

論文 応力開放法を用いた有効プレストレス推定手法の検討

原口 政仁^{*1}・幸左 賢二^{*2}・上原 伸郎^{*3}・清水 英樹^{*4}

要旨: 大型の PC 桁供試体を対象に有効プレストレス量の推定法として円形コア削孔, およびスリット切削による応力開放法を実施し, 表面のひずみ変化量から推定値の評価を行った。PC 鋼線の緊張力から算出した想定ひずみ量と実測ひずみ量がほぼ等しいことを確認した上で, 応力開放法によって得られたひずみ量の評価した結果, 円形コア削孔では応力開放法によるひずみ変化の挙動を示すものの推定値は高いものでも 75%程度に留まった。一方, スリット切削では, 想定ひずみ量と同等の推定値が得られた。この差の要因として, コア径や切削幅と検出長の寸法, コアビットの傾斜や表面の不陸, 削孔時の応力再分配などが考えられた。

キーワード: PC, 応力開放法, 有効プレストレス

1. はじめに

PC 構造では, 供用中においてもプレストレスが有効に作用していることがその構造を成立させる上で必要不可欠であり, 既設橋の有効プレストレス量や部材の応力状態を精度よく推定可能な非破壊・微破壊による推定手法の開発が望まれている。現在までに, プレストレスを推定する方法としては応力開放法, 鉄筋切断法, あるいはスロットストレス法などが提案されている。しかしながら, 既設部材にこれらの手法を適用する場合には, 鉄筋切断が構造物へ与える影響やコンクリート材料の不均質性に起因する推定誤差などの点において未だ不明な点が残されており, 有効プレストレス量を適切に評価する手法は確立されていないのが現状である¹⁾。

以上から本研究では, 有効プレストレスの推定に用い

られる微破壊試験方法の一つとして応力開放法に着目し, 大型の PC 桁供試体で行った実験から当該手法の評価を行った。応力開放法は, PC 部材の表面にコアや切り込みなどの部分的な溝を作ることで開放される応力を, コンクリート表面のひずみ変化量から求める方法である。本稿では, 円形コア削孔とスリット切削の2つの方法を用いてコンクリート表面におけるひずみの変化量を計測し, 得られた実験値から切削方法や溝の形状が現存応力の推定結果に及ぼす影響について考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 PC 桁供試体概要

図-1にPC桁供試体の概要, ひずみゲージ貼付位置, およびスリット切削位置を示す。

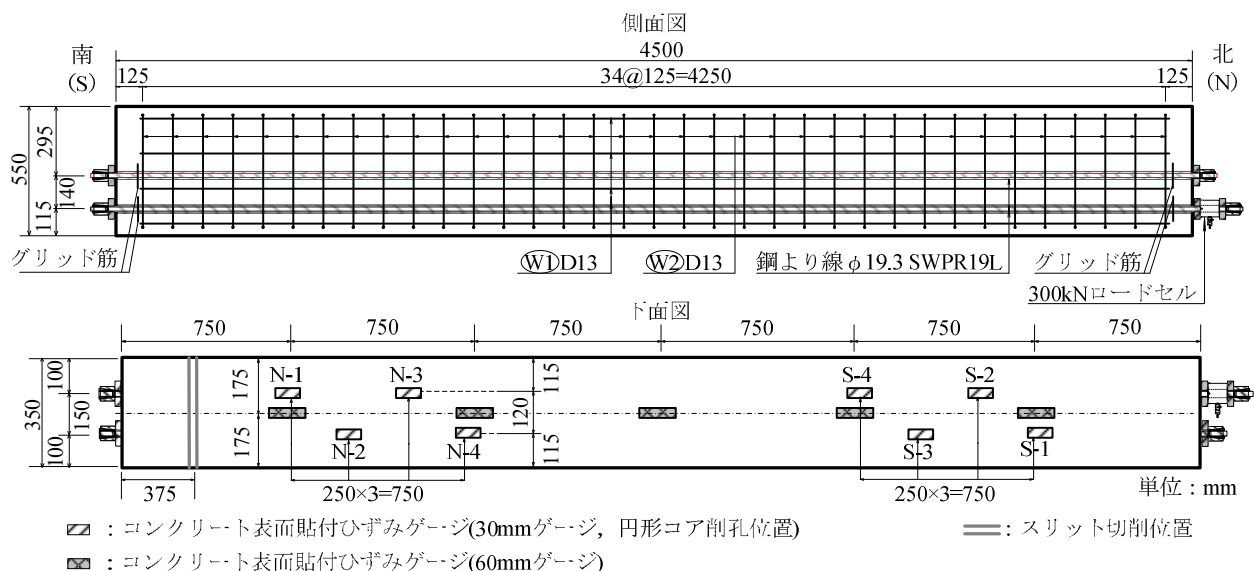


図-1 PC 桁供試体概要とひずみゲージ位置

*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

*4 大日本コンサルタント(株) 九州支社技術部 工修 (正会員)

