

PC版の応力開放実験のFEM解析による評価

九州工業大学 正会員 ○瀬良 洋夢

九州工業大学 正会員 Ph.D 幸左 賢二

西日本高速道路(株) 福永 靖雄

大日本コンサルタント(株) 正会員 工学修士 清水 英樹

Abstract : Releasing stress method of the core was applied to the PC slab at the Kanmon road tunnel which has been operated for more than 50 years. An analytical examination by FEM to simulate the experiment is also performed. The results showed this method can be applicable in the case of core drilled from the high stress side to the low stress side.

keywords : Prestress loss, PC slab, FEM analysis, Releasing stress method

1. はじめに

関門国道トンネルは1958年に開通した山口県下関市と福岡県北九州市を結ぶ全長3461mの海底トンネルである。本州と九州を結ぶ重要な自動車道のため交通量が多く、また、海底トンネルの特殊性から、老朽化・損傷がみられるため、定期的に調査・補修工事が行われている。

関門国道トンネルの換気用の排気ダクトは図-1に示す様に、車道と排気ダクトをPC版で仕切っており、車の排気ガスや海水の漏水等による材料劣化、有効プレストレスの減少によるPC版の耐力の低下が懸念される。

そこで本検討では、関門国道トンネルPC版の応力開放法実験をもとに、2次元FEM解析を用いて数値シミュレーションを行い、実験では確認することのできない、コア内部のひずみ変化や変形を把握し、ひずみ変化と計測精度について考察を行った。

2. 応力開放法実験概要

2.1 実験供試体

図-2に供試体諸元¹⁾、表-2に材料諸元¹⁾を示す。供試体は両端単純支持のプレテンション方式の天井版で、寸法は幅495×長さ3275×厚さ60mmとなっている。PC鋼線はφ2.9mmを上列5本、下列16本の合計21本配置している。鉄筋にはφ3.2mmの鉄線(丸鋼)を22本使用し

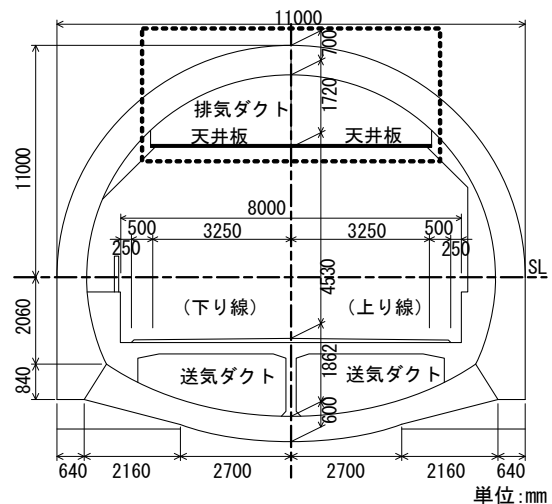


図-1 関門トンネル断面図

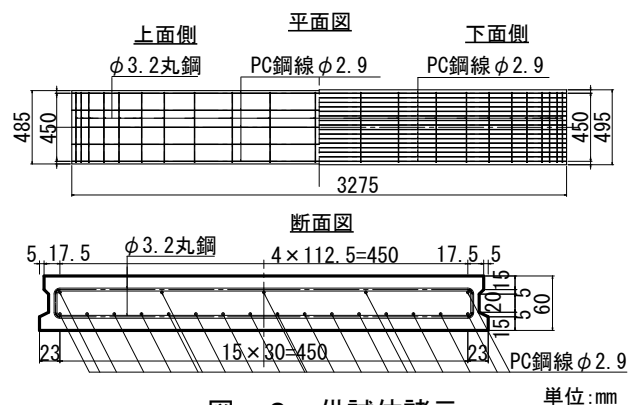


図-2 供試体諸元

表-1 材料諸元

| 使用材料 | 諸元 | |
|-----------|--------|-----------------------|
| | コンクリート | 設計強度 |
| 製作時の実圧縮強度 | | 61.5N/mm ² |
| 現在の実圧縮強度 | | 47.1N/mm ² |
| PC鋼線 | 設計降伏強度 | 1600N/mm ² |
| | 0.2%耐力 | 1825N/mm ² |
| | 初期緊張力 | 1372N/mm ² |

