論文 PC 版の応力開放法による有効プレストレス量の推定

清水 英樹^{*1}·幸左 賢二^{*2}·福永 靖雄^{*3}·松尾 明武^{*4}

要旨:本論文は,竣工後53年の長期間に渡って海水の漏水や排気ガスに曝された薄いPC版構造が保有している有効プレストレス量の評価を目的とし,PC構造において、コア抜きによる応力解放量より有効プレストレス推定方法の適用性について検討した。その結果、有効プレストレス比は、初期導入ひずみ量に対して弾性変形やクリープ、乾燥収縮、リラクセーションを含め7割程度であると推定された。また、コア抜き前後のひずみ量の差により有効プレストレス量を推定する場合は、初期導入ひずみ量が大きいと想定される側よりコアを抜き始める方が、信頼性のある計測が可能であることが明らかとなった。

キーワード:有効プレストレス,応力開放法,PC版

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下 PC)構造が我が国 で初めて採用されたのは、昭和26年頃といわれており、 今回対象とする関門トンネル¹⁾は、昭和32年竣工と PC 構造の創生期に造られた構造物である。図-1に関門国 道トンネル断面図を示す。関門国道トンネルは、全長 3461m(うち海底部分780m)、断面中段が車道であり、 上下線各1車線であるが本州と九州を結ぶ重要な路線と なっている。この3kmを超えるトンネルから自動車排気 ガスを円滑に換気するため、トンネル断面下段には新鮮 な空気を送り込むための送気ダクトと、断面上段には汚 れた空気を外に出すための排気ダクトがある。今回取り 上げている PC 版は、車道と排気ダクト間にある天井版 であり、1 断面内に横に2枚単純支持されている。本研 究では、竣工後53年の長期間に渡って海水の漏水や排 気ガスに曝された薄い PC 版構造が保有している有効プ



図-1 関門トンネル断面図

*1 大日本コンサルタント(株)九州支社技術部 (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 西日本高速道路(株)大阪支社

*4 九州工業大学 工学部建設社会工学科

レストレス量の評価を目的としている。既往の有効プレ ストレス量の推定法²⁾には、PC 鋼線を直接切断し収縮 量により推定する方法、構造物を載荷しひび割れ時の荷 重より推定する方法、コアカッターでコンクリートを抜 き取りその膨張量から推定する方法等があり、本 PC 版 への適用方法の検討を実施している。ここでは特に、薄 い PC 構造において、コア抜きによる有効プレストレス 推定方法の適用性について述べる。

コア抜きによる有効プレストレス推定方法 4.1 供試体諸元

天井 PC 版の形状を図-2に示す。 PC 版は長さ
3275mm幅495mm,厚さ60mmで1枚の重量が約250kg,
断面下側にφ2.9mmのPC 鋼線が16本,上側に同鋼線が
5本プレテンションで配置され、φ3.2mmの丸鋼がPC
鋼線を取り囲んでいる。表-1に天井 PC 版の材料物性



値を示す。コンクリートの圧縮強度は、天井 PC 版から PC 鋼線がコア内に入らない様に採取した φ 25mm コア 6 本の平均で 47.1N/mm²,弾性係数も同じく 6 本平均で 37500N/mm²となり PC 鋼線とコンクリートの弾性係数比 率は、5 程度となっている。また、PC 鋼線の初期緊張力 の設計値は、設計降伏強度の約 86%で 1372N/mm² 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量は、図-3,1)の PC 鋼 材緊張応力から,2)でのPC版の実弾性変形,3)での実際 のクリープ・乾燥収縮・リラクセーション・弾性係数の 低下等の劣化要因を考慮に入れた PC 鋼材の有効引張応 力である。今回使用するコアカッターでコンクリートを 抜き取りその膨張量から推定する方法は,応力開放法と も呼ばれ、図-3、4)の様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付け、初期値を計測し、コア 抜きにより PC 鋼線からコンクリートへの圧縮力が開放 されることで、コア抜き前後または途中のコンクリート ひずみ値の変化により, PC 鋼材の有効プレストレス量を 推定する。コア抜きは、図-4に示す様に PC 版-A~E た。これは、採取コア内に残る PC 鋼線の本数と長さの 違いに着目したものである。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。

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コアあたり上面 3ch,下面 3ch の計 6ch としてい る。各方向のゲージは,x 方向ゲージが応力開放量を直 接計測するもので, y 方向 xy 方向ゲージは応力開放に伴 うポアソン効果の程度を確認するものであるが、本論文 ではポアソン効果に着目していないため使用していな い。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、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。また、コア ϕ 100mm では 60mm ゲー ジを, ϕ 66mm では 30mm ゲージを使用しており, 最大 粗骨材径が 20mm であることから、30mm ゲージの計測 精度が問題となるが、コア4本を平均することで精度確 保を図っている。