PC 桁供試体は、長さ 4500mm、幅 350mm、厚さ 550mm の長方形充実断面とした。PC 鋼線は $\phi 19.3\text{mm}$ の鋼より線を 4 本配置し、緊張方法はポストテンション方式とした。図中の下面図に示したゲージ長 60mm のひずみゲージは、緊張力導入時のひずみ変化量計測用として、またゲージ長 30mm のひずみゲージは円形コア削孔による応力開放法実施時のひずみ変化量計測用として用いた。なお、本実験では同様な 2 体の供試体を作製し(No.3, No.4 と表記)、以後の推定手法の評価を行っている。

2.2 PC 桁実験概要

図-2 に実験パラメータを示す。Case1 として緊張力導入時にゲージ長 60mm のひずみゲージを用いて計測した供試体下面における実測ひずみ量と、ロードセルで計測した PC 鋼より線の緊張力を基に計算によって求めた想定ひずみ量を比較し、以後の推定手法の評価に用いる基準値を選定した。Case2 では、円形コアを削孔することで局部的に応力を開放した際に計測されるひずみ量から評価を行った。なお、円形コアの径は 2 水準とし、 $\phi 66\text{mm}$ では 11 本、 $\phi 100\text{mm}$ では 4 本のコアの実験結果から開放ひずみ量の評価を行った。Case3 では、PC 桁供試体の緊張力と直交する横断方向に 66mm 間隔で 2 本のスリットを切削することによって、下面における軸方向の応力をすべて開放させ、計測されるひずみ量の評価を行った。なお、具体的な実験方法については、以降の節でそれぞれ詳しく説明する。

2.3 評価に用いる基準値の選定 (Case1)

図-3 に緊張力によって PC 桁下面に発生すると考えられる想定ひずみ量の算出方法を示す。なお、本実験では、図-1 に示す位置にロードセルを取り付け、PC 鋼線の緊張力を直接計測した。まず、ロードセルで計測した緊張力を用いて、PC 桁の断面に作用する圧縮応力(σ)を推定した。次に、推定された圧縮応力(σ)、および材料試験により求めた静弾性係数(E)を用いて、図-3 中の算出式から、供試体下面に発生すると考えられる想定ひずみ量(μ_o)を算出した。なお、算出に用いた静弾性係数は、テストピース 3 本($\phi 100 \times 200\text{mm}$)で行った試験の平均値を用いた。テストピースは湿潤養生とし、試験材齢は 28 日とした。

図-4 にロードセルで計測した PC 鋼線の緊張力変化の一例として No.3 供試体の計測結果を示す。なお、括弧内の数値はロードセルの実測値から前述の方法で算出した想定ひずみ量を示している。設計値を 272kN(312 μ)に設定し、セットロスの影響を考慮して 314kN(360 μ)まで緊張した。結果としては想定より若干大きなセットロスが生じ、ジャッキ開放直後の導入緊張力は 264kN(304 μ)となった。さらに、応力開放法の実施直前では 234kN(270 μ)となった。

実験項目	Case1	Case2	Case3
計測目的	基準値の評価	応力開放法の評価	
実験	想定ひずみ量と実測値の比較	円形コア削孔による推定	スリット切削による推定
備考		$\phi 66\text{mm} \times 11$ 本 $\phi 100\text{mm} \times 4$ 本	66mm 間隔 スリット $\times 2$ 本

