げると乾燥収縮は一般的に大きくなる。

4) 収縮解析の中間報告

・山中川東、自然田の2橋について3次元FEMにより乾燥収縮・水和熱に対する時刻歴解析を行なった結果を報告。

・山中川東の損傷部(P2~P3)は、標準的な乾燥収縮度(コンクリート標準示方書式)では橋軸直角方向に5~6N/mm²程度の引張応力が生じ、ひび割れ指数は0.5程度となる。その引張応力を全て鉄筋で受け持たせた場合のひび割れ幅は計算上0.3mmとなるが、実際のひび割れ幅は0.45mm程度のため、乾燥収縮度

は標準値の 1.5 倍程度であった可能性がある。

・自然田高架橋の場所打ち床版に注目すると、標準的な乾燥収縮度での最大主応力度は $1.0 \sim 1.4 \text{N/mm}^2$ 、ひび割れ指数は $1.8 \sim 2.4$ となる。従って、乾燥収縮度は標準値の 2 倍程度であった可能性がある。

・以上の結果はクリープ・鉄筋の影響を考慮していないため、実際の応力は解析値より小さいと思われる。

・今後は、損傷部位と解析結果の相関を整理する。さらに、ひび割れ幅と間隔より収縮度を推定してみる。

5) 圧縮強度試験・静弾性係数試験結果 (速報)

・石田高架橋 P67 の結果では、圧縮強度は $36 \sim 41 \text{N/mm}^2$ ($f_{ck} = 24 \text{N/mm}^2$)、静弾性係数は $21 \sim 25 \text{kN/mm}^2$ (計算値 $E_c = 30 \text{kN/mm}^2$) となった。

・強度と弾性係数の相関を整理することで、原因の絞込みが可能になると思われる。同一原因の場合、損傷の差は拘束条件の差となる。

5. 資料： 第 2 回議事録 (案)
 コア採取の最終方針
 コア抜き試料を用いた収縮試験について
 他工事における骨材試験、収縮試験結果の紹介
 解析結果の概要 (山中川東、自然田)
 コア採取位置図
 圧縮強度試験、静弾性係数試験結果 (速報)

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第4回)

議事概要

1. 日 時：平成21年3月18日(水) 15:00~17:00

2. 場 所：土木学会関西支部会議室

3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長

井上委員、綾野委員、渡辺委員

沢田委員(田口委員の代理)、森田委員

山本(剛)幹事、和田幹事、山本(貴)幹事、小林幹事

(オブザーバー8名)

欠席者：河野委員

4. 議事概要

1) 詳細点検結果

・橋梁定期点検(平成17年度、18年度)と同じ点検員による点検結果(近接目視)について報告。前回マーキング(白色)と異なるひび割れを青色でマーキングした。

・山中川東の上部、自然田の床版とP23橋脚、菟砥川の床版とP36橋脚、石田のP67橋脚について青色マーキングが発生した。ただし、以前の白色マーキングが降雨で消えている場合があり(特に下部工)、青色マーキングが必ずしも新規に発生したひび割れとは限らない。

・前回確認したひび割れ(白色)については、幅の変化はほとんどなかった。

・代表的なひび割れについてBS法で深さを測定した。貫通ひび割れはなかったが、概ね鉄筋位置まで達していることが分かった。

2) コア抜き調査(中間報告)

・本日までにデータが得られた7箇所のコア抜き位置における、圧縮強度と静弾性係数の相関を報告。圧縮強度は設計基準強度以上発現しているが、強度に応じたヤング係数は、コンクリート標準示方書による標準値の60~90%に留まっている。

・これに対し、菟砥川と自然田の上部工($ck = 30\text{N/mm}^2$)について、特に強度に対するヤング係数の比率が低い点が問題であるとの意見があった。また実測値は、「非破壊試験を用いたコンクリート構造物の健全度診断マニュアル」による静弾性係数の標準値と比較すべきではないか、という意見があった。

・A法(化学法)によるASR判定を行った結果、金熊寺川(下部工) = 無害、山中川東(上部工) = 有害、自然田(上部工) = 無害、菟砥川(上部工) = 有害、という結果になった。これを踏まえ、有害判定の骨材には迅速モルタルバー法を実施することとした。

3) コア抜き試料による収縮試験結果(速報)

・自然田、菟砥川、石田、金熊寺川について、躯体表面から290mm以深より採取したコアで収縮試験を実施した結果の報告があった。乾燥期間10日での結果(3本の平均)は、自然田が最大で 502μ (3本の平均)、金熊寺川が最小で 246μ となった。

・水分損失(%)を横軸、乾燥収縮ひずみを縦軸としたグラフでは、菟砥川の

勾配が最も大きく、石田が最も小さい結果となった（一般的に傾きが小さいほど、骨材が悪い傾向にある）。

・コア抜き時の硬さでは、自然田が最もやわらかく、金熊寺川が硬かった。硬度が低いほど、乾燥収縮の進行度が大きい傾向が認められた。

・自然田はコア抜き時に茶色の粉が出ていたが砂岩系では珍しく、石田（下部工）のコアは高炉Bを使用しているが色が白っぽい、との報告があった。

4) クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果

・国交省側で実施した解析について報告。

・自然田は床版のみを取り出した部分モデル、山中川東は施工手順を追った全体系モデルとしている。解析による引張応力は、自然田の床版で 2.5N/mm^2 程度、横桁で $1.5\sim 2.5\text{N/mm}^2$ 程度、山中川東の押出し部 - 場所打ち部の接合部はP3側で $1.0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ 、P2側で $1.0\sim 1.5\text{N/mm}^2$ 程度となった。

・また、ヤング係数をコンクリート標準示方書の標準値に対し70%に低減したところ、発生応力は1.2~1.4倍に増加した。

・以上に対し、ヤング係数が低下すると応力も一般的には低下するので、境界条件も含め入力値のチェックが必要との意見があった。また、今後は実際の物性値を使って解析を行なう方針を確認した。

5) 弾性解析の結果

・前回に引き続き、土木学会で実施した解析について報告。

・山中川東はクリープの影響を簡易的に評価したところ、応力が2割程度に低減した。また、損傷が報告されていない部位の発生応力は解析でも小さかった。さらに、実際のひび割れ幅、間隔より推定される収縮度は 400μ 強である、等の報告があった。

・自然田は、損傷部として張出床版、支点横桁にも注目したが、やはり標準的な乾燥収縮度では引張強度を上回る応力が発生しないことを確認した。また、中間床版でひび割れが記録されていない部分の応力は、解析でも小さかった。さらに、実際のひび割れ幅、間隔より推定される収縮度は 800μ 強である、等の報告があった。

・これに対し、乾燥収縮の部材内外での進行度差による内部拘束応力の評価と、実際の物性値による解析が今後の課題として挙げられた。

6) 次年度の取組み

・コア抜き試験、解析結果が概ね出揃う時期として6月に委員会を開催し、原因についてある程度の絞り込みを行なう方針で一致した。

5. 資料： 第3回議事録（案）
議事録要約版
詳細点検結果
コア抜き調査（中間報告）
コア抜き試料による収縮試験結果（速報）
クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果
次年度の概略スケジュール

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第5回)

議事概要

1. 日 時：平成21年7月17日(金) 10:00~12:30

2. 場 所：土木学会関西支部会議室

3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長

河野委員、井上委員、綾野委員

渡辺委員、山本(剛)委員、森田委員

山元幹事、和田幹事、小林幹事

(オブザーバー8名)

欠席者：山本(貴)委員

4. 議事概要

1) 委員・幹事の変更

・田口委員

山本(剛)委員(近畿地整企画部)に交代

・山本(剛)幹事

山元幹事(近畿技術事務所)に交代

2) 各種試験結果

採取したコアによる各種試験結果について

・圧縮強度、引張強度は設計値以上。静弾性係数はコンクリート標準示方書の標準値以下となった。

・中性化、塩害については問題がない結果となった。

・骨材試験では、4ヶ所のコアでA法(化学法)の結果が「無害でない」となった。

・配合推定試験では、ほとんどが配合報告書のW/Cに近い結果となった。

生コンを用いた乾燥収縮試験

・E産の粗骨材と、別産地(B産)の粗骨材では、1週ひずみが265 μ (コンクリート標準示方書による予測値の122%)、183 μ (同84%)となった。前者の最終予測値が1000 μ を越えるため、コンクリート標準示方書による1週ひずみの120%を閾値に設定することが提案された。

3) クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果

・弾性係数、乾燥収縮度をパラメータとし解析を行なった。感度分析では、乾燥収縮度の影響の方が大きかった。

・解析結果より、7日で200 μ 程度の収縮量で最終的なひび割れ指数が1程度となった。

・以上の報告に対し、ひび割れ指数を1.45で制御した場合の検討と、クリープ係数の考え方に対する整理が課題として挙げられた。

4) コア抜き試料による収縮試験結果

収縮試験結果

最終ひずみの回帰値として、自然田1,100 μ 、金熊寺川600 μ 、菟砥川760 μ の値が得られた。

乾燥収縮ひずみ解析

水分移動解析を行ない、部材内外の乾燥収縮進行度差により生じる内部拘束応力を定量評価した。Dischingerの近似式でクリープの影響を考慮した最大主応力は、石田高架橋の橋脚モデルで1.8N/mm²になった。

5) 全体系解析結果

山中川高架橋、菟砥川高架橋、自然田高架橋（実際の物性値による解析）の解析結果について報告があった。

6) 損傷部の評価と補修工法の選定

・「コンクリートのひび割れ、補修、補強指針 - 2009 - 」によると、ひび割れは「評価」であり、期待延命期間を20年以上とした場合、ひび割れ幅が0.3mm以下の場合、補修不要という結果になった。

・指針によると、ひび割れ幅が0.2mm～1.0mmの場合には、補修方法として「注入工法」が選定される。

・その他、山中川東の交差部には表面被覆工、山中川のウェブひび割れがASRの場合にはシラン系高含浸塗布材の使用、プレビーム桁の床版部には予防保全を目的に表面含浸工法の使用を行なうことが提案された。

7) 再発防止策

・設計的対応においては、不静定力算出時の乾燥収縮度の引き上げが提案された（現行150 μ JIS試験結果に応じ割増し）。また、曲げひび割れ幅の算出についても、鉄道指針に準拠し300～450 μ への引き上げが提案された。

・材料的対応については、「コンクリートの収縮問題検討委員会」（日本コンクリート工学協会）の報告内容について紹介がなされた。

5. 資料：
- 平成21年度委員会の構成とスケジュール
 - 第4回議事録（案）
 - 検討の流れ
 - 各種試験結果
 - 乾燥収縮ひずみの予測
 - 山中川東 画像解析結果
 - クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果
 - コア抜き試料による収縮試験結果
 - 乾燥収縮解析結果
 - 全体系解析結果（山中川・菟砥川）
 - 損傷部の評価と補修工法の選定
 - 再発防止策について
 - 平成20年度委員会報告書（CD）

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第6回)

議事概要

1. 日時：平成21年8月27日(木) 14:00~17:00

2. 場所：土木学会関西支部会議室

3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長

河野委員、井上委員、綾野委員、山本(貴)委員

渡辺委員、山本(剛)委員、森田委員

山元幹事、小林幹事

(オブザーバー16名)

欠席者：和田幹事

4. 議事概要

1) クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析

・自然田の横桁に生じた実際のひび割れ幅から収縮度、応力を想定し、ひび割れ指数1.45を達成する乾燥収縮度を解析で求めた。結果は、最終予想値の1,200 μ に対し、782 μ となった。

・この報告に対し、解析では乾燥開始3日後の弾性係数など初期材齢の物性値を使用しているが長期材齢でよいのではないか、という意見があった。また、解析は限定された部位や現象にこだわるのではなく、もう少し幅広い視点から取り組む必要がある等の意見があった。

2) 全体系解析

・菟砥川高架橋、自然田高架橋、山中川東高架橋、山中川高架橋について、コンクリート標準示方書の推定式による乾燥収縮度を2倍とした場合の、ひび割れ指数コンター図、主応力ベクトル図を点検調書と対比した結果の報告があった。

・温度応力解析ソフトを使用した全体系解析は、外部拘束等により生じる有害なひび割れをある程度、表現できることから、検討の初期段階での使用に適するのではないか、という評価がなされた。

3) 乾燥収縮ひずみ解析

・自然田の床版をモデルに、部材内部の水分移動に着目した解析結果の報告があった。

4) 補修に関する基本方針の策定

・「コンクリートのひび割れ、補修、補強指針 -2009-」(日本コンクリート工学会)に従い、全てのひび割れに対し幅0.3mm以下は無補修、0.3mmを超える場合は注入工法で補修を行うという方針が決定した。

・山中川東の交差部におけるシート系の表面被覆工や、プレベーム桁の床版部分における表面含浸材の塗布については、「予防的に行ってもよい」という表現に留めることになった。

5) 再発防止策

早期健全度判定

・最終ひずみを 8×10^{-4} (849 μ)以下とするための、乾燥開始材齢7日、28日時点での閾値とそのカバー率について報告があった。乾燥開始材齢28日において、コンクリート標準示方書の予測値に対し120%という閾値を設定した場合、22例のデータにおけるカバー率は86%になったが、最終ひずみが849 μ を上回るデータも8例になった。

JASS5 の規定

JASS5 の規定について、紹介がなされた。

- ・特記がない場合の乾燥収縮率は、計画供用期間の級が長期（100年）超長期（200年）のコンクリートでは 8×10^{-4} 以下とする。
- ・ヤング係数は、圧縮強度との相関式による推定値の 80% 以上の範囲内にあるものとする（今回のコア抜き試験結果に当てはめると、コンクリートが不健全な部分のコアは、この規定を満足しない）。
- ・以上は、工事開始前の試験練り、または、類似の材料・調合による試験結果で確認する。

検討フロー

- ・発注者（設計者）側、受注者側のそれぞれの取り組みを明確にしたフロー（案）の報告があった。
- ・発注者側は、まず乾燥収縮に対する配慮が必要な構造物かの判断を行い、必要と判断される構造物については、建設地点に健全なコンクリートが供給可能か、調査を行うことを原則とする。また、プラントが存在しても、乾燥収縮度がある一定の範囲（例えば 800μ から $1,200 \mu$ の間）にある場合には、乾燥収縮度を割り増して設計のチェックを行うことを原則とする。
- ・受注者側は、試験練りにより使用予定のコンクリートがある一定の基準（例えば乾燥収縮度なら 800μ 以下）にあることを確認する。基準を満足しない場合、材料による対応、または設計による対応を実施するものとする。
- ・なお、設計で使用する乾燥収縮度の検討のため計画されていた紀北東道路工事の実物大実験については、来年 6 月から 1 年間の予定で実施する見通しであるとの報告がなされた。
- ・フローに記載されている閾値等の数字は、次回委員会までに幹事会で検討することとした。また、設計や現場でのチェック方法についても、現実的な方法を検討することとした。

6) その他

拘束膨張及び収縮試験、長さ変化試験、自己収縮試験、凍結融解試験を追加で実施することになった（近畿技術事務所で実施）。

5. 資料：

第 5 回議事録（案）
クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析
全体系解析
乾燥収縮解析（自然田床版）
補修方法まとめ
長さ変化試験によるコンクリートの早期健全度判定
JASS5 の規定について
収縮に対する検討フロー（案）
対策について
自己収縮試験結果概要
アンケート調査「骨材状況を探る」
工事における技術提案の事例

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第7回)

議事概要

1. 日時：平成21年10月27日(火) 14:00~17:00
2. 場所：土木学会関西支部会議室
3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長
河野委員、井上委員、綾野委員、山本(貴)委員
渡辺委員、山本(剛)委員、森田委員
山元幹事、和田幹事、小林幹事
(オブザーバー17名)

4. 議事概要

1) 対策フローについて

新しい対策フロー(案)の紹介がなされた。

・対策フローは、【理想版】、【実用版】、【地域限定版】の3種類とする。【理想版】は対策の理念を表し、【実用版】は具体的な運用方法を示す。また、【地域限定版】は、第二阪和国道に対してのみ有効とする。

・各フローは、「計画」「設計」「施工」「維持管理」の4段階で構成される。

・「計画」は、計画段階における発注者の取り組みである。乾燥収縮ひずみの特性値(例えば 800μ)が設定できない、又は施工実績からひび割れの発生が見られる場合には、乾燥収縮ひずみの特性値を 1000μ として性能照査型設計を行うこととしている。ただし【地域限定版】では、ヤング係数がある目標値を上回っていれば、性能照査型設計を行わなくてもよいこととしている。

・「設計」は、設計段階における設計会社の取り組みである。設計会社は、「計画」で発注者に指示された設計手法を用いる。これが従来型設計の場合には、乾燥収縮ひび割れの照査を省略したことを設計図書等に記載する。

・「施工」は、施工段階における施工者の取り組みである。施工計画の際、乾燥収縮ひずみを調査し、特性値(例えば 800μ)を上回っていれば材料的な対応の実施、または工場の変更を行う。ただし【地域限定版】では、ヤング係数がある目標値を上回っていれば、通常施工を行ってよいことにしている。

・「維持管理」は、維持管理段階における管理者の取り組みである。当該構造物について乾燥収縮ひび割れの照査が行われていない場合、同等の設計および配合条件を用いた類似構造物の点検記録に基づき、維持管理計画を立案する。

フロー(案)に対し、以下の意見があった。

・【地域限定版】において、乾燥収縮ひずみが大きくても、ヤング係数の規定をクリアすれば従来どおりの設計・施工を行ってよいことになっているが、必要以上に高強度化しないための縛り(例えば設計基準強度の1.5倍)が必要である。また、そうしたコンクリートの使用に際しては、養生を長く行うなど、何らかのペナルティが必要である。

・委員会で得られた意見を集約した概念的なフローを次頁に示す。

閾値等の設定について

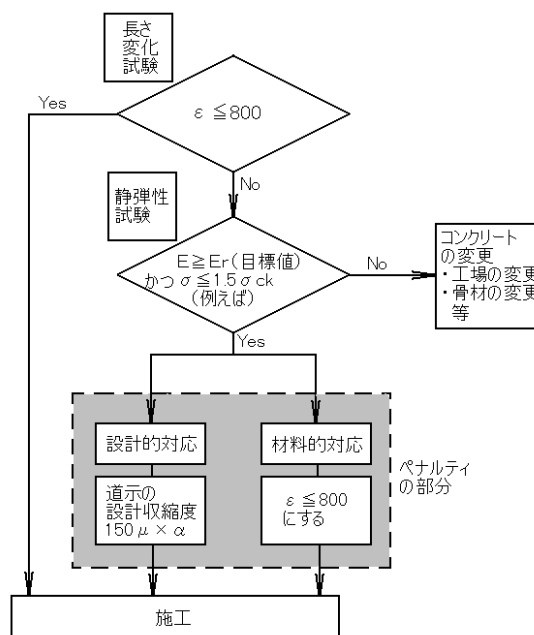
・乾燥収縮ひずみの上限値は、【コンクリート標準示方書 施工編】より 1000μ と設定することとした。

・乾燥収縮ひずみの標準値については、a) JCI の資料により、1979年の段階では 800μ を超えるコンクリートはほとんど存在していない、b) コンクリート標準示方書の収縮ひずみ推定式は、最大値として 800μ 程度を予測する、c) 実構造物の鉄筋比や体積表面積比、クリープの影響を簡易的に評価すると、JIS 試験値の 800μ と道示の設計値 150μ を関連づけることができる、等により、 800μ 以下であるという推測が成される。

- ・これに対し、 800μ という数字は、現段階では妥当なものと考えられるが、設計では水和熱による残留応力も考慮されないため、やはり養生の延長等による品質向上策が必要である、等の意見があった。
- ・ヤング係数のクリアすべき目標値については、NEXCO データの使用が可能であればそれに基づき議論を行うこととした。

2) クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果

- ・T.B.法で e を3日時点の e と cc から定義し、 $\alpha = 0.39$ とすると、逐次計算の結果に近くなった。
- ・山中川東高架橋において、FEM モデル範囲外の剛性評価(梁モデル)と支承による弾性支持、有効プレストレスの評価とPC鋼材の換算断面積評価を行い、再度解析を実施した。結果、損傷部の特徴的な橋軸方向ひび割れを表現することができた。
- ・これに対し、プレストレスだけの影響を調べるため、乾燥収縮度をゼロにした解析を行ってはどうか、という意見があった。



3) その他

現場採取コンクリートの品質試験結果

- ・26週の乾燥収縮ひずみは、工事（粗骨材：B産）が 767μ 、工事（粗骨材：E産）が 920μ となった。
- ・石田高架橋A2の膨張量測定結果（3ヶ月）より、ASRに対し有害でないと判断された。
- ・コンクリートの各種収縮試験及び凍結融解試験（中間報告）
 - ・試験練りでは、収縮低減剤を使用した場合の空気量はコントロールが困難であった。
 - ・粗骨材の吸水率は、標準品が0.55%程度であるのに対し、E産は1.79%（許容値3.0%）であった。
 - ・凝結試験では、収縮低減剤を混和した場合、始発が1.5hr程度、遅くなった。
 - ・拘束膨張・収縮試験によると、膨張材のみより収縮低減剤を添加した方が収縮低減効果の高いことが確認された。

