

フライアッシュを添加したPCスラブの初期応力挙動に関する検討

富山県立大学 正会員 博士(工学) ○伊藤 始
 富山県立大学 仕入 裕也
 金沢大学 博士(工学) 深田 宰史
 北陸電力(株) 博士(工学) 参納千夏男

Abstract : In this study, for the purpose of investigating the thermal crack restraint effect by the use of the fly ash and the pre-stress introduction, the field measurement test of full size PC slab and the thermal stress analysis to it were carried out. As a result, the crack were not observed on the surface of the PC slab by the use of fly ash and prestress introduction. These behaviors were confirmed by measurement and were verified by the analysis. Moreover, the improvement effect of crack index by the pre-stress was confirmed.

Key words : Thermal stress, Prestressed concrete, Full size PC slab, Fly ash

1. はじめに

スラブや橋脚等のマスコンクリートでは、耐久性能や構造性能に影響を与えないように、温度応力による初期ひび割れを抑制することが重要である。その抑制対策として、発熱量の低減や拘束力の低減等が実施されて、その効果が確認されている¹⁾。それらの対策において、フライアッシュ (FA) の添加によるコンクリートの発熱量変化やプレストレス (PC) 導入による応力低減を、実大規模の計測試験で詳細に検討した事例は少ない^{2),3)}。本研究では北陸産分級FAの添加とPC導入の2つの温度ひび割れ抑制対策による挙動変化とその効果を明らかにすることを目的とした。研究では載荷装置の床版に用いられる長さ25mの大型PCスラブの現場計測と温度応力解析を実施し、各対策による発熱・応力挙動を検討した。

研究の流れを図-1に示す。研究では、まず写真-1のPCスラブのコンクリートを打込み、温度、ひずみ、応力を計測し、PC緊張によるコンクリートのひずみと応力の挙動を検討した。次に、温度変化によるひずみと応力の挙動を検討するとともに、現場条件に合わせた温度応力解析を実施することで、現場試験のコンクリート挙動を模擬した。最後に、セメント種類やPC導入の有無の解析条件を変更したことによるひずみや応力、ひび割れ指数への影響を検討した。

2. PCスラブの計測試験方法

2.1 PCスラブの概要とPC導入方法

PCスラブは、写真-1および図-2に示す幅4.75m、高さ1.5mの矩形断面を持つ、長さ25mのスラブである。PC鋼材は長手方向の2段に26本を配置した。PC鋼材は付帯設備のため、南側を0.25mあけて設置した。PC鋼材には、プレグラウト方式の直径21.8mmのPC鋼より線を用いた。PC緊張時の鋼材応力は $1130\text{N}/\text{mm}^2$ とし、緊張直後のコンクリート応力は $1.2\text{N}/\text{mm}^2$ と設定した。PC鋼材の緊張順序は図の番号のように南側1番目の位置(断面中心CLから1850mm)の鋼材から緊張を開始して、北側13・14番目の位置(CLから-2125mm)の鋼材で

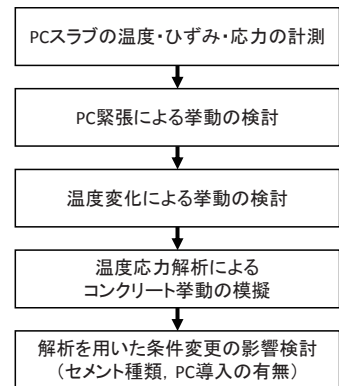


図-1 研究の流れ

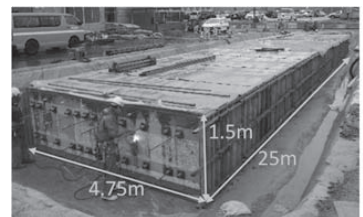


写真-1 試験状況(PC緊張)

