

論文 膨張材を用いたコンクリート構造物における鉄筋比とケミカルプレストレス効果に関する研究

山門 健人*1・田村 隆弘*2・島袋 淳*3

要旨：本研究では、鉄筋比と膨張材のケミカルプレストレス効果の関係を明らかとすることを目的として、一軸拘束試験、軸方向の鉄筋比のみをパラメーターとした、軸方向拘束供試体の温度、ひずみの計測を行った。その結果、本研究において作製した軸方向拘束供試体(縦 450mm×横 450mm×長さ 600mm)のサイズにおいても軸方向鉄筋の増加によって、コンクリートの膨張ひずみが鉄筋の拘束効果により低減することが確認された。また、軸方向拘束供試体の中心部のひずみを仕事量一定則に適用した場合、表面に配置した鉄筋による拘束が十分ではなく、推定値との差が大きくなった。

キーワード：膨張材、一軸拘束試験、軸方向拘束試験、仕事量一定則

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の建設初期段階で発生するひび割れは長期的な耐久性・美観などの品質の観点から重要視されており、それらひび割れの発生を抑制、また許容ひび割れ幅内に抑えることが重要視されている。そのような背景のなか、収縮補償効果やプレストレス作用による引張応力の低減を期待して膨張材の使用が見られる。膨張材は、セメント量に内割り置換し、コンクリートに膨張を生じさせ、それらの膨張を型枠もしくは構造物内部に配置された鉄筋等により拘束することでケミカルプレストレスを導入するものである。山口県におけるひび割れ抑制対策では、橋台胸壁においては補強鉄筋追加後、鉄筋比 0.5%としており、さらに膨張材を使用することで、ひび割れ抑制効果をさらに高めている¹⁾²⁾。橋台たて壁では、補強鉄筋追加後、鉄筋比 0.3%としているが、長さ 20m を超える大きな橋台では、発生するひび割れを分散し、許容ひび割れ幅以内に抑制することは出来ているものの、完全に発生を抑制するまでには至っておらず、橋台たて壁においても胸壁と同様に補強鉄筋を追加し、膨張材を使用することで、ケミカルプレストレス効果を高めひび割れを抑制することを期待している³⁾。膨張材の膨張特性、ケミカルプレストレス効果に関する研究は、長年にわたり国内でも土木学会、建築学会、JCI 等で活発に行われており、使用するセメントの種類・使用量・養生温度により膨張性能が異なることや実構造物サイズにおける検証実験でも温度ひび割れメカニズム(ここでは内部拘束、外部拘束を指す)に言及した研究報告もなされている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、膨張材を使用するうえで、導入されるケミカルプレストレス量を事前に評価することが重要であるが、辻らは、鉄筋比 0.7%~4.0%の領

域における仕事量一定則⁷⁾⁸⁾、半井らは、鉄筋比 0.6%以下の低鉄筋比領域における修正仕事量一定則⁹⁾¹⁰⁾などを提案している。しかし、それらは一軸拘束試験体のサイズ(縦 100mm×横 100mm×長さ 400mm)では、適用性が確認されているものの、実構造物のような比較的マッシブな部材での適用性は確認されておらず、内部に配置された鉄筋に関して、軸方向鉄筋のみの増加によるケミカルプレストレス効果、また、一定の温度養生条件下での膨張材の膨張特性に関する評価は不十分である。

本研究では、仕事量一定則のマッシブな部材への適用性の検討と軸方向鉄筋と膨張材によるケミカルプレストレス効果との関係を明らかにすることで、橋台たて壁のような部材厚の大きな部材における膨張材によるケミカルプレストレス効果を評価することを目的として、一軸拘束試験、膨張材の有無・軸方向鉄筋比をパラメーターとした縦 450mm×横 450mm×長さ 600mm サイズの供試体による中心の温度、ひずみの計測を行った。本論文では、これらの計測結果に基づき、軸方向鉄筋比と膨張材のケミカルプレストレス効果、膨張収縮特性に着目して評価を行った結果を報告する。

