

論文

ケミカルプレストレスの定量化による合成床版のひび割れ抵抗性の管理

神頭峰磯*, 木村潤市**

*日本車輛製造株式会社 輸機・インフラ本部技術計画室(〒456-8691 愛知県名古屋市中熱田区三本松町1-1)

**デンカ株式会社 青海工場セメント・特混研究部(〒949-0393 新潟県糸魚川市大字青海 2209)

鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版）の長寿命化を目的に、合成床版に使用される膨張コンクリートのケミカルプレストレスに着目して、合成床版のひび割れ抵抗性を評価した。本論文では、合成床版内のケミカルプレストレスが、管理用供試体の長さ変化率を基準に、仕事量一定則を適用することで評価できることを実験的に検討した。これにより、膨張材の使用量や合成床版の拘束度の検討を施工前に行うことができ、合成床版のひび割れ発生リスクを低減できる。

キーワード：膨張材，ひび割れ抵抗性，ケミカルプレストレス，合成床版

1. はじめに

近年、鋼橋の床版に用いられる合成床版は、一般的なRC床版よりも耐久性に優れている反面、コンクリートが鋼材に覆われる構造になることからコンクリートに対する拘束が強く、収縮に起因するひび割れが発生しやすい特徴がある。そのため、材齢初期のひび割れ発生を抑制する目的で、合成床版には、収縮補償範囲で膨張コンクリートが用いられている。

膨張コンクリートを用いる際の品質管理は、主に材齢28日における圧縮強度と、JIS A6202による拘束膨張試験を行うに留まり、施工される合成床版のひび割れ抵抗性について管理するものではない。

今回、合成床版に使用される膨張コンクリートのケミカルプレストレスに着目し、合成床版の品質管理手法にひび割れ抵抗性の評価を加えることで、施工前に合成床版のひび割れ発生リスクを管理する手法を検討した。

2. ケミカルプレストレスの定量評価

2.1 仕事量一定則の概念による推定

膨張コンクリートのケミカルプレストレス量は、仕事量一定則の概念によって評価できることが知られており、「単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量は、膨張コンクリートの配合および養生条件が同じであれば、鉄筋量や鉄筋の配置方法によらず、一定である」との仮定に基づくもので、式(1)で表される。

$$U = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot \varepsilon_s = \text{一定} \quad (1)$$

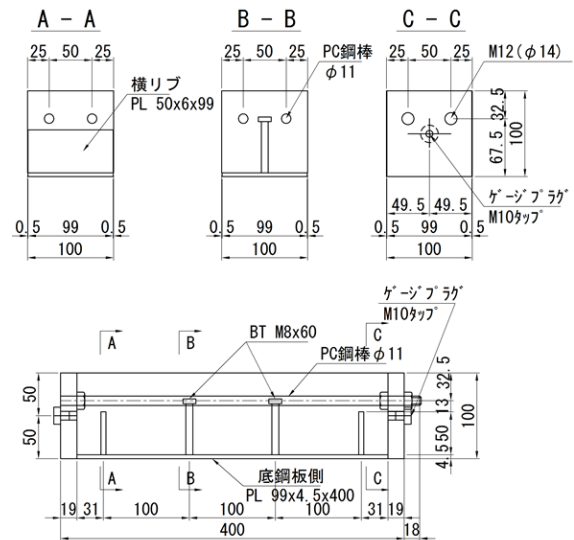


図-1 ミニモデルの形状寸法

ここに、 U ：膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量(N/mm^2)、 σ_c ：ケミカルプレストレス(N/mm^2)、 ε_s ：拘束鋼材の長さ変化率($\times 10^{-6}$)である。

この仕事量一定則では、経時変化する膨張コンクリートの弾性係数やクリープ係数を必要としないため、基準となる管理供試体の長さ変化率から、容易に実部材のケミカルプレストレスを推定することができる^{1),2)}。