図-2 実験パラメータ

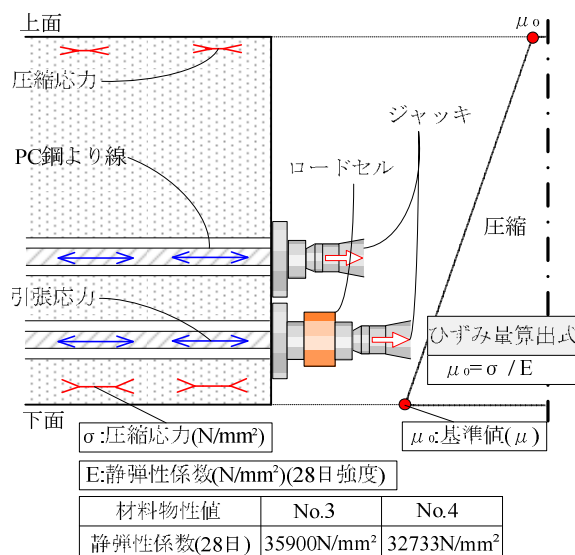


図-3 緊張力によって発生するひずみ量の算出

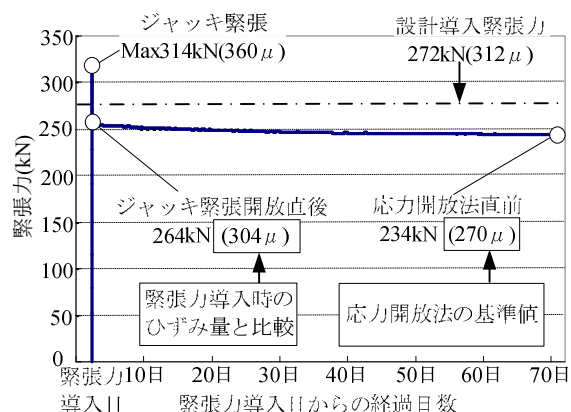


図-4 PC 鋼線の緊張力変化 (No.3)

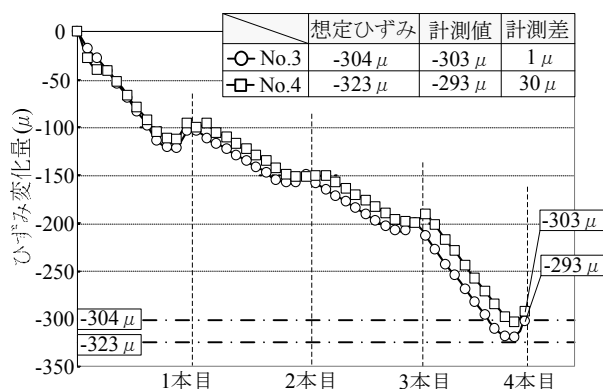


図-5 緊張力導入時の下面ひずみ計測結果

図-5 に緊張力導入時に PC 桁下面に貼り付けた 5 枚の 60mm ひずみゲージで計測したひずみ変化量の平均を示す。なお、ひずみゲージの貼付位置は、図-1 の下面図に示す通りである。すべてのひずみゲージで、4 本の PC 鋼線に緊張力を導入するごとに圧縮ひずみ量が増加する傾向を示した。図中の表に示すように、緊張力導入後に計測されたひずみ量は No.3 で -303μ 、No.4 で -293μ であった。また、計測値と想定ひずみ量との差は、No.3 で 1μ 、No.4 では 30μ となった。

上記の通り、緊張力導入時の供試体下面で計測されたひずみ変化量の実測値と計算によって求めた想定ひずみ量の算出値がほぼ同程度となったことから、緊張力によって供試体下面で発生するひずみ量をひずみゲージで精度良く計測できていることがわかる。よって、以後の推定値の評価では、応力開放法実施直前の想定ひずみ量(No.3 : 270μ 、No.4 : 303μ)を評価の基準値とした。

3. 円形コアによる応力開放法(Case2)

3.1 円形コア削孔方法

円形コアを削孔した際に、表面で発生するひずみ変化量を用いて、有効プレストレスを推定した。図-6 に円形コア削孔および計測方法を示す。コア径は、主、帯鉄筋を傷付けずにコンクリート部分のみを削孔し、十分な削孔深さを確保するために $\phi 66\text{mm}$ とした。コア表面で発生する開放ひずみ量を計測するために、コア表面の中心部分にロゼッタゲージを貼り付けた。ひずみゲージは、コア径 $\phi 66\text{mm}$ の内側に防水処理をした状態で貼付するためゲージ長 30mm のものを選定した。削孔深さはシースを傷付けないように 80mm までとした。また、打設時にあらかじめリード線を埋設し、削孔時にはリード線を傷つけないように削孔することで、コンクリート表面において開放されるひずみ変化量を連続的に計測できるように配慮した。なお、今回は緊張力の開放を直接計測している軸方向の計測値を用いて評価した。当初コア削孔は No.3,4 の PC 桁で合計 11 本を予定していたが、供試体の移動や実験不備などによって、4 本が計測不可になったため、残りの 7 本で評価を行った。