2. 評価方法

2.1 仕事量一定則

仕事量一定則は、辻らによって提案された一軸拘束試験から求められる基準膨張ひずみを用いて評価する方法であり式(1)、(2)により表される⁷⁾⁸⁾。基準となる A 法一軸拘束試験の鉄筋比、約 1.0%に対し、鉄筋比が 0.7%~4.0%までの実用的な範囲での適用性が確認されている。また、コンクリートの弾性係数、クリープ係数を必要とせず、比較的精度よく予測が可能な手法である。

*1 徳山工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 教授 博(工) (正会員)

*3 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 准教授 博(工)

表－1 コンクリートの配合

名称	スランブ SL(cm)	水結合材比 W/B(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m³)							空気量 Air(%)	AE 減水剤 Ad(kg/m³)
				水 W	セメント C	膨張材 Ex	細骨材 S		粗骨材 G			
							1	2	1	2		
BB	12	53	48.1	167	315	0	530	348	395	592	4.5	3.15
BB-Ex	12	53	48.2	167	295	20	533	348	395	592	4.5	3.15

表－2 材料特性

材料	特性
セメント(C)	高炉セメント B 種(BB) 密度：3.04g/cm ³
細骨材(S)	硬質砂岩砕砂 1, 表乾密度：2.69g/cm ³ 石灰石砕砂 2, 表乾密度：2.64g/cm ³
粗骨材(G)	硬質砂岩砕石 1505A1, 表乾密度：2.78g/cm ³ 硬質砂岩砕石 2010A2, 表乾密度：2.78g/cm ³
AE 減水剤(Ad)	主成分：リグニンスルホン酸塩
膨張材(Ex)	低添加型石灰系, 密度：3.16g/cm ³

$$U = 0.5 \cdot P \cdot E_s \cdot (\varepsilon_{scp})^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{cpa} = (2 \cdot P \cdot E_s)^{0.5} \cdot (U)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、U：膨張コンクリートが内部鉄筋に対して行う仕事量(N/mm²)、P：内部鉄筋比(%)、Es：拘束鋼材の弾性係数(N/mm²)、 ε_{scp} ：内部鉄筋の最大膨張ひずみ、 σ_{cpa} ：仕事量一定則に基づくケミカルプレストレス(N/mm²)を示している。

2.2 修正仕事量一定則

半井らは、低鉄筋比領域での仕事量一定則の適用を目的に修正仕事量一定則、式(3)、(4)を提案した^{9) 10)}。これは基準の仕事量から膨張コンクリートが拘束体に対してなす仕事を低減し、修正仕事量として評価しているものである。本研究ではこの2つの法則を用いて軸方向鉄筋の増加によるケミカルプレストレス効果を評価するものとする。

$$U_c = \alpha \cdot U_A \quad (3)$$

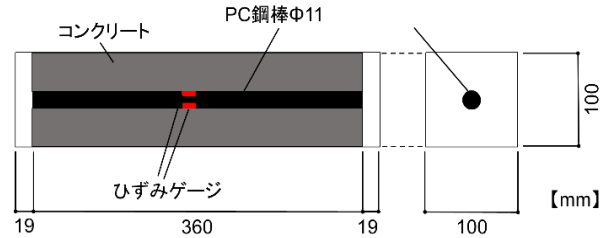
$$\alpha = \left(\frac{P}{0.7}\right)^\beta \quad (4)$$

ここで、 U_c ：修正仕事量(N/mm²)、 α ：仕事量比、P：内部鉄筋比(%)、 β ：膨張能力で決まる定数、 U_A ：A法一軸拘束試験から求まる基準仕事量(N/mm²)を示している。本研究の配合における単位膨張材量は 20kg/m³ のため、定数 β の値は 1 とした。