その他

- ・フローは現場で使えるものにする、大きなひび割れが発生しないように整理を行うこと、2点の方針について確認が成された。
- ・今後、委員会成果を論文等で発表する方針とした。

5. 資料:

- 第6回議事録（案）
- 対策フロー
- 対策フローについて（補足）
- クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果
- 現場採取コンクリートの品質試験結果
- 各種収縮試験及び凍結融解試験（中間報告）
- （付録）PC橋の設計結果からの考察
- （乾燥収縮度に対する感度分析）

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第8回)

議事概要

1. 日 時：平成21年12月22日(火) 14:00~17:00
2. 場 所：土木学会関西支部会議室
3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長
河野委員、井上委員、綾野委員、山本(貴)委員
渡辺委員、山本(剛)委員、森田委員
山元幹事、和田幹事、小林幹事
(オブザーバー11名)

4. 議事概要

1) 対策フローについて

理想版フロー

- ・小委員会・幹事会にて作成された最終案が提示された。
 - ・名称を再検討することとしたが、内容については承認された。
- ###### 地域限定版フロー
- ・理想版と同様、最終案が提示された。
 - ・前回からの変更点は以下のとおり。
 - 検討や対策が必要となる収縮ひずみの下限値をフロー中では特性値という表現とし、具体的な数値は解説で述べることにした(暫定値として26週で 800μ)。
 - 早期判定は適切な方法で行ってもよいこととし、解説の参考資料中に早期判定の目安として、4週で 400μ 以下、8週で 530μ 以下の数値を掲げた。
 - 収縮ひずみが特性値を実際に上回るか、上回ることが予想される場合、コンクリート(粗骨材)の変更が可能かどうかをまず問うことにした。
 - コンクリート(粗骨材)の変更が困難な場合、コンクリートのヤング係数と圧縮強度の確認を行い、さらに設計的、材料的な対応が必要であるとした。なお、受け取り基準は、設計基準強度の1.5倍以下の圧縮強度の条件で、ヤング係数が示方書標準値の80%以上であることにした。
 - 対応を実施したコンクリートでも、養生をできるだけ延長し品質向上を付加的に図ることとした。
 - ・これに対し、以下の意見があった。
 - 「品質管理」、「検査」の項目をフローから除く。
 - 【解説2】【参考1】で述べている「道路橋示方書による設計の限界」は不要。
 - 800μ の数字的な裏付けは【解説】で大まかな説明を行う。
 - 【参考4】の「設計上の限界乾燥収縮度」について注釈を追記する。また、横方向の検討は全断面有効とした縁応力での評価とする。
 - 【参考5】の 50×100 供試体による迅速判定法を委員会として推奨するかどうかは、今後の検討課題とする。
 - ・以上、【解説】や【参考】の内容は委員・幹事の意見を踏まえ修正を行うこととし、理想版と同様、名称を再検討することとしたが、フローの内容は基本的に承認された。

2) クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果について

- ・前回に引き続き、山中川東高架橋を対象にした解析結果の報告があった。
- ・乾燥収縮を0として解析を行うと発生する応力は微細なものとなり、プレストレスの影響は支配的でない。

・ひび割れ指数が1以上となる限界の乾燥収縮度は逆解析で586 μ となった。

3) コンクリートの各種試験結果及び凍結融解試験(中間報告)

・自己収縮試験の材齢8週での結果は、配合NO.1(無添加)が212 μ の収縮、配合NO.3(収縮低減剤添加)が137 μ の収縮となり、配合NO.2(膨張材添加)は65 μ の膨張となった。

・拘束膨張・収縮試験

材齢8週での結果は、水中養生7日後を基長とすると、配合NO.1(無添加)が563 μ 、配合NO.2(膨張材添加)が575 μ 、配合NO.3(膨張材+収縮低減剤添加)が420 μ となり、収縮低減剤の効果が確認された。

・長さ変化試験

材齢8週での結果は、配合NO.1(無添加)が768 μ 、配合NO.3(収縮低減剤添加)が558 μ となった。また、配合NO.1(無添加)の長さ変化は、拘束膨張試験結果の1.27倍を示した。

・凍結融解試験

120サイクルまでの結果は、配合NO.1(無添加)の相対動弾性係数は100%を保っているが、配合NO.3(収縮低減剤添加)では41%まで低下した。

4) 乾燥収縮の進行度差による内部拘束応力の解析結果

・ $ck = 40\text{N/mm}^2$ の標準的なコンクリートを使用した $V/S = 25\text{mm}$ 、 150mm 、 300mm の3種類のモデルにおいて、内部拘束応力を算定した結果の報告があった。

・ $V/S = 25\text{mm}$ では、引張強度(2.7N/mm^2)を上回る引張応力は発生しなかったが、 $V/S = 150\text{mm}$ では材齢10日程度で、 $V/S = 300\text{mm}$ では材齢2週間程度で外縁の応力が引張強度を超過した。最終ひび割れ深さ(発生応力引張強度となる点の表面からの距離)はそれぞれ40mm、90mmとなり、最外縁の引張応力はそれぞれ最大で -7N/mm^2 、 -8N/mm^2 となった。

・これに対し、外縁の発生応力が最終的に圧縮に転じるのはおかしいとの意見があり、結果の妥当性は再度、幹事会で議論することとなった。

5) 変状の原因について

・幹事案が示された。

-主たる原因は「大きな乾燥収縮量」であり、その要因は「骨材品質」である。

-副次的要因として、現行設計法の限界が背景にあった。

・これに対し、副次的要因とされているものは今後の注意、という整理を行うこととし、基本的に了承された。

6) その他

日刊建設工業新聞(12/9)記事「収縮とひび割れ対策を探る」が話題提供として紹介された。

報告書の内容確認を行うため、平成22年3月に委員会を追加開催することとした。

5. 資料:

第7回議事録(案)

対策フロー(理想版)

対策フロー(地域限定版)

クリープ・鉄筋の影響を考慮した解析結果

各種収縮試験及び凍結融解試験(中間報告)

乾燥収縮の進行度差による内部拘束応力の解析結果

変状の原因について

収縮とひび割れ対策を探る(新聞記事紹介)

以上

「第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会」(第9回)

議事概要(案)

1. 日時：平成22年3月26日(金) 15:00~17:30

2. 場所：土木学会関西支部会議室

3. 出席者：宮川委員長、松井副委員長
井上委員、綾野委員、
渡辺委員、山本(剛)委員、森田委員
山元幹事、和田幹事、小林幹事
(オブザーバー11名)

欠席者 河野委員、山本(貴)幹事

4. 議事概要

1) 平成21年度報告書について

前回までに報告した内容からの追加と、修正・変更点は以下のとおり。

1. 対象橋梁と変状

・目視による診断結果を追加。

2. 調査・試験

・近畿技術事務所で実施中の各種試験は材齢13週までとなっており、中間報告とする(26週まで得られた段階で差し替え)。

3. 解析

・「全体系解析」 「部材に一樣な収縮を考慮した解析」に変更。

・部材内部の湿度移動に着目した応力解析を追加。

4. 変状の原因

・原因を以下とした。

【主たる原因は、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる骨材が使用されたことにあり、現行の指針・規格類の体系では、この種の骨材を選別することが不可能であることによる】

5. 補修方針

6. 再発防止策

・基本フロー

理想版フローから名称を変更し、基本方針、作業手順に関する解説を追加した。

・第二阪和限定フロー

地域限定版フローから名称を変更した。内容の変更点は、以下のとおり。

-第二阪和道路限定とする。

-特性値は 8×10^{-4} にする(従前 800μ)。

-ヤング係数の測定における圧縮強度の条件を「呼び強度」の1.5倍以下とする(従前「設計基準強度」の1.5倍以下)。

参考資料

・参考2で、湿度移動解析に基づく乾燥収縮ひずみの解析結果を追加。

・参考3で、1~3径間のラーメン構造の乾燥収縮による発生応力の試算結果を追加。また、横方向の検討結果を、下床版のRC計算から縁応力の算定に変更。

・参考4で、小口径コア(50×100mm)による42日目の収縮ひずみが、JIS試験における180日目の収縮ひずみに相当する計測データを追記。

・参考5で、乾燥収縮による内部拘束応力について、解析結果を修正。V/S=300mm(PC上部工相当)の場合、材齢2年で表面におよそ -4N/mm^2 の引張応力が生じる。

これに対し、以下の意見があった。

- ・第二阪和限定フローを他地域で適用するか否かについては、第二阪和で使用された骨材が流通しており、近畿地整全体の問題と捉えられることから、使用材料・環境条件が同じ場合には他地域でも使用できるものとし、「第二阪和の調査に基づく限定フロー」のような名称に改める。
- ・特性値を 8×10^{-4} としたことで、収縮ひずみは JIS 試験で 849μ まで許容されるが、解析では 800μ と 850μ で大きな差があるので注意、としているところ、応力差はこの程度である、という表現に改める。
- ・補修方針で、「ひび割れの原因は」を「ひび割れの主たる原因は」に改める。また、補修の要否について、「部位の状況等を考えて補修が必要かどうかを判断する」という表現を追記する。
- ・伸縮装置の不具合から生じる漏水については、報告書から削除する。
- ・報告書は、土木学会本部の委員会で検討中のケーススタディと内容のすり合わせを行う。また、報告書に対する意見は今後、幹事あてに寄せるものとし、幹事団で協議後、委員長判断を持って内容を決定する方針とし、了承された。
- ・報告書は 20 年度、21 年度を合本後、各委員に配布する。

2) その他

- ・紀北東道路で予定されている実物大供試体による収縮ひずみの計測試験について、近畿地整から内容の紹介がなされた。
- ・宮川委員長より、本委員会の終了宣言がなされた。

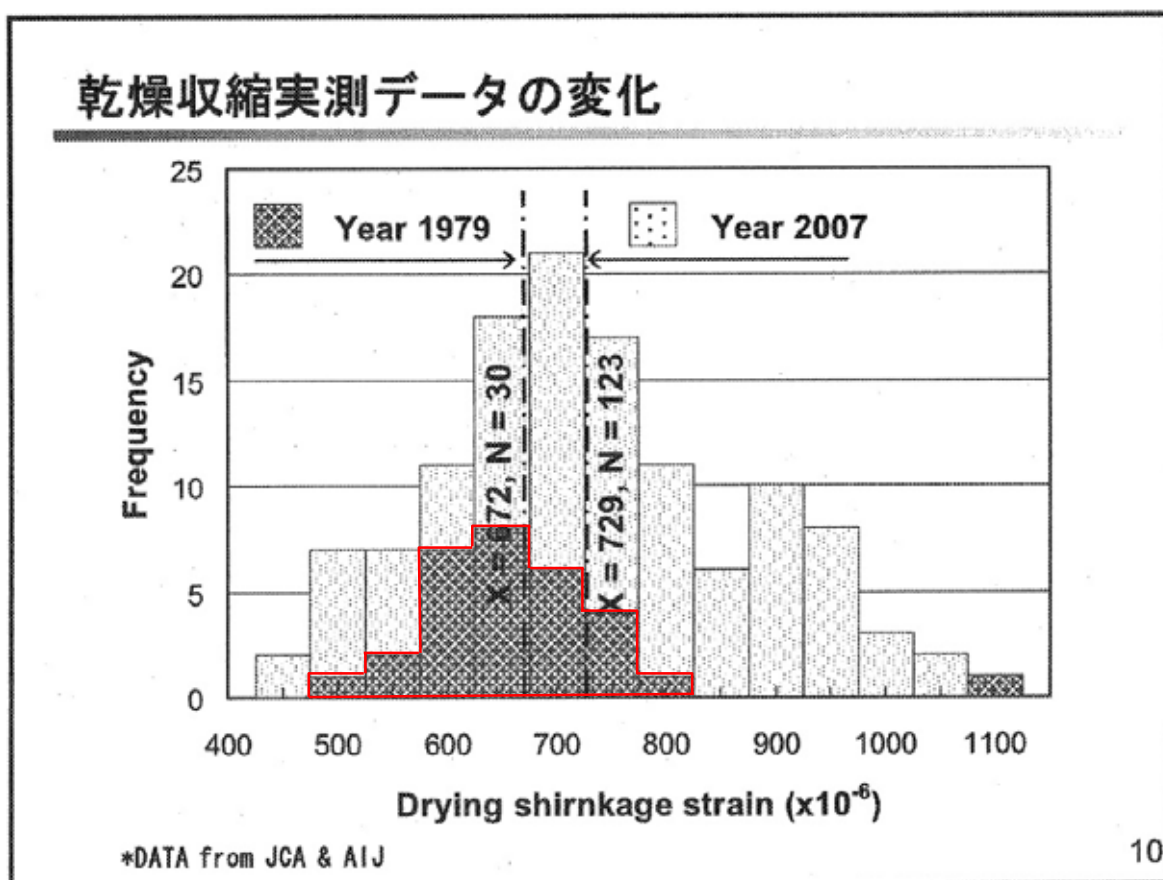
5. 資料:

平成 21 年度 委員会報告書
事務連絡
【レディミクストコンクリートにおける「JIS A 1122、
JIS A 5005 (硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験)」及び
「JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法)」
の試験の試行について】(平成 20 年 6 月 9 日)
事務連絡(案)
【コンクリート橋梁における「ひび割れ防止対策(案)」
について(試行)】
京奈和自動車道紀北東道路での乾燥収縮ひずみ測定について

以上

參考資料

【参考1】 乾燥収縮ひずみの計測結果



図参考 - 1. 乾燥収縮実測データの変化 【JCI 時間依存性委員会 資料】より

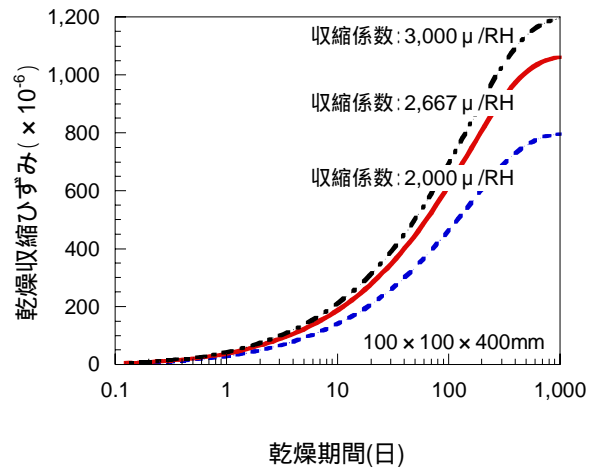
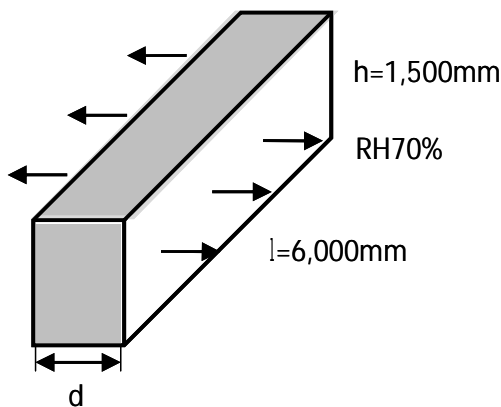
1979年のデータでは、乾燥収縮ひずみは600～750 μに集中しており、800 μを上回ることは希であったと思われる。これより、乾燥収縮が問題になる以前は、乾燥収縮ひずみとして800 μ以下を想定していたと推察される。

【参考2】湿度移動解析に基づく乾燥収縮ひずみの解析結果

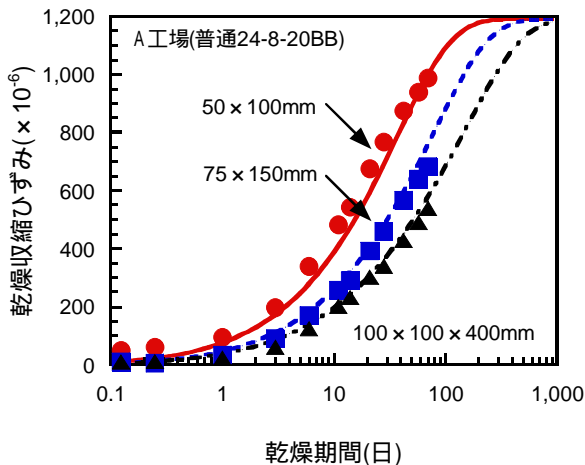
図参考 - 2に示す2面乾燥モデル（部材厚 d を変化させた、高さ $h=1,500\text{mm}$ 、長さ $l=6,000\text{mm}$ の角柱）において、乾燥開始から30年までの乾燥収縮ひずみを解析で求めた（使用ソフト：ASTEAMACS）。全てのケースで用いた拡散係数およびフィルム係数は、実際の生コンクリートより得られた値であり（図参考 - 3参照）、コンクリート部材の置かれる環境の相対湿度は70%とした。

収縮係数は、以下の3ケースで解析を行った（RH：相対湿度）

- ・収縮係数： $2,000 \mu/\text{RH}$ →RH60%での乾燥収縮ひずみの最終値が 800μ
- ・収縮係数： $2,667 \mu/\text{RH}$ →RH60%で $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体の乾燥期間26週での乾燥収縮ひずみが 800μ
- ・収縮係数： $3,000 \mu/\text{RH}$ →実際の生コンクリートの値
 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体の乾燥期間26週での乾燥収縮ひずみが 880μ

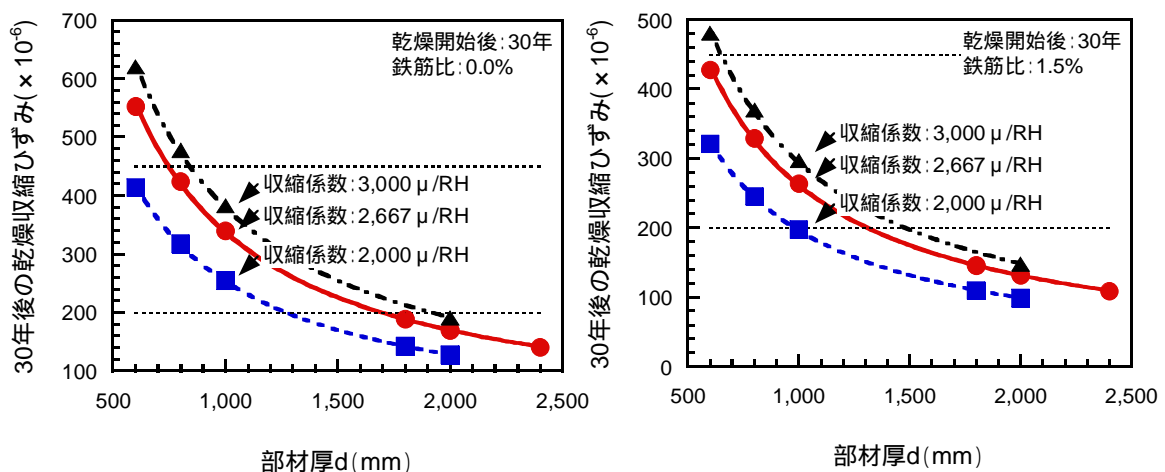


図参考 - 2 . 解析モデルと検討収縮係数



拡散係数 (mm^2/day)	$4.0e^{-1.0(1-\text{RH})}$
フィルム係数 (mm/day)	0.250
収縮係数 (μ/RH)	2,974

図参考 - 3 . 収縮係数 $3,000 \mu$ の実測データ



図参考 - 4 . 解析結果 (左:鉄筋比 0.0%、右;鉄筋比 1.5%)

解析結果を図参考 - 4 に示す。

JIS 試験における 26 週での乾燥収縮ひずみが 800 μ のコンクリートは、赤いラインで示される (青ラインは最終値が 800 μ のコンクリート、黒ラインは実測された大きな収縮係数のコンクリート)。ここで、PC 上部工を対象とした場合、部材厚の上限値は 700mm 程度のため、鉄筋比 1.5% の場合 (右グラフ) では 380 μ 程度の収縮ひずみとなる (鉄筋を考慮しない場合には 480 μ 程度: 左グラフ)。一方、200 μ 程度の収縮ひずみとなるのは、赤いラインで部材厚 1,300mm 程度、青いラインでも 1,000mm 程度と下部工クラスの構造物である。

