

論文 埋込みセンサを用いた PC 桁の内部ひずみ測定手法に関する検討

小林 勇佑*1・伊藤 始*2・西野 哲史*3・白上 新*3

要旨 : PC 橋梁の力学性能を精度よく評価するためには、コンクリートの内部応力を把握することが重要である。本研究では膨張コンクリートのコア削孔実験を行うことで、埋込みセンサを用いた内部ひずみ測定手法の精度を確認した。加えて、実橋梁から切り出したポストテンション PC 桁を対象にコア削孔実験を行い、その適用性を検討した。その結果、内部ひずみ測定法では安定した値が得られることが確認できた。また、実験で得た解放ひずみから推定した切出し桁のプレストレスは設計時と比較して小さくなった。

キーワード : 応力解放法, 内部ひずみ, 埋込みセンサ, 解放ひずみ, PC 桁, プレストレス

1. はじめに

我が国では、高度経済成長を背景に多数のコンクリート構造物が建設され、その代表的なものに橋梁がある。橋梁には様々な外力が作用することで応力が生じ、加えて乾燥収縮やクリープに起因して応力が複雑に変化する。このような橋梁を適切に維持管理していくためには、コンクリート部材の内部応力を把握することが重要である。内部応力の把握は、橋梁が有する力学性能を精度よく評価することにつながる。

橋梁に用いるプレストレストコンクリート構造（以下、PC 構造）は、コンクリートにプレストレスを導入することによって、コンクリートの弱点である引張応力度とひび割れを制御した構造である。PC 構造の使用により、橋梁や建築の梁などの長径間の部材に対して、コンクリートの適用が可能となった。PC 構造の成立には、プレストレスの導入が不可欠であり、維持管理の面でコンクリートの残存プレストレスを考慮することが重要である。

これまで既設の構造物に蓄積した内部ひずみや内部応力を測定する手法が提案されており、そのうち微破壊で精度の高い測定手法に応力解放法がある¹⁾。著者らはコア削孔により円形の切欠きを用いており、膨張コンクリートを対象に研究を行ってきた²⁾。

応力解放法を PC 桁に適用した研究事例として、二井谷ら³⁾は残存プレストレスの推定のために、コア切込による方法を用いている。応力調査の対象箇所、2 方向のひずみゲージを貼り付け、コアを切り込むことによって解放されるひずみを測定している。2 方向のひずみ差を測定することにより、乾燥収縮やクリープによるひずみの影響を除去できる算定式を提案している。また、渡瀬ら⁴⁾は二井谷らの方法を応用し、コア径の縮小に伴って切込み深さを浅くする手法を提案している。この手法において切込み深さをコア径の 36%とすることで、全解放と同程度の解放ひずみを得られることを示している。

しかしながら、コンクリート表面のひずみゲージによるひずみの計測法（表面ひずみ測定法）は、ゲージ周辺の骨材の影響およびコア削孔時のドリルの熱や冷却水の影響を受けて誤差が生じるなどの欠点を有している。

本研究では、コンクリート内部のひずみを安定的に計測することを目的に、埋込みセンサを用いた内部ひずみ測定法を提案し、PC 桁内部のひずみ測定への適用を検討した。研究では、図-1 のように膨張コンクリートを用いた埋込みセンサの要素実験を行い、PC 桁への適用に向けて埋込みセンサの改良を行った。その後、実橋梁から切り出した PC 桁に対して内部ひずみ測定手法を適用し、設計計算値である有効プレストレスと残存プレストレスを比較するとともに、相違点を考察した。

2. 膨張コンクリートを用いた埋込みセンサの適用検討

2.1 内部ひずみ測定法

本研究では、コア削孔による解放ひずみの測定にあたり、図-2 (a) のようにコンクリート中心部のひずみを測定する方法（内部ひずみ測定法）を検討した。表面ひずみ測定法は、簡易に計測できる特徴がある。それに対して、内部ひずみ測定法は実構造物において、拘束ひずみが蓄積されやすい鉄筋位置で計測できること、乾燥収

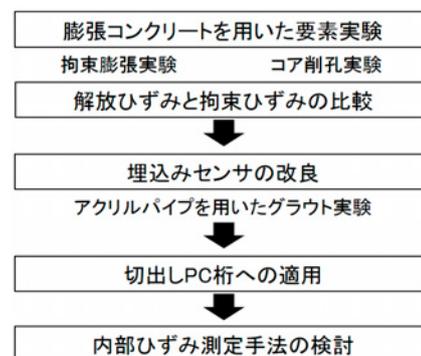


図-1 研究フロー

*1 富山県立大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部 環境工学科 教授 博 (工) (正会員)