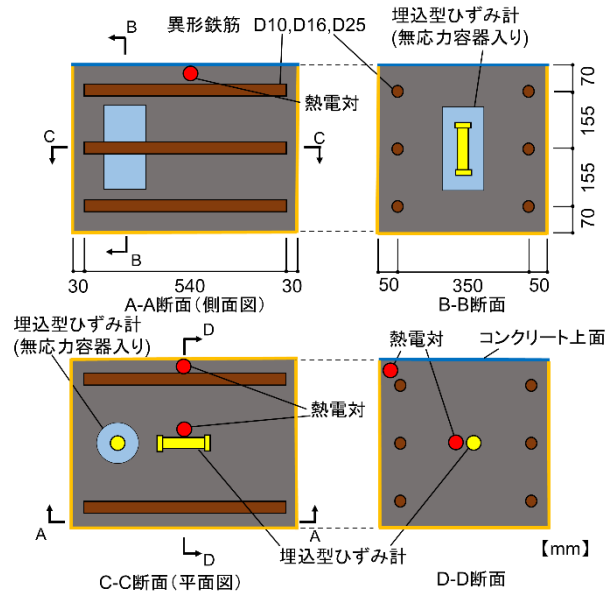
3. 実験方法

3.1 使用材料および配合条件

製作したコンクリートの配合を表－1 に示す。本実験



図－1 一軸拘束供試体寸法



図－2 軸方向拘束供試体寸法

で使用した材料を表－2 に示す。名称の頭文字は使用セメントを示しており、BB は高炉セメント B 種、末尾に Ex とついたものは膨張材を添加したものを示す。膨張材は一定の結合材量 B (セメント C + 膨張材 Ex) に内割置換した配合である。膨張材は石灰系低添加型膨張材 (構造タイプ) を使用し、標準添加量である 20kg/m³ である。コンクリートの呼び強度は 27 である。

3.2 供試体作製方法および試験ケース

図－1 に一軸拘束試験の供試体の寸法を示す。一軸拘束試験の供試体は JIS A 6202 A 法に準拠した縦 100mm×横 100mm×長さ 400mm とし、縦 100mm×横 100mm×厚さ 19mm の 2 枚の拘束板と φ11mm の拘束棒からなる拘束器具を使用した。JIS においては、ひずみはダイヤルゲージによって計測することとされているが、ひずみゲージによる計測によっても、同様の結果を得られることが確

表-3 試験ケース

試験	名称	膨張材	鉄筋比 (%)	計測項目
一軸拘束試験		有	0.95	鋼材ひずみ
軸方向拘束供試体	BB0	無	0	自由ひずみ (無応力容器)
	BB1		0.211	拘束ひずみ
	BB2		0.588	
	BB3		1.5	
	BB-Ex0	有	0	自由ひずみ (無応力容器)
	BB-Ex1		0.211	拘束ひずみ
	BB-Ex2		0.588	
	BB-Ex3		1.5	

認されていることから¹¹⁾、幅 3mm、長さ 11mm のひずみゲージで計測しても差し支えないものとした。ひずみゲージは、防水性粘着テープによって表面を保護している。また、供試体は、2 つ作製し、結果においては 2 つの供試体及び、1 つの供試体あたり 2 つのひずみゲージ、計 4 つのデータの平均値を表示している。

図-2 に軸方向拘束供試体の寸法を示す。軸方向拘束供試体は縦 450mm×横 450mm×長さ 600mm とした。供試体の型枠は合板を使用し、側面は L 型鋼、木材で補強した。軸方向鉄筋は計 6 本配置した。試験ケースを表-3 に示す。軸方向拘束供試体は膨張材の有無、鉄筋比をパラメーターとした計 8 パターンである。鉄筋比は本数を固定し、配置する 6 本の鉄筋の直径を変更させることで変化させた。軸方向拘束供試体は 1 パターンあたり 1 供試体とした。