このように、26 週の試験値が 800 μ のコンクリートを PC 上部工に使用した場合、道路橋示方書に示される標準的な乾燥収縮度 150 ~ 200 μ に対し、大きな乾燥収縮ひずみを生じさせる印象を与える。しかし、例えば、両端固定の条件で、300 μ の乾燥収縮ひずみが生じる場合に生じる内部応力は、クリープを考慮しない場合には、

$$\text{コンクリートの内部応力} = \text{コンクリートの弾性係数} \times 300 \mu \cdots (1)$$

となる。これに対して、TB 法に基づきクリープの影響を考慮した場合には、

$$\text{コンクリートの内部応力} = \frac{\text{コンクリートの弾性係数}}{(1 + \text{材齢係数} \times \text{クリープ係数})} \times 300 \mu$$

となる。材齢係数を 0.5 とし、クリープ係数を 2 とすれば、

$$\text{コンクリートの内部応力} = \text{コンクリートの弾性係数} / 2 \times 300 \mu \cdots (2)$$

となる。(1) (2) の比較により、クリープの影響を考慮することで、内部応力はクリープの影響を考慮しない場合の半分になることが分かる。

コンクリートの乾燥収縮ひずみの影響を不静定力の解析において用いる場合等、クリープの影響も含めた設計値としての乾燥収縮ひずみが求められる場合には、図参考 - 4 に示される値の約半分の値を用いなければ、過剰な設計となる恐れがある。また、道路橋示方書

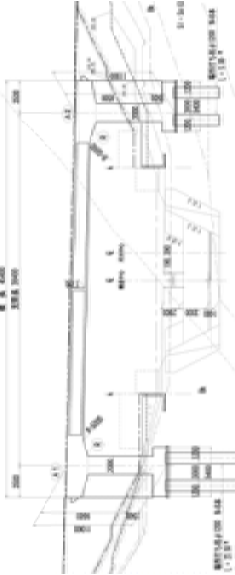

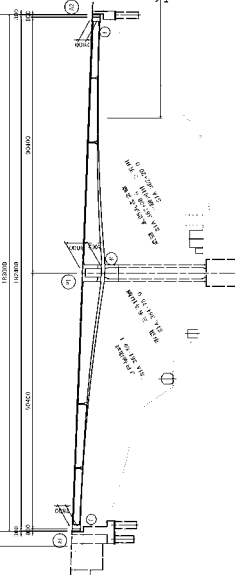
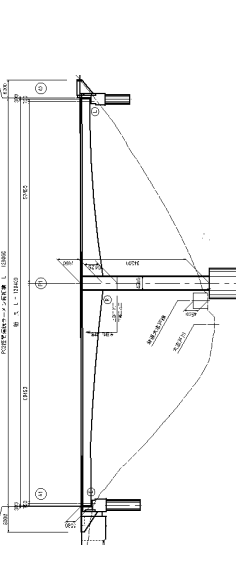
共通編 2.2.5 では「・・・実際の乾燥収縮度は条文に規定する値よりも大きい。しかし、乾燥収縮によって生じる不静定力はコンクリートのクリープのために弾性理論で計算した値よりもかなり小さくなるので、コンクリートの乾燥収縮度は 15×10^{-5} の値を用いることとした。」の記述があり、過剰な設計値とならないことに配慮したものである。さらに、山中川東橋梁の解析結果(5 - 4 参照)に示されるように、湿度移動解析に基づく解析結果は、実際の挙動に比べて、時間的に早い傾向にあり、検討を行う年数における実際のコンクリート部材の乾燥収縮ひずみは、解析結果より小さくなる傾向にある。

以上のことより、設計値として用いる乾燥収縮ひずみの値は、湿度移動に基づく解析結果の値をそのまま用いるのではなく、クリープの影響および雨露の影響等を加味した値とし、これまで用いられてきた 150μ を基本とすることとした。しかし、従来のコンクリートの収縮係数が $2,000 \mu/RH$ が想定される一方で、第二阪和国道限定フローでは、 $2,667 \mu/RH$ の収縮係数のコンクリートまで受け入れることを許容した。比較的薄い部材厚を有する PC 上部工の場合、下部工などのマッシブな部材に比べれば、乾燥収縮の進行は早く、特性値以下のコンクリートでも実構造物の収縮度が設計で仮定した値を上回る可能性がある。従って、設計用乾燥収縮度の引き上げも将来、視野に入れる必要があると思われるが、本委員会では、具体的な数値の提案にまでは至らず、今後、さらなる研究が必要と考えられる。


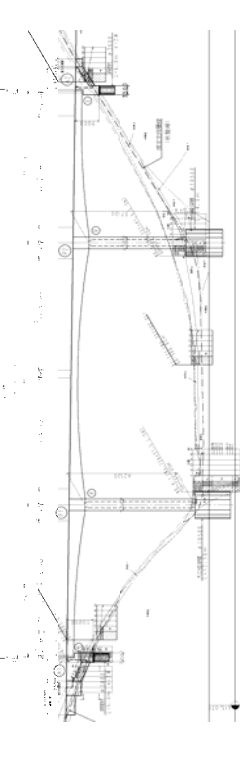
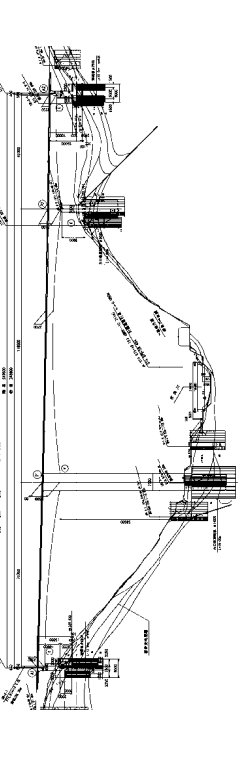
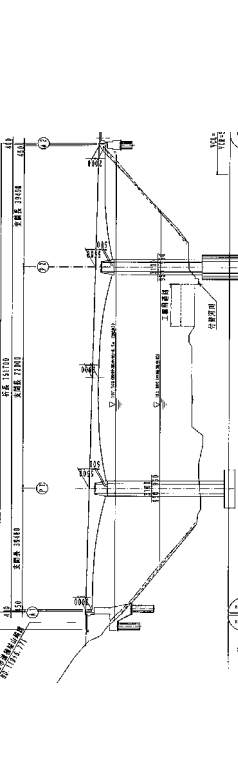
【参考3】設計実例における検証

(1)主方向の設計例

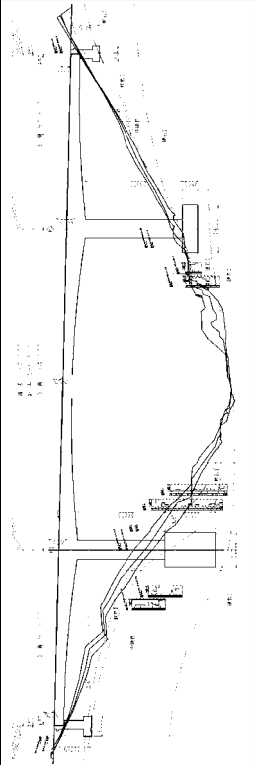
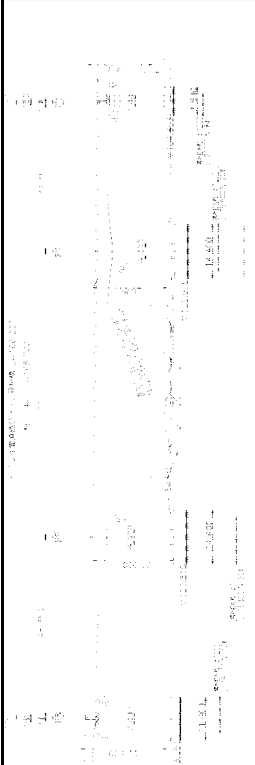
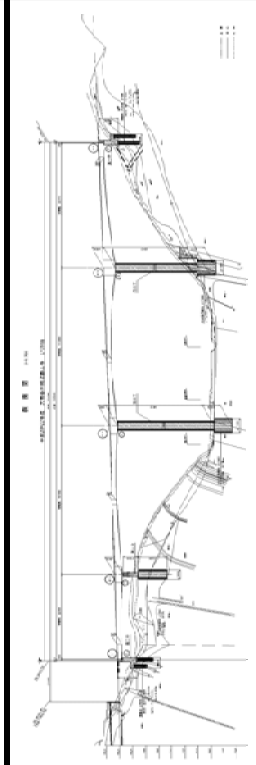
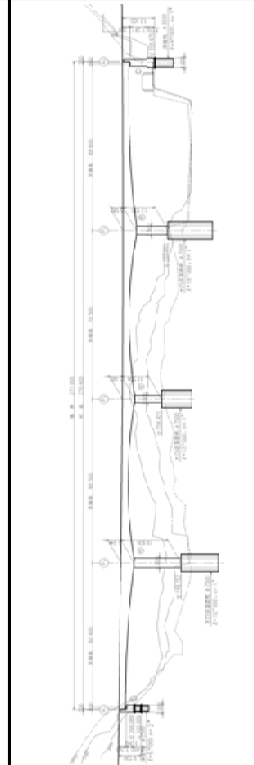
表参考 - 1 . 乾燥収縮による上部工の縁応力度(その1)

	橋梁形式	一般図	設計上の乾燥収縮度	乾燥収縮による発生応力度	対象径間
単径間 ラーメン橋	門形ラーメン箱桁橋 橋長 L = 45.4m 支間割り 38.4		200 μ	-0.48	A1 ~ A2下縁
	2径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 103.0m 支間割り 50.65+50.65		195 μ	-0.29	A2 ~ P1下縁
Tラーメン 橋 (その1)	2径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 183.0m 支間割り 90.4+90.4		190 μ	-0.01	A1 ~ P1下縁
	2径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 129.0m 支間割り 69.45 + 57.45		195 μ	-0.03	A1 ~ P1下縁

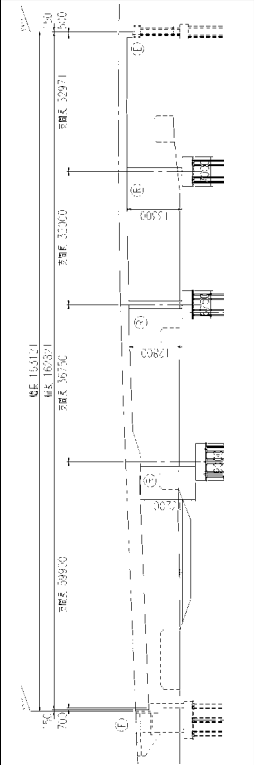
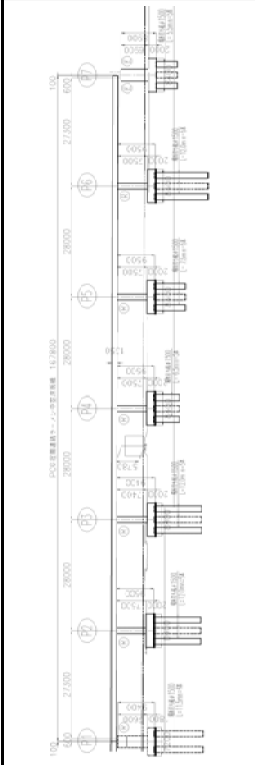
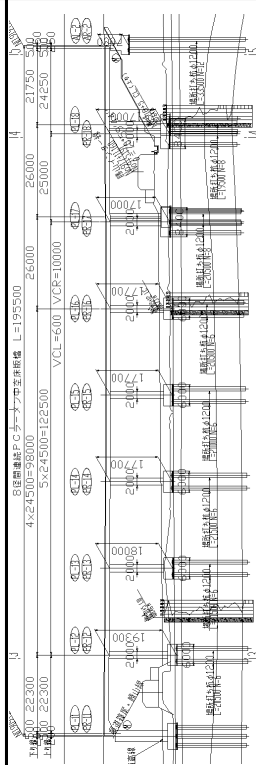
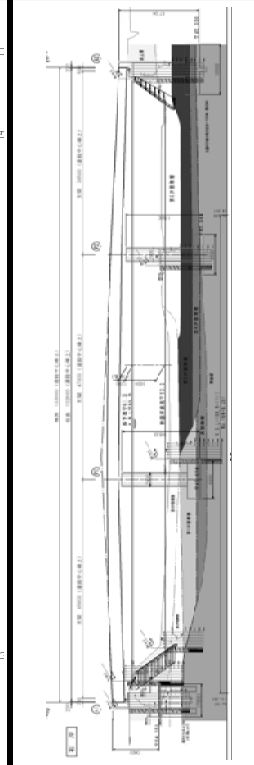
表参考 - 2 . 乾燥収縮による上部工の縁応力度(その2)

	橋梁形式	一般図	設計上の乾燥収縮度	乾燥収縮による発生応力度	対象径間
Tラーメン橋 (その2)	2径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 180.0m 支間割り 88.9 + 88.9		195 μ	0.00	A1 ~ P1下縁
	3径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 217.0m 支間割り 57.4+100.0+57.4		190 μ	-0.39	P1 ~ P2下縁
多径間 ラーメン橋 (その1)	3径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 249.8m 支間割り 79.7 + 118.7 + 49.4		195 μ	-0.08	P1上縁
	3径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 152.5m 支間割り 39.4 + 72.0 + 39.4		200 μ	-0.02	A1 ~ P1下縁

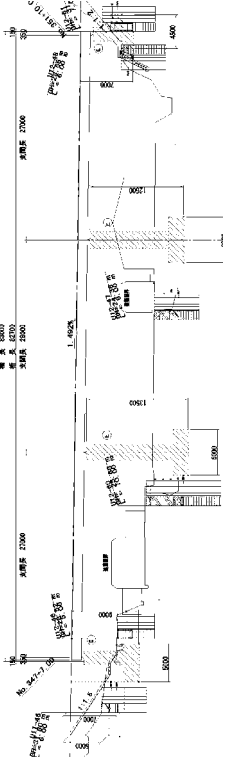
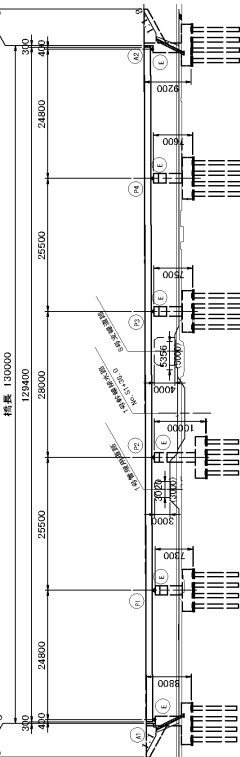
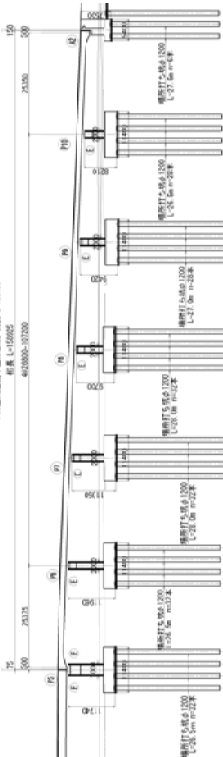
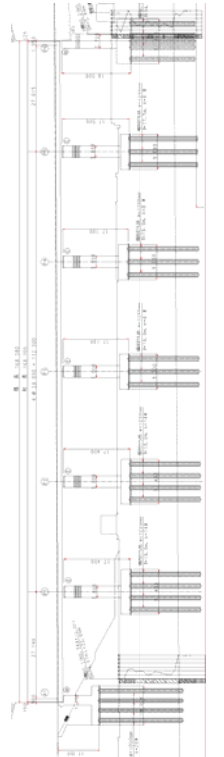
表参考 - 3 . 乾燥収縮による上部工の縁応力度(その3)

	橋梁形式	一般図	設計上の乾燥収縮度	乾燥収縮による発生応力度	対象径間
多径間 ラーメン橋 (その2)	3径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 197.0m 支間割り 51.5 + 94.00 + 51.5		200 μ	-0.48	P1上縁
	3径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 166.0m 支間割り 48.35+77.00+29.35		195 μ	-1.01	P9 ~ P10下縁 (中央径間)
	4径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 391.0m 支間割り 63.7+112.0+119.0+93.7		195 μ	-0.60	P2 ~ P3下縁
	4径間連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 271.0m 支間割り 60.4 + 68.5 + 70.5+69.6		190 μ	-1.50	P2 ~ P3下縁

表参考 - 4 . 乾燥収縮による上部工の縁応力度(その4)

	橋梁形式	一般図	設計上の乾燥収縮度	乾燥収縮による発生応力度	対象区間
	4径連続ラーメン箱桁橋 橋長 L = 163.1m 支間割り 59.9+36.7 +32.0+32.9		195 μ	-0.38	P2上縁
多径間 ラーメン橋 (その3)	6径連続ラーメン中空床版橋 橋長 L = 167.8m 支間割り 27.3+4x28.0 + 27.3		190 μ	-0.95	P6上縁
	8径連続ラーメン中空床版橋 橋長 L = 195.5m 支間割り 22.3+5@24.5 +25.0+24.25		190 μ	-1.50	P13上縁 (端部から 2番目)
連続桁橋 (その1)	3径連続箱桁橋 橋長 L = 133.0m 支間割り 45.8+47.0+38.5		支承条件をFix - Movとしており、乾燥収縮の影響が現れない。		

表参考 - 5 . 乾燥収縮による上部工の縁応力度(その5)

	橋梁形式	一般図	設計上の乾燥収縮度	乾燥収縮による発生応力度	対象径間
	3径間連続中空床版橋 橋長 L = 83.0m 支間割り) 27.0+28.0+27.0		200 μ	-0.02	P2 ~ A2下縁
	5径間連続中空床版橋 橋長 L = 130.0m 支間割り) 24.8+25.5+28 +25.5+24.8		190 μ	-0.02	P2上縁
連続桁橋 (その2)	6径間連続中空床版橋 橋長 L = 159.15m 支間割り) 25.375+4x26.8+25.35		190 μ	-0.06	P8上縁
	6径間連続中空床版橋 橋長 L = 168.38m 支間割り) 27.14+4@28.0+27.015		185 μ	-0.04	P1上縁

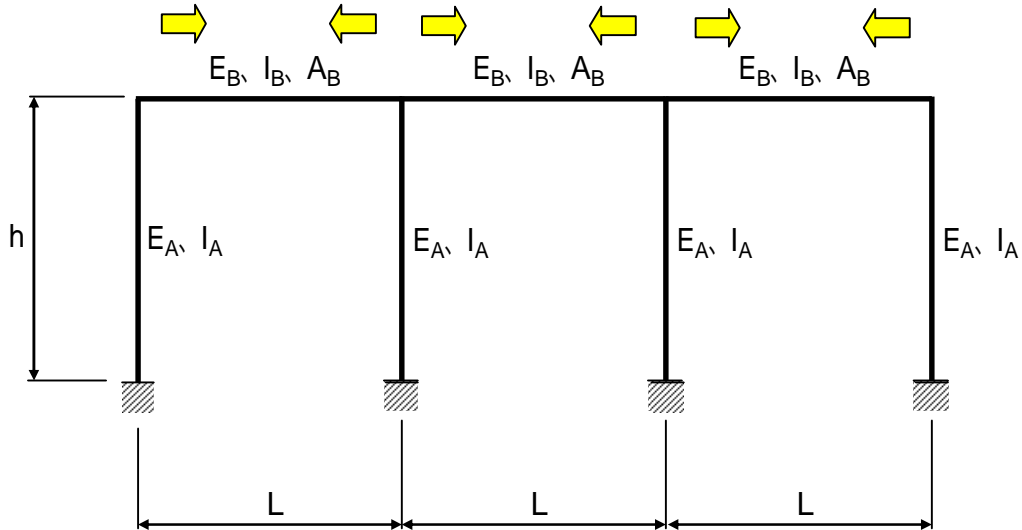
表参考 - 6 . 乾燥収縮による上部工の縁応力度(その6)

	橋梁形式	一般図	設計上の乾燥収縮度	乾燥収縮による発生応力度	対象径間
斜橋	3径間連続斜材付 型ラーメン中空床版橋 橋長 L = 63.0m 支間割り 15.15 + 34.5 + 13.35		150 μ	-0.56	P2 ~ P1下縁
	3径間連続斜材付 型ラーメン中空床版橋 橋長 L = 45.0m 支間割り 7.48 + 28.0 + 9.40		150 μ	-0.41	P1 ~ P2下縁

施工済み 22 橋の PC 橋について調査を行い、設計計算書より乾燥収縮による主方向の縁応力度を抽出した。

結果は、ラーメン橋（T ラーメンを除く）や斜 橋のように、主桁が下部工に拘束される構造については-0.5 ~ -1.5N/mm² 程度の比較的高い引張応力度が発生し、連続桁橋は-0.1N/mm² 未満の低い引張応力しか発生していないことが分かった。