*3 北電技術コンサルタント (株) 第一土木部 設計第一グループ

表-1 実験ケース一覧

ケース	型枠種類 計測方法 (シリーズ)	実験条件					材料試験結果		実験結果(削孔材齢時)		計算					
		コア径 (mm)	膨張材量 (kg/m ³)	鉄筋径 (mm)	削孔 材齢 (日)	配筋方法	配筋 間隔 (mm)	圧縮 強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	鉄筋ひずみ (計測) ($\times 10^{-6}$)	解放ひずみ (計測) ($\times 10^{-6}$)	拘束 ひずみ ($\times 10^{-6}$)				
								(N/mm ²)	(kN/mm ²)	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)				
R-1	鋼製型枠 内部ひずみ (Rシリーズ)	100	40	10	14	直線配筋	150×150	18.7	24.3	901	79	57				
R-2				13				18.7	24.3	619	73	67				
R-3				28				19.5	25.5	492	76	51				
N-1	合板型枠 内部ひずみ (Nシリーズ)			100	40			10	14	2段 正方形	150×150	18.7	24.3	622	124	107
N-2								28				44.0	32.8	344	85	40
N-3								14				18.7	24.3	428	119	125
N-4								13	21			40.2	29.7	270	124	56
N-5									28			18.5	25.5	434	85	121
N-6												200×200	33.4	27.2	337	108
N-7		16	28			直線配筋	150×150	33.4	27.2			308	90	42		
N-8								1段 直線配筋	33.4			27.2	316	66	122	
N-9									33.4			27.2	257	104	55	

縮や冷却水等による温度変化の影響を極力取り除くことができることの特徴がある²⁾。

内部ひずみ測定法の手順は、図-2 (a) のように先行して小径のコア (インナーコア) を削孔し、コア内にひずみ計 (埋込みセンサ) を設置し、モルタルを充填する。モルタルの硬化後に、インナーコアの外側に一回り大きいコア (アウターコア) を削孔する。アウターコアの削孔時に埋込みセンサのひずみを深さごとに測定することで、解放されるひずみを得る。

図-2 (b) に埋込みセンサの概要を示す。まず半円形の凹部を持つ 20×20×10mm の直方体のモルタルを製作し、凹部に検長 30mm の埋込み型ひずみ計を挟み込み、モルタルをエポキシ樹脂で接着する。これをひずみ計が直交するように 2 段重ねる。ひずみ計の分解能は、 1×10^{-6} である。

2.2 拘束膨張実験

(1) 実験ケース

本研究では、既往⁵⁾の実験に新たにケースを追加し、膨張コンクリートの拘束膨張実験およびコア削孔実験を実施した。実験ケースを表-1 に示す。実験ケースを型枠種類による実験シリーズとして分類した。

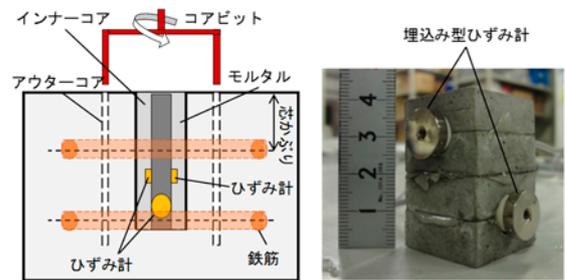
(2) 拘束供試体の製作

R シリーズの拘束供試体は、鋼製型枠と付着を取り除いた丸鋼鉄筋で膨張コンクリートを囲むことで拘束条件下に置いた供試体である⁵⁾。

N シリーズの拘束供試体は、図-3 のように合板型枠内に異形鉄筋を配筋することで拘束条件下に置いた供試体である。鉄筋を平面上の 2 方向に各 4 本配置した構造と鉄筋を曲げ加工して端部を溶接で接合することで正方形に閉合した構造とした。