折り返し、26番目の位置の鋼材を緊張することで終了した。

2. 2 試験手順と施工条件

試験では、準備として地盤を掘削し、その上に厚さ200mmの栗石と厚さ100mmの均しコンクリートを施工した。次に鉄筋とPC鋼材の配置、型枠の設置、計測器の設置を行った。試験は、型枠内にコンクリートを打込み、一定間隔で温度、ひずみ、応力を計測することで行った。コンクリート打込み後に表-1に示す施工手順で上面シート養生と給熱養生、型枠脱型、PC緊張、埋戻しを行った。また、表には材齢ごとの天気を示す。

2. 3 配合条件と強度試験結果

表-2にコンクリートの配合表を示す。本配合では強度保証材齢を7日とした。配合条件として配合強度を36N/mm²、目標スランプを12cm、粗骨材最大寸法を25mmとした。セメントにはPC緊張工程を考慮して早強ポルトランドセメントを用い、混和材としてフライアッシュ (FA) を15%添加した。FAは七尾大田火力発電所から産出された分級FA (JIS II種相当) を使用した³⁾。コンクリートの圧縮強度試験結果 (H+FA) を図-3に示す。図には早強ポルトランドセメントのみを用いた場合の試験結果 (H) および土木学会コンクリート標準示方書 (以下、示方書) の圧縮強度発現曲線を併せて示す⁴⁾。FAを15%添加した場合でも、PC導入時に必要な圧縮強度を満足し、さらに結合材量を低減できる可能性を示した。

2. 4 計測方法

計測項目は、温度、コンクリートひずみ、およびコンクリート応力とした。温度は熱電対を用い、コンクリートひずみは長さ100mmの埋込み型ひずみ計を用いた。コンクリート応力は長さ500mmの有効応力計を使用した。ひずみ計と有効応力計は、スラブの長手方向と平行方向に配置することを基本とし、ひずみ計の2本のみを長手方向の水平直交方向に配置した。

長手方向の計測位置は、中央部 (端部から12.5m) のA断面、中央部から5mのB断面、中央部から10m (端部から2.5m) のC断面に設定した。A断面の測点位置は図-2のように鉛直方向に図中記号L1~M~U1の7段、水平方向に同S1~CL~N3の5列とした。測点位置を「CL・M点」のように列・段の順に表示することとする。A断面の「CL・U2点」と「CL・M点」では、ひずみ計を長手方向の平行方向と水平直交方向の2方向に配置した。水平直交方向のひずみは記号の後ろに「-Y」と記す。B・C断面の測点位置はA断面のU3、L3段とN3列を除いた点とした。

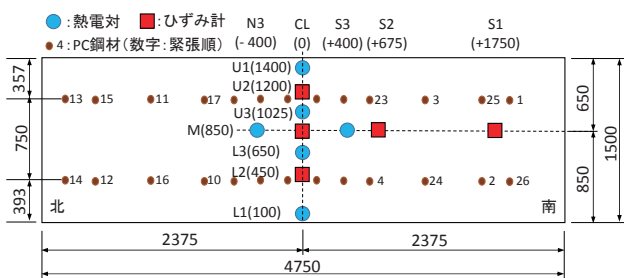


図-2 PCスラブの断面寸法と測定位置 (A断面)

表-1 コンクリート打込み後の施工手順

工程	材齢(日)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
コンクリート打込み	■											
上面シート養生	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
給熱養生	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
型枠脱型				■	■	■	■	■	■	■	■	■
PC緊張								■	■	■	■	■
埋戻し										■	■	■
天気	曇・雪	晴	雨	晴	曇	雨	曇	晴	曇	曇	雨	

表-2 配合表

水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		セメント C	フライアッシュ FA	水 W	細骨材 S	粗骨材 G
H+FA	42.9	305	54	154	779	989
H	48.3	325	-	157	812	987