(2) ラーメン構造における試設計



図参考 - 5 . 多連ラーメン構造の解析モデル

(1) の検討結果を踏まえ、乾燥収縮 ($\epsilon = 150 \mu$) によりラーメン構造の上部工部分に発生する応力を算出する。

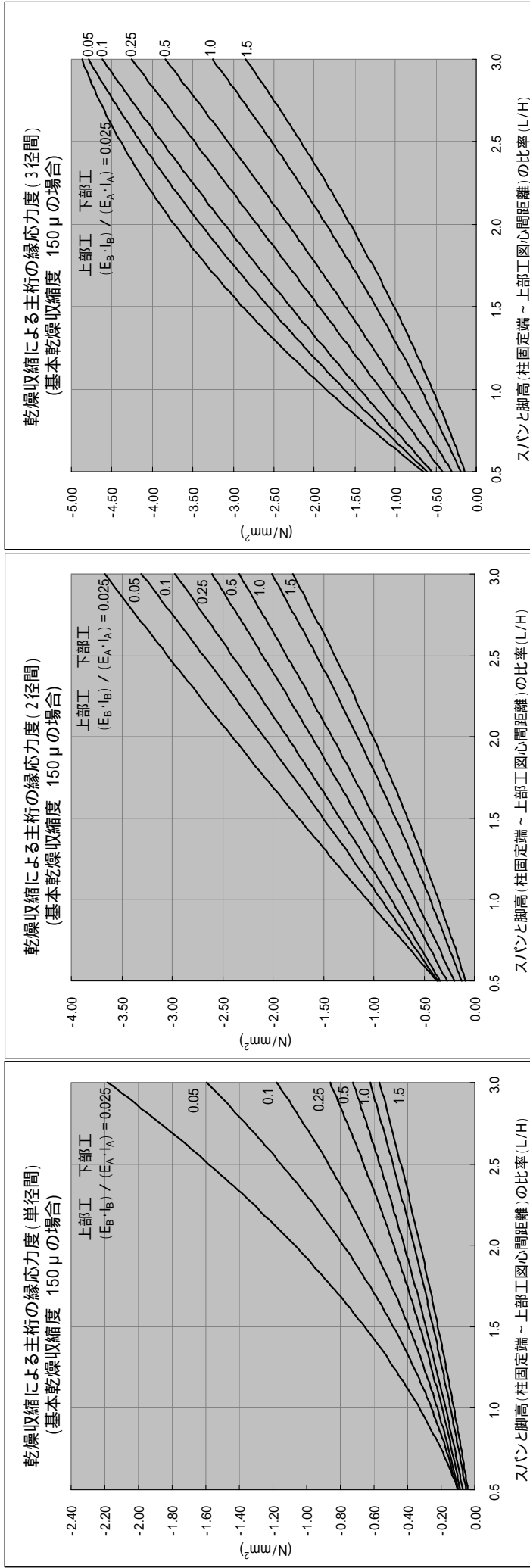
上部工部分はPC箱桁橋をイメージし、スパンLはPC箱桁橋の平均的な数値として45mを設定した^{注)}。また、断面性能は、【PC道路橋計画マニュアル】((社) プレストレスト・コンクリート建設業協会) に示される標準値より決定した。橋脚下端は固定支点としている。

下部工の剛性と橋脚高さhをパラメータとした解析を実施し、上部工に発生する断面力 (M、N) から縁応力を求めた。得られた応力と、スパン、橋脚高さ等との相関を以下に示す。

注) スパンLは、30、40、50、60mの4ケースで解析を行い、45mの場合と結果を比較したが、発生応力とスパンL・橋脚高hとの相関は近似関数のレベルでは大差がなく、簡便のため平均的なスパンを使用することとした。

表参考 - 7 . 計算結果一覧

剛比 $E_B \cdot I_B / E_A \cdot I_A$	上部工 スパン L(m)	下部工 高さ h(m)	L/h	単径間				2径間				3径間			
				断面力		縁応力 (N/mm ²)	断面力		縁応力 (N/mm ²)	断面力		縁応力 (N/mm ²)	断面力		縁応力 (N/mm ²)
				軸力 N(kN)	曲げモーメント Mmax(kN・m)		軸力 N(kN)	曲げモーメント Mmax(kN・m)		軸力 N(kN)	曲げモーメント Mmax(kN・m)		軸力 N(kN)	曲げモーメント Mmax(kN・m)	
0.025	45	15.0	3.0	-12543.4	1542.2	-2.16	-18013.6	4358.3	-3.62	-24719.2	5338.7	-4.81			
0.025	45	18.0	2.5	-8745.2	1543.3	-1.62	-13788.8	4773.1	-3.11	-20661.5	6281.2	-4.46			
0.025	45	22.5	2.0	-5198.6	1426.4	-1.08	-9033.6	4839.5	-2.45	-14998.5	6945.5	-3.81			
0.025	45	30.0	1.5	-2439.1	1180.2	-0.63	-4618.0	4329.3	-1.70	-8501.2	6780.5	-2.84			
0.025	45	45.0	1.0	-773.4	828.7	-0.31	-1559.6	3189.9	-0.99	-3121.3	5325.3	-1.73			
0.025	45	90.0	0.5	-102.2	418.3	-0.12	-217.0	1626.8	-0.42	-462.2	2776.9	-0.73			
0.05	45	15.0	3.0	-7910.8	1913.9	-1.59	-12812.8	6005.9	-3.27	-19709.4	7997.0	-4.74			
0.05	45	18.0	2.5	-5142.8	1780.2	-1.16	-9014.8	6009.6	-2.73	-15090.1	8579.0	-4.22			
0.05	45	22.5	2.0	-2880.7	1543.2	-0.78	-5428.7	5551.6	-2.11	-9902.8	8502.3	-3.46			
0.05	45	30.0	1.5	-1297.8	1216.7	-0.48	-2596.2	4580.9	-1.47	-5114.1	7437.1	-2.52			
0.05	45	45.0	1.0	-405.0	828.4	-0.26	-850.2	3187.5	-0.89	-1781.1	5356.1	-1.54			
0.05	45	90.0	0.5	-54.5	408.9	-0.11	-121.2	1557.2	-0.39	-268.7	2620.8	-0.67			
0.1	45	15.0	3.0	-4618.1	2184.7	-1.18	-8319.0	7339.4	-2.95	-14317.1	10527.6	-4.58			
0.1	45	18.0	2.5	-2873.0	1915.4	-0.87	-5495.7	6821.1	-2.43	-10157.3	10342.2	-3.94			
0.1	45	22.5	2.0	-1559.7	1595.1	-0.61	-3145.0	5895.6	-1.87	-6211.1	9377.8	-3.14			
0.1	45	30.0	1.5	-692.0	1221.2	-0.39	-1460.9	4611.9	-1.32	-3054.8	7585.7	-2.26			
0.1	45	45.0	1.0	-217.0	813.6	-0.23	-479.1	3078.7	-0.81	-1051.7	5133.3	-1.39			
0.1	45	90.0	0.5	-30.4	390.7	-0.10	-71.5	1428.9	-0.35	-164.2	2347.1	-0.59			
0.25	45	15.0	3.0	-2153.6	2307.4	-0.86	-4373.2	8196.7	-2.60	-8569.3	12491.7	-4.23			
0.25	45	18.0	2.5	-1308.5	1982.8	-0.66	-2772.2	7125.4	-2.11	-5714.5	11212.3	-3.52			
0.25	45	22.5	2.0	-703.6	1583.0	-0.48	-1550.4	5810.9	-1.62	-3341.4	9353.4	-2.73			
0.25	45	30.0	1.5	-314.5	1179.2	-0.33	-720.2	4318.6	-1.14	-1610.9	7024.5	-1.92			
0.25	45	45.0	1.0	-101.6	762.2	-0.20	-242.7	2727.9	-0.69	-558.1	4414.8	-1.14			
0.25	45	90.0	0.5	-15.3	343.9	-0.09	-38.1	1143.0	-0.28	-88.3	1797.9	-0.45			
0.5	45	15.0	3.0	-1221.1	2289.5	-0.73	-2695.2	8080.6	-2.33	-5699.4	12489.0	-3.82			
0.5	45	18.0	2.5	-742.3	1908.9	-0.57	-1694.7	6774.1	-1.87	-3711.3	10655.5	-3.10			
0.5	45	22.5	2.0	-402.6	1509.7	-0.42	-948.7	5332.1	-1.42	-2136.6	8466.4	-2.34			
0.5	45	30.0	1.5	-183.3	1099.6	-0.29	-444.9	3809.9	-0.98	-1021.2	6047.1	-1.60			
0.5	45	45.0	1.0	-61.1	686.9	-0.17	-152.0	2277.8	-0.57	-350.7	3571.7	-0.91			
0.5	45	90.0	0.5	-9.6	286.7	-0.07	-23.8	856.7	-0.21	-53.7	1308.6	-0.32			
1	45	15.0	3.0	-720.4	2161.3	-0.62	-1707.0	7308.7	-2.00	-3775.0	11218.6	-3.24			
1	45	18.0	2.5	-441.7	1767.0	-0.49	-1070.6	5923.6	-1.58	-2411.7	9163.5	-2.55			
1	45	22.5	2.0	-242.8	1365.8	-0.36	-599.4	4490.2	-1.17	-1364.6	6957.7	-1.87			
1	45	30.0	1.5	-112.5	964.3	-0.25	-280.9	3080.9	-0.78	-640.0	4719.8	-1.23			
1	45	45.0	1.0	-38.2	572.8	-0.14	-95.1	1709.4	-0.43	-213.8	2606.6	-0.66			
1	45	90.0	0.5	-6.0	215.0	-0.05	-14.3	570.6	-0.14	-31.0	857.4	-0.21			
1.5	45	15.0	3.0	-541.1	2029.0	-0.57	-1318.8	6582.2	-1.77	-2940.0	10010.1	-2.83			
1.5	45	18.0	2.5	-333.4	1636.8	-0.44	-824.1	5526.0	-1.45	-1854.8	7983.1	-2.19			
1.5	45	22.5	2.0	-184.3	1243.9	-0.33	-459.1	3867.1	-1.00	-1035.7	5906.3	-1.57			
1.5	45	30.0	1.5	-85.8	857.9	-0.22	-213.5	2557.0	-0.65	-478.3	3887.7	-1.00			
1.5	45	45.0	1.0	-29.1	491.1	-0.12	-71.1	1369.3	-0.34	-156.5	2065.5	-0.52			
1.5	45	90.0	0.5	-4.5	172.0	-0.04	-10.3	428.4	-0.10	-22.0	641.3	-0.16			



図参考 - 6 . 応力と剛比、スパン・脚高比の相関

結果を上図に示す。これより、

- ・ L/h が大きくなると、応力が大きくなる (スパンに対し脚高が低くなると、拘束度が高まり断面力が増加する)
 - ・ 剛比 $(EB \cdot IB) / (EA \cdot IA)$ が小さくなると、応力が大きくなる (下部工の剛性が高くなると、拘束度が高まり断面力が増加する)
 - ・ 径間数が増すと、応力が大きくなる (径間数が増すと、中央に近い径間の拘束度が高まり断面力が増加する)
- ことが分かる。

以上より、乾燥収縮が上部工の安全性に及ぼす影響は、下部工との構造バランスに負うところが大きい。

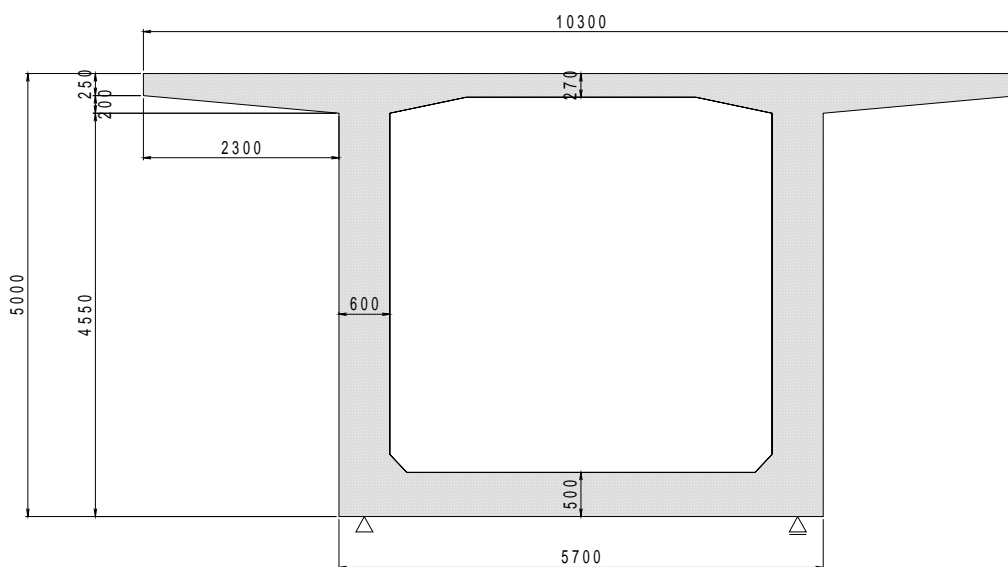
(3) 横方向(橋軸直角方向)の検討

検討概要

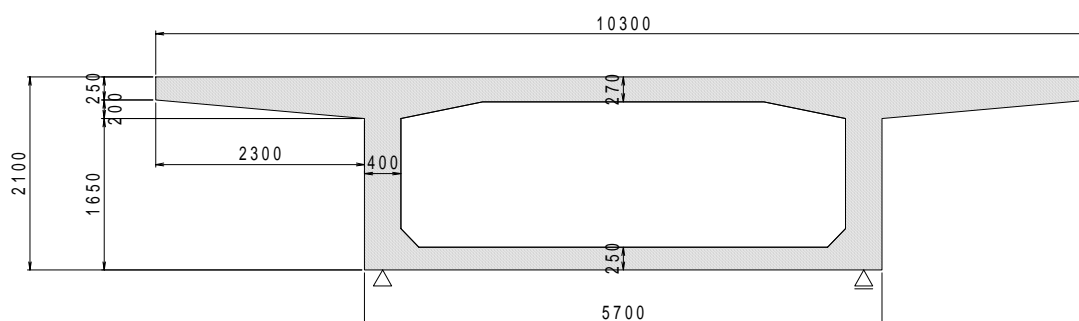
コンクリートの乾燥収縮が、箱桁橋の横方向の設計に与える影響を検討した。

断面形状

対象としたのは支間 80m の箱桁橋で断面は支点部と支間中央の 2 断面を選定した。この 2 断面の形状を以下に示す。



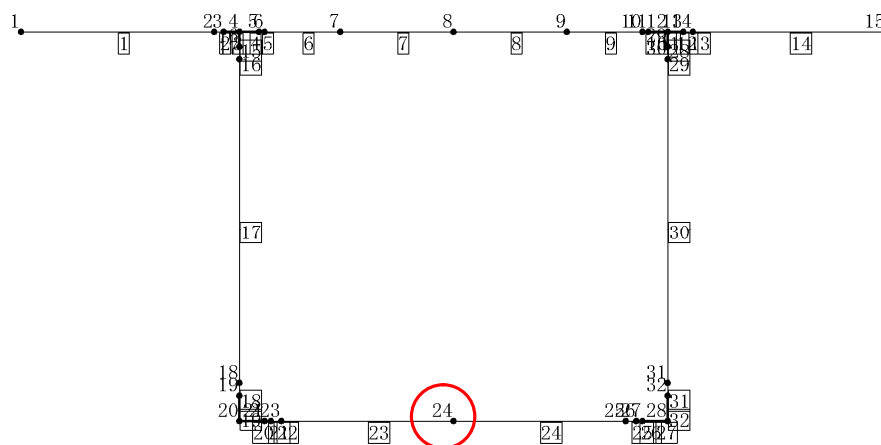
図参考 - 7 . 支点部断面



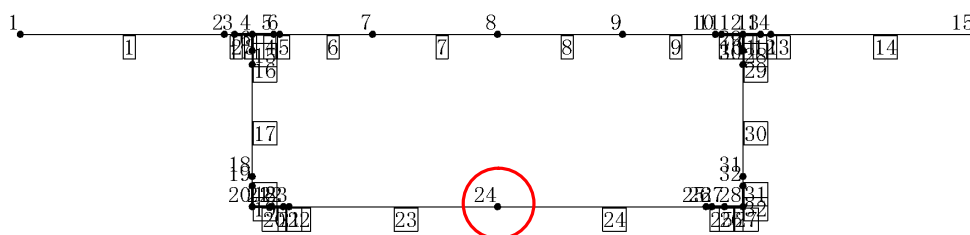
図参考 - 8 . 支間中央断面

計算モデル

前述の断面を骨組みでモデル化し、コンクリート部材に一様に 200μ の乾燥収縮ひずみを与えてその断面力を求める。着目点は下床版の中間（格点番号:24）である。



図参考 - 9 . 支点部断面モデル



図参考 - 10 . 支間中央断面モデル

表参考 - 8 . 下床版中央の断面力

断面力

断面力の計算結果を表参考 - 8 に示す。

	モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	軸力 (kN)
支点部断面	0.724	-0.200
支間中央断面	0.199	-0.279

発生する応力度の算定

求まった断面力により、下床版の下縁応力を求めた。結果を表参考 - 9 に示す。

下床版には軸力と曲げモーメントが作用するため、許容値は 2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] 5.2.1 強度 による曲げひび割れ強度 (f_{bck}) とした。

まとめ

横方向の検討では、乾燥収縮が構造の安全性に与える影響は極めて微細であることが分かった。

表参考 - 9 . 下床版下縁の縁応力度

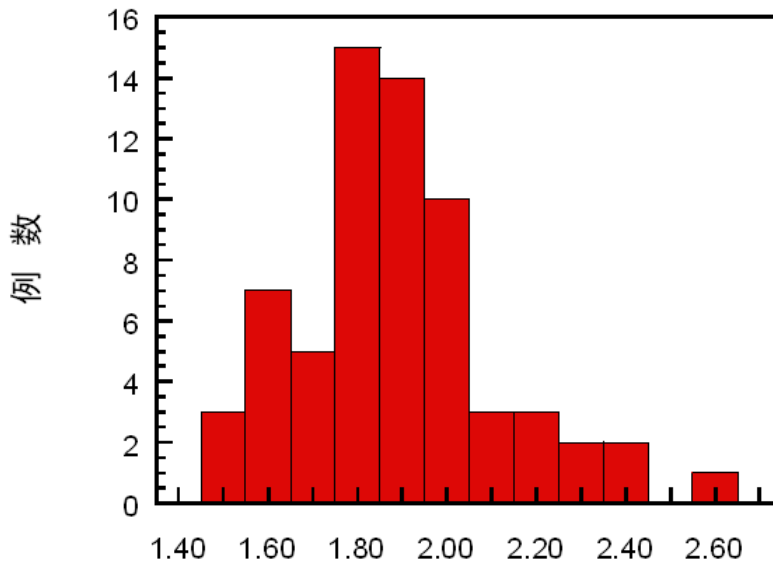
	l (N/mm^2)	f_{bck} (N/mm^2)
支点部	-0.018	2.030
支間部	-0.020	2.661

曲げひび割れ強度 f_{bck} の算定にあたり、 $f_{ck} = 40\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $d_{\text{max}} = 20\text{mm}$ とした。

【参考4】 早期判定について

(1) 早期判定の考え方

セメント、骨材等の使用材料は同じだが、水セメント比、単位水量、養生期間の異なる65種類のコンクリートについて、乾燥収縮ひずみを測定した(データ提供:岡山大学綾野教授)。



(乾燥期間180日の実験値) / (乾燥期間30日の実験値)

図参考 - 11. 乾燥期間 30 日と 180 日の乾燥収縮ひずみ

上図は、乾燥期間 30 日と 180 日の乾燥収縮ひずみを単純に比較した結果である。比率は 1.5 ~ 2.6 とばらつきが多く、分布のピークは 1.8 ~ 2.0 程度である。