3.2 $\phi 66\text{mm}$ 実験結果

図-7 にコア径 $\phi 66\text{mm}$ の実験結果を示す。縦軸はひずみ変化量(μ)を基準値(μ_0)で除し、横軸は削孔深さ(L)をコア径(ϕ)で除すことにより無次元化している。

全計測結果で共通する事象として、 $L/\phi=0.5\sim 0.6$ で最大ひずみ量が計測され、その後ひずみ量が減少した。また、 $L/\phi=1.0$ 以降でひずみ量が一定の値に収束していく挙動が見られた。このことから、ひずみ量が収束した位置 $L/\phi=1.0$ 以降の削孔深さ位置では、コア表面の応力が完全に開放されたと判断される。よって、最終計測位置

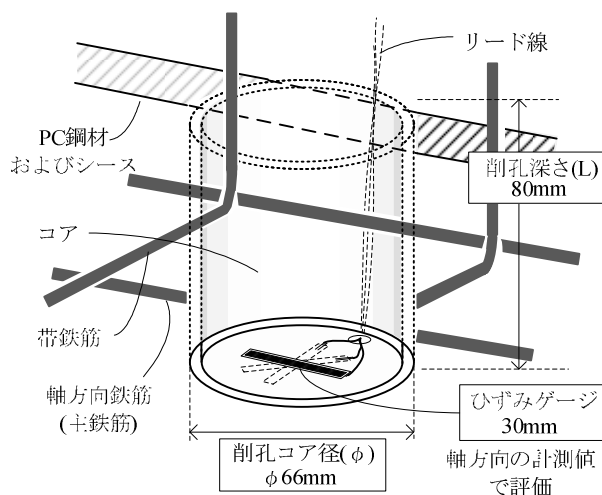


図-6 円形コア削孔および計測方法

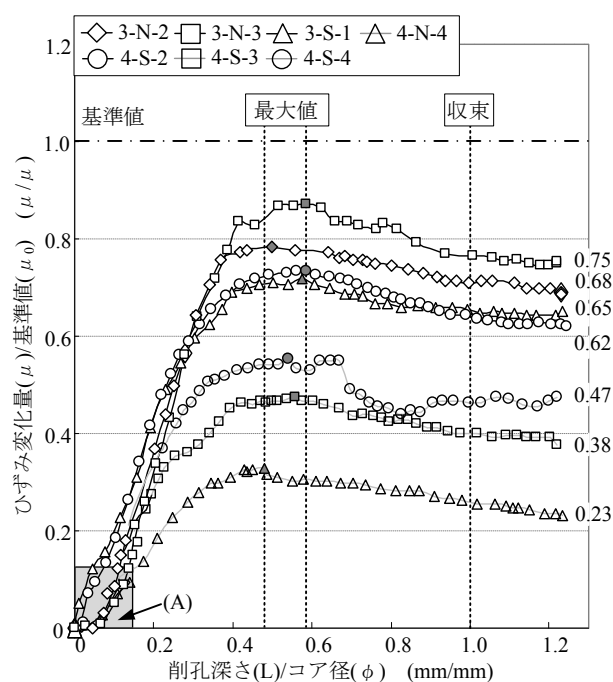


図-7 $\phi 66\text{mm}$ 実験結果

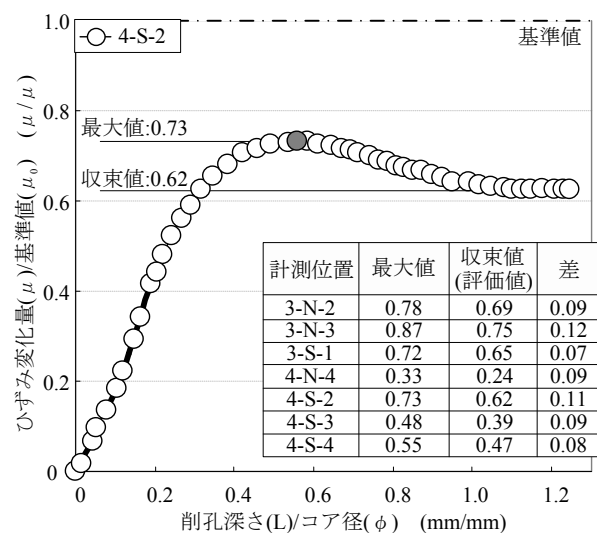


図-8 ひずみ変化の最大値と収束値の関係

で計測されたひずみ量を用いて推定値を評価した。

推定値は図中に示す通り 0.23~0.75 となり、いずれの値も基準値より小さく、計測位置ごとの計測差が大きい結果となった。計測差が大きくなった要因としては、骨材の最大寸法 20mm に対して 1.5 倍程度のゲージ長 30mm を選定したために、表面近傍に存在する粗骨材の影響を受けた可能性が考えられる。

図-8 に計測位置 4-S-2 を代表例として、ひずみ変化における最大値と収束値の関係を示す。収束値はコア表面の応力が完全に開放された状態と考えられるため、最大値と収束値の差は緊張力の開放以外で発生するひずみ量と考えられる。4-S-2 では、最大値で 0.73、収束値で 0.62 となり、その差は 0.11 となった。また、全ての計測結果では、図中の表に示す通り、その差は 0.09~0.11 となった。