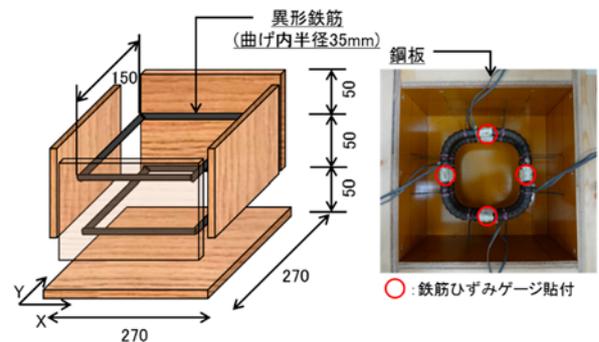
(3) 実験方法

実験手順を図-4 に示す。拘束供試体には表-2 に示す配合条件のコンクリートを用いた。セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、管理材齢を 14 日とした。コンクリートの打込み後、材齢 7、21 日にインナー



(a) 内部ひずみ測定法 (b) 埋込みセンサ

図-2 ひずみ測定方法



(a) 内部の詳細図 (b) 組立状況

図-3 合板型枠 (N シリーズ)

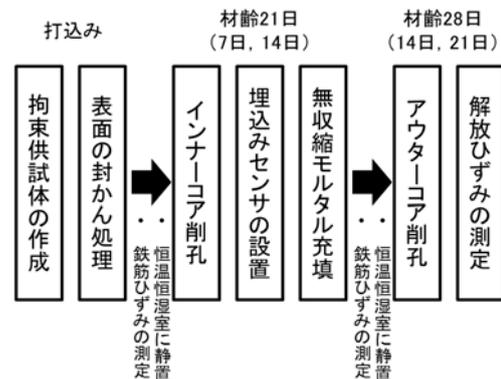


図-4 実験手順

コアの削孔と埋込みセンサの設置を行い、材齢 14, 28 日にアウターコアの削孔を行った。

2.3 コア削孔実験

(1) 実験方法

コア削孔および埋込みセンサの設置の方法は、2.1 節 (図-2) で述べたとおりである。埋込みセンサの設置にあたり、インナーコアの直径を 50mm として、深さ 100mm 程度となるように削孔した。次にインナーコア内にモルタルを充填し、上記の埋込みセンサを設置した。アウターコアの削孔は、直径 100mm のコアビットを用いて、削孔深さを確認しながら行った。コア削孔時は、センサのリード線がコアビットの内部にあることから、コアの削孔時にリード線のコネクタをデータロガーから取り外し、計測時に接続することでひずみを計測した。

(2) 実験結果

図-5 は N-5 におけるコア削孔深さごとの解放ひずみである。矢印は各々の埋込みセンサの位置を表している。

コア削孔深さ 70mm 前後から表面に近い上段のセンサのひずみが徐々に解放された。続いて、コア削孔深さ 80mm 前後で下段のセンサのひずみが徐々に解放された。削孔深さが 100mm を超えると、上段と下段のひずみは同程度の差で推移した。鉄筋ひずみは収縮方向に推移した。コア削孔を行うことでひずみが解放され、コンクリートの膨張によって伸びていた鉄筋が収縮したためである。

2.4 拘束ひずみと解放ひずみの関係

拘束ひずみは、拘束膨張実験で計測した鉄筋ひずみと自由膨張ひずみを用いて算定した⁵⁾。自由膨張ひずみから鉄筋ひずみを引くことで拘束ひずみを算定した。

また、N シリーズのコンクリートの断面積は、鉄筋からコンクリートへの支圧力を想定し、鉄筋位置からコア削孔位置へ 45° の角度に広がる面積と仮定して与えた。

図-6 は拘束ひずみ (計算値) と解放ひずみ (最大値) の関係を示したグラフである。図中の点線は $Y=X$ の式であり、拘束ひずみと解放ひずみが一致した場合の直線である。鉄筋径や鉄筋間隔、鉄筋段数が変化することで鉄筋ひずみや解放ひずみが増減することを確認できた。

R シリーズと N シリーズを比較すると、N シリーズではばらつきが大きいケースが多かった。R シリーズでは鉄板による一軸方向の拘束であったことに対して、N シリーズでは鉄筋による 3 次元的な拘束であったため、鉄筋と計測箇所的位置関係によりコンクリートひずみに差が生じたことが要因として考えられた。

加えて、解放ひずみの算出による影響やコンクリートの材料物性の考慮の差異による影響、ひずみの計測手法による影響が考えられた。解放ひずみの算出による影響として、本研究では、解放ひずみは最大値を用いること

表-2 配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	C	W	E	S	G
65	268	174	40	806	965