2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] 5.2.8 収縮 による収縮ひずみの推定式

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot sh$$

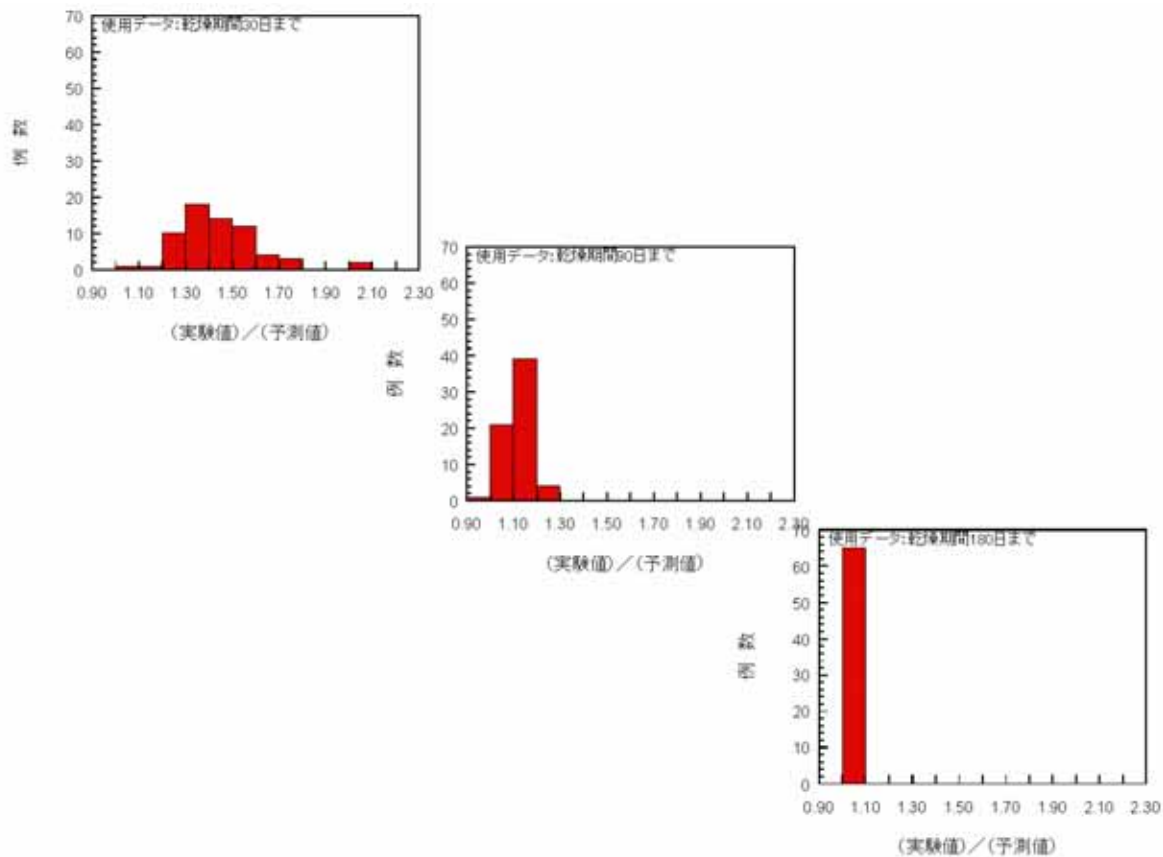
’ $\epsilon_{cs}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^5$)

’ sh : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^5$)

t_0 : 乾燥開始時の有効材齢 (日)

t : 乾燥中の有効材齢 (日)

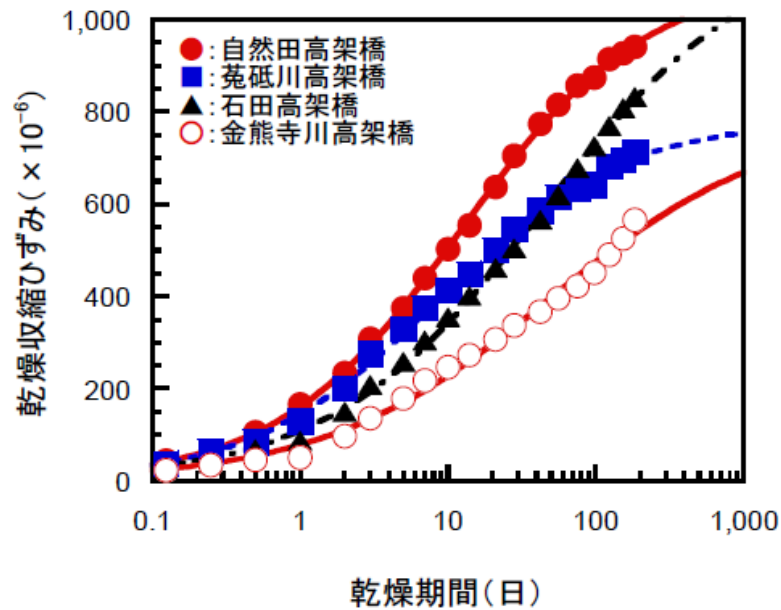
によると、材齢 30 日と 180 日の収縮ひずみの比率は 1.00 : 1.67 であることから、実際の測定結果は推定式より 180 日が高めの結果となっている。従って、ばらつきを考慮しない早期判定は、本データの分析結果によると危険側の結果をもたらす可能性がある。



図参考 - 12 . 早期判定の回帰値と実測値の比較

上図の上段は、1、3、5、7、10、20、30 日目までのデータを双曲線で回帰し、180 日目の実験データと回帰値とを比較したものである。中段はさらに 90 日目まで、下段は 180 日目までのデータを用いて、同様に回帰したものを実験値と比較している。

図参考 - 11の結果と同様、材齢 30 日目までのデータによる早期判定では、測定値が予測値より全て大きくなり、2 倍を超えるものも見られた。これより、180 日目の乾燥収縮ひずみを精度良く予想するためには、少なくとも 90 日目までのデータを使用することが望ましいと思われる。



図参考 - 13 . コア抜き試料の収縮試験結果

上図は、第二阪和国道におけるコア抜き試料の収縮試験結果である。

最終的に大きな収縮ひずみを示した石田高架橋 () は、変状がなく健全なコンクリートと判断される菟砥川高架橋 () に比べ、材齢初期では小さい収縮ひずみを示していた。このように、収縮ひずみの経時変化はコンクリートごとに異なるため、早期判定が有する危険性を認識することができる。

なお、最終収縮ひずみ (双曲線 $at/(b+t)$ で回帰した a に相当する値) は、以下の値となっている。

自然田高架橋 ()	1,090 μ
石田高架橋 ()	1,172 μ
菟砥川高架橋 ()	782 μ
金熊寺川高架橋 ()	789 μ

(2) 早期判定の目安について

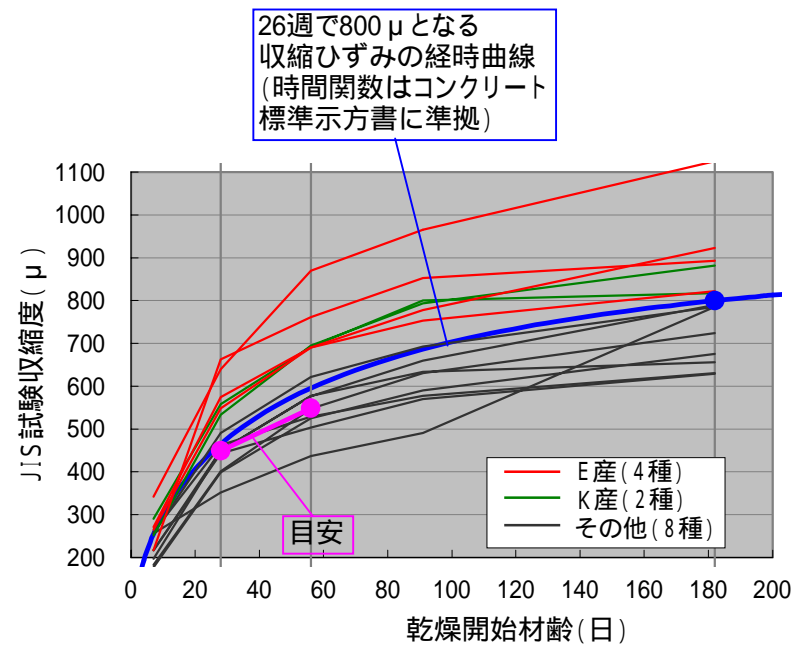
表参考 - 10. 乾燥収縮ひずみの測定例と早期判定の結果

No.	箇所名	生コン規格	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	骨材産地 ^{注)}	長さ変化率 (μ)								4週の目安	
							保存期間								最終予測値	4 × 10 ⁻⁴ (上限449 μ)
							7日	14日	21日	28日	42日	56日	91日	182日		
1	下部工	40-8-20BB	39.0	423	165	B産	260			463		529	578	631	795	×
8	上部工	36-15-20H	44.0	398	175	(I産)	216			450		578	634	656	832	×
9	上部工	30-10-20H	47.0	357	168	(I産)	197			450		577	660	790	896	×
10	下部工	24-8-20BB	55.0	300	165	E産	265	373		549		691	778	923	1,062	
11	下部工	24-8-20BB	55.0	300	165	B産	183	272		401		548	631	724	831	
12	床版	30-10-20N	49.0	343	168	(J産)	177			399		525	591	676		
13	上部工	36-12-20N	43.0	386	166	(K産)	291			558		692	800	818	1,034	×
14	床版	30-8-20N	47.0	336	158	(K産)	252			534		695	794	882	1,064	
15	上部工	30-12-20N	50.0	326	163	(L産)	256			352		437	491	785		
16	上部工	30-8-20N	50.0	330		E産	342			640		870	966	* 1,125		
18	上部工	40-12-20H	37.0	441	163	(L産)	217	305	387	443	486	504	570	629	773	
19	下部工	30-12-20N	50.0	326	163	(L産)	256	352	437	491	602	622	693	785	938	×
20	上部工	40-12-20N	40.0	400	160	E産	218	378	541	663	711	762	853	893	1,124	
22	上部工	40-12-20H	38.0	421	160	E産	271	433	536	575	652	691	753	822	1,043	×

注) 骨材産地で()内は第二阪和国道の変状橋梁で使用されていない。

判定結果	4週で目安値を超過し、26週でも8 × 10 ⁻⁴ を超過(的中)		的中率57%	
		4週で目安値未滿、かつ26週でも8 × 10 ⁻⁴ 未滿(的中)		4
	×	4週で目安値を超過したが、26週では8 × 10 ⁻⁴ 未滿(生産者危険)		6
		4週で目安値未滿であったが、26週で8 × 10 ⁻⁴ 超過(消費者危険)		0

*データがなく、標準示方書の時間関数で推定



図参考 - 14. 乾燥収縮の進行と早期判定における目安値

No.	長さ変化率 (μ)								8週の目安	
	保存期間								最終予測値	5 × 10 ⁻⁴ (上限549 μ)
	7日	14日	21日	28日	42日	56日	91日	182日		
260			463			529	578	631	795	
216			450			578	634	656	832	×
197			450			577	660	790	896	×
265	373		549			691	778	923	1,062	
183	272		401			548	631	724	831	
177			399			525	591	676		
291			558			692	800	818	1,034	×
252			534			695	794	882	1,064	
256			352			437	491	785	772	
342			640			870	966	* 1,125		
217	305	387	443	486	504	570	629	773		
256	352	437	491	602	622	693	785	938	×	
218	378	541	663	711	762	853	893	1,124		
271	433	536	575	652	691	753	822	1,043	×	

判定結果	8週で目安値を超過し、26週でも8 × 10 ⁻⁴ を超過(的中)		的中率64%	
		8週で目安値未滿、かつ26週でも8 × 10 ⁻⁴ 未滿(的中)		5
	×	8週で目安値を超過したが、26週では8 × 10 ⁻⁴ 未滿(生産者危険)		5
		8週で目安値未滿であったが、26週で8 × 10 ⁻⁴ 超過(消費者危険)		0

*データがなく、標準示方書の時間関数で推定

の検討結果より、早期判定は誤った判断をする可能性のあることが分かった。

しかし、試験開始から3ヶ月後、あるいは6ヶ月後まで当該コンクリート使用の可否を判断できないとすると、工事の工程に重大な影響を与える場合も生じる。

そこで、やむを得ず早期判定を行う場合の目安としては、

4週時点：4 × 10⁻⁴ (特性値8 × 10⁻⁴の1/2程度)

8週時点：5 × 10⁻⁴ (特性値8 × 10⁻⁴の2/3程度)

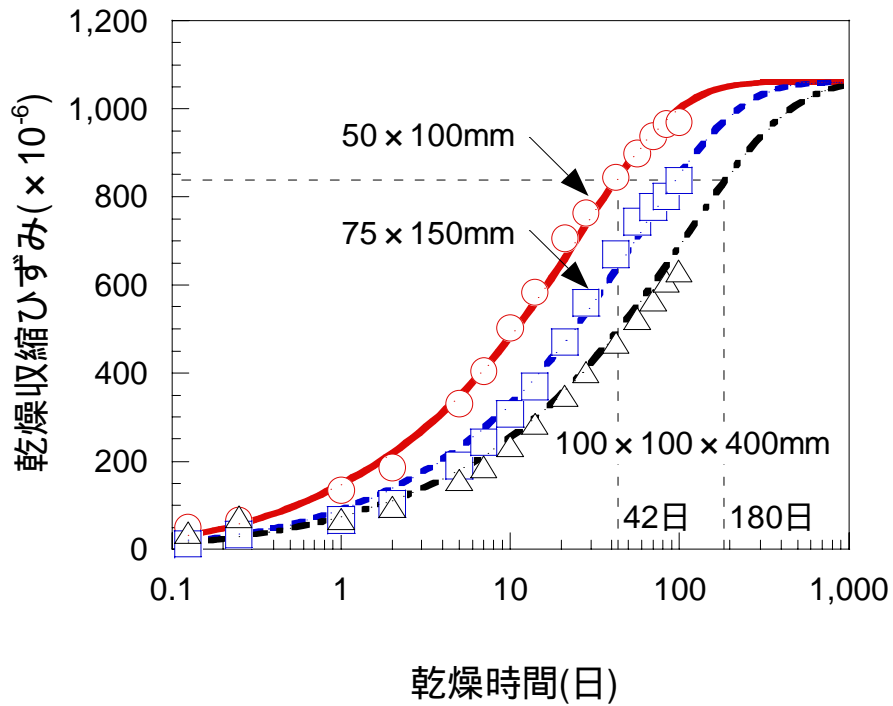
程度が現段階では妥当な数値であると思われる。これは、の検討結果、あるいはJASS5の不良率4%を許容した早期判定式を参考にしたものである。

上記は、近畿地方整備局で集められた乾燥収縮ひずみの測定結果14例である。先の目安を参考とした場合、4週では6例、8週では5例が、生産者危険側(×)の誤った判断結果となった。一方で、消費者危険側(▲)の誤判断は生じなかった。

今後、測定データを収集し、配合やセメント種別ごとに分析を行い早期判定の目安を見直すことで、誤判断の可能性を小さくすることができると考えられるが、これらの目安値を用いて早期判定を行う場合は、26週の試験結果を確認する必要がある。

(3) 迅速判定に関する取り組み

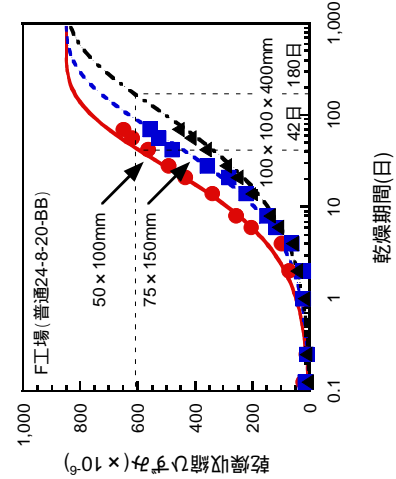
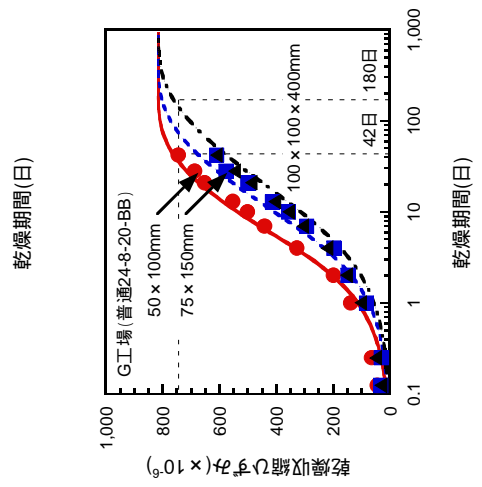
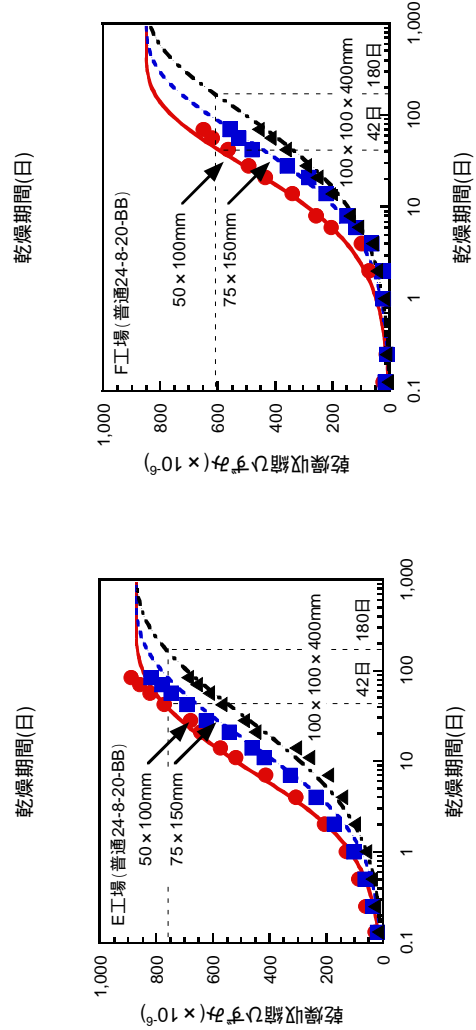
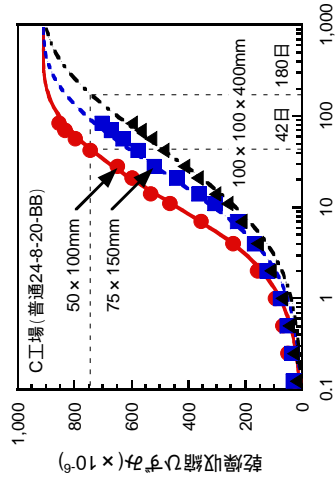
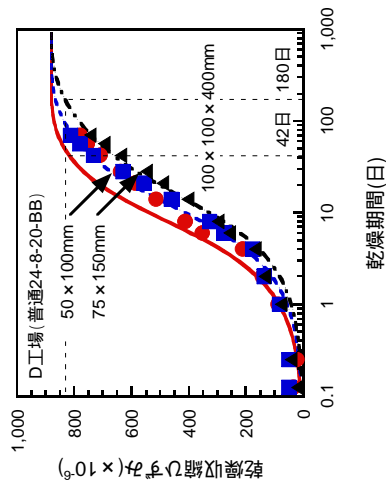
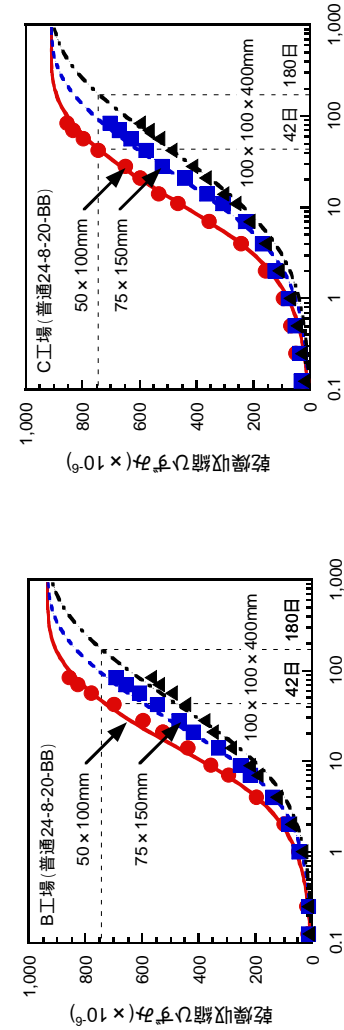
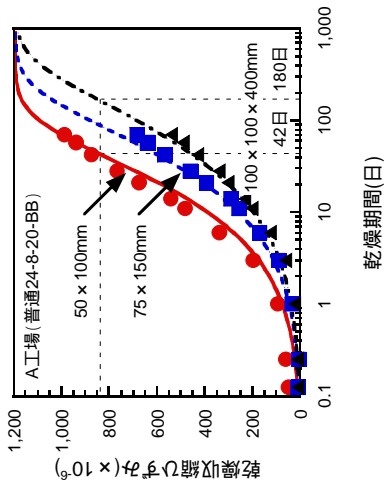
1) 50×100 供試体による乾燥収縮試験法(岡山大学 綾野教授による)