ている。コンクリート強度は平成 21 年の圧縮強度試験の平均が 47.1N/mm^2 、PC 鋼線は引張試験の結果、0.2%ひずみ耐力の平均が 1825N/mm^2 であった。また、初期緊張力は 1372N/mm^2 である。なお、天井版の有効プレストレス設計値は 80%である。

2.2 有効プレストレス推定方法

推定する有効プレストレスはクリープ、乾燥収縮、リラクゼーション、その他劣化要因を考慮に入れた PC 鋼線の有効引張応力である。実験方法は図-3の1)のようにコア抜き前にコンクリート上下面にひずみゲージを貼り付け、初期値を計測し、2)のようにコア抜きにより PC 鋼線からコンクリートの圧縮力が開放されることでコア抜き前後、または途中のコンクリートのひずみ値の変化より PC 鋼線の有効プレストレスを推定する。コア抜きは、図-4に示す様に PC 版-A~E の 5 枚よりコア $\phi 100\text{mm}$ を 6 本抜いている。また、PC 版-A~D は下面から上面に向かって、PC 版-E は上面から下面に向かって抜き、切削深さ 1mm 増加する毎にひずみを計測して、切削深度と応力開放量に着目している。なお、切削時は PC 版に自重は与えず、コアは固定していない。

計測に使用するゲージは図-5に示す様に PC 鋼線緊張方向 (x 方向) と、これと直交する方向 (y 方向) これらと 45 度の角度をなす方向 (xy 方向) に貼付けており、1 コアあたり上、下面 1 組ずつとしている。このうち、本実験では応力開放量を直接計測する x 方向ゲージの値に着目する。コア抜き時にコアカッター内となる下面ゲージのリード線は、連続的にひずみを計測するため、①に示すようにゲージと PC 鋼線を避けた位置にリード線を通すための孔をあけ、上面側に抜いている。この孔は応力開放に影響のないように $\phi 4\text{mm}$ とし、コアの中心から 30mm の位置としている。また、計測には長さ 60mm のゲージを使用している。

3. FEM解析概要

3.1 FEM解析モデル

本解析は応力開放法実験を模擬して FEM 解析を行い、上下面の開放ひずみ履歴を実験結果と比較する。また、削孔方向の違いによるひずみ開放の違いを確認する。図-6に今回の解析対象の3次元イメ