2.2 ミニモデルによる評価

一般に、仕事量一定則の概念によって評価するケミカルプレストレス量は、JIS A6202 附属書2に示されている鉄筋比が0.95%の一軸拘束膨張試験を基準とする場合が多いため、鉄筋比が4%以上と大きい場合には、過大に評価する傾向がある³⁾。そのため、合成床版の拘束鋼

材比（3～6％程度）に対する仕事量一定則の適用について、合成床版の拘束を模擬した供試体（以下、ミニモデル）により確認した。

ミニモデルの形状寸法を図－1に示す。ミニモデルは、断面が100×100mm、長さを400mmとし、JIS A 6202 附属書2 B 法で、長さ変化率を測定できる形状とした。拘束条件は、供試体の底面に厚さが4.5mmの鋼板、両端部に反力をとるために厚さが19mmの鋼端板を配置し、JIS A6202 附属書2 B 法で測定できるように測定チップを設置した。上縁から32.5mmの位置にM11のPC鋼棒を2本配置した。また、合成床版のリブを模して、高さが50mmの鋼板を両端から50mmの位置にそれぞれ設け、供試体の中心から50mmの位置にジベル筋としてM8のボルトを2本配置した。これらの構成により、ミニモデルの拘束鋼材比は、6％程度となった。コンクリートは、呼び名が30-8-20Nをベースに、エトリンガイト石灰複合系の低添加型膨脹材を0, 20, 25, 30kg/m³として、単位セメント量に置換したものをを用いた。ミニモデルの他に、JIS A6202 附属書2 B 法による管理供試体を作製し、長さ変化率を材齢1, 3, 5, 7, 14, 28, 56, 91日で測定した。

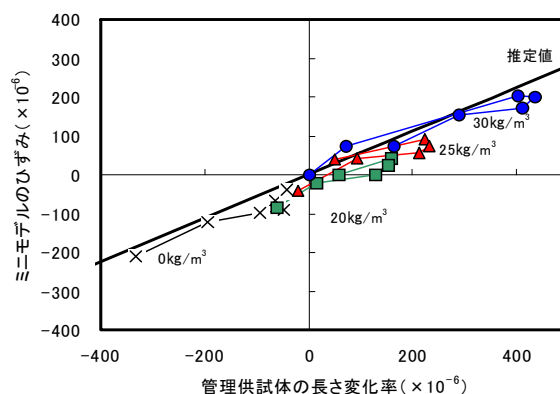
図－2に管理供試体の長さ変化率とミニモデルの軸方向の中心位置におけるひずみの関係を供試体の材齢ごとにプロットした。なお、ミニモデルのひずみは、JIS A 6202 付属書2に準じて、供試体のプラグ間の距離を測定して、ひずみに換算したものである。また、管理供試体の長さ変化率を基準とした場合に対して、仕事量一定則の概念を適用し、ミニモデルの拘束条件下におけるミニモデルの中心位置で算定した推定値をグラフに併記した。管理供試体の長さ変化率とミニモデルの軸方向の中心位置におけるひずみの関係は、仕事量一定則の概念に基づく推定値に、ほぼ対応することが確認できたため、拘束鋼材比が高い合成床版においても仕事量一定則が適用できると考えられる。

2.3 模擬合成床版による評価

ミニモデルの試験結果より、合成床版において仕事量一定則の概念が適用できることが確認されたため、合成床版におけるひび割れ抑制効果の検証を目的として、実際の合成床版を参考とした1.5m×1.5mの合成床版大型モデル試験体を用いて膨脹材の使用量を要因としたモデル実験を行った。