3.3 養生方法および計測方法

一軸拘束試験では、コンクリート打込み後、1 日で脱型し、7 日間水中養生した。鋼材ひずみは、コンクリート打込み後、1 時間ごとに計測した。軸方向拘束供試体においては、本研究では、若材齢からのひずみ挙動を求めるため、図-2 に示すように埋込型ひずみ計(弾性係数: 40N/mm²)を供試体中心部に配置し、コンクリート打込み終了後より測定を開始し、30 分ごとに計測した。また、埋込型ひずみ計と同位置及び、図-2 に示すように表面かぶりの中心部(型枠から 25mm、コンクリート上面から 35mm の位置)における温度も熱電対によって計測した。さらに、鉄筋を配置していない試験ケース BB0、BB-Ex0 においては、無応力容器を設置し、コンクリートの自由ひずみも計測した。養生では、脱型は行わず、型枠の側面(図-2 における黄色で示した

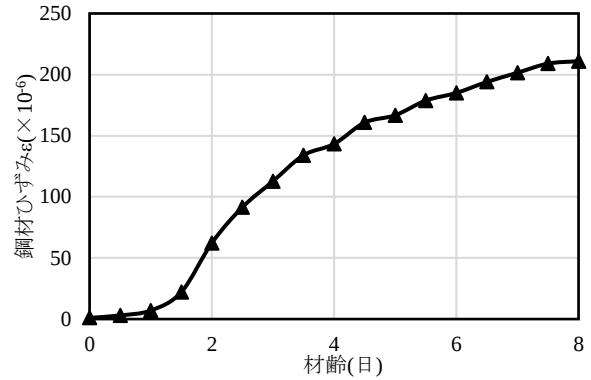


図-3 鋼材ひずみ(一軸拘束試験)

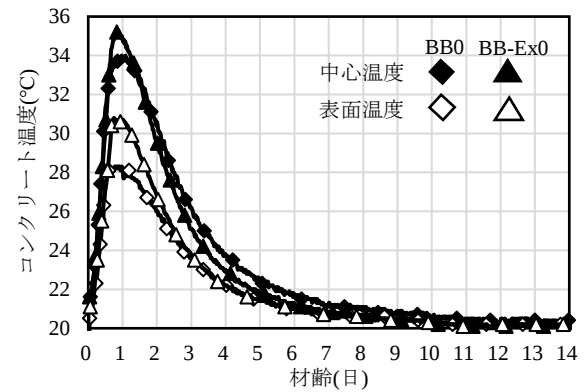


図-4 コンクリートの温度変化

面)を直径 10mm の気泡シート 4 枚で覆い、コンクリート上面(図-2 における青色で示した面)は打込み後、コテ押さえを行った後、気泡シートの上からビニールシートで覆ったため、乾燥収縮による影響はなかったものとする。本研究で設定した環境温度は、20℃一定である。また、コンクリートの打込みも同様の環境温度下の恒温室内で行った。

3.4 各ひずみ成分の扱い

本実験でのコンクリートの配合は水結合材比 W/B が 53%であり、低 W/B コンクリートに比べて自己収縮の影響が顕著でないことが予想されたため、本研究ではひずみの重ね合わせ則が成立すると仮定した上で試験ケース BB0、BB-Ex0 の無応力容器内に設置した埋込型ひずみ計より求めた見かけの線膨張係数より温度ひずみを算出し、各試験ケース中心部の埋込型ひずみ計より求まる拘束ひずみより差し引いたものを温度補正ひずみとして評価した。さらに、ひずみの変化は設置したひずみ計の数値の変化より判断し、その時間以降のひずみの変化を評価した。

4. 実験結果

4.1 一軸拘束試験結果

図-3 に一軸拘束試験の鋼材ひずみの変化を示す。水中養生後の材齢 7 日の時点で、膨張ひずみが約 210μ 程度発現した。

4.2 軸方向拘束試験結果

(1) 温度計測結果

図-4 に BB0, BB-Ex0 の供試体中心部, 表面部の温度計測結果を示す。本実験ではコンクリートの養生における環境条件は全ての試験ケースで同じであり, 各配合ケースにおいて温度変化に差がなかったため, 代表値として試験ケース BB0, BB-Ex0 のみの結果を示す。膨張材を添加した配合の方が中心部, 表面部における最高温度が 2℃程度高くなる傾向が確認された。また, 材齢 1 日程度で最高温度に到達し, 材齢 10 日には 20℃で安定した。