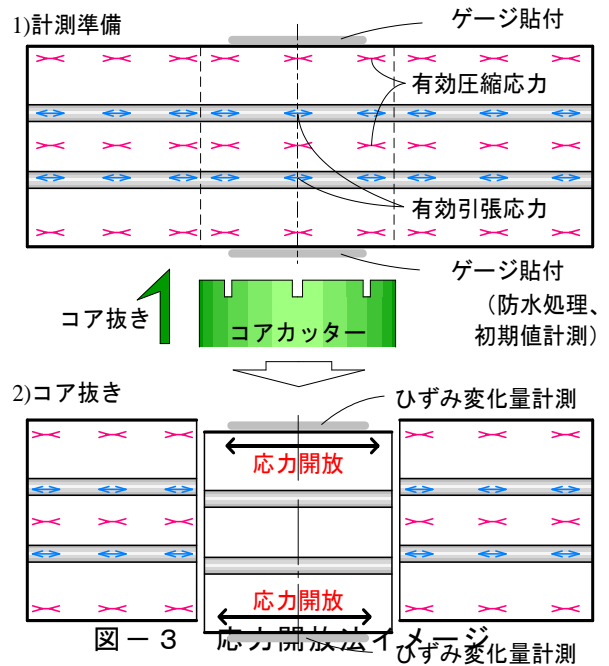


図-3

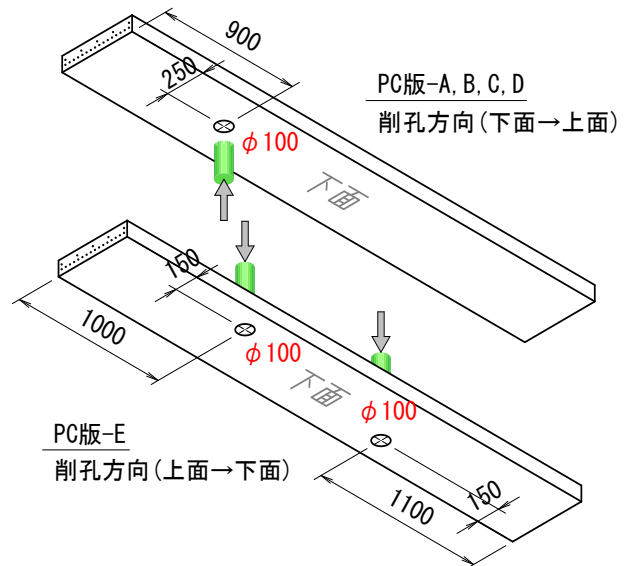


図-4 コア抜き位置と削孔方向

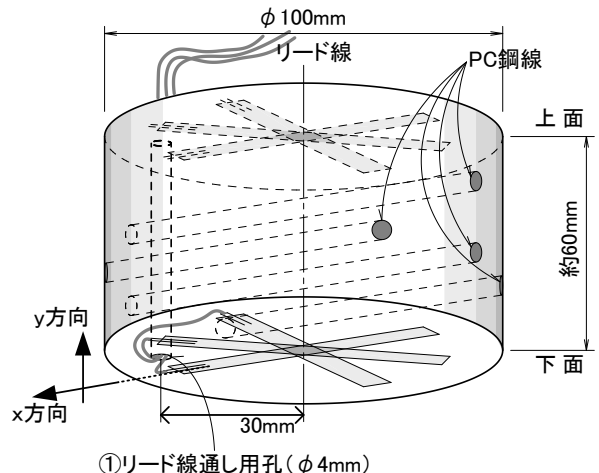


図-5 コアとゲージの計測方法

ーシ図を示す。解析モデルは対称性を考慮し、コア部分の体積を実験と一致させた、簡易的な2次元のハーフモデルとし、ここではPC版をS1（削孔コア内部）、S2（削孔位置）、S3（全断面で残る部分）、S4（削孔によって残る部分）の4箇所に分けた。なお、奥行きは以下の考え方に基づき図-6のように設定した。

- 1) 要素に平面応力要素を用いているため応力は奥行きに関係なく軸方向のみに開放される。また、実験のφ100mmコアと開放ひずみ履歴の比較のため、コア部分の軸方向距離を実験と同じ50mmと設定した。
- 2) コア抜きで残る部分の体積を実験と同じになるようを平面S4に奥行きを与える。

奥行きは図-6の(2)に示すように全体で495mmとし、コア部分であるS1は実験での円形コアと等面積となるように奥行きを78.5mmとした。S4の奥行きは全体(495mm)から、コア部分(78.5mm)を引いて416.5mmとした。

図-7に解析に用いた供試体モデルの要素分割図を示す。解析対象は①に示すようにPC版の一部としてスパン方向500mmの範囲をモデル化している。拘束条件は両端の辺をx方向拘束、コアの上端の一部を②に示すようにy方向拘束としている。これは削孔後にコア部分が上下方向に不安定にならないための境界条件として、コアの変形に最も影響の少ない点を選んだためである。平面S1とS4は同位置にあり、2次元モデルでは重なるが、S4（削孔で残る部分）がS1（コア）を拘束しないよう、2つの平面はそれぞれ別の挙動となるよう設定した。ただし、S2、S4はどちらもS3に接続されているので③に示すようにS2、S4がS3と接するラインは同じ挙動となるように設定している。なお、削孔は12段階で下側から1要素ずつ削除した。