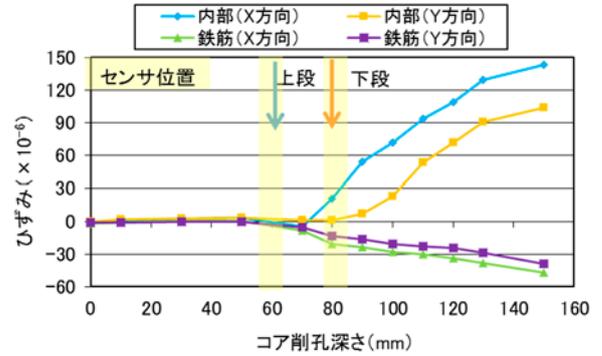


図-5 解放ひずみと削孔深さの関係 (N-5)

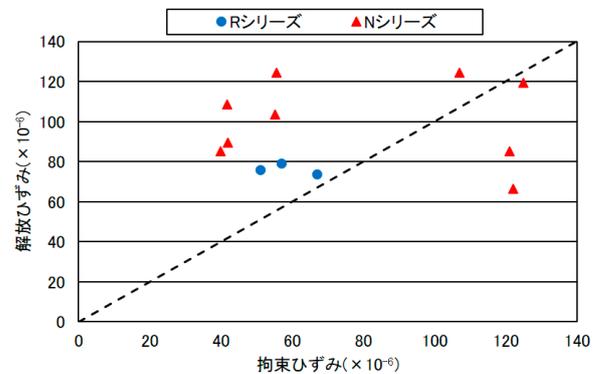


図-6 拘束ひずみと解放ひずみの関係



(a) インナーコア内の空隙 (b) 埋込みセンサの偏り
図-7 埋込みセンサの課題 (一部ケース)

により算定した。そのため、3次元応力解析により適切な数値に補正することが必要である。コンクリートの材料物性の考慮の差異による影響に関しては、今回算定した拘束ひずみは鉄筋径や鉄筋間隔、鉄筋段数等のパラメータを考慮して算出したため、両者のひずみに差異が生じたと考えられた。ひずみの計測手法では、一部のケースにおいて図-7 に示すように、インナーコア内の空隙や埋込みセンサの偏りが見られ、センサの設置とモルタルの充填の確実性が課題となった。この課題を含めて、埋込みセンサの PC 桁への適用を次章で検討する。

3. ひずみ測定手法の改良

3.1 改良型埋込みセンサの製作

ここでは、要素実験での埋込みセンサの課題を解決するために、センサを挿入する際のセンサの設置法、モルタルの充填法を検討した。センサの設置法では、削孔面に対するセンサの直交2軸方向を確実にすることにも配慮した。

埋込みセンサの PC 桁への適用にあたって、既往の埋込みセンサ (図-2(b)) を基本として、図-8 に示す改良型埋込みセンサを製作した。前述の直方体モルタルに加えて、測定箇所に応じて長さを任意に設定する高さ調整用モルタルで構成した。センサ両端の円盤状モルタルは、グラウト材とセンサのリード線が通過するための穴をあけた構造とし、この円盤状モルタル、ひずみ計固定用モルタル、高さ調整用モルタルをそれぞれエポキシ樹脂で接着した。この形状とすることで、直交する2軸のセンサの方向を確実にした。

3.2 アクリルパイプによるグラウト材の充填

改良型埋込みセンサの適用にあたって、インナーコア内のグラウト材の材料や配合を選定するため、グラウト材のアクリルパイプ内への注入実験を実施した。

本研究で使用したグラウト材は、水平方向への注入に適した無収縮グラウト材 (デンカボルトフィックス, 電気化学工業株式会社) を使用した。水結合材比 W/B を 20% として、練り混ぜを行った。アクリルパイプでインナーコアを模擬するため、パイプの内径をインナーコアと同じ直径 50mm とした。実験は、あらかじめパイプ内部に所定量のグラウト材を注入しておき、その後、埋込みセンサをパイプ端部から内部に圧力挿入することにより実施した。図-9 の実験状況のように、埋込みセンサの右端の円盤状モルタルの穴から残余分のグラウト材が流出し、アクリルパイプ内の充填を確認することができた。