(2) 自由ひずみ計測結果

図-5 に無応力容器内に設置した埋込型ひずみ計より計測された自由ひずみと同位置で計測されたコンクリート温度の関係を示す。温度降下時(最高温度から温度が一定となる材齢 10 日程度まで)の勾配より求まる見かけの線膨張係数は BB0 では $12.669\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$, BB-Ex0 では $9.2984\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$ であり BB-Ex0 の方が 26.6%小さくなり, 既往の研究と同様の傾向が見られた^{4),5),6)}。膨張材の線膨張係数の計測に関しては, 多くの研究が行われており, 一般に, 本研究と同様に無応力容器を使用する方法や, 一軸拘束試験体サイズに埋込型ひずみ計を挿入し, 計測する方法などもあるが, 膨張材は, セメント及び水とともに練り混ぜた後, 水和反応により, エトリンガイド, 水酸化カルシウムなどを生成し, それら鉱物の生成によってコンクリートは膨張する。また, それらの膨張特性はセメント種類により異なる。そのため, 膨張材の添加にかかわらず線膨張係数を無添加のコンクリートと同等の値を用いる方法もあるが, 本研究では, 膨張・収縮特性が異なると考えたため, 上記で求めた見かけの線膨張係数を用いて考察するものとする。

図-6 に BB0 及び, BB-Ex0 の材齢に伴う自由ひずみ及び, 見かけの収縮ひずみの関係を示す。ここでの見かけの収縮ひずみとは, 自由ひずみから上記より求めた見かけの線膨張係数に温度変化を乗じた温度ひずみを引いた値である。見かけの収縮ひずみの値は, 主に自己収縮ひずみ及びクリープひずみなどの変化を示している。また, 見かけの収縮ひずみは, 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]に示される自己収縮ひずみの予測式(5)を最小二乗法を用いて近似している。

$$\varepsilon_h = \varepsilon_\infty [1 - \exp\{-\alpha t^\beta\}] \quad (5)$$

ここで, ε_h : 自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), ε_∞ : 自己収縮ひずみの終局値($\times 10^{-6}$), t : 凝結の始発(日), α, β : 自己収縮の進行特性を表す係数を示している。膨張材の有無を膨張材により導入された膨張ひずみとすると, 膨張材を添加することで 459.5μ の膨張ひずみが発現した。また膨張ひずみは材齢 10 日で収束した。本研究で製作したコ