図参考 - 15 . 小口径コアによる収縮試験結果

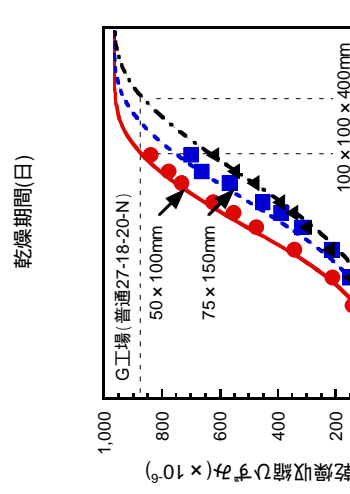
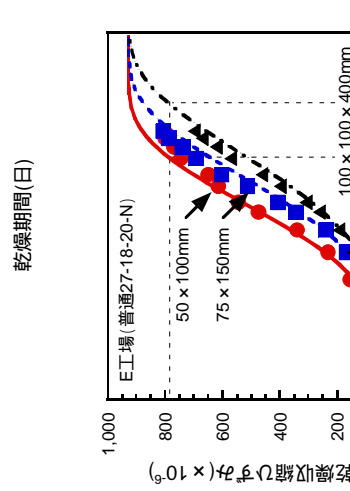
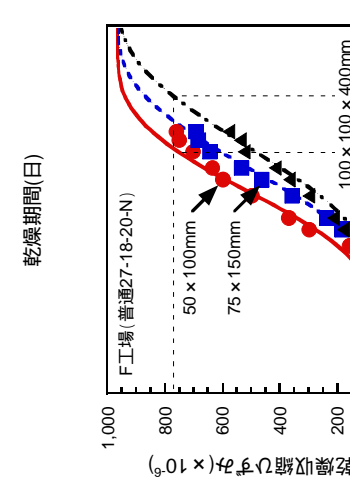
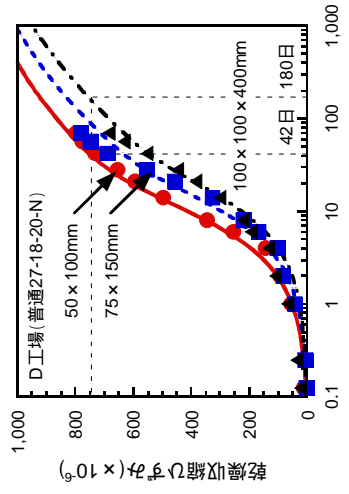
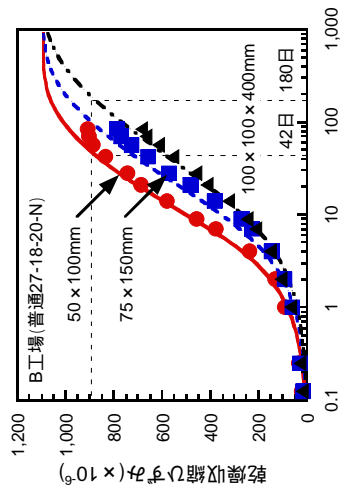
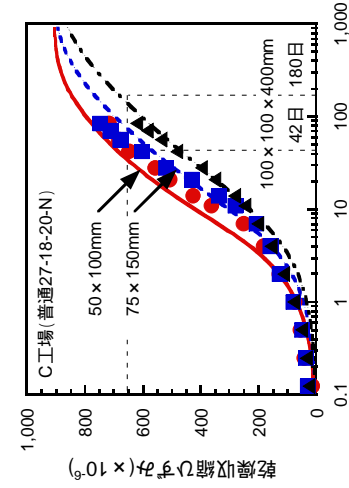
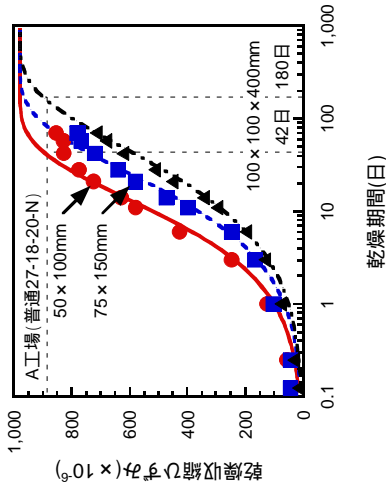
上図は試験練りで作成したコンクリートによる供試体の例を示すが、50×100 の供試体における 42 日目の収縮ひずみは、100×100×400 の供試体の 180 日目に相当している。また、次頁以降にレディーミクストコンクリートにおける試験結果を示すが、同じ結果となっている。以上より、小口径コアを用いた収縮試験は、およそ 1.5 ヶ月で精度良い判定を行うことが可能であり、早期判定に有望であると思われる。

工場名	細骨材1	細骨材2	粗骨材1	粗骨材2	拡散係数 (mm ² /日)	フィルム係数 (mm/日)	収縮係数 (μ/RH)
A	海砂	安山岩	安山岩	-	4e ^{-1.0} (1-RH)	0.25	2,974
B	石灰岩	流紋岩	流紋岩	-	50e ^{-9.0} (1-RH)	0.20	2,334
C	花崗岩	-	花崗岩	-	40e ^{-8.0} (1-RH)	0.30	2,273
D	海砂	川砂	川砂利	-	1,000e ^{-14.0} (1-RH)	0.30	2,200
E	砂岩	石灰岩	安山岩	-	60e ^{-8.0} (1-RH)	0.50	2,179
F	閃緑岩	-	安山岩	閃緑岩	10e ^{-4.5} (1-RH)	0.20	2,125
G	海砂	石英安山岩	石英安山岩	-	100e ^{-8.0} (1-RH)	0.50	2,039



図参考 - 16. レディーミックスコンクリート 普通 24-8-20-BB の場合

工場名	細骨材1	細骨材2	粗骨材1	粗骨材2	拡散係数 (mm ² /日)	フィルム係数 (mm/日)	収縮係数 (μ/RH)
A	海砂	安山岩	安山岩	-	19e ^{-3.0} (1-RH)	0.40	2,448
B	石灰岩	流紋岩	流紋岩	-	50e ^{-3.0} (1-RH)	0.25	2,730
C	花崗岩	-	花崗岩	-	80e ^{-12.0} (1-RH)	0.25	2,261
D	海砂	川砂	川砂利	-	450e ^{-20.0} (1-RH)	0.15	2,695
E	砂岩	石灰岩	安山岩	-	30e ^{-3.0} (1-RH)	0.30	2,317
F	閃緑岩	-	安山岩	閃緑岩	40e ^{-3.0} (1-RH)	0.20	2,409
G	海砂	石英安山岩	石英安山岩	-	70e ^{-3.0} (1-RH)	0.50	2,408



図参考 - 17. レディーミクスコンクリート 普通 27-18-20-N の場合

2) 予測式を用いて、短期データから長期ひずみを予測する。

鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説(日本建築学会)

付録2 収縮ひずみならびにクリープひずみの予測式 より

付表 2.1 各予測式におけるパラメータの一覧

予測式	CEB-FIP1990	ACI209	土木学会 - 普通強度式 -	土木学会 - 高強度式 -	提案式
パラメータ	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_m \cdot \left(\frac{t-t_0}{0.03S \left(\frac{2A_s}{u} \right)^2 + (t-t_0)} \right)^{0.5}$ A _s : 断面積 u: 乾燥を受ける部材の周囲長	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_m \cdot \frac{(t-t_0)}{35+(t-t_0)}$	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_m \cdot \left[1 - \exp \left\{ -0.108 \cdot (t-t_0)^{0.58} \right\} \right]$	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_m \cdot \frac{(t-t_0)}{\frac{4W\sqrt{V/S}}{100+0.7t_0} + (t-t_0)}$ W: 単位水置	$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_m \cdot \left(\frac{t-t_0}{0.16 \cdot (V/S)^2 + (t-t_0)} \right)^{1.4(V/S)^{-0.2}}$
セメントの種類	○			○	
水セメント比				○	
単位水置			○(130~230kg/m ³)	○(130~230kg/m ³)	○
単位セメント量		○			○
単位粗骨材量					○
細骨材率		○			
圧縮強度	○(20~90N/mm ²)		55N/mm ² 以下 W/C を小さくした場合は 70N/mm ² 以下	○(55~80N/mm ²)	
スランプ		○			
空気量		○			
養生条件		○			
部材寸法	●	○(50mm 以上)	○(100~300mm)	●	●(0~250mm)
温度	○		●	○	
湿度	○(40~100%)	○(40~100%)	○(45~80%)	○(40~90%)	○(40~100%)
乾燥開始材齢				○	○

(4) 予測式の検証

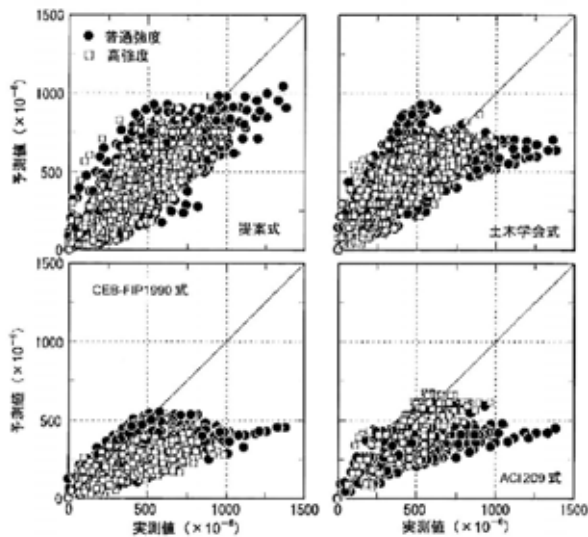
本指針(案)式の妥当性を検証するために、既往の予測式との比較検討を行った。ここでは、水結合材比が40%以上を普通コンクリート、40%未満を高強度コンクリートと定義し、普通コンクリートおよび高強度コンクリートに区別して検証を行った。また、比較検討に用いた既往の予測式は、海外の予測式である CEB-FIP1990 式、ACI209 式および国内の予測式の土木学会式である(付表 2.1 参照)。

検証結果を付図 2.4 に示す。図中において、普通コンクリートと高強度コンクリートを区別してプロットした。また、予測値から実測値を差し引いた残差の平均と分散を付表 2.2 に示す。残差の平均が 0 に近づくほど、図中においてプロット点が直線 y=x に集中し、また残差の分散が小さいほど実測値と予測値の誤差が少なくなる。

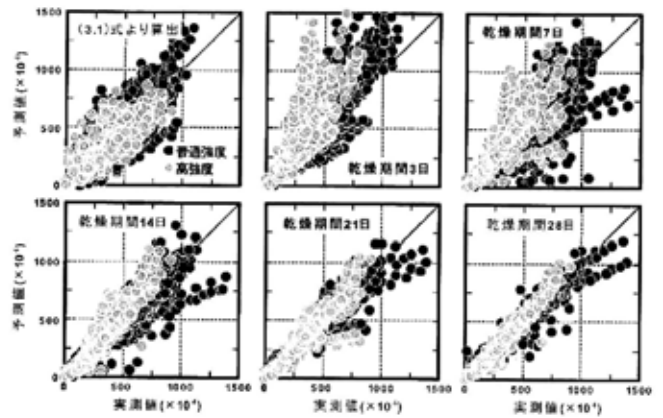
付図 2.4 より、CEB-FIP 式、ACI 式による予測値が全体的に実測値を過小評価する傾向にあることが分かるが、これは材料条件の違いによることが指摘されている。また、土木学会式を含めた既往の予測式は、実測値の大きいところで予測値が過小評価する傾向にある。本提案式は、高強度コンクリートの実験データに対してばらつきはあるものの、比較的よく実験データを表している。また、付表 2.2 より、本提案式は他の予測式と比べても、残差の平均が最も 0 に近く、かつ残差の分散が最も小さいことから、本提案式は国内の実験データに対する適合性が高いことが分かった。

付表 2.2 残差の平均と分散

コンクリートの種類	残差	提案式	土木学会式	CEB-FIP 式	ACI 式
普通強度	平均	-20.0	-21.90	-167.67	-157.30
	分散	13 279	21 392	27 236	30 445
	データ数	2 216	2 216	1 245	633
高強度	平均	-12.56	15.98	-210.14	-41.68
	分散	14 095	14 191	31 160	15 815
	データ数	776	770	315	178



付図 2.4 収縮ひずみの予測値と実測値の比較



解説図 3.6 短期実験データを用いた予測値と実測値の比較

【鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説】(以下、ひび割れ制御指針)による建築学会の予測式は実験データに対する適合性が高いとされるが、【コンクリート標準示方書】による土木学会の予測式も精度上、大差がない。

ひび割れ制御指針では、こうした予測式により短期の実験データに基づき長期間の収縮ひずみを予測する方法について紹介しており、乾燥期間 28 日あるいは 21 日程度のデータを用いれば、予測精度はかなり高くなるとしている(上図参照)。

ただし、既述によるコンクリートごとのばらつきについては考慮されていない。

3) JASS5 による早期判定法

建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009

(解説)11 節 品質管理・検査および措置 より

11.4 使用するコンクリートの品質管理および検査

- a. 使用するコンクリートの試験は、日本工業規格および本会制定の試験方法 (JASS 5 T) による。
- b. 施工者は、工事開始前に使用するコンクリートの試し練りを行い、コンクリートの種類、使用材料、調合管理強度、スランプ、空気量、水セメント比、単位水量、コンクリート中の塩化物量およびアルカリ総量によるアルカリ骨材反応対策を行う場合のコンクリート中のアルカリ量が設計図書または 3 節および 5 節の規定に適合していることを確認する。
使用するコンクリートが JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) の規定に適合するレディーミクストコンクリートの場合は、レディーミクストコンクリート工場が提出する配合計画書が設計図書または 3 節および 5 節の規定に適合していることを確認すれば試し練りを省略することができる。
- c. 工事現場練りコンクリートの調合強度の管理は、JASS 5 T-602:2009 (工事現場練りコンクリートの調合強度の管理試験方法) による。
- d. 施工者は、工事開始前に試し練りを行ってヤング係数を求め、それが圧縮強度に対して、(3.1)式で算定されるヤング係数の 80%以上であることを確認する。ただし、使用するコンクリートまたは類似の材料・調合のコンクリートのヤング係数の試験結果がある場合は、試験を省略することができる。
- e. コンクリートの乾燥収縮率が特記されている場合、および計画供用期間の級が長期または超長期の場合は、施工者は、工事開始前に試し練りを行って乾燥収縮率を求め、それが特記された乾燥収縮率または 8×10^{-4} 以下になることを確認する。ただし、使用するコンクリートまたは類似の材料・調合のコンクリートの乾燥収縮率の試験結果がある場合は、試験を省略することができる。

d. コンクリートのヤング係数 (静弾性係数) は、JIS A 0203 (コンクリート用語) において、「一軸静的載加によって得られた応力-ひずみ曲線において、原点と任意の点とを結ぶ直線の勾配で表される値。コンクリートの場合、強度の 1/3 に相当する応力点と原点を結ぶ線分の勾配として与えられる割線ヤング係数で示す」と定義されている。コンクリートのヤング係数が特記されている場合は、工事開始前に試し練りを行って作製した供試体を用い、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) によって試験を行い、測定結果が特記されたヤング係数の 80%以上となることを確認しなければならない。ただし、コンクリートのヤング係数は (3.1) 式に示すように、おおよその圧縮強度や単位容積質量ならびに粗骨材や混和材の種類により定まる係数によって求めることができるため、使用するコンクリートまたはそれと類似の材料を使用し、調合したコンクリートのヤング係数の試験結果がある場合は、それらの既存データから使用するコンクリートのヤング係数を推測することで試験を省略することができる。試験を省略できる類似の材料・調合のコンクリートとは、次の (1)~(3) を原則とする。

(1) 同一と認められる構成材料 (セメント、骨材、水、混和材料) であること。例えば、セメントの場合には単に種類だけでなく製造会社も同一であるか、骨材の場合には岩種や産地、人工軽骨材の場合には品名が同一であるか、などを解説表 11.3 を参考にして、第三者機関が実施した試験成績書によって確認する。

(2) 目的とするコンクリートの危険側の調合条件としたコンクリート、あるいは目的とするコンクリートの調合条件を補完できるコンクリートの試験結果であること。

(3) 目的とするコンクリートの物理的および化学的性質が大きく異なること。

なお、(3.1) 式中の圧縮強度 (σ_n) は、使用するコンクリートと同一調合のフレッシュコンクリートを用い、JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) によって供試体を作製し、標準養生を行った後、材齢 28 日で JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) によって試験した結果を用いるものとする。

e. コンクリートの乾燥収縮率が特記されている場合、または計画供用期間の級が長期もしくは超長期の場合には工事開始前に試し練りを行って作製した3個の供試体を用いて JIS A 1129-1～3 (モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法) および同附属書 A (参考)「モルタルおよびコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」〔付 21〕によって乾燥開始後の材齢 6 か月の乾燥収縮率を測定し、得られた 3 個の測定値の平均値を四捨五入によって整数に丸めた値 ($\times 10^{-4}$) が、特記された乾燥収縮率以下になることを確認しなければならない。ただし、使用するコンクリートまたはそれと類似の材料を使用し、調査したコンクリートの乾燥収縮率の試験結果がある場合は、試験を省略することができる。試験を省略できる類似の材料・調査のコンクリートについては、上記 d. と同様である。

また、乾燥収縮の試験には 6 か月以上の長期の期間を要するため、所定の乾燥収縮率を得るための材料の事前選定の見地から、以下の早期判定式 (解 11.1) を用いて、使用するコンクリートの乾燥収縮率が 8×10^{-4} 以下であることが確認できれば乾燥収縮の試験を省略することができる。

$$\varepsilon_{sh}^{26} = \alpha_i \times \varepsilon_{sh}^i \quad (\text{解 11.1})$$

ここに、 ε_{sh}^{26} : JIS A 1129-1～3 および同附属書 A (参考) に基づき測定されたコンクリートの乾燥期間 26 週 (6 か月) における乾燥収縮率の推定値

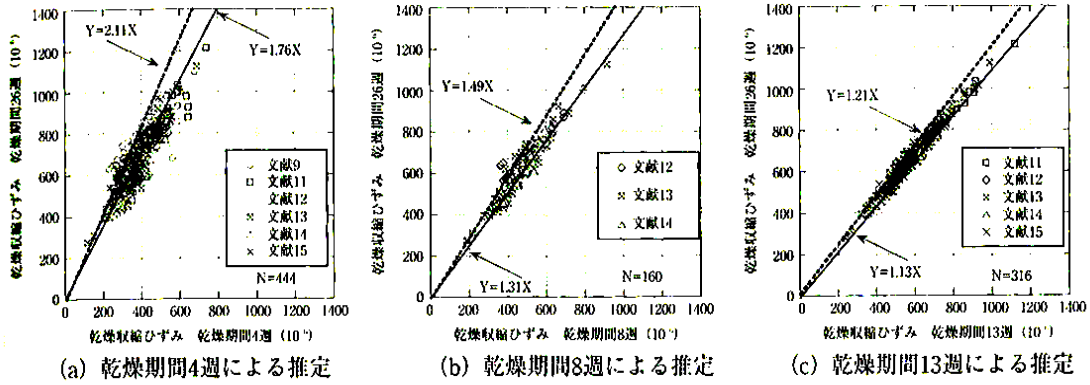
ε_{sh}^i : JIS A 1129-1～3 および同附属書 A (参考) に基づき測定された乾燥期間 i 週における乾燥収縮率、 i は 4, 8, 13 のいずれかとする

α_i : ε_{sh}^i から ε_{sh}^{26} を推定するための係数

α_i の値は、短期の乾燥期間と 26 週での乾燥収縮率の関係に関する信頼できる資料に基づいて定める。ただし、そのような資料がない場合には、解説表 11.5 に示す $\alpha_4 = 2.11$, $\alpha_8 = 1.49$, $\alpha_{13} = 1.21$ を用いてもよい。解説表 11.5 の α_i の値は、JIS A 1129-1～3 および同附属書 A (参考) に基づき測定された既発表データ^{1)~6)} から、乾燥期間 26 週に対する i 週の乾燥収縮率の倍率について、同表に示すように平均値と標準偏差を算出して定めた。解説表 11.5 に示す α_i の値の妥当性を検証するため、解説図 11.2 (a)～(c) には、乾燥期間 26 週に対する乾燥期間 4 週、8 週、13 週の乾燥収縮率の関係が示されている。これらの図から、早期材齢の乾燥収縮率 ε_{sh}^i に α_i を乗じて算出した 26 週の推定値 ε_{sh}^{26} は、試験値をほぼ安全側に評価しているといえる。

ただし、解説表 11.5 に示す α_i を用いた早期判定法が適切な評価となるためには、以下の注意点を十分に考慮し、適用範囲内で活用することが重要である。

- (1) 適用範囲から、解説図 11.2 に含まれない軽量コンクリートや高強度コンクリートなどの特殊な仕様のコンクリート、およびフライアッシュや膨張材、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、収縮低減剤などの混和材を使用するコンクリートを除外する。これらを (解 11.1) 式の対象とする場合には、使用材料に対応した α_i の値を別途定めることが必要である。
- (2) 乾燥収縮率の合理的な推定のため、乾燥収縮の期間はできるだけ長くするのがよい。解説表 11.5 からわかるように、推定に用いる短期の乾燥期間が 4 週から長くなるほど標準偏差が小さくなり、乾燥期間が短いほど ε_{sh}^{26} を大きく推定するためである。