(1) 実験概要

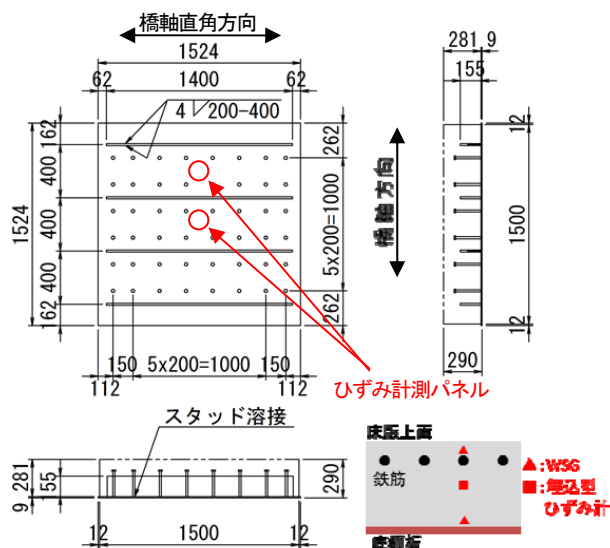
表－1に実験水準とコンクリートの配合を示す。実験水準は、エトリンガイト石灰複合系の低添加型膨脹材の使用量を0, 20, 25, 30kg/m³とする4水準とした。また、現場での膨脹コンクリートの管理評価には、一般的に運用されているJIS A6202 附属書2の一軸拘束膨脹試験（以下、JIS法）と、JCI-S-009-1012「円筒型枠を用いた膨脹



図－2 実験値と推定値の比較

表－1 実験水準およびコンクリートの配合

Case	W/C+Ex (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)		
			W	C	Ex
1	49.0	43.2	165	337	0
2	49.0	43.2	165	317	20
3	49.0	43.2	165	312	25
4	49.0	43.2	165	307	30



図－3 試験体の形状寸法

コンクリートの拘束膨脹試験方法」(以下、SG法)を併用した。

図－3に実験で使用了試験体の形状寸法、およびひずみ計の設置位置を示す。試験体は、ロビンソンタイプの合成床版を参考とした。このタイプは、底鋼板にずれ止めのスタッドを溶接してコンクリートとの一体化を図ることを特徴としている。

(2) 測定項目

測定項目は、底鋼板、コンクリートおよび鉄筋のひずみ、および温度とした。合成床版の底鋼板および鉄筋には、基長が6mmのワイヤストレーンゲージ(以下、WSG)を、コンクリートには埋込型のひずみ計を用いて、それぞれのひずみを計測した。ゲージの設置部位は、図－3

表-2 打込みコンクリートの性状

Case	スランブ (cm)	空気量 (%)	C.T. (°C)	圧縮強度※ ¹ (N/mm ²)	長さ変化率※ ² ($\times 10^{-6}$)
1	10.5	5.7	16	35.0	-32
2	10.0	5.7	16	35.9	120
3	10.0	5.3	16	34.5	185
4	8.0	4.3	18	35.5	314

※1 現場養生における材齢28日の圧縮強度

※2 JIS A6202附属書2の材齢7日の長さ変化率(供試体は現場で採取)