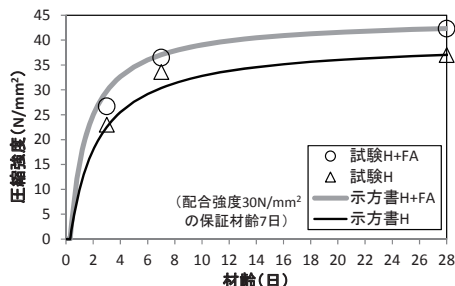


図-3 強度試験結果

3. PC導入によるコンクリートの挙動の検討

3. 1 コンクリートのひずみ増加量

図-4にPC緊張によるひずみ増加量の分布を示す。図-4 (a)の水平方向分布のひずみはCLからの距離が大きくなるとともに小さくなった。S1点のひずみ増加量の平均値は 37.9×10^{-6} であり、CL点の値 50.5×10^{-6} よりも 12.6×10^{-6} 小さくなった。一方、図-4 (b)の鉛直方向分布では、平均値が $49.8 \sim 51.4 \times 10^{-6}$ であり、差異が小さかった。

3. 2 圧縮応力と弾性ひずみの関係

図-5にB断面で計測したコンクリートの圧縮応力と弾性ひずみの関係を示す。弾性ひずみは計測した実ひずみから温度ひずみを引くことで計算した。温度ひずみは温度変化量に線膨張係数 (10×10^{-6}) を乗じることで計算した。弾性ひずみと圧縮応力はおおむね比例しており、その割合は 23500 N/mm^2 であった。示方書の計算法を用いると、PC緊張時までの温度履歴を考慮したコンクリートの有効材齢が22.9日であり、図-3の強度発現曲線から圧縮強度の計算値が 41.9 N/mm^2 と得られ、ヤング係数が 22000 N/mm^2 と計算された⁴⁾。計測されたヤング係数はほぼ一致しており、有効材齢を考慮することで推定可能であることが確認できた。

4. 温度変化による挙動の検討

4. 1 温度履歴

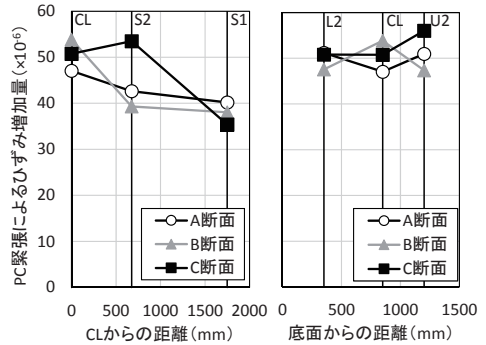
図-6にA断面・CL軸の5点と外気の温度履歴を示す。打込み温度は 13°C 程度であり、中心Mの最高温度は 64.2°C に達した。上側表面から 100 mm のU1では、最高温度が低く、温度低下が早い時期に見られた。また、底面から 100 mm のL1では地盤側の温度の影響で最高温度が低いものの、温度低下は緩やかであり、地盤側への放熱が小さいことが確認できた。

4. 2 実ひずみの履歴

図-7にA断面・CL軸の5点の実ひずみの履歴を示す。すべての実ひずみは温度上昇に伴い膨張側に推移した。長手直交方向のM-YがMに比べ $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 大きくなり、地盤等からの拘束が小さいことが推察された。また、材齢5日のPC導入により、長手平行方向のU2, M, L2のひずみが $40 \sim 60 \times 10^{-6}$ 小さくなった。

4. 3 各種ひずみの履歴

図-8に実ひずみ、温度ひずみ、弾性ひずみの履歴を示す。図には後述する解析値も併記している。温度ひずみは温度上昇に伴って膨張側に増加し、実ひずみは温度ひずみが地盤等に拘束されることで、温度ひずみに比べて小さくなった。図-8 (a)のCL・M点の弾性ひずみは、圧縮側に位置し、5日から14日にかけて圧