3.2 材料モデル

解析に用いたコンクリートの物性値を表-2に示す。コンクリートの弾性係数は道路橋示方書I共通編²⁾より、PC版のコンクリート圧縮強度の設計値50N/mm²に対応する弾性係数とした。線膨張係数およびポアソン比は、コンクリート

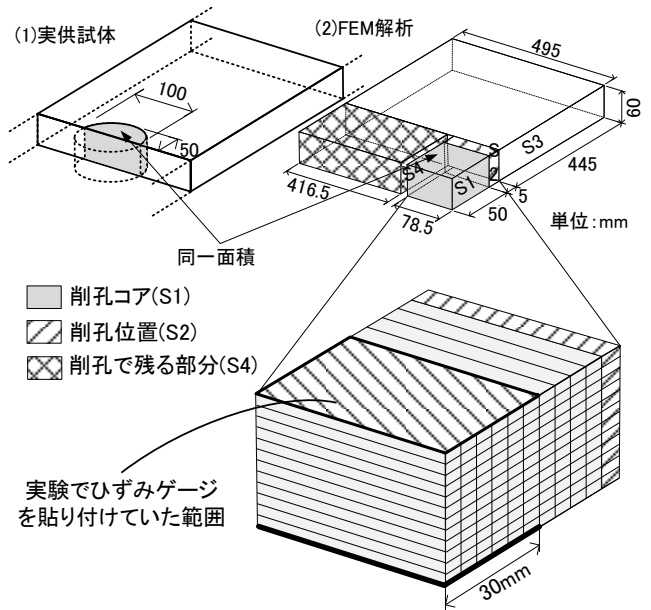


図-6 解析の3次元イメージ

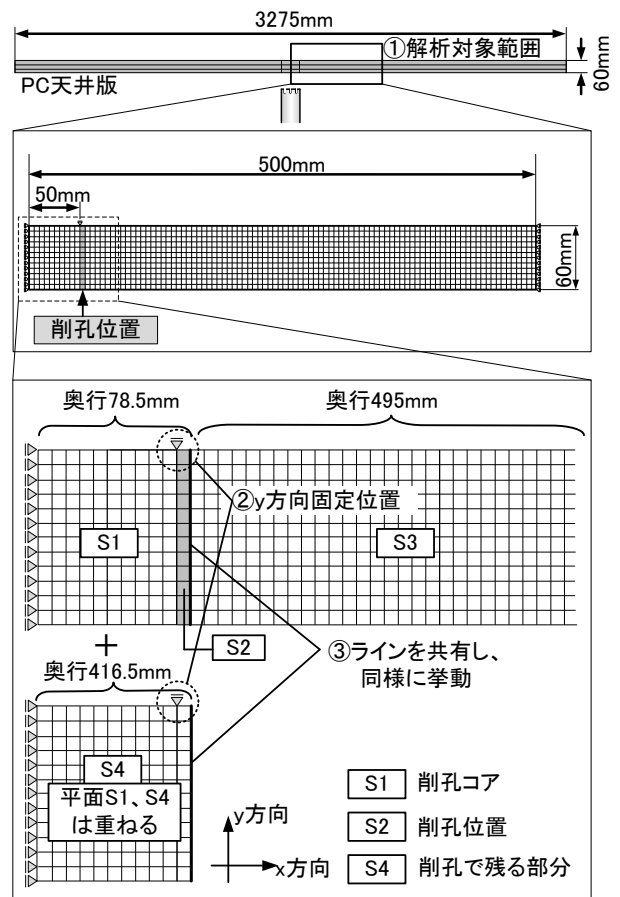


図-7 要素分割図

表-2 材料特性

| 対象の構造体 | コンクリート |
|--------------------------|--------|
| 弾性係数(N/mm ²) | 33000 |
| ポアソン比 | 0.2 |