既往の研究²⁾では、この差分をコア端部に作用する応力で生じた曲げによる引張応力成分によるコア表面の膨張量としており、最大値と収束値(推定値)との差は、約 0.25 程度となっている。今回、すべてでこの値よりも小さい値であったことを併せて考えると、円径コアの変形は、緊張力の開放によるものが主要であり、コアの曲げ膨張やポアソン比などによって発生するひずみ量は、緊張力の開放量と比較して小さいと推察される。

次に、図-7(A)に示した応力開放の初期において立ち上がりが遅れる現象も認められたことから、図-9 に応力開放法初期のひずみ変化を拡大して示す。図より、3本で応力開放初期に緊張力の開放が遅れるなどの現象が確認された。この要因は、コアビットが供試体に接触する際の傾きや供試体表面の凹凸などによると推察される。このことから、応力開放初期においては、ひずみ変化の計測が不安定になることから、ひずみ変化量の計測精度に影響する可能性があり、事前の準備や前処理等に十分留意する必要があると考えられる。

3.3 φ100mm 実験結果

図-10 にコア径 φ100mm の実験結果を示す。骨材の影響を極力低減するために、粗骨材の最大寸法 20mm を考慮して 60mm のゲージ長を用いることとし、削孔深さは主、帯鉄筋を傷付けない限界深さである 45mm とした。なお、図-7 と同様に、縦軸と横軸を無次元化して示している。推定値の評価は、既往の研究²⁾において見かけ上応力が完全に開放される位置とされる $L/\phi=0.33$ の深さで計測されたひずみ量を用いて行う。

全ての計測結果で、最終計測位置 $L/\phi=0.45$ までひずみ量が増加する挙動が見られ、推定値は 0.58~0.65 となった。前述の φ66mm コア(30mm ゲージ長)と比べて、計測差の範囲が小さいことから、骨材の影響等が少なく平均的なひずみ変化量が計測されたものと推察される。しかしながら、φ66mm コアの結果と同様に、いずれの計

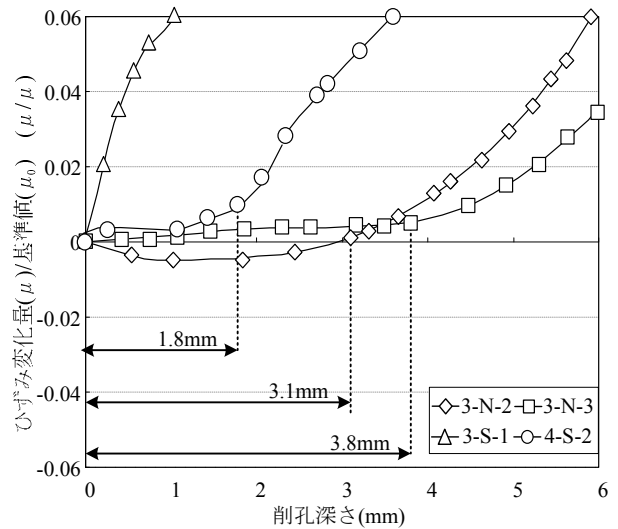


図-9 応力開放法初期のひずみ変化
(図-7(A)の拡大図)