3. 実験結果

3.1 コア内 PC 鋼材位置と初期導入ひずみ量

表-2にコア内 PC 鋼線実測位置平均値と,その位置 に初期緊張力が全くロス無く導入されたとした場合の PC 版上下面のひずみ量を示す。コア内の鋼材の位置は,

表-1 天井 PC 版の材料物性値

	使用材料	材料物性值	Í
	コンク リート	設計強度	50N/mm ²
		圧縮強度	47.1N/mm ²
		変形係数	37500N/mm ²
	PC鋼線	0.2%永久伸びに対する応力	1600N/mm ²
		初期緊張力(設計値)	1372N/mm ²
		変形係数	200000N/mm ²





表-2 コア内 PC 鋼線実測寸法と初期導入ひずみ量

供試体			PC版-A		PC版-B		PC版-C		PC版-D		PC版-E	
コア径 φ [mm]			100	66	100	66	100	66	100	66	100 (1)	100 (2)
平均	上面~上鋼材中心[mm]		19.5	20.1	21.5	20.8	21.6	23.1	20.2	23.9	20.3	18.7
	上下鋼材中心間[mm] 18		18.3	18.9	19.5	19.6	18.8	17.3	19.5	18.2	22.4	21.5
寸	下鋼材中心~下面[mm] 19		19.5	19.1	18.4	19.4	20.6	20.6	21.3	19.5	17.8	18.4
法	全 厚[mm]		57.3	58.1	59.4	59.8	61.0	61.0	61.0	61.6	60.5	58.6
;	初期導入 ひずみ量	上面[µ]	86	74	53	68	75	69	90	50	47	68
		下面[μ]	266	273	285	269	255	261	241	277	286	275

図-5 コアとゲージの計測方向



図-6 削孔パラメータと結果概要

↓100mmの場合上鋼材が1本,下鋼材が3本含まれるため鋼材断面が確認できる上鋼材が2箇所平均,下鋼材は 6箇所の平均寸法としており,↓66mmの場合上鋼材が1 本,下鋼材が2本であるため,上鋼材が2箇所と下鋼材が4箇所の平均である。同一PC版内で採取したコア内の鋼材位置は,平均して1mm程度の違いがあり,コア 抜き位置の違いによる鋼材位置のばらつきが見られる。 そのため,採取コア1本毎にPC鋼材の位置を考慮した初期導入ひずみ量を算出し評価する。

上面の初期導入ひずみ量は、10個のコアで最大 90 μ 、 最小 47 μ と 43 μ の差があり、下面の最小 241 μ 、 286 μ と同一の PC 版-D ϕ 100 コアと PC 版-E ϕ 100(1)コアで下 面の差 45 μ と同程度である。また、下面の初期導入ひず み量約 270 μ は、最大圧縮強度となる 2000 μ の 14%程度 の値である。なお、導入ひずみ量と計測ひずみ量の符号 は、本論文では導入ひずみを圧縮が正とするため、計測 ひずみは引張を正としている。

3.2 計測ひずみ

図-6に削孔手法のパラメータ別の結果概要を示し、 表-3にコア抜き後のx方向最終ひずみ変化量と、括弧 内にひずみ変化量を表-2の初期導入ひずみ量で除し て PC 鋼材に導入されていると推定される有効プレスト レス比(式(1))を示す。

表-3 最終ひずみ変化量と有効プレストレス量

供試体		PC版-A PC版-B		PC版-C	PC版-D	平均
1	上面	52μ	89μ	_	-	
手法	ゲージ	(0.70)	(1.31)	_	_	
1	下面 ゲージ	184µ	179µ	_	193µ	185µ
		(0.67)	(0.67)	_	(0.70)	(0.68)
ł	上面 ゲージ	71µ	1μ	70μ	72μ	
手法		(0.83)	(0.02)	(0.93)	(0.80)	
2	下面 ゲージ	104µ	135µ	141µ	112µ	123µ
		(0.39)	(0.47)	(0.55)	(0.46)	(0.47)
供試体		PC版-E(1)		PC版	平均	
1	上面 ゲージ	-9μ		10		
手法		(-0.19)		(1.		
3	下面 ゲージ	54μ		93	76μ	
		(0.19)		(0.	(0.27)	

(1) 手法 1

手法1は、コアを下面から上面にφ66mmで抜いたケ ースで、表-3の4本コア8ゲージ中3ゲージが欠測と なり、コア抜き後までひずみが連続的に計測できる可能 性は中程度である。しかし、上面ゲージと比較して安定 してひずみが計測されている下面ゲージの平均最終ひ ずみ変化量は、3手法中最も大きい185μであり、計測 中のひずみ変化量は比較的大きい。また、供試体別の有 効プレストレス比は0.67~0.70とばらつきが少なく、平 均すると0.7程度と推定される。