標準示方書設計編³⁾の値を用いた。なお、応力ひずみモデルは線形モデルとした。

3.3 プレストレス導入方法

実験で用いている PC 版は上下 2 列の PC 鋼線によるプレテンション方式であり、初期導入応力は図-2 に示す PC 版で 100% の緊張力が作用している応力度とし、上面で 3.05N/mm^2 、下面で 9.77N/mm^2 の圧縮応力である。解析はこの応力が PC 版断面内で直線に分布すると仮定し、自重は無視している。なお、プレストレスはコンクリートモデルに線膨張係数を設定して温度を与え、膨張するのを拘束することで発生する横方向応力をプレストレスとみなしている。

4. 解析結果

4.1 下側から削孔した場合

図-8 にコア内部の応力状態を確認するため各切削段階のコアの最小主応力図を示す。図-8 の 1) の切削深さ 20mm の段階では下面の応力はほぼ開放され、また、1) の①の範囲で示すように切削位置から斜め約 45° 方向の応力も開放される。切削終盤では 2) の①の範囲で示す切削深さ 50mm までの範囲の応力がほぼ開放されている。また、1) および 2) の②の範囲に示す切削位置の最も深い箇所では高い圧縮応力が発生している。

図-9 に PC 版を下側から削孔した際の上面、下面ひずみを実験、FEM 解析の両方で示す。実験は 5 枚の PC 版で行い、最終ひずみと初期導入ひずみの割合から有効プレストレスを算出したところ、39~55% となり、平均は 47% となった。ここでは PC 版の設計値である 80% に最も近かった PC 版-C の $\phi 100\text{mm}$ の結果を示す。解析結果は実験でひずみゲージを貼り付けていた範囲 30mm の x 方向ひずみとした。下面ひずみに関して、図-9 の①に示すように切削深さ 20mm の時点で、解析では最終ひずみ量 298μ に対し 216μ 、実験では最終ひずみ量 141μ に対し 106μ と 7~8 割程度のひずみが開放され、ひずみ履歴の変化傾向は同様である。実験は下面の有効プレストレス量が初期導入ひずみ 255μ に対し 141μ と 55% となり、設計値である 80% よりも小さい結果とな