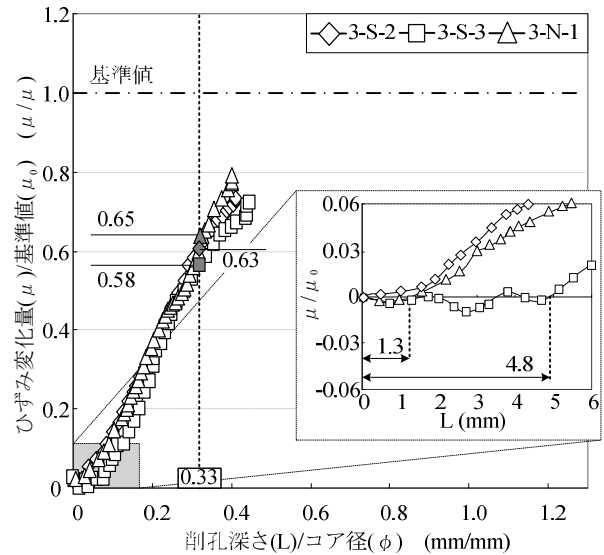


図-10 φ100mm 実験結果

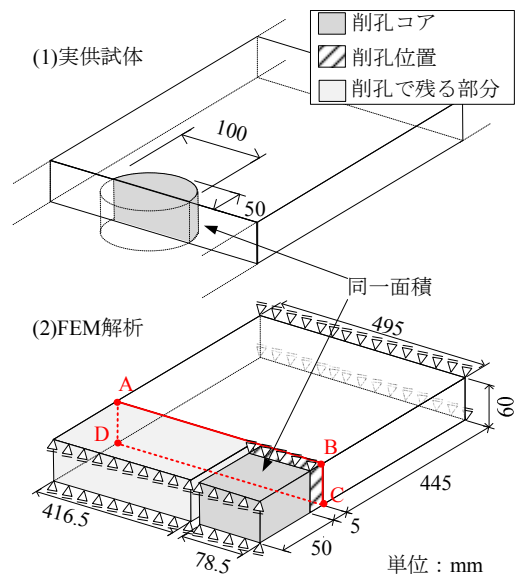


図-11 解析条件

測結果も基準値に対して推定値が小さい結果となった。また、図中拡大図に示すように、応力開放初期の立ち上がりが遅れる現象も同様に確認された。3.2 の結果と併せて考えると、円形コア削孔で局部的に表面の緊張力を開放する方法では、計測される開放ひずみ量が小さくなると考えられる。次節では、既往の解析例との比較などから計測結果に及ぼす影響因子について検討する。

3.4 計測結果に及ぼす影響因子

既往の研究³⁾で行っている解析条件を図-11に示す。既往の研究ではPC天井板を対象に、円形コアを同一面積の矩形に変更して解析が行われている。また、図に示すような境界条件を用いた2次元モデルを用いている。

図-12に解析結果と今回の実験結果の一例として4-S-2の結果を併せて示す。図より、 $L/\phi=0.5$ 付近で最大値を示した後、減少傾向を示す曲線形状は同様であることから、今回の実験結果は応力開放に伴うひずみ変化の挙動を示していると考えられる。しかしながら実験値の最大値、および最大値と収束値の差は、解析値と比べて65%程度の値となっている。

実験値においてひずみ変化量が小さく計測された要因については、以下のように推察される。円形で削孔した場合には、表面における応力状態が必ずしも一様ではなく、また、局所的なひずみを計測するゲージによりコア中心付近を部分的に計測していることが考えられる。次に、解析の境界条件では、削孔時に発生する3次元的な応力分散を考慮しておらず、実験ではコア削孔に伴う内部の応力分散が発生するため、開放ひずみ量が小さくなったと考えられる。

図-13に応力の再分配に関する模式図を示す。コア削孔位置の周辺における水平断面に着目すると、既にコアが削孔されている深さ位置(AA断面)では、削孔箇所を介して応力は伝達されないことから、未削孔部分が応力を分担すると考えられる。一方、コアビット先端の直下(BB断面)では、周辺部分が分担した応力は未だ残存することから、コア削孔の過程を通して削孔箇所の応力は周辺よりも小さくなっていると推測される。

4. スリット切削による応力開放法(Case3)