(a) 水平方向分布 (b) 鉛直方向分布

図-4 PC緊張によるひずみ増加量の分布

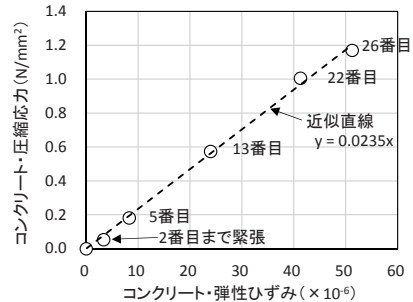


図-5 圧縮応力と弾性ひずみの関係

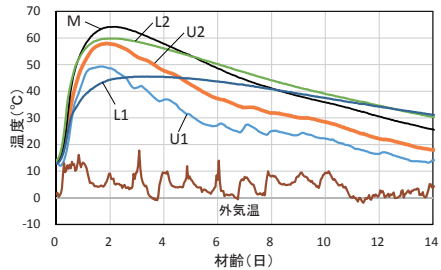


図-6 温度履歴 (A断面・CL軸)

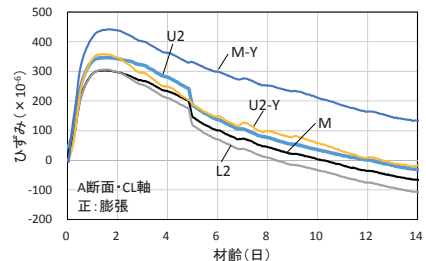


図-7 実ひずみ履歴 (A断面・CL軸)

縮ひずみが小さくなった。また、PC導入により、弾性ひずみが圧縮側に推移した。図-8 (b)のCL・M-Y点では、実ひずみと温度ひずみの差が長手平行方向に比べ小さく、弾性ひずみが14日でゼロとなった。

4. 4 応力履歴

図-9にB断面のCL・M点の圧縮を正とした圧縮・弾性ひずみと圧縮応力の履歴を示す。圧縮応力はPC緊張力の導入により約1.1N/mm²増加し、設定上の値とほぼ一致した。応力の履歴は、ひずみの履歴に比べて温度変化やPC導入の影響を大きく受けた。その影響について、図-10に圧縮応力と弾性ひずみの関係を示す。材齢2.6日まではひずみの増加にともない応力が緩やかに増加し、材齢5日のPC緊張力導入時や6日以降の温度下降時にはひずみの変化に対して応力が大きく変化した。これは材齢にともなうヤング係数の増加が関係していると考えられた。

また、材齢14日で圧縮応力が約0.0N/mm²であり、引張応力が約1.1N/mm²生じるころをPC導入で抑制したことが推察された。なお、材齢2.6~4.8日と5.7~6.2日において、弾性ひずみがほぼ一定であることに対して、圧縮応力が低下している理由は、有効応力計の感度部の局所的な弾性変形による応力緩和⁵⁾や線膨張係数の影響が考えられた。