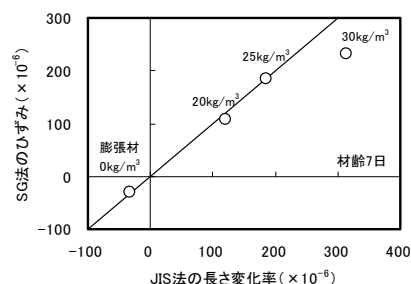


図-4 JIS 法と SG 法の比較

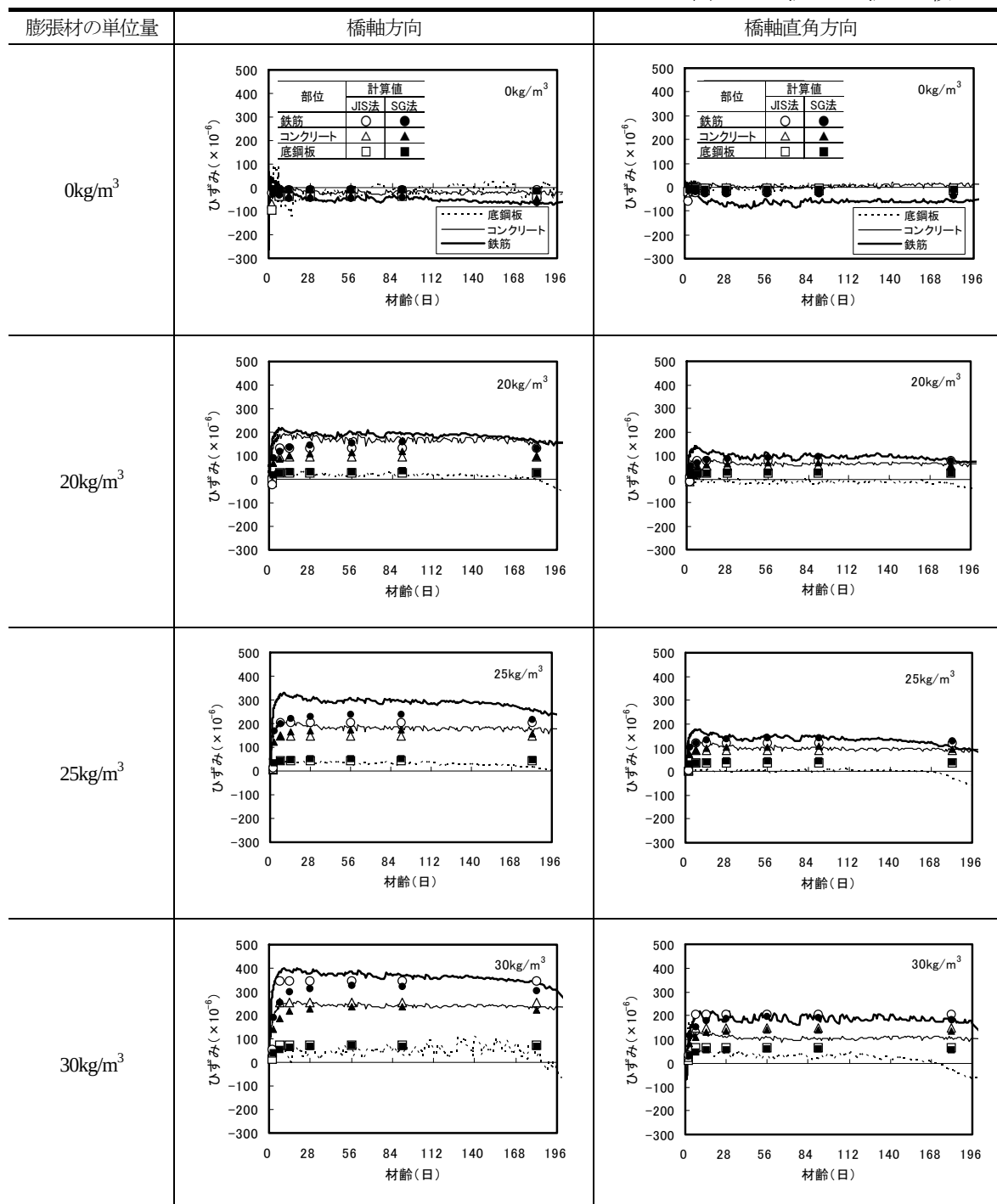
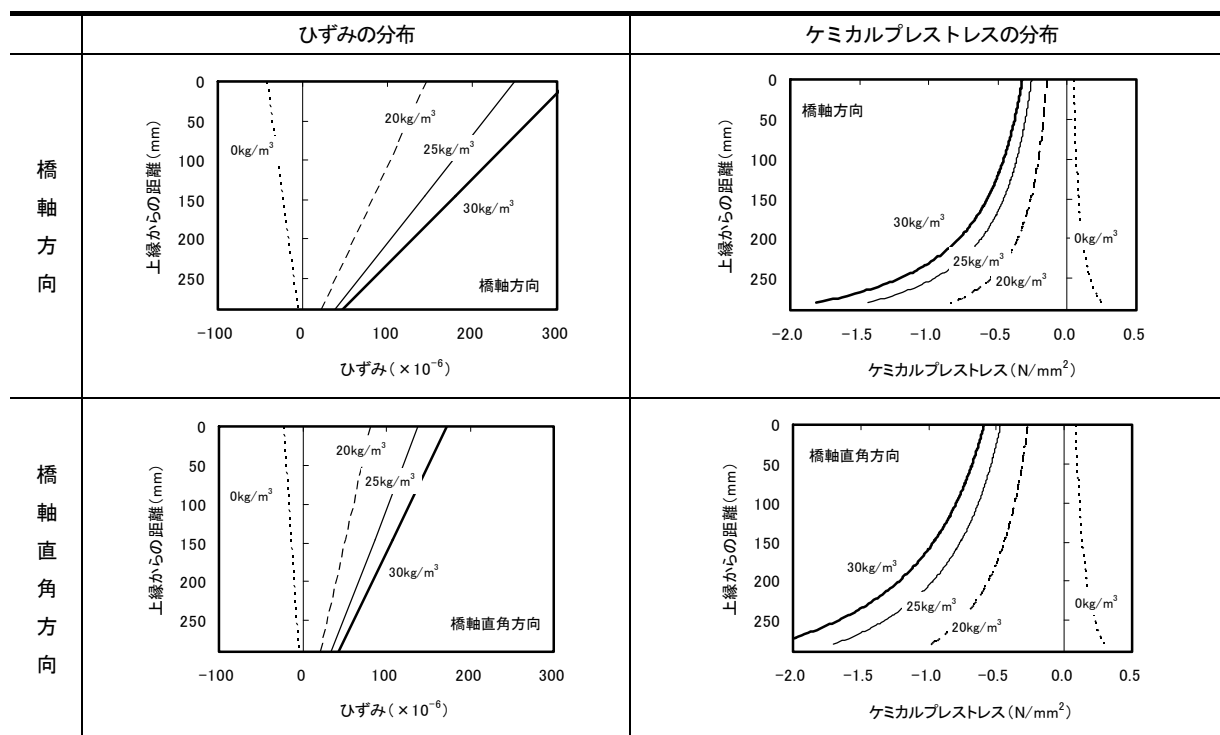