以上により、改良型埋込みセンサと選定したグラウト材によって PC 桁のひずみ測定が適切に実施できると考え、PC 桁のコア削孔実験において両者を使用することとした。なお、グラウト材の PC 桁への適用に際して、グラウト材の水分がコンクリートに吸収されたことから、水結合材比 W/B を 22% として使用した。

4. PC 桁でのコア削孔実験

4.1 PC 桁の概要

PC 桁は北陸自動車道で 25 年間供用され、塩害により損傷し撤去されたポストテンション T 型桁である。PC 桁は、高さ 1.0m、幅 1.3m、桁長 17.9m を持ち、12φ7mm の PC 鋼線が 5 本配置された構造である⁶⁾。本研究では、PC 桁から切り出した長さ 2.32m の切出し桁を対象として検

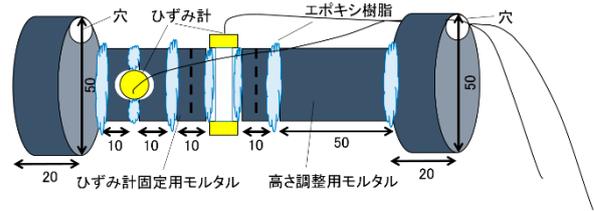


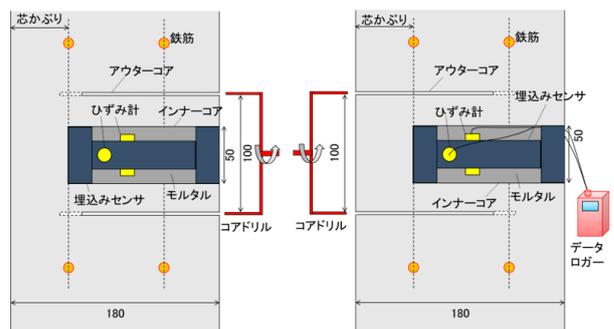
図-8 改良型埋込みセンサ



図-9 アクリルパイプによるグラウト実験状況



図-10 削孔箇所を選定



(a) 正面削孔方式

(b) 背面削孔方式

図-11 解放ひずみ測定法 (単位: mm)

討した。

4.2 実験方法

コア削孔箇所として、コアの切削によって PC 鋼材と鉄筋の破断がなく、かつプレストレスが大きく作用している箇所を選定した。選定した削孔箇所は、図-10 に示す PC 桁のウェブ部とフランジ部にあたる位置とした。なお、実験では図-10 のように切出し桁の床版面と桁下面を上下反転させて使用した。

実験では、図-11 に示すように、先行コアの削孔後、

インナーコア内をモルタルで充填し、埋込みセンサを設置した。モルタルの硬化後、アウターコアを削孔した。

図-10のA-1とA-2の2ヶ所では、図-11(a)に示すように埋込みセンサの埋込み面からアウターコアを削孔し、削孔深さごとに埋込みセンサのひずみを計測した(正面削孔方式)⁷⁾。また、図-10のB-1とB-2の2ヶ所では、解放ひずみの連続計測を目的として、図-11(b)に示すように埋込みセンサの埋込み面の背面から削孔した(背面削孔方式)。

それらの計測に加えて、図-10のS-1では、表面ひずみ測定法(削孔径： $\phi=50\text{mm}$)での測定を実施した。なお、表面ひずみ測定法では、図-10に示す切出し桁の反対面から削孔した。

4.3 実験結果

(1) 内部ひずみ測定法

図-12と図-13は、それぞれA-1とB-2におけるコア削孔深さごとの解放ひずみである。図中の黄色の網掛け部分は、センサの位置を表す。ひずみは正側が膨張、負側が収縮である。正面削孔方式によるA-1の2つのひずみは、センサ位置を過ぎて膨張側に大きくなり、計測位置から30~40mm程度深く削孔した地点でそれぞれ大きなひずみが得られた。橋軸方向のひずみは、センサ位置まで一時的に収縮側に推移した。

背面削孔方式のB-2では、連続的なひずみを得られ、計測位置から削孔側に約40mmの地点からひずみが徐々に解放され、それ以降はおおむね一定の値を示した。また、得られた解放ひずみは、正面削孔方式による値よりも小さくなった。これは、背面削孔方式では埋込みセンサよりも深い位置にインナーコアがあり、応力が若干解放されたことが要因の1つと考えられた。