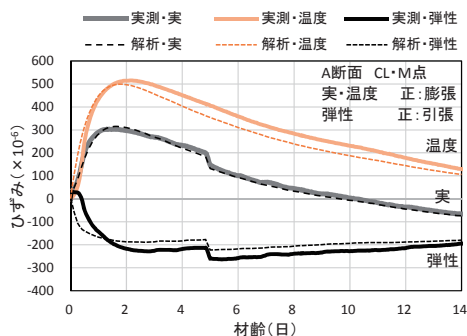
4. 5 ひび割れ発生状況

材齢75日が経過した現状においてFAを添加した部材厚1.5mのPCスラブの表面にひび割れは観察されていない。また、ひずみや応力に急激な変化が見られていない。

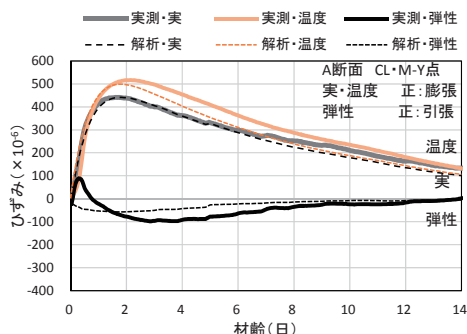
5. 解析を用いた条件変更の影響検討

5. 1 解析方法

温度応力解析を用いて、温度履歴とひずみ履歴の計測結果を模擬した上で、条件変更の影響について検討した。計測結果の模擬は、温度解析条件として断熱温度上昇特性と熱伝達率を、応力解析条件として地盤の弾性係数をパラメータとして用い、実測値と解析値が最も近似する値を採用することで実施した。条件変更の影響として、セメント種類に早強ポルトランドセメントHの断熱温度上昇特性と強度発現特性を用いたケース、PCを考慮しないケースを実施した。解析はプログラムASTEAMACSを用いて、示方書に準じて実施した⁴⁾。解析モデルは図-11に示すように地盤を考慮した4分の1モデルとし、軸対称面と地盤周囲を法線方向に拘束した。解析条件を表-3に示す。打込み温度と外気温の履歴、圧縮強度は実測値を用いた。ヤング係数と引張強度は圧縮強度から算定



(a) A断面 CL・M点



(b) A断面 CL・M-Y点

図-8 各種ひずみ履歴

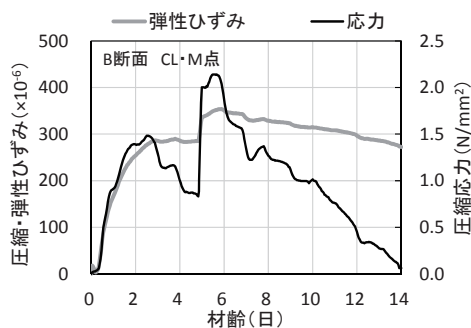


図-9 圧縮応力履歴 (B断面 CL・M点)

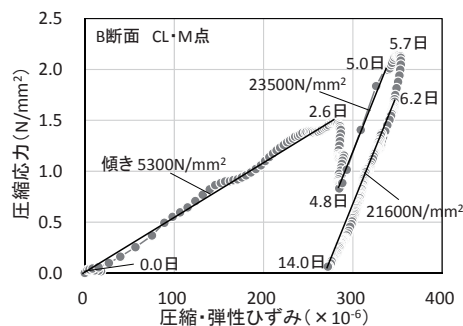


図-10 圧縮応力と弾性ひずみの関係

することとし、初期クリープの影響を有効ヤング係数法で考慮した。なお、今回は検討対象を材齢初期としたため、PC緊張による長期的なクリープや乾燥等による収縮は考慮していない。

5. 2 パラメータの設定方法

温度解析でパラメータとした断熱温度上昇特性 (K, α) は、セメント種類、単位セメント量、および打込み温度から示方書の算定式に基づいて設定した。H+FAでは早強Hの算定方法を代用し、セメント量にFA量を考慮しない値を設定した。断熱温度上昇特性ではセメント量を1.00倍から0.05倍ずつ増加させて、1.15倍で図-12のように解析値が計測値に近くなった (表-3 : H+FA修)。このセメント量はH+FAの結合材量とほぼ同量であり、今回の試験への示方書算定式の適用性等を詳細に検討する必要がある。熱伝達率について、上面の断熱シート養生の値は、試験実績から $4.0W/m^2\text{C}$ と設定した。外気との境界面の値は、示方書標準値の $14.0W/m^2\text{C}$ と設定した。側面の合板型枠の値は、標準値の $8.0W/m^2\text{C}$ から $4.0W/m^2\text{C}$ とすることで解析値が実測値に近くなった。これは地面を掘り下げて施工したため、風の影響が小さかったことが要因と考えられた。なお、熱伝達率の示方書標準値は風速3m程度を想定して、その変化の目安を風速1m/sあたり $3W/m^2\text{C}$ 程度としており、適当な値であると考えられる。