4.1 スリット切削方法

図-1中に示した位置で2本のスリットを66mm間隔となるように切削した。スリット切削による計測は、No.3、No.4 供試体でそれぞれ1箇所ずつ実施した。図-14にスリット切削および計測状況を示す。本実験では、緊張力と直交し、PC桁を横断するように切削した2本のスリット間で発生するひずみ変化量を計測した。なお、スリット間隔は、 $\phi 66\text{mm}$ 円形コアの結果と比較するために66mmとしている。ひずみの計測は、計測長50mmのコ

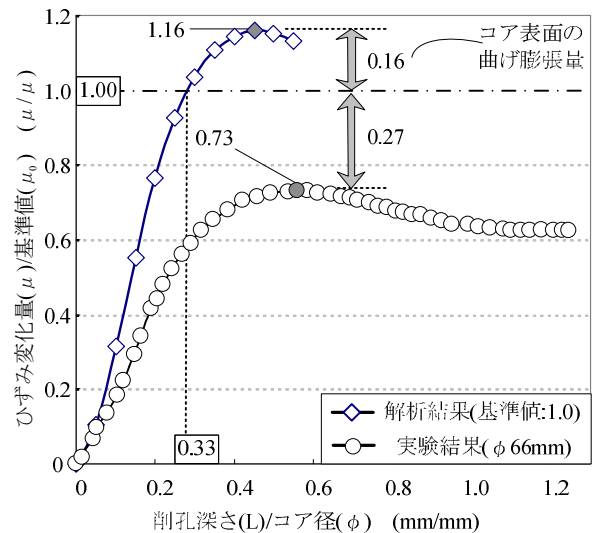


図-12 解析結果との比較

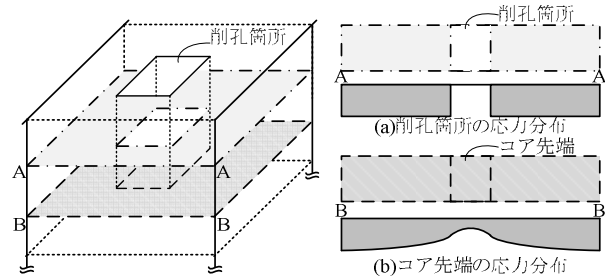


図-13 削孔時のコンクリート内部応力の変化

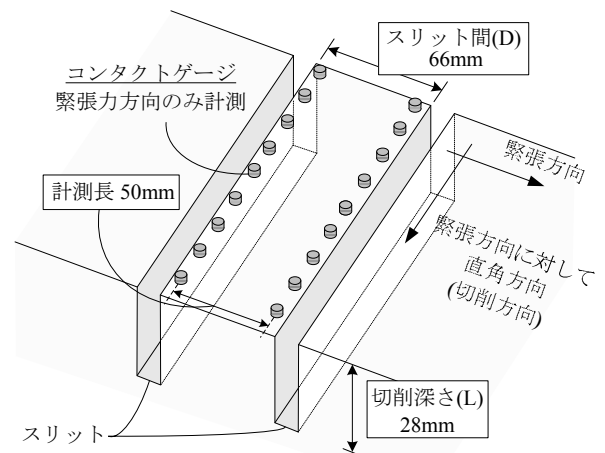


図-14 スリット切削および計測状況

ンタクトゲージによって行い、計測箇所は図に示す通り9箇所とした。削孔深さは、削孔器具の制約上28mmまでとし、削孔深さ5、10、および22mmの時点で一旦切削を中断し、それぞれ計測を行った。

4.2 実験結果

図-15にNo.3 供試体の9点で行った計測結果の平均値と前章で示した解析結果を併せて示す。なお、縦軸と横軸は図-7と同様に無次元化して表記している。また、スリット切削深さは28mmまでであるため、計測値の評価は $\phi 100\text{mm}$ の場合(L/ϕ)と同様に、 $L/D=0.33$ の時点とした。

計測の結果、 $L/D=0.33$ (切削深さ 22mm)まではひずみ量が単純に増加するとともに、それ以降ではひずみが減少する挙動が確認された。この傾向は、円形コア削孔の場合と同様であった。一方で、 $L/D=0.33$ で計測されたひずみの比は 1.08 であり、円形コア削孔による方法で得られた 0.23~0.75 と比べて明らかに大きく、基準値と同等の推定結果が得られている。また、解析の結果を参考にその曲線形状を比較すると、最大値を示して以降の下降線でやや傾きが大きいものの、概ね同様な曲線形状が示されていると判断される。ここで、スリット切削による方法で円形コア削孔による方法よりも高い推定値が得られた要因について、以下に考察する。