解説図 11.2 早期判定式の係数 α_i の妥当性の検証

解説表 11.5 早期判定式の係数 α_i の算定

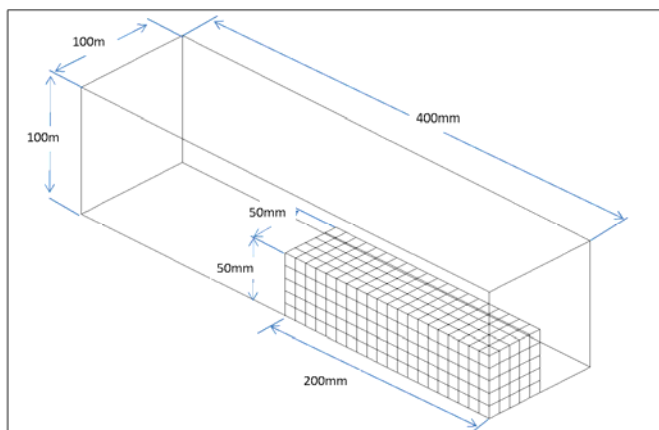
乾燥収縮率の倍率	平均値	標準偏差	α_i (4%不良率を許容)
乾燥期間26週に 対する4週の倍率	1.76	0.204	2.11 (α_4)
乾燥期間26週に 対する8週の倍率	1.31	0.101	1.49 (α_8)
乾燥期間26週に 対する13週の倍率	1.13	0.043	1.21 (α_{13})

【参考5】 乾燥収縮による内部拘束応力について

ここでは、湿度移動解析に基づく乾燥収縮による内部拘束応力について、体積表面積比を変化させた3ケースでの検討結果を示す。

1) 解析モデルおよび条件

解析モデルは、 V/S が 25mm、150mm および 300mm となるようにそれぞれ $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 、 $600 \times 600 \times 2400\text{mm}$ および $1200 \times 1200 \times 4800\text{mm}$ の3種類とし、右に示す 1/8 モデルを用いた。乾燥面は側面のみ4面乾燥とした。



図参考 - 18 . $V/S=25\text{mm}$

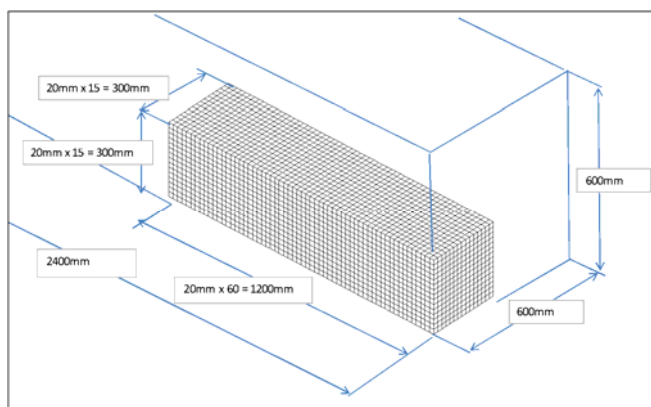
2) 解析の流れ

湿度移動解析

標準的なコンクリートの拡散方程式とフィルム係数を仮定して湿度移動解析を行う。

(使用ソフト：ASTEAMACS、
(株)計算力学研究センター)

湿度移動解析によって求めた水分損失量に収縮係数(2500μ)を乗じて乾燥収縮ひずみを算出。

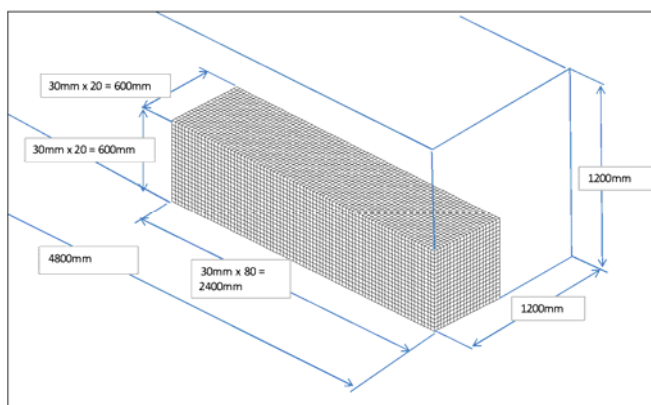


図参考 - 19 . $V/S=150\text{mm}$

クリープの影響を考慮した応力解析

の結果にクリープの影響を考慮して乾燥収縮に伴う内部拘束応力を算出。

(使用ソフト：Time DACS、
JIP テクノサイエンス (株))



図参考 - 20 . $V/S=300\text{mm}$

3) 解析条件

解析条件を下記に示す。

フィルム係数： $H_f=0.54\text{mm/day}$

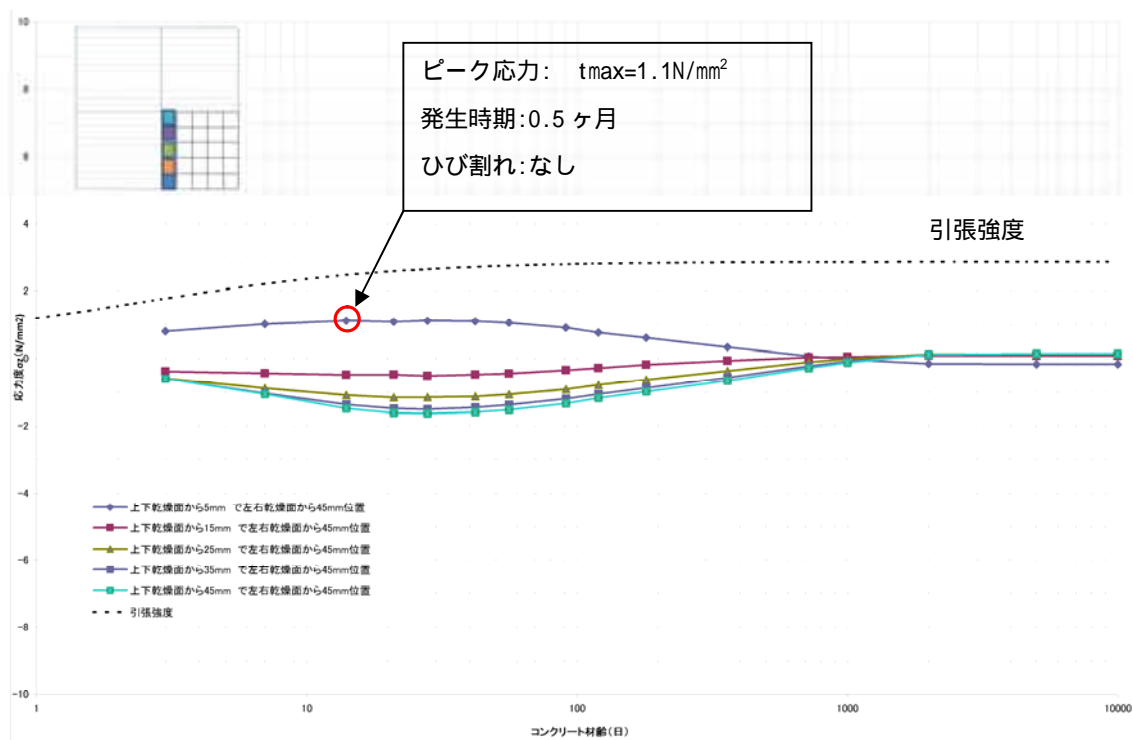
拡散方程式： $D(h) = 22.0e^{-8.26(t-h)} \text{ mm}^2 / \text{day}$

相対湿度：供試体の初期値=1.00，外気湿度=0.60 一定

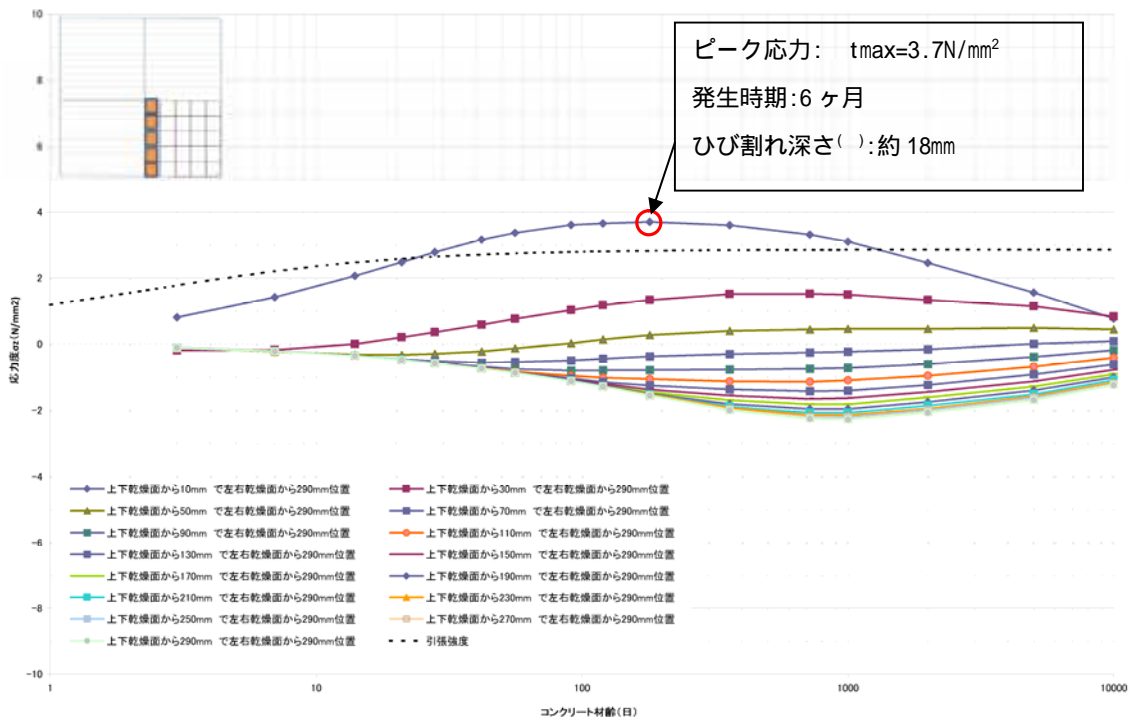
変数名	環境条件	データ
C	単位セメント量	452 (kg/m ³)
W	単位水量	170 (kg/m ³)
RH	相対湿度 (%)	65 (%)
VS	体積表面積(mm)	25.0 (mm)
σ_c	圧縮強度	40 (N/mm ²)
T0sh	乾燥開始時刻	1 (日)

4) 解析結果

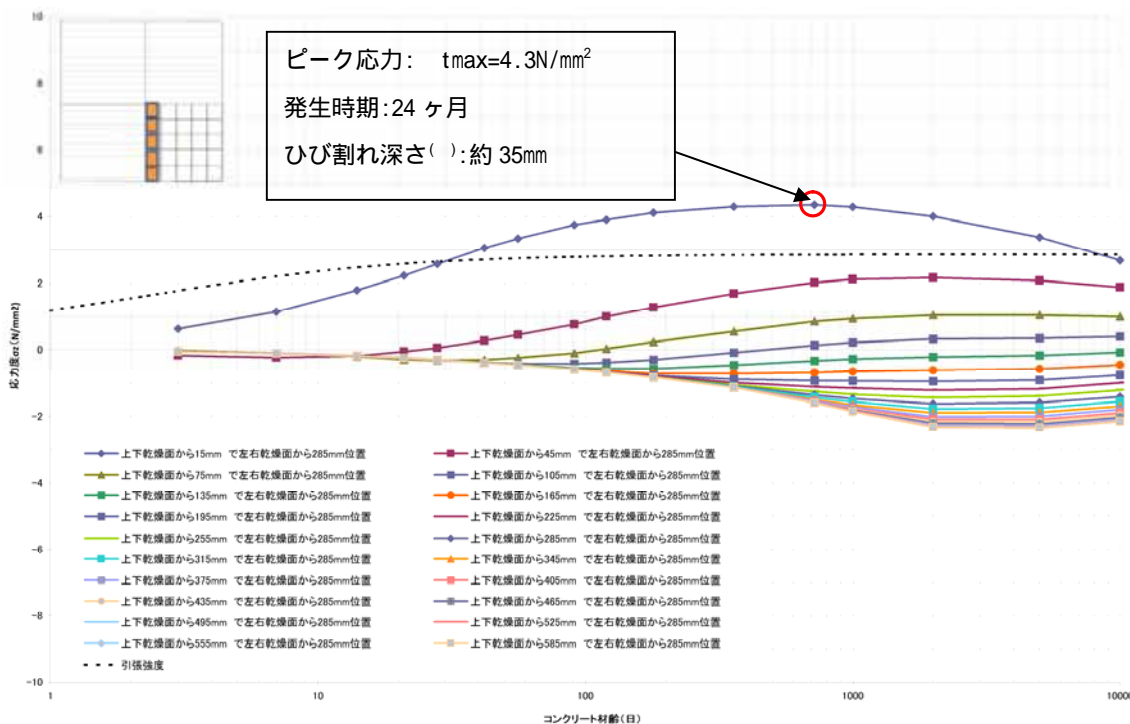
解析結果を図参考 - 21 ~ 23 に示す。



図参考 - 21 . 内部応力と材齢の関係 (V/S=25mm モデル)



図参考 - 2.2 . 内部応力と材齢の関係 (V/S=150mm モデル)



図参考 - 2.3 . 内部応力と材齢の関係 (V/S=300mm モデル)

ひび割れ深さは、引張強度を上回る応力が生じている表面からの距離とした。

PC 上部工の標準的な体積表面積比は 300mm 程度のため、図参考 - 23によれば内部拘束応力として部材表面に -4N/mm^2 程度の引張応力が発生する可能性がある。しかし、内部拘束応力による損傷は外部拘束によるものと比べ一般的に軽微であり、解析でもひび割れ深さ（引張強度を上回る応力が生じている表面からの距離）は 35mm であり、上部工の標準的なかぶり程度となっている。

【参考6】鉄筋の影響について

コンクリートの収縮ひずみは、収縮方向に配置された部材の鉄筋量に影響を受ける。以下では、収縮ひずみと鉄筋比の相関について検討を行った。

(1)コンクリート標準示方書より

2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] 5.2.8 収縮 では、鉄筋比が1%の場合、

- ・ 乾燥開始材齢 3 日以内 340 (鉄筋比 1%) / 400 (無筋) = 0.85
- ・ 同 4~7 日 290 (鉄筋比 1%) / 350 (無筋) = 0.83
- ・ 同 28 日 180 (鉄筋比 1%) / 230 (無筋) = 0.78

の比率で収縮ひずみが低下するとしている。

表参考 - 11. コンクリート標準示方書による鉄筋比を考慮した収縮ひずみ

解説 表 5.2.5 コンクリートの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

環境条件	コンクリートの材齢*				
	3日以内	4~7日	28日	3ヶ月	1年
屋外	400	350	230	200	120
屋内	730	620	380	260	130

* 設計で収縮を考慮するときの乾燥開始材齢

解説 表 5.2.6 普通コンクリートの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$) (鉄筋比 1%)

環境条件	コンクリートの材齢*				
	3日以内	4~7日	28日	3ヶ月	1年
屋外	340	290	180	160	120
屋内	620	520	310	210	120

* 設計で収縮を考慮するときの乾燥開始材齢

(2)理論解

コンクリートの自由収縮が鉄筋により拘束された場合の力のつり合いを考える。

図参考 - 24より、自由収縮ひずみを $1,000 \mu$ とした場合の鉄筋比と収縮ひずみの関係は以下のとおりとなる。鉄筋比 1%における収縮ひずみは 838μ であり、コンクリート標準示方書の値 (乾燥開始材齢 7 日まで) と良いオーダーで一致している。

表参考 - 12. 理論解に基づく収縮ひずみ

p (%)	0.00	0.50	1.00	1.50
$\epsilon_s (\mu)$	1000	912	838	775

ただし、コンクリートのヤング係数 $E_c = 3.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、クリープ係数 = 4.0 の場合



コンクリートが伸ばされた変位 a

$$a = \epsilon_{sh} * L - \Delta L$$

$$a = (\epsilon_{sh} - \epsilon_s) * L$$

ここで、 $\epsilon_s = \Delta L / L$

鉄筋が圧縮された変位 b

$$b = \Delta L / L$$

$$b = \epsilon_s$$

外力が作用していない時
コンクリートの断面力と鉄筋の断面力の和は 0 となる。
クリープを考慮した場合、つり合い式は以下のように表される

$$E_s \cdot \epsilon_s \cdot A_s = (\epsilon_{sh} - \epsilon_s) \cdot E \phi \cdot A_c$$

$$\epsilon_s = \epsilon_{sh} / (1 + n' p)$$

となる。

ここで、 $n' = E_s / E \phi$ 、 $p = A_s / A_c$
 $E \phi = E_c / (1 + \rho \cdot \phi)$
 $\rho = 0.5$ 、 ϕ : クリープ係数

今、コンクリートの E_c (3日)(乾燥収縮解析スタート日)が

$$E_c = 31,000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_r = 200,000 \text{ N/mm}^2$$

で、クリープ係数が $\phi = 4.0$

乾燥収縮が $\epsilon_{sh} = 1000 \mu$

の時、部材の変形と鉄筋比の関係は、次のようになる

$n' = 19.355$ より、

p (%)	0.00	0.50	1.00	1.50
ϵ_s (μ)	1000	912	838	775

図参考 - 24 . 力のつり合いによる収縮ひずみと鉄筋比の関係

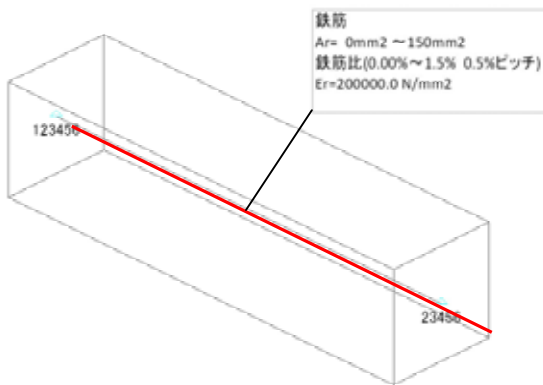
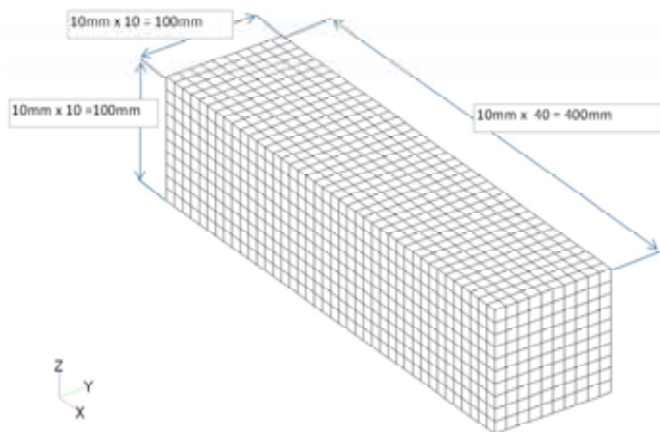
(3) 解析

JIS 供試体寸法で鉄筋比を変化させたモデルで解析を行った(図参考 - 24:自由収縮ひずみ 1,000 μ)。

結果を図参考 - 25 に示す。鉄筋中心からある程度、離れた位置での収縮ひずみは理論解と概ね一致している。

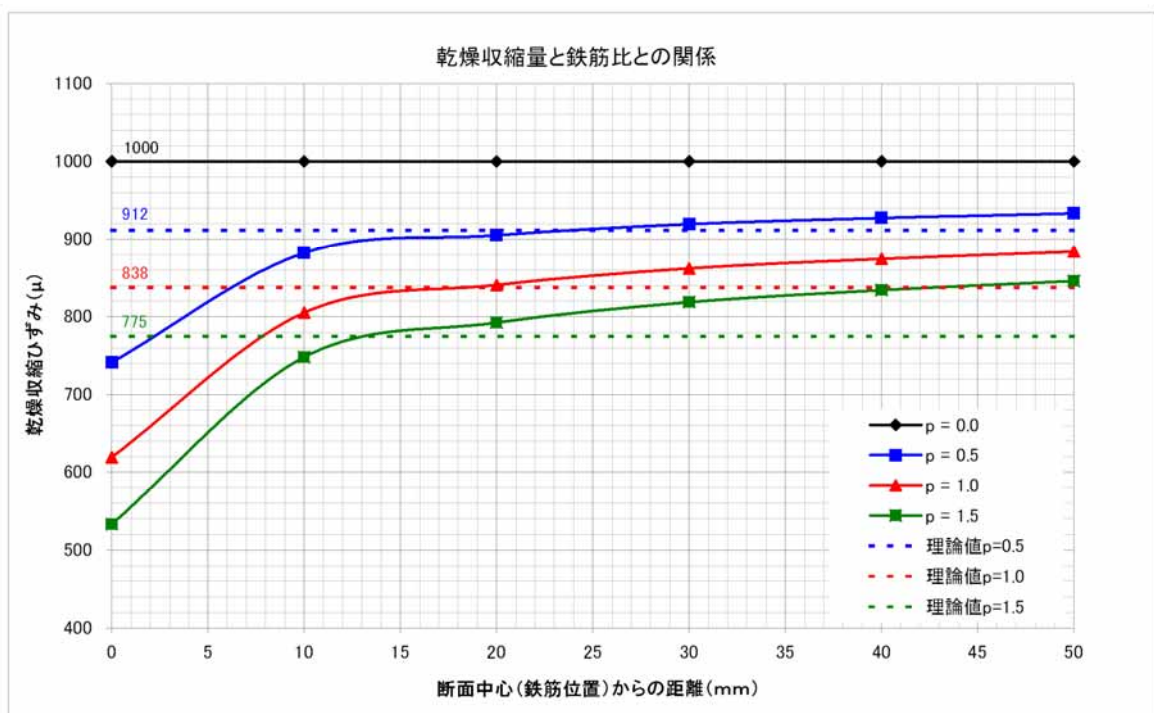
(4) まとめ

- ・コンクリート標準示方書、理論解、解析は、結果に大きな乖離が見られない。
- ・PC 橋の軸方向鉄筋比は 1% 前後であり、理論解によると収縮ひずみは概ね 80% 程度に低減されると考えられる。