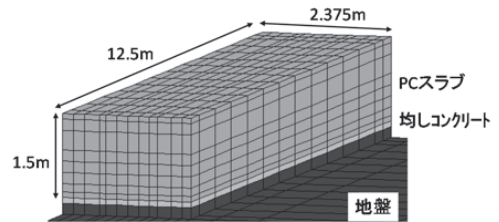


図-11 解析モデル

表-3 解析条件

			H+FA	H+FA修	H	
配合	単位セメント量	C	kg/m ³	305	351	325
	単位フライアッシュ量	FA	kg/m ³	54	54	-
	単位水量	W	kg/m ³	154	154	157
	水結合材量比	W/(C+FA)	%	42.9	38.0	-
施工	水セメント比	W/C	%	50.5	43.9	48.3
	打込み温度	T ₀	°C	13.2		
	圧縮強度(28日)	f _c	N/mm ²	42.3	42.3	37.0
温度	終局断熱温度上昇量	K	°C	55.779	62.005	58.486
	温度上昇速度	α	-	1.373	1.474	1.417
	熱伝達率	η	W/m ² C	文中に記す		
	外気温度	T _{air}	°C	実測値		
地盤	弾性係数	Er	N/mm ²	50		

* H+FA修ケースは、最高温度を整合させるためにH+FAケースのセメント量を1.15倍して、温度上昇特性を算出したケースである。

応力解析でパラメータとした地盤の弾性係数は、温度ひび割れ制御設計・施工指針⁶⁾の岩盤相当 5000 N/mm^2 、普通(砂質土等) 500 N/mm^2 、軟弱(粘性土等) 50 N/mm^2 に設定した。このうち、軟弱とすることで図-8のように解析値が計測値に近くなった。上記の入力条件に設定することで、材齢0.5日程度までの初期の温度および温度ひずみを除き、解析値が実測値とおおむね一致した傾向を示した。

5. 3 ひび割れ指数

模擬した解析における外部拘束型のひび割れ指数の分布(断面内部)を図-13(a)に示す。ひび割れ指数は、ひび割れの発生しやすさを表す指標で、コンクリートの引張応力で、そのときの引張強度を除すことで得られる。履歴中の最小のひび割れ指数は材齢60日に中央部で1.84(ひび割れ発生確率5%)、PC緊張端付近で1.50(同12%)となり、ひび割れ発生の可能性が低いことが確認できた。これは実際にひび割れが発生していないことと一致した結果である。最小ひび割れ指

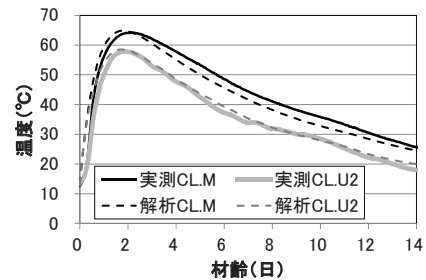


図-12 温度履歴の比較

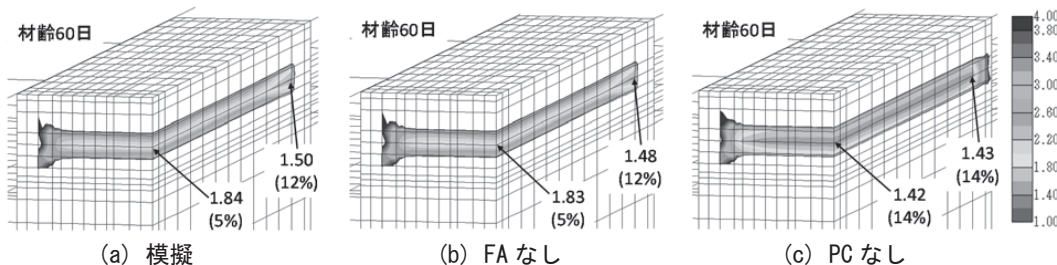


図-13 ひび割れ指数分布 (()内: ひび割れ発生確率)