今回実施したスリット切削による方法では、コンタクトゲージを使用し、スリット幅 66mm に対して検長 50mm (スリット幅の 76%)で計測を行っている。一方、円形コア削孔による方法ではひずみゲージを用いて、コア径 $\phi 66\text{mm}$ には 30mm 長(コア径の 45%)、 $\phi 100\text{mm}$ では 60mm 長さ(同 60%)の検長で計測を行った。応力開放を行った領域の幅、または直径に対する検長の比が大きいほど、領域全体の変位を平均化して計測できていると考えられることから、この検長の違いが推定結果に差異を生じた一つの要因として考えられる。

次に、両者の形状の違いとコンクリート中で生じる応力変化に着目する。図-15(a)に、スリット切削方法において想定される応力変化の模式図を示す。今回の実験では、供試体軸の横断方向をすべて切削している。そのため、局所的に応力が開放され、側方の残部が連続して応力を伝播する円形コア削孔の場合とは異なり、スリット切削では、供試体軸方向の同一深さにおいて等分布荷重が作用した状態であると推察される。このように、供試体軸直交方向への応力の再分配や軸方向における応力集中が生じにくい切削方法としたことが、高い推定値が得られた要因として推察される。

5. まとめ

大型の PC 桁供試体を対象に、有効プレストレス量の推定手法として円形コア削孔、およびスリット切削による応力開放法を実施し、コンクリート表面におけるひずみ変化量を基に推定値の評価を行った。その結果、本研究の範囲内において以下の知見を得た。

- 1) PC 鋼線の緊張力をロードセルで計測した値を基に、供試体下面で発生すると想定されるひずみ量を算出し、併せてひずみゲージを用いて下面のひずみ量を実測した。算出された想定ひずみ量は 304μ と 323μ であり、対応する実測値はそれぞれ 303μ と 293μ であったことから、コンクリート表面において算出値とほぼ同等の値が実測されたことを確認した。

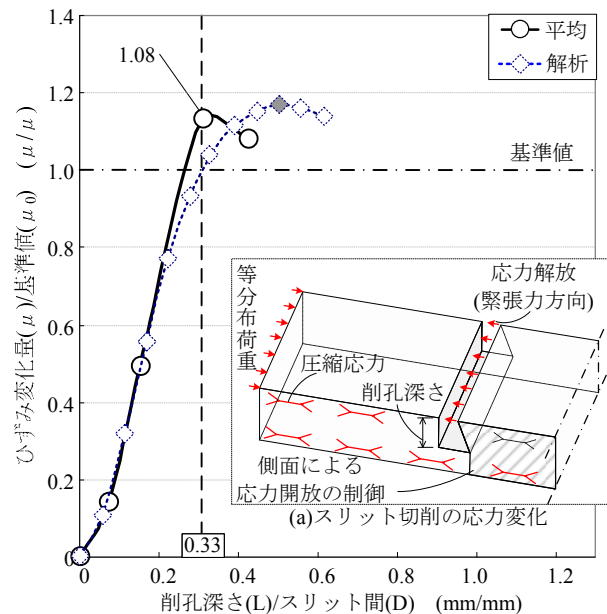


図-15 スリット切削による実験結果

- 2) 円形コア削孔による応力開放法では、既往の文献や解析結果によって求められる曲線形状と同様なひずみ変化の挙動を示したものの、推定値は高いものでも 75%程度に留まる結果となった。この要因としては、コア径やゲージ長の寸法、コアビットの傾斜や供試体の不陸、削孔時における応力の再分配などが考えられた。
- 3) スリット切削による応力開放法では、概ね基準値と同等の推定結果(108%)を得た。この要因としては、応力を開放したスリットの幅に対するひずみの検出長が円形コアによる方法よりも相対的に長かったこと、供試体軸の横断方向をスリットにより切削する場合には、供試体軸横断方向で等分布荷重になると考えられることなどが挙げられた。このことから、スリット切削では、比較的良好な推定値を得ることができた。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか: PC 道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第 613 号, 2010.10
- 2) 樋口嘉剛, 神田亨, 三木千壽: 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
- 3) Yulong Zheng, Kenji Kosa, Yasuo Fukunaga, Masao Kusano: Estimation of Effective Prestress based on Stress-releasing Method and FEM Analysis of the Method, Journal of Structural Engineering, Vol.58A, pp.599-610, 2012.3