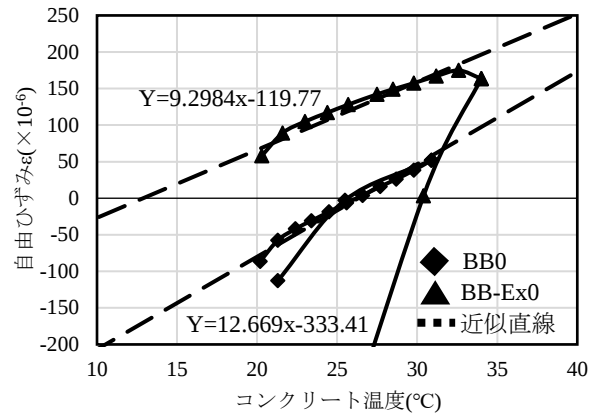


図-5 自由ひずみとコンクリート温度の関係

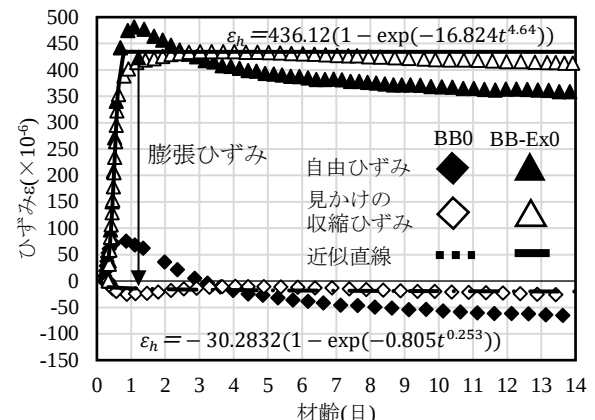


図-6 自由ひずみ, 見かけの収縮ひずみの変化

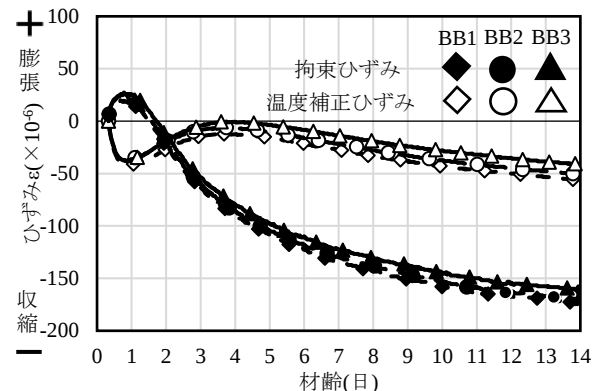


図-7 拘束ひずみ, 温度補正ひずみの変化 (BB)

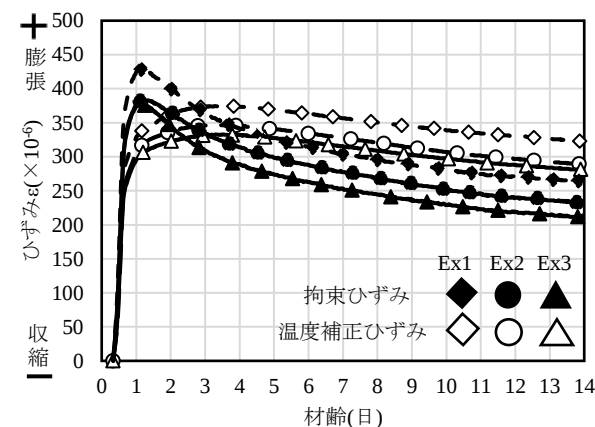


図-8 拘束ひずみ, 温度補正ひずみの変化 (BB-Ex)

ンクリートの水結合材比は高いため、自己収縮によるひずみの影響は小さかった。

(3) 拘束ひずみ及び温度補正ひずみ

図-7 に BB、図-8 に BB-Ex の各パターンの拘束ひずみ及び、温度補正ひずみの変化を示す。ここでの拘束ひずみは供試体中心部に設置した埋込型ひずみ計より計測されたひずみである。また、温度補正ひずみはそれらの拘束ひずみから無応力容器内の埋込型ひずみ計から算出された見かけの線膨張係数に各パターンの温度変化を乗じた温度ひずみを引いた値である（＋：膨張，－：収縮）。図-7 より、BB において、鉄筋による拘束効果によって図-6 に示す自由ひずみよりも拘束ひずみは小さくなっている。また、鉄筋比が増加するほど、収縮ひずみが若干低下していることから、鉄筋により、ひび割れの発生の起因となるひずみが抑制されていることが確認された。図-8 の BB-Ex においても、鉄筋による拘束効果によってひずみが小さくなっている。BB では収縮領域（図のマイナスの領域）において鉄筋比の増加に伴いひずみが低減しているが、BB-Ex では膨張領域（図のプラスの領域）において鉄筋比の増加に伴いひずみが低減している。このことは、膨張領域においては、鉄筋による拘束効果によってケミカルプレストレスが導入されたと考えられる。また、それは BB よりも顕著であり、鉄筋比が大きいほど顕著である。しかし、部材表面に配置された鉄筋が中心部のコンクリートの膨張を拘束しているのは、明らかではあるが、Ex1 と Ex3 を比較した場合、拘束する鉄筋と中心部のコンクリートの距離が大きいため、鉄筋比が 1%以上増加したにも関わらず、膨張ひずみは 50μ 程度しか低減しなかった。