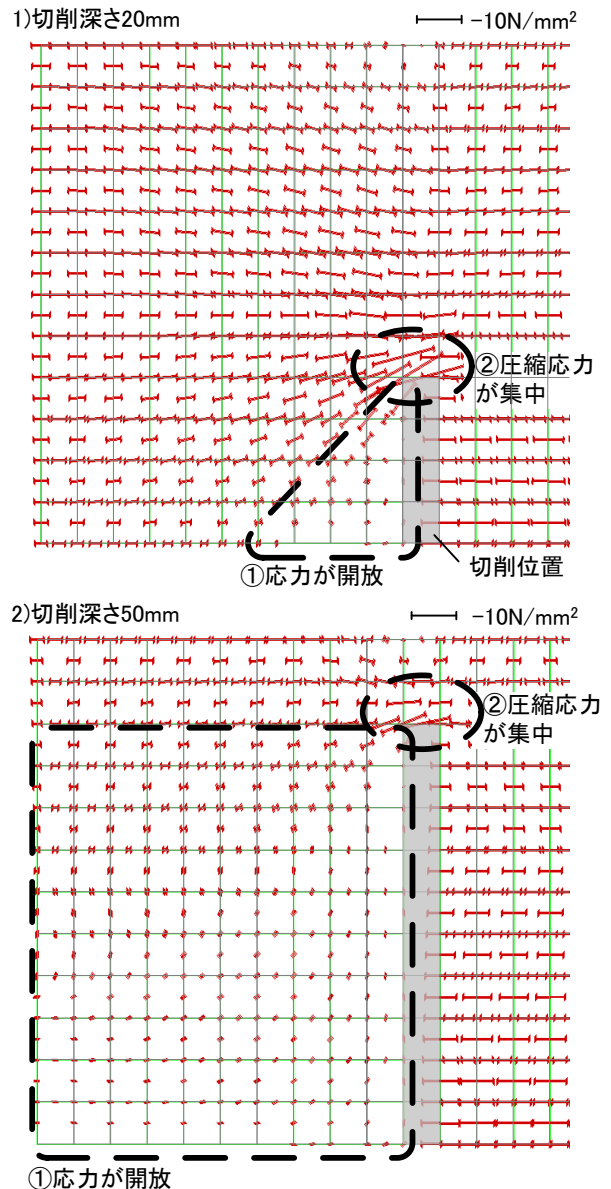


図-8 最小主応力ベクトル図

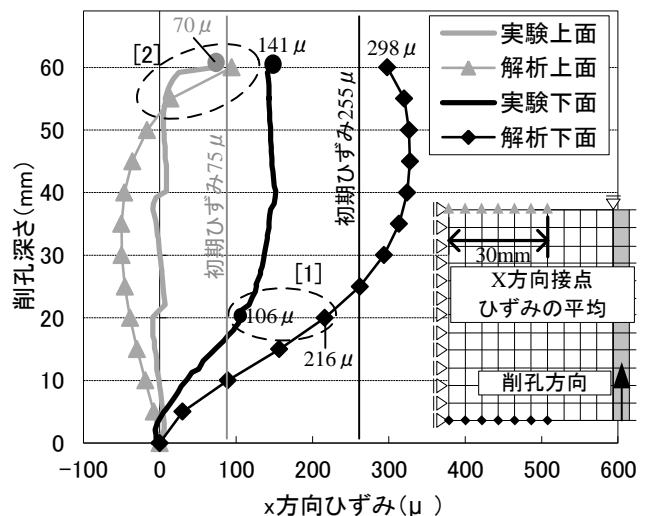


図-9 上面、下面ひずみ履歴

った。なお、実験の初期導入ひずみはPC版-Cの削孔したコア内PC鋼線位置を計測し、その位置に初期緊張力が導入された時の値として算出した。上面ひずみに関して、切削深さ50mmまでは実験でひずみはほとんど変化せず、解析では約 50μ の圧縮ひずみが生じる。その後、②に示すように両方で急激に引張ひずみが増加する。上面での有効プレストレスは初期導入ひずみ 75μ に対し 70μ と 93% となり、ほぼ同様となった。

図-10にFEM解析結果のコアの変形状態を示す。なお、変形量は200倍にして示している。図-10の1)に示すように切削を行ったとき、切削位置では外部からの作用力が無くなり、内部からの膨張力のみとなる。よってコアには図-10の2)に示すように上面 39μ の圧縮ひずみ、下面 216μ の引張ひずみが生じる。

4.2 上側から削孔した場合

ここでは上側から削孔した場合のひずみおよび変形状態について記述する。図-11に上側から削孔する時の解析条件を示す。拘束条件を下側から削孔する場合から変更しており、y方向の拘束条件をコアの下縁の一カ所に変更している。また、削孔は上側からとした。その他の解析条件である要素分割や材料モデル、プレストレスの導入方法などは下側から削孔する場合と同様とした。

図-12に上面、下面ひずみを示す。実験結果は上側から削孔したPC版-Eの $\phi 100\text{mm}$ の結果を示す。下面ひずみでは、切削深さ50mmまでは実験、解析ともにひずみは増加せず、最終的に解析で急激にひずみが増加し 298μ のひずみが生じたのに対し、実験では 66μ 程度しか生じず、有効プレストレスも初期導入ひずみ 286μ に対し 19% と低い値となった。このように絶対値が小さく、コア抜きの最後で急変するひずみを実験では精度よく計測できていないと思われる。また、実験上面では図-12の[1]に示すように切削深さ42mmを超えた段階で引張ひずみから圧縮ひずみに急変している。これは切削深さ40mm付近のPC鋼線を切断した影響が出たものと思われる。