図-5 合成床版大型モデル試験体のひずみ

に示す試験体の中央部と、リブを挟んでその上部の2箇所とした。それぞれの部位において、底鋼板と鉄筋のそ

れぞれ橋軸方向と橋軸直角方向の2方向にWSGを貼付した。埋込型ひずみ計は、高さ方向の中央位置に、それ



図－6 試験体の断面内のひずみおよびケミカルプレストレスの分布の推定

ぞれ橋軸方向と橋軸直角方向に設置した。

(3) コンクリートの特性

表－2 にコンクリートのフレッシュ性状，および力学特性を示す。冬季の打込みであったため，長さ変化率はやや小さめとなった。また，圧縮強度は，いずれの水準も約 35N/mm²であった。

(4) SG 法による膨張ひずみ

図－4 に材齢 7 日における SG 法の測定値と JIS 法の長さ変化率の関係を示す。現場に存置した SG 法の供試体は，現場封緘養生とした。JIS 法の供試体は，供試体採取の翌日以降が 20℃水中養生となり，水分供給を受け膨張ひずみが大きくなる。このことから，JIS 法のひずみは SG 法に比べて若干大きなひずみを示したが，概ね同様の傾向といえる。

(5) 合成床版のひずみ

図－5 に底鋼板，鉄筋およびコンクリートのひずみの経時変化を，橋軸方向と橋軸直角方向で整理した代表例を示す。底鋼板および鉄筋のひずみは貼付した WSG の測定値を，コンクリートのひずみは高さ方向の中央に埋設した埋込型ひずみ計の測定値である。また，仕事量一定則の概念における計算値を○，△，□でそれぞれプロットした。なお，JIS 法の測定値を基準とした場合を塗りつぶしなし，SG 法の測定値を基準とした場合を塗りつぶしで表記した。実験値において，膨張材の使用量に応じて各部位のひずみが大きくなっている。膨張コンク