4.3 仕事量一定則の適用

一軸拘束試験より求まる鋼材比 0.95%の膨張ひずみを基準膨張ひずみとして軸方向拘束供試体に式(1)の仕事量一定則及び、式(3)の修正仕事量一定則を適用した。基準膨張ひずみは、一軸拘束試験より求まる水中養生終了後の材齢 7 日における最大膨張ひずみ量である 210μ を基準とした。軸方向拘束供試体の膨張ひずみは、中心部における埋込型ひずみ計から求まる温度補正ひずみの最大値を適用している。また BB-Ex1, BB-Ex2 は低鉄筋比領域であるため、修正仕事量一定則を使用した。これらの結果を図-9 に示す。図より、Ex1, Ex2 においては、修正仕事量一定則を適用することで、仕事量を低減することができている。しかし、理論上においては、仕事量は鉄筋比を変化させた場合においても一定となるべきだが、鉄筋比の増加に伴い、仕事量も増加している。それらの理由として、配置した鉄筋の配置方法(本実験では表面部のみに鉄筋を配置)や、部材寸法の影響によってコンクリートの膨張を十分に拘束できていないことが考

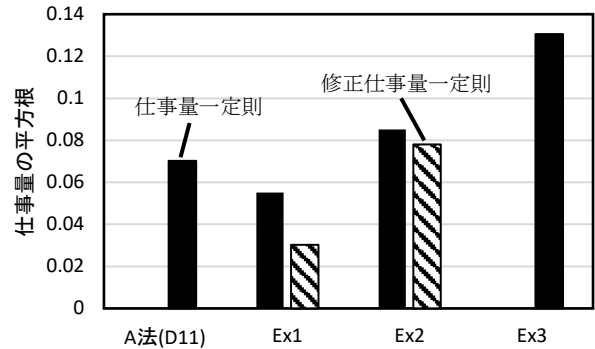


図-9 軸方向拘束供試体の仕事量

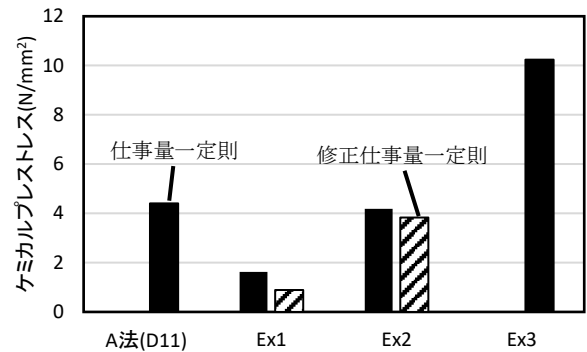


図-10 軸方向拘束供試体のケミカルプレストレス

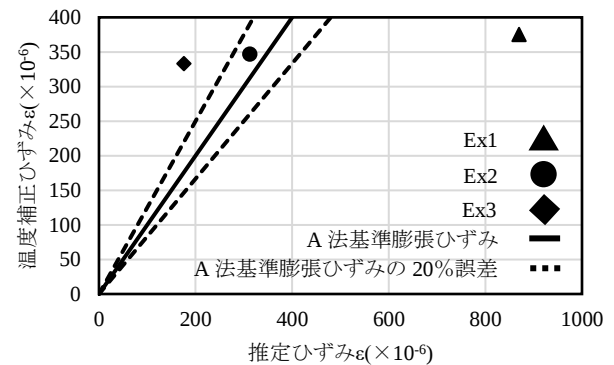


図-11 推定ひずみと温度補正ひずみの関係

えられる。

4.4 ケミカルプレストレスの算定

図-10 に式(2)を用い膨張材を用いた軸方向拘束供試体のケミカルプレストレスを示す。このときの仕事量は、図-9 で求めた仕事量を適用している。また、低鉄筋領域である Ex1, Ex2 については修正仕事量を適用している。ケミカルプレストレスは、供試体の鉄筋比が大きくなる程、増加する傾向がみられた。