(2) 表面ひずみ測定法

図-14はS-1におけるコア削孔深さごとの解放ひずみであり、ひずみは正側が膨張、負側が収縮である。図中の測点1と測点2のひずみは、表面ひずみ測定法^{3), 4)}に準じて算定した結果である。測点3と測点4のひずみは、それぞれコアの外径から30mm離れた地点において計測した橋軸方向のひずみである。

全体的な傾向として、ひずみはコア削孔深さ10mm地点を過ぎてから変動した。このうち、測点1と測点3、測点4のひずみは正側に推移し、コアの切削によりコンクリートが膨張しており、想定される結果となった。

4つのひずみ、特に測点2のひずみは、各々の削孔深さの間でばらつきが生じ、内部ひずみ測定法と比較して安定的な値を得ることができなかった。この要因として、コア削孔の際に使用する冷却水とコンクリートの温度差による影響が考えられた。

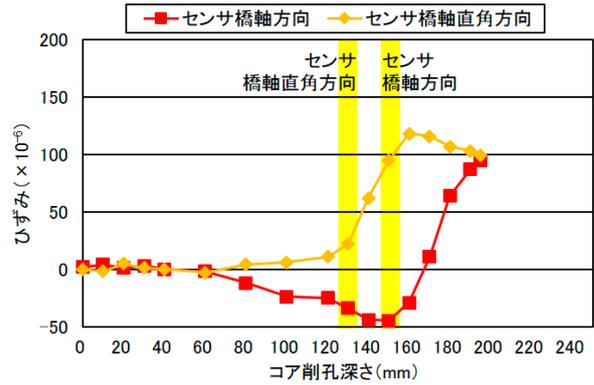


図-12 コア削孔実験結果 (A-1)

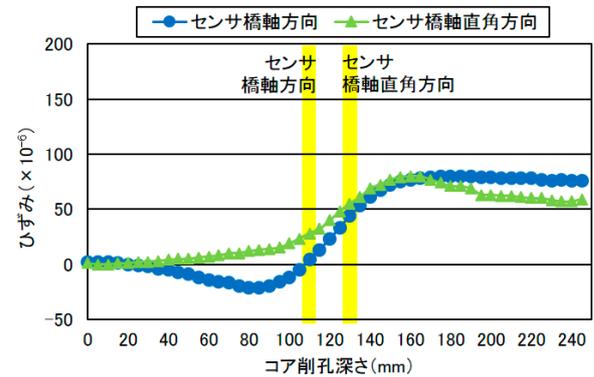


図-13 コア削孔実験結果 (B-2)

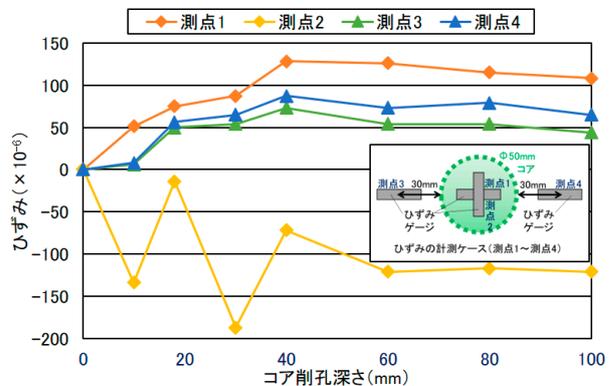


図-14 コア削孔実験結果 (S-1)

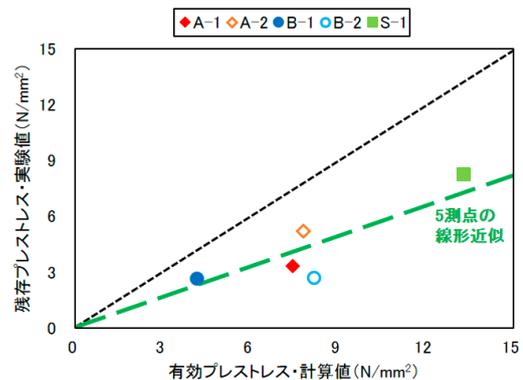


図-15 有効プレストレスと残存プレストレスの関係

4.4 残存プレストレスの推定

(1) 有効プレストレスと残存プレストレスの算出方法

有効プレストレスは、以下の(1)式により算出した⁸⁾。

$$\sigma_p = \frac{P \times \eta}{A} + \frac{P \times \eta \times e_p}{Z} \quad (1)$$