リートを使用した試験体のひずみは，いずれも材齢 7 日程度まで膨張を示し，その後，ほぼ一様の値となり，膨張ひずみが長期にわたって導入されているといえる。

橋軸方向と橋軸直角方向では，鉄筋比の違いに加えて，リブの拘束の影響を受け拘束度の大きい橋軸直角方向のひずみが小さくなった。断面内のひずみの分布は，拘束の大きい底鋼板の近傍のひずみが小さく，底鋼板から離れた鉄筋のひずみが大きい結果となった。

また，実測されたひずみと，管理供試体の膨張率と仕事量一定則の概念によって算出した計算値は，同等もしくは若干計算値が小さい結果となった。

(6) 合成床版に導入されたケミカルプレストレス

図－6 は，仕事量一定則の概念を積層モデルに取り入れた断面解析⁴⁾により算出した試験体断面のひずみ分布とケミカルプレストレスの推定値である。解析モデルは，拘束体を底鋼板および鉄筋としてモデル化した。なお，ジベル筋は橋軸方向の膨張を拘束するものではなく，底鋼板に力を伝達する機能を有するものと仮定した。試験体の下縁では，底鋼板の拘束によりひずみは小さく，ケミカルプレストレスは大きくなる。下縁から上縁に向かって，底鋼板の拘束の影響が小さくなるため，ひずみが大きくなり，ケミカルプレストレスが小さくなる。コンクリートの収縮に起因するひび割れは，床版上面で発生することから，床版上縁のケミカルプレストレスが評価できることは，実務上有用である。また，図－7 は，合成床版上縁のケミカルプレストレスと，断面内のケミカルプレストレスの平均値を，JIS 法の長さ変化率で整理

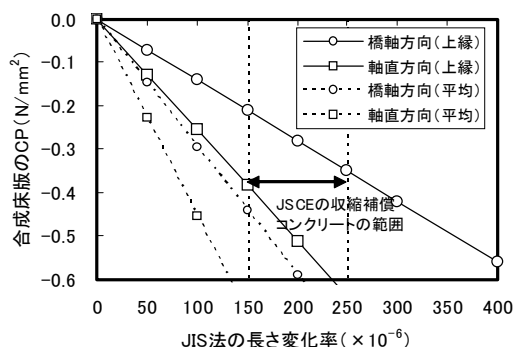


図-7 JIS法の膨張率とケミカルプレストレス

したものである。図-7を利用することにより、目標とするケミカルプレストレスから、膨張コンクリートに要求される膨張率が推定される。この長さ変化率を満足する膨脹材の使用量を試験練りで事前に把握しておくことで、適切な膨脹材の使用量を選定することができる。

3. 実橋における効果の確認

3.1 実橋におけるひび割れ抵抗性の検討

仕事量一定則の概念を取り入れた積層モデルによる断面解析により、合成床版上面のケミカルプレストレスが定量評価できることを実験で確認した。これを用いることで、JIS A6202 または SG 法によって測定した膨張率に対する合成床版のケミカルプレストレスが算出できるため、ひび割れを抑制できる膨張率を算出することができる。

本手法を用いて、4 径間連続鋼鈑桁橋の合成床版における配合検討を行った。本橋では、中間支点が固定支承であり、中間支点付近の床版コンクリートが温度変化を受けた場合に高い引張応力度が発生するため、膨脹材によるケミカルプレストレスの管理により、ひび割れ抵抗性の向上を試みた。ひび割れ抵抗性は、引張強度に対するコンクリートの引張応力度の比で検討を行い、数値が高いほど、ひび割れ抵抗性を有していると判断した。なお、コンクリートの引張応力度は、打込み順序により生じる引張応力度に温度変化時の付加応力と膨脹材によって得られるケミカルプレストレス量を考慮することにより算出した。

本橋のコンクリートの配合では、膨脹材の標準使用量である 20kg/m^3 に対する膨張率が不明であったため、標準使用量に加え、 25kg/m^3 、 30kg/m^3 の添加についても試験練りを行い、図-8 に示すフローにより検討を行った。本橋のコンクリートの配合を表-3 に示す。本検討では、合成床版の設計完了後に積層モデルによる断面解析を行い、図-9 に示すケミカルプレストレスと膨張率の関係をグラフ化した。