数のとき、長手平行方向の応力が 1.25N/mm^2 、直交方向の応力が 1.77N/mm^2 であり、長手直交方向の応力が卓越した。ひび割れが発生した場合、その方向は長手平行方向(PC鋼材と平行方向)が想定された。

5. 4 セメント種類の影響

フライアッシュを添加せず早強ポルトランドセメントHを使用したケースのひび割れ指数分布を図-13(b)に示す。ひび割れ指数が中央部で0.01、端部で0.02低下した。部材厚さが1.5mと比較的小さいことに加えて、H+FA(修正)とHの断熱温度上昇曲線が同程度であったことから、計算上のひび割れ抑制効果が表れにくかったと考える。部材厚が薄い場合にフライアッシュによるひび割れ抑制効果を有効に得るためには、ワーカビリティの改善効果を利用して単位水量を低減し、結合材量を小さくする必要があると考えられる³⁾。

5. 5 PC緊張の有無の影響

PC緊張を考慮しないケースのひび割れ指数分布を図-13(c)に示す。中央部で0.42、端部で0.07の低下となった。ひび割れ発生確率は中央部で9%の増加となった。PC緊張の有無による引張応力と引張強度の差異について、図-14に示すように引張強度 3.27N/mm^2 と長手直交方向の応力 1.77N/mm^2 は変化しないが、長手平行方向の応力がPC緊張で 2.30N/mm^2 から 1.25N/mm^2 に減少する。これにより引張応力の卓越方向が変化するとともにひび割れ指数が増加する。長手平行方向に限るとき、ひび割れ指数が1.42から2.61となり、ひび割れ発生を制限できる値から発生の可能性がほとんどない値に改善された。

6. まとめ

- 1) 実大規模の計測試験で、温度応力とプレストレス力が組み合わされたときのコンクリートの温度、ひずみ、および応力の初期挙動を把握することができた。断熱温度上昇特性と熱伝達率、地盤の弾性係数をパラメータとした解析値は、実測値とおおむね一致した。
- 2) フライアッシュを添加した場合でも材齢初期にPC導入のための圧縮強度を満足できた。また、フライアッシュを添加した部材厚1.5mのPCスラブにおいて、実際にひび割れ発生は見られなかった。
- 3) PC緊張によるひずみ増加量は、中心からの距離が大きくなることにともない小さくなった。
- 4) 今回のPC緊張では、引張応力を想定通りの約 1.1N/mm^2 減少させることができた。この値を考慮した解析のひび割れ指数は2.61となり、ひび割れ発生の可能性がほとんどない値に改善された。

謝辞

本研究はSIP(戦略的イノベーション創造プログラム、代表:金沢大学・鳥居和之教授)の研究費により行った。また、オリエンタル白石(株)および北川物産(株)に測定協力および強度データ提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針, 2008
- 2) 渡辺将之, 福永靖雄, 石井祐二, 加藤大典: 広幅員床版を有するPC箱桁橋の施工上の課題と対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1261-1266, 2001
- 3) 伊藤始, 大野宏樹, 橋本徹, 宮里心一: 分級フライアッシュの混和によるコンクリートの温度ひび割れ抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1267-1272, 2013
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 2012
- 5) 高瀬和男, 倉田幸宏, 下村匠, 丸山久一: 構造物中のコンクリートの測定方法に関する再検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.615-620, 2007
- 6) 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2008

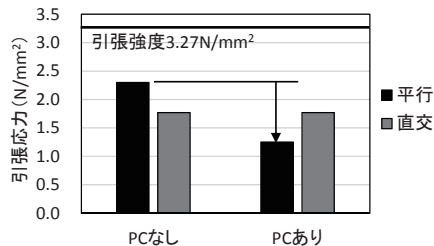


図-14 実ひずみ履歴 (A断面・CL軸)