図-11 にひずみの推定値及び、温度補正ひずみの関係を示す。ここでの推定ひずみは仕事量一定則及び、修正仕事量一定則から求まる仕事量が一定の場合の各ケースにおいて推定したひずみである。また、温度補正ひずみは、本実験で得られた図-8 に示すひずみの最大値である。実験より求めた温度補正ひずみは推定ひずみに比べ差が大きい。本研究では、供試体中心部のひずみを仕事量一定則に適用しており、拘束する鉄筋からの距離

が大きいため、推定値よりも差が大きくなったと考えられる。また、鉄筋の本数を 6 本と固定しており、上段、下段に配置した鉄筋が中心のコンクリートのひずみに及ぼす影響が小さい可能性がある。さらに、鉄筋近傍では、中心部に比べ、鉄筋による拘束が大きいため、中心部よりも膨張ひずみが低減している可能性が高い。これらの結果より、鉄筋を表面に配置した軸方向拘束供試体では、鉄筋比の増加に伴って、膨張ひずみが低減することが確認されたものの、仕事量一定則、修正仕事量一定則に基づいて算出された推定値よりも小さいことが確認された。それゆえに、橋台たて壁のような部材厚の大きな構造物に膨張材を使用し、ケミカルプレストレス効果を期待する場合には、ケミカルプレストレスを導入したい部分に鉄筋を配置することが妥当であると考えられる。

5. 結論

仕事量一定則のマッシブな部材への適用性と軸方向鉄筋とケミカルプレストレス効果を明らかとすることを目的に一軸拘束試験及び、軸方向拘束供試体による温度、ひずみの計測を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) 本研究における軸方向拘束供試体のサイズにおいても、部材の表面に配置した鉄筋が、中心部のコンクリートの膨張を拘束し、膨張ひずみが鉄筋の拘束効果によって低減することが確認された。さらに、部材内に配置される鉄筋量の増加に伴って、膨張ひずみが低減することが確認された。
- 2) 軸方向拘束供試体において、中心部のひずみを仕事量一定則に適用した場合は、鉄筋による拘束が十分ではなく、実験値と推定値の差が大きくなった。それゆえに、構造物において、鉄筋が配置されていない、もしくは、拘束する鉄筋との距離が大きい箇所に関しては、膨張材によるケミカルプレストレス効果の期待は小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 二宮純：山口県における取り組み（コンクリート構造物の品質確保システム）、コンクリート技術大会（郡山）、2013.10
- 2) 山口県技術管理課：コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料、2007.10
- 3) 日本コンクリート工学会：高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会 報告書、pp.427-432, 2011
- 4) 壹岐直之、清宮理、何海明、植田智幸：膨張材を混入したコンクリート梁の挙動とひび割れ抑制効果の解析的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.30, No.2, pp.157-162, 2008
- 5) 酒井貴洋、水谷征治、網野貴彦、清宮理：実大モデル実験による膨張材の温度ひび割れ抑制効果に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.31, No.1, pp.1591-1596, 2009
- 6) 末岡英二ほか：膨張材の内部拘束による温度ひび割れ抑制効果に関する考察、土木学会第 64 回年次学術講演会、V-409, pp.815-816, 2009
- 7) 辻幸和：ケミカルプレストレスの推定手法について、セメント技術年報、No.27, pp.340-344, 1973
- 8) 辻幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究、土木学会論文集、第 235 号、pp.111-124, 1975
- 9) 半井健一郎、萩原淳弘、辻幸和：拘束の小さい膨張コンクリートへの仕事量一定則の適用手法、セメント・コンクリート論文集、No.62, pp.189-196, 2008
- 10) 半井健一郎、森田卓、辻幸和：低鉄筋比領域における膨張コンクリートのなす仕事量の再評価、セメント・コンクリート論文集、No.64, pp.154-161, 2010
- 11) 三谷裕二、谷村充、佐久間隆司、佐竹紳也：マス養生温度下における膨張コンクリートの膨張応力評価法について、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, pp.225-230, 2004