試験練りでは、各配合に対してフレッシュ性状の確認

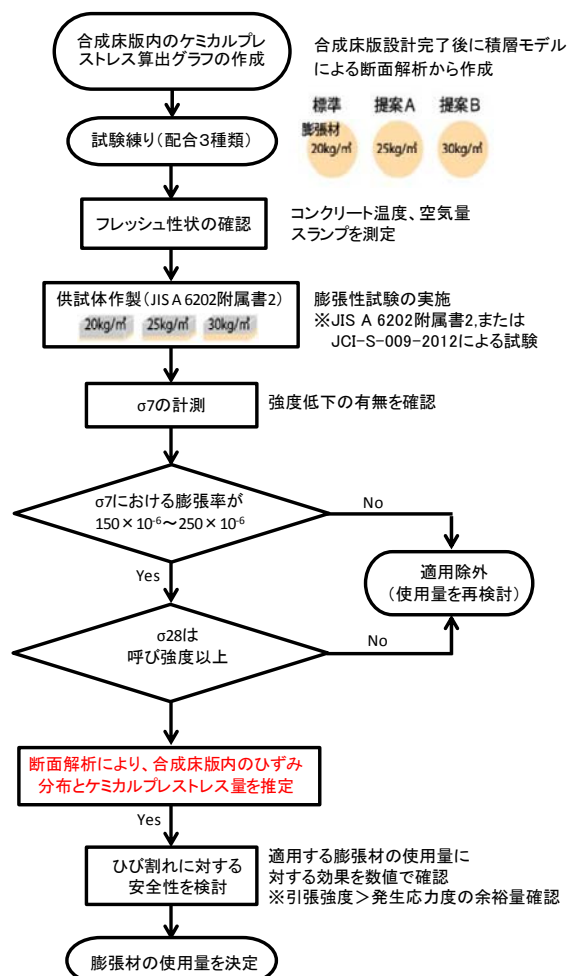


図-8 検討フロー

表-3 実橋合成床版の配合

Case	W/C+Ex (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)		
			W	C	Ex
1	49.5	43.5	164	311	20
2	49.5	43.5	164	306	25
3	49.5	43.5	164	301	30

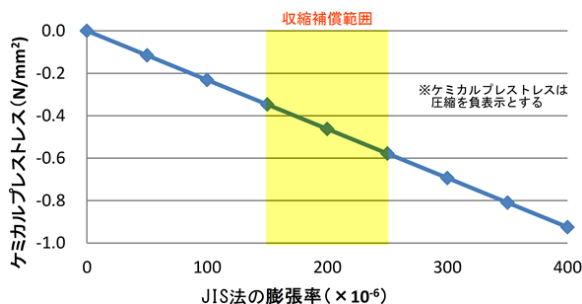


図-9 ケミカルプレストレス算出グラフ

と JIS A6202 による膨脹試験、材齢 7 日および 28 日の圧縮強度試験を行った。試験で得られた圧縮強度と膨脹率の結果を表-4 に示す。また、試験練りによって得られた膨脹率からケミカルプレストレスを算出した結果を

図-10 に示す。膨張材が 20kg/m^3 使用時の圧縮応力であるケミカルプレストレスは -0.41N/mm^2 であり、 25kg/m^3 の使用時には -0.53N/mm^2 と約 30% 向上した。また、膨張材を 30kg/m^3 使用した場合のケミカルプレストレスは、 -0.90N/mm^2 で、標準使用量 20kg/m^3 の 2 倍以上のケミカルプレストレスが床版上面で発生する。しかし、本橋に用いるコンクリートは、コンクリート標準示方書における収縮補償コンクリートとしたため、膨張率の上限を 250×10^{-6} とし、これを超える配合は適用しないこととした。そのため、今回の検討では、膨張材の使用量を 25kg/m^3 に決定した。表-5 に本検討の効果を示す。標準使用量の 20kg/m^3 に対して、 25kg/m^3 に膨張材を増量することにより、引張強度と引張応力度の比は、約 6% の改善が期待できる。また、本橋の場合、表-4 に示すように、膨張材の使用量 30kg/m^3 においても著しい圧縮強度の低下が見られないことから、膨張材の 30kg/m^3 の採用も可能であったと考えられる。この場合、引張強度と引張応力度の比は、約 29% 改善が見込まれ、より一層ひび割れ抵抗性を向上することができる。