図-13にコアの変形状態を示す。1)に示す切削深さ20mmの段階で、下面から切削した場合と同様、

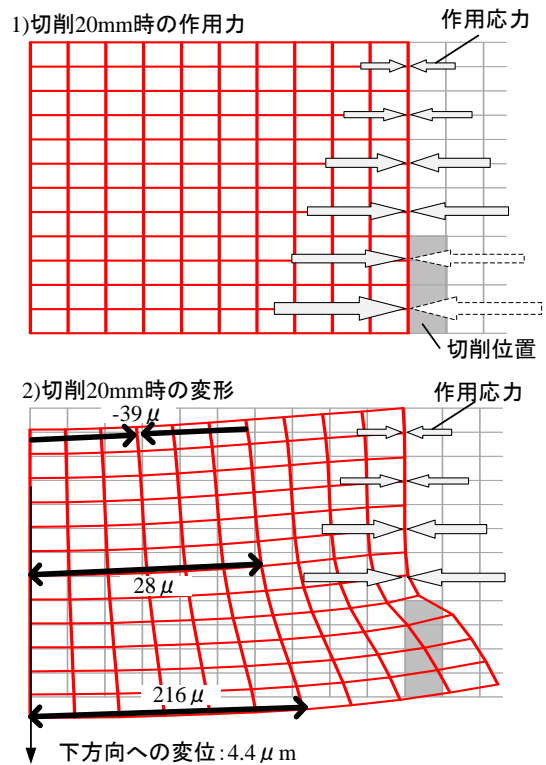


図-10 コアの変形状態

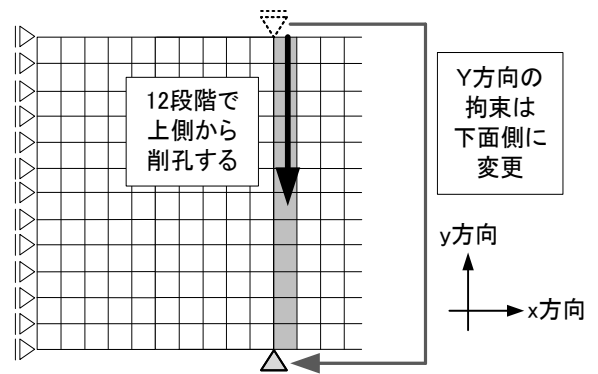


図-11 上面からの削孔時の解析条件

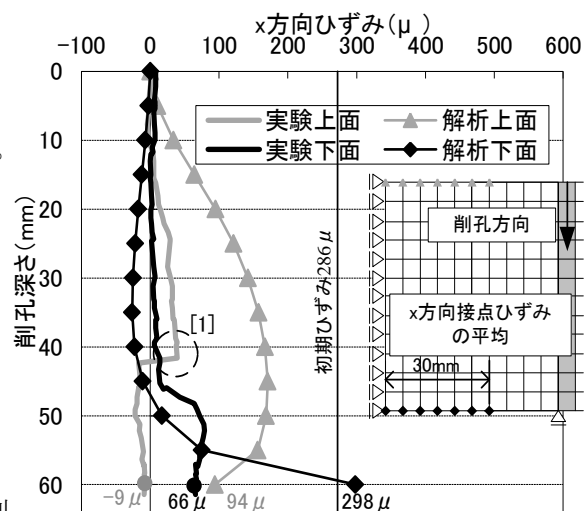


図-12 上下面ひずみ履歴(上面から削孔)

曲げ挙動の作用によりコアを抜き始めた側に変位する。また、切削開始面の開放ひずみに着目すると、20mm 切削した段階では図-13の[1]に示すように引張ひずみが 95μ 程度となっており、図-10に示す下面から切削した場合の 216μ と比較して小さい。これは図-13の[2]に示すように導入されている圧縮力が上面に近いほど小さいためである。2)に示す切削深さ50mmの下面ひずみに関しては終盤でも引張ひずみが 17μ 程度とほとんど応力開放されていない状態であり、図-14に後述するようにコア抜き最後の数mmで一気に応力が開放されることになる。