ここに、 P : 導入直後の全プレストレス、 η : 有効係数、 A : コンクリートの断面積、 e_p : PC 鋼材偏心量、 Z : 断面係数である。

残存プレストレスは、コア削孔実験で得られた解放ひずみを用いて推定した。正面削孔方式と背面削孔方式における解放ひずみの算出方法は、削孔終了時にひずみが全解放していると考え、削孔実験終了時の橋軸方向の値を用いた。これらの解放ひずみにコンクリートのヤング係数を乗じることで残存プレストレスを算出した。表面ひずみ測定法 (S-1) では、削孔実験終了時のひずみを用いて、既往³⁾の方法に基づいて残存プレストレスを算出した。

(2) 有効プレストレスと残存プレストレスの関係

図-15 に設計計算値である有効プレストレスと各測点の残存プレストレスの関係を示す。図中の破線は、有効プレストレスと残存プレストレスが一致した場合の直線 ($Y=X$) である。全体的な傾向として、残存プレストレスは、有効プレストレスと比較して小さくなった。図中の緑色の破線は、内部ひずみ測定法の A-1、A-2、B-1、B-2 の 4 ケース、さらに表面ひずみ測定法の S-1 の合計 5 ケースの残存プレストレスの線形近似である。今回の実験で得られた解放ひずみから推定した残存プレストレスは有効プレストレスの 55% となった。このようになった主な要因として、実験に使用した PC 桁は載荷試験を実施されていること⁶⁾、切り出されていることで設計時と状態が異なることによる影響などが重なったためであると考えられた。

以上から、内部ひずみ測定法の正面削孔方式は、表面ひずみ測定法に比べて安定した解放ひずみが得られた。さらなる推定精度の向上には、内部ひずみ測定手法の使用による改善や 2 軸センサの結果を用いた適切な解放ひずみの算出に加え、材料物性値を考慮した 3 次元応力解析により推定値を補正することが必要と考えている。また、構造物の損傷を極力低減して測定するために、埋込みセンサの小型化が必要である。

5. まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 膨張コンクリートを用いたコア削孔実験から、鉄筋径や鉄筋間隔、鉄筋段数が変化することで解放ひずみや鉄筋ひずみが増減することが確認できた。

- (2) 切出し桁を用いた実験において、内部ひずみ測定法の正面削孔方式では、解放ひずみが計測位置を過ぎてから膨張側に大きくなり、安定した値が得られた。
- (3) 内部ひずみ測定法の背面削孔方式では、解放ひずみが計測位置の手前から大きくなりはじめ、正面削孔方式に比べ小さい値となった。
- (4) 解放ひずみから推定した切出し桁の残存プレストレスは、有効プレストレスと比較して小さくなり、55%であった。切出し桁の状態と設計条件が異なったことが主な要因と考えられた。

謝辞

本研究の一部は科学研究助成金 (基盤研究(C)25420461) により行いました。本研究を実施するにあたり、元富山県立大学大学院の佐橋宗明氏に多大なるご協力を頂きました。また、中日本高速道路 (株) の青木圭一氏、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) の有馬直秀氏に PC 桁の情報提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 樋口嘉剛, 神田亨, 三木千尋: コンクリート部材中の応力推定法, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.11-18, 1998.2
- 2) 石田雅大, 伊藤始, 松井淳史: コア削孔によるコンクリートの膨張ひずみ測定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.7
- 3) 二井谷教治, 渡瀬博, 阪田憲次, 綾野克紀: コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 20 巻, pp.27-37, 2009.5
- 4) 渡瀬博, 二井谷教治, 高橋聖二, 石田真知, 綾野克紀: 浅切り方式によるコア応力解放法の提案とその適用性, コンクリート構造物の補修補強アップグレード論文報告集, pp.49-54, Vol.12, 2012.11
- 5) 若井航, 伊藤始, 西野哲史, 高島依里: 埋込みセンサを用いた膨張コンクリートの解放ひずみ測定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013.7
- 6) 有馬直秀, 深田宰史, 玉田和也, 森山守: 塩害により撤去した PCT 桁の載荷試験と維持管理手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1369-1374, 2015.7
- 7) 佐橋宗明, 小林勇佑, 伊藤始, 西野哲史, 真田裕行: コア削孔を用いた内部ひずみ測定手法の RC 部材への適用に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, pp.69-70, 2015.9
- 8) 社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会: やさしい PC 橋の設計, pp.115-198, 2002.7