以上により、合成床版のひび割れ抵抗性を定量化して、対策を講じることにより、合成床版のひび割れ発生リスクを低減することができた。また、本検討のように膨張率の上限を収縮補償コンクリートの範囲の上限に設定し、膨張材の標準使用量に対する膨張率が、上限付近となるようなコンクリートの場合でも、鉄筋量の増加など合成床版の拘束度を高めることにより、膨張材の効果であるケミカルプレストレスの増強を図ることができる。

本手法を用いることにより、合成床版に使用される膨張材を効果の面から最適値について検討することが可能となり、施工前に合成床版の性能を照査し、その対策について検討することができる。

4. まとめ

本検討により、鋼・コンクリート合成床版のひび割れ抑制を目的として、膨張コンクリートを適用した場合のケミカルプレストレス量の定量化を検証した結果、以下の知見を得た。

- (1) 拘束鋼材比が 6% 程度と大きい合成床版に対しても仕事量一定則が適用できる。
- (2) 仕事量一定則の概念を適用することにより、JIS 法または SG 法による管理試験の膨張ひずみから導入プレストレス量の安全側での評価が可能となる。
- (3) ケミカルプレストレスに着目することにより、合成

表-4 圧縮強度と JIS 法による膨張率

	材齢 (日)	膨張材添加量		
		20kg/m^3	25kg/m^3	30kg/m^3
圧縮強度 (N/mm^2)	7	28.3	28.7	28.0
	28	38.4	38.6	37.5
膨張率 ($\times 10^{-6}$)	7	179	229	388

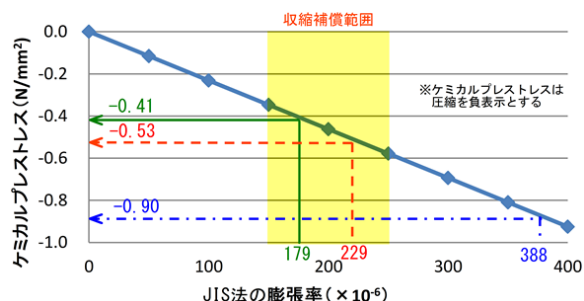


図-10 床版上面のケミカルプレストレス

表-5 膨張材の効果

	膨張材の単位量		
	20kg/m^3	25kg/m^3	30kg/m^3
ケミカルプレストレス (N/mm^2)	-0.41	-0.53	-0.90
引張応力度 (N/mm^2) : 温度変化時	2.20	2.08	1.71
引張強度/引張応力度	1.01	1.07	1.30

床版のひび割れ抵抗性を事前に評価でき、ひび割れ抑制対策を定量的に検討できる。

参考文献

- 1) 辻幸和：ケミカルプレストレスの推定方法について，セメント技術年報，No.27，pp.340-344，1973
- 2) 辻幸和：ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法，コンクリート工学，Vol.19，No.6，pp.99-105，June 1981
- 3) 辻幸和，栖原健太郎：膨張コンクリートの性能評価，技報堂出版，2011
- 4) 辻埜真人，橋田博，菊池俊文，田中博一：膨張材と石灰石骨材を併用した低収縮コンクリートに関する検討（その 2 膨張コンクリートの品質管理方法）日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-1，pp.925-926，2010.9
- 5) 栖原健太郎，李春鶴，芦田公伸，辻幸和：膨張コンクリートを用いた CPC はりの曲げひび割れ幅の評価，コンクリート工学年次論文集，第 31 巻，No.2，pp.229-234，2009.7
(2016 年 7 月 18 日受付)