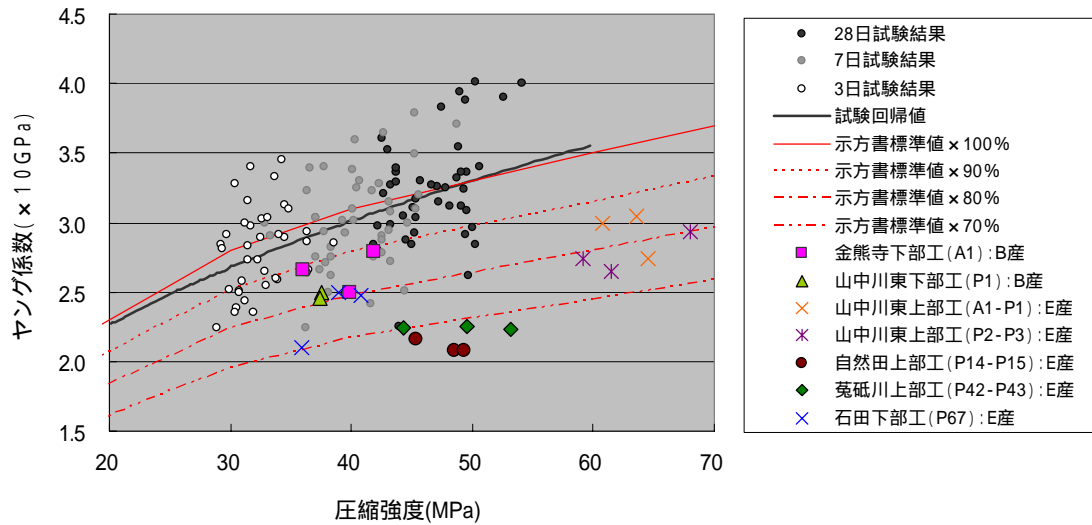
項目	数値	単位	
σ_{ck}	40	N/mm ²	
E_c	31000	N/mm ²	コンクリートの弾性係数
ν_c	0.167		コンクリートのポアソン比
ϕ	4.0		クリープ係数
ρ	0.5		リラクゼーション係数
$\epsilon_{sh\infty}$	1000	μ	コンクリートの乾燥収縮ひずみ
p	0.0, 0.5, 1.0, 1.5	%	鉄筋比
E_s	200000	N/mm ²	鉄筋の弾性係数
ν_s	0.3		鉄筋のポアソン比

図参考 - 25 . 解析モデル(使用ソフト TimeDacs)



図参考 - 26 . 解析結果(実線)と理論解(点線)

【参考7】 ヤング係数の基準値について



図参考 - 27 . 圧縮強度とヤング係数 (静弾性係数) の相関

試験結果: (社)日本道路協会 コンクリート橋小委員会幹事会資料より

コンクリートのヤング係数 (静弾性係数) と圧縮強度の相関を上記に示す。

試験回帰値はコンクリート標準示方書の標準値に近い。データは概ね、標準値の80%以上となっている。一方、第二阪和国道のコア抜き試験結果によると、粗骨材がE産以外の金熊寺川下部工、山中川東下部工はともに、コンクリート標準示方書の標準値×80%以上であるが、E産はそれ以下となっている。自然田上部工、菟砥川上部工のように70%を割り込むものもある。

以上より、コンクリートをヤング係数から評価する場合、コンクリート標準示方書の標準値×80%を基準値とし、それ以上を健全、それ未満を不健全と判定しても問題が少ないと思われる。

表参考 - 13 . 道路橋示方書・同解説 共通編 によるヤング係数

表-3.3.3 コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

設計基準強度	21	24	27	30	40	50	60
ヤング係数	2.85×10 ⁴	2.5×10 ⁴	2.65×10 ⁴	2.8×10 ⁴	3.1×10 ⁴	3.3×10 ⁴	3.5×10 ⁴

表参考 - 14 . 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編] によるヤング係数

表 5.2.1 コンクリートのヤング係数

f_{cu} (N/mm ²)		18	24	30	40	50	60	70	80
E (kN/mm ²)	普通コンクリート	22	25	28	31	33	35	37	38
	軽骨材コンクリート*	13	15	16	19	-	-	-	-

* 骨材を全部軽骨材とした場合

【参考8】材料的対応について

①基本的な対応策

【コンクリートの収縮問題検討委員会】(社)日本コンクリート工学協会報告書より

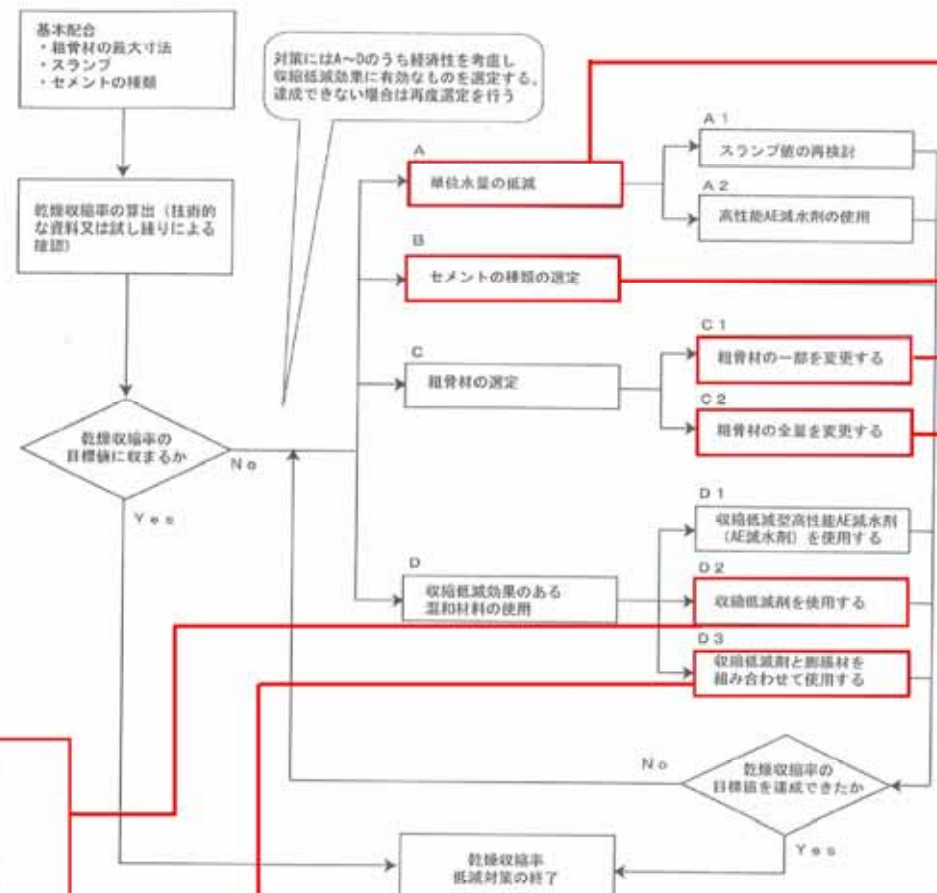


図-5.15 収縮低減対策の選定手順

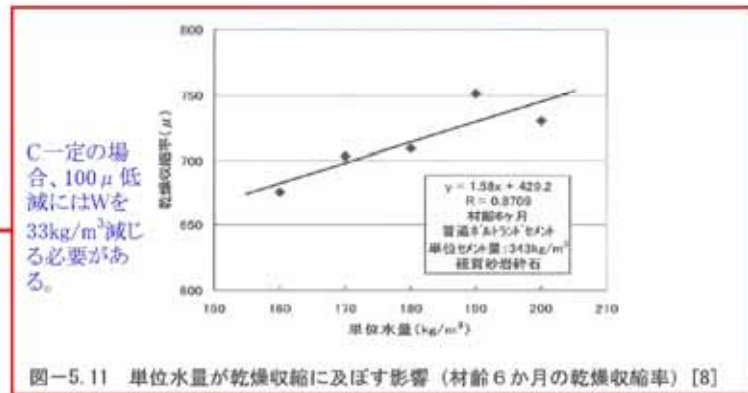


図-5.11 単位水量が乾燥収縮に及ぼす影響(材齢6か月の乾燥収縮率) [8]

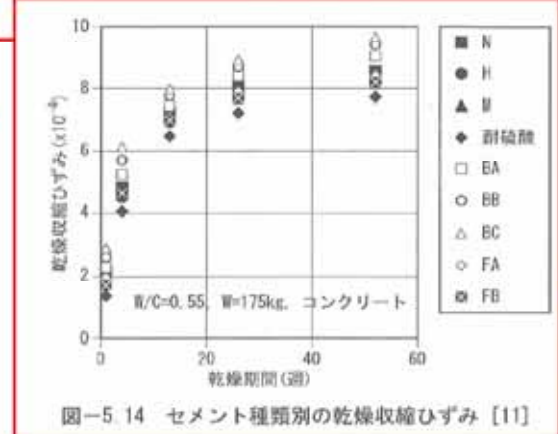


図-5.14 セメント種類別の乾燥収縮ひずみ [11]

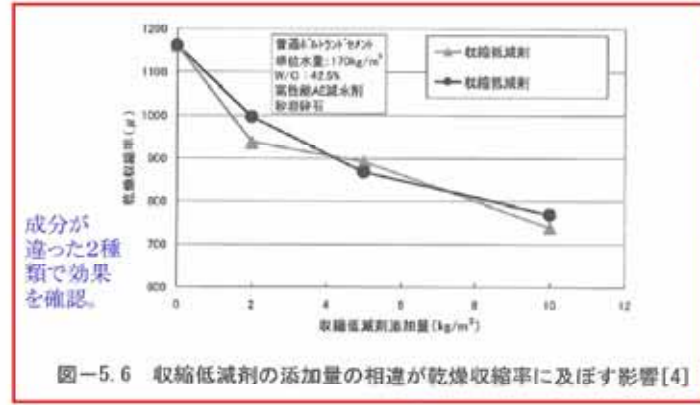


図-5.6 収縮低減剤の添加量の相違が乾燥収縮率に及ぼす影響 [4]

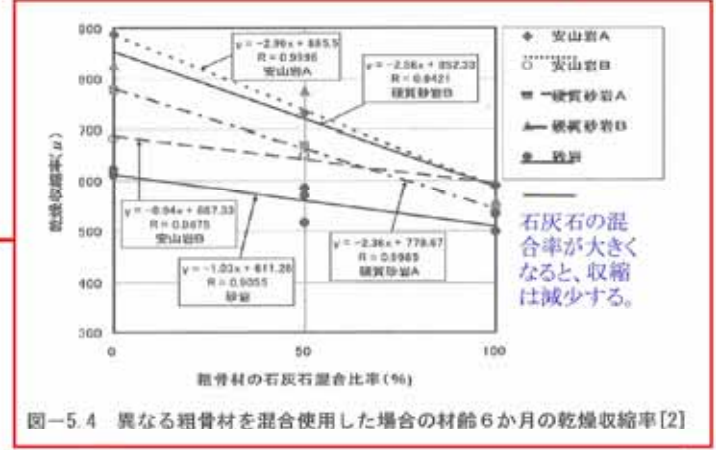


図-5.4 異なる粗骨材を混合使用した場合の材齢6か月の乾燥収縮率 [2]

左から順に、
 基準コンクリート
 膨張材20kg/m³
 膨張材25kg/m³
 膨張材20kg/m³+塗布型収縮低減剤
 膨張材20kg/m³+混和型収縮低減剤

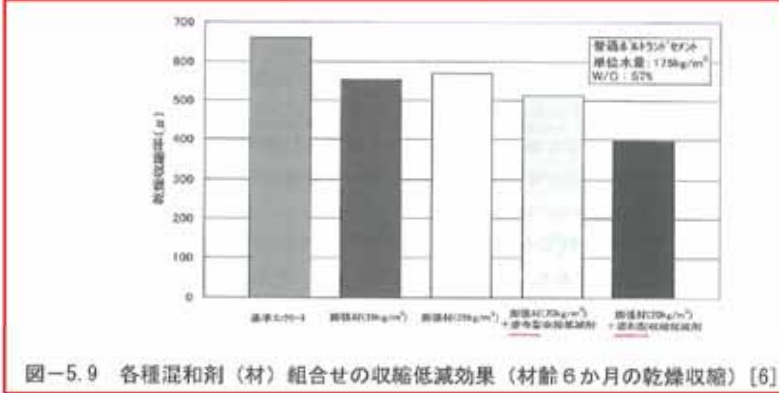


図-5.9 各種混和剤(材)組合せの収縮低減効果(材齢6か月の乾燥収縮) [6]

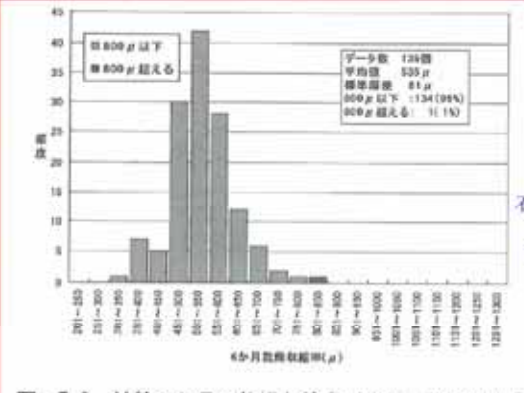


図-5.2 材齢6か月の乾燥収縮率(岩種:石灰石) []

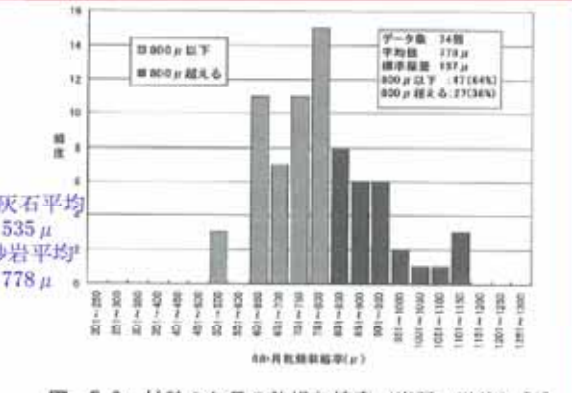


図-5.3 材齢6か月の乾燥収縮率(岩種:砂岩) [1]

【参考9】養生期間の延長について

乾燥開始材齢が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を調べた実験データを重回帰分析した結果、以下の相関式が導かれた（データ提供：岡山大学 綾野教授）

$$\text{乾燥収縮ひずみ} = 5.00 \times (W/C)^{0.26} \times W^{0.740} \times t_0^{-0.084} (\mu)$$

ただし、

W/C：水セメント比（%）

W：単位水量（kg/m³）

t₀：乾燥開始材齢（日）

これに従うと、3日で乾燥を開始した半年後の乾燥収縮ひずみを1とした場合、

- ・ 7日で乾燥開始：0.93
- ・ 14日で乾燥開始：0.88
- ・ 28日で乾燥開始：0.83

となる。

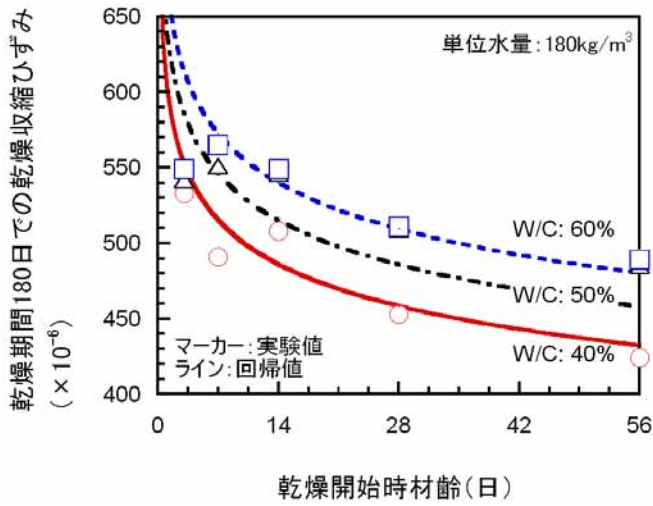
従って、養生日数を14日間にすることで、収縮ひずみを1割、低減可能ということになる。

ただし、養生日数の延長は工程に与える影響が大きく、例えばおよそ11日サイクルでコンクリートを打設していくカンチレバー施工への全面的な適用は困難と考えられる。しかし、箱桁内部で後打ちされる横桁については型枠を存置することが可能であり、また既設床版の散水養生の延長、また養生シート等による表面保護も延長が可能である。従って、工程に与える影響を考慮の上、強く拘束を受けたり乾燥しやすい部材にはできるだけ養生期間を長く取る等の措置が望まれる。

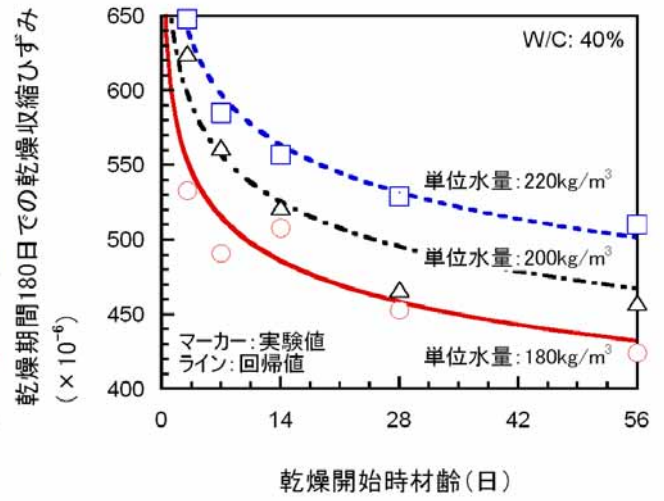
表参考 - 15 . 乾燥開始材齢と収縮ひずみの相関

水セメント比	単位水量	乾燥開始時材齢(日)				
		3	7	14	28	56
40	180	533	491	508	453	424
50		542	551	546	509	485
60		549	565	549	511	489
50	190	580	579	576	503	462
40		625	562	522	467	458
45	200	622	579	538	534	448
50		619	616	595	530	503
55		654	649	618	539	483
60	210	626	652	628	517	500
50		647	667	598	510	504
40	220	648	585	557	529	510
50		675	644	601	574	521
60		687	671	642	576	525

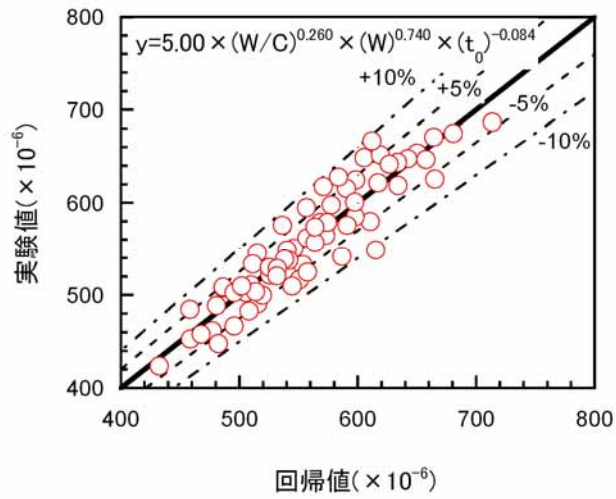
※乾燥期間180日目の乾燥収縮ひずみ



図参考 - 29 . W/C と収縮ひずみの相関



図参考 - 30 . 単位水量と収縮ひずみの相関



図参考 - 31 . 重回帰分析結果