図-14に上記の解析結果をまとめたひずみの変化率を示す。コアを上面、下面それぞれから削孔した場合の下面ひずみ履歴を示している。ひずみ変化率に着目すると、下面から削孔した場合、1mm 削孔するごとに切削深さ55mm以降で約 4μ 、最も変化率の大きい個所で約 14μ ずつ変化している。これに対し、上面から削孔した場合、変化率は $75\mu/\text{mm}$ であり5倍以上の変化率となる。そのことから、上面から削孔した場合、終盤で一気にひずみが増加するためその変化をひずみゲージで精度よく計測できないことが懸念される。よって今回のPC版のように薄い部材を貫通させて応力開放法を行う際には初期導入ひずみが大きい側から削孔し、計測ひずみの変化を緩やかにすることで計測精度は高くなると考えられる。

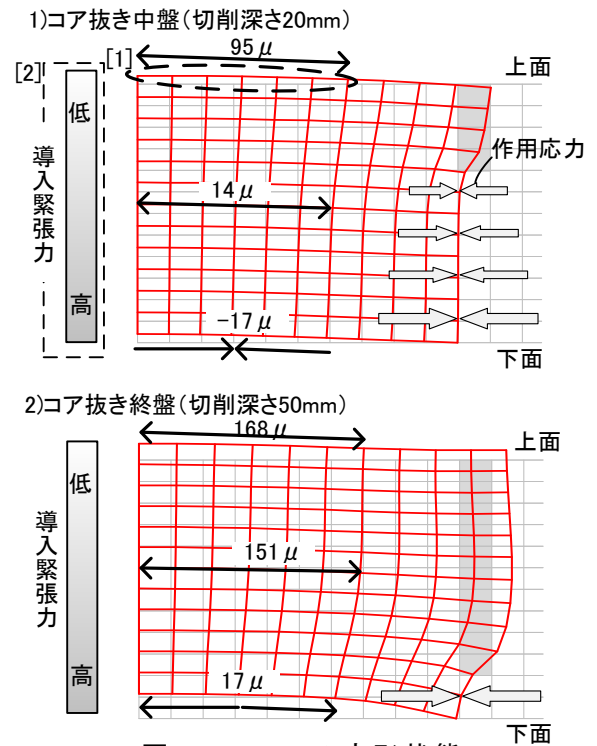


図-13 コアの変形状態

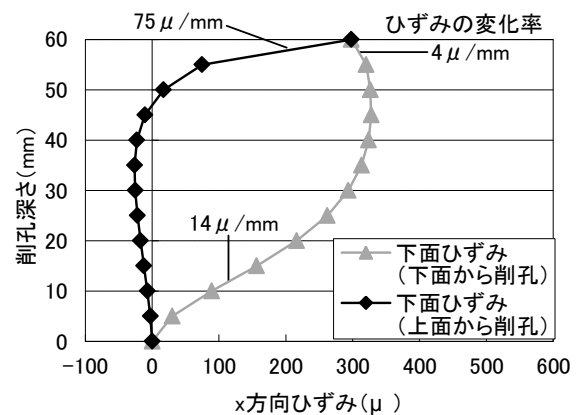


図-14 ひずみ変化率

5. まとめ

施工後53年が経過したPC版の応力開放法実験およびFEM解析により以下の知見が得られた。

- (1) 実験結果より、PC版の下面ひずみから求めた初期導入緊張力に対する有効プレストレス比は下面から削孔した場合で55%、上面から削孔した場合19%となり、どちらも設計値より大幅に小さい。しかし、ひずみを連続的に計測できていることやひずみの変化が解析結果の傾向と一致していることから、計測にあたっては下面から削孔した場合のほうが良いと思われる。
- (2) 解析結果のコアの変形状態およびひずみの変化率より、今回のPC版のような薄い部材を貫通させて応力開放法を行う際には初期導入ひずみが大きい側から削孔し、ひずみの変化が連続的に計測することで安定し精度は高くなると考えられる。

参考文献

- 1) 建設省：関門トンネル工事誌，pp.6-7，1960年
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書，同解説I共通編，pp.72-87，2002年
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，pp.32-64，2007年