図-7,8に手法1のPC版切削深度と表面ひずみの 変化量を示す。図-8のPC版-Cは、上面側ひずみ挙動 が図-7の3コアと明らかに異なり、コア抜き初期段階 から引張ひずみが計測されていること、下面側ひずみが コア抜き途中でデータが取れなくなったことからこれ を評価から除外した。図-7の3つのコア全体としての ひずみ変化挙動は、上面が初めから切削深さが大きくな る程圧縮ひずみが増加してゆき、深さ55mmを超えると 引張方向にひずみが急増して、PC版-Dは、コアが抜け た際にコアカッター内にコアが残ってしまいコアカッ ターとともにコアが回転してリード線が切断されたこ とから、コアが抜けた直後のひずみが計測できていない。 PC 版-A と B は最終的にコアが抜けたときには引張ひず みとなっている。下面は、切削深さ 0→20mm 程度で引 張ひずみが最終ひずみの8~10割程度発生し、深さ20mm 以深はひずみが微増、微減している。この現象について は次章で考察する。

(2) 手法 2

手法2は、コアを下面から上面に ϕ 100mmで抜いたケ ースで、表-3の4本コア8ゲージ全て計測できており、 ひずみが安定して計測できる可能性は比較的大きい。下 面ゲージの平均最終ひずみ変化量は、123 μ であり中程 度であり、供試体別の有効プレストレス比は0.39~0.55 と手法1に比べばらつきが大きく、平均すると0.5程度 と一般的な値よりも小さくなっている。図-9に手法2 のPC版切削深度と表面ひずみの変化量を示す。4つの コア全体としてのひずみ変化挙動は、上面が ϕ 66m コア とほぼ同様である。下面は、切削深さ0→20mm程度で 引張ひずみが最終ひずみの7~10割程度発生し、深さ30 ~40mm辺りで引張ひずみが最大となり、これ以降コア を抜ききるまで徐々に引張ひずみが小さくなる傾向に ある。この現象についても次章で考察する。

(3) 手法 3

手法3は、コアを上面から下面にφ100mmで抜いたケ ースで、2本コア4ゲージ全て計測できているが、図-10に示す様にひずみ変化が不規則で連続的に計測で きていない。また、下面ゲージの平均最終ひずみ変化量 は、76μであり比較的小さく、供試体別の有効プレスト レス比は0.19と0.35で手法1に比べばらつきが大きく、 平均すると0.3程度と精度良く計測出来ていない。PC版 -Eの2つのコアは、ひずみが上下面ともに削孔前半は40 μ程度で手法1、2に比べあまり変化せず、後半に不規 則な変化で連続的にひずみが計測できず信頼性に欠け る。これは、前半に導入圧縮ひずみの小さい上面側を削 孔していることから、ひずみの変化が少なく、後半に版 とコアの結合部分が少なくなった状態で、PC 鋼線を 3 本同時に切断しているため、ひずみ分布が急激に変化す るためと考えられる。

3.3 結果まとめ

以上の結果より、コアを上面から下面方向に抜く手法 3 は、ひずみ計測の信頼性が低いと推定される。コアを 逆に抜く手法1(ϕ 66mm)と手法2(ϕ 100mm)を比較 すると、ひずみ変化量を多く計測できる手法1の方が計 測精度を確保できると推定されるが、コア抜きを失敗す る可能性がある。

表-3の手法1,2の上面ゲージ有効プレストレス量 は、下面ゲージに比べばらつきが大きく、**表-2**の上面 初期導入ひずみ量と同様に、鋼材位置寸法の僅かな差が 大きく影響しているものと推定される。以上のことより、



(c) PC版-D

図-7 手法1: φ66mm コアひずみ計測結果 (PC 版-A, B, D)



図-8 手法1: ϕ 66mm コアひずみ計測結果 (PC 版-C)





手法1のφ66mm コアを下面から上面に抜く方法を用い て、下面ゲージより有効プレストレス量を推定する方法 が比較中最も信頼性を確保できると考えられる。

手法2に対して,手法1の計測精度が確保できた理由 としては、φ100mmに比ベφ66mmのコアの方がコア内 に残存する PC 鋼線の本数及び長さが少なく,PC 鋼線の クサビ効果により付着の影響が少なかったためと推定 される。今後さらに計測精度を向上させるには、コア径 を小さくし PC 鋼線の拘束影響を出来る限り除外するこ とが考えられるが、コアが小さい分コア抜き作業にはよ り慎重さが求められる。また、y方向や版厚(z)方向に 生じるひずみの影響を考慮することが今後の課題であ る。

図-7~9のひずみ変化履歴を個別に見ると図中の ○で囲んだ部分において、計測ひずみの不連続が確認で きる。この不連続位置は,表-2に示すコア内 PC 鋼線 実測寸法位置と一致しており,コアカッターが PC 鋼線 を切断した際に生じたものと考えられる。特徴としては, 上面ひずみは PC 鋼線を切断すると引張側にシフトする のに対し,下面ひずみは一旦圧縮側に変化した後,元の ひずみに戻る傾向が見られる。

4. 結果の評価と考察

図-11に PC 版を下面側から上面側にコア抜きした 場合のひずみ変化イメージ図を示す。コア抜き前は、3 章で計測・推定した有効プレストレス量の結果をもとに、 コア抜き前は図-11の[1] に示す様に上面側で約 50 μ ,下面側で約 190 μ の圧縮ひずみと仮定し、初期の計 測ひずみは 0 μ である。コア抜き序盤の切削深度 0→ 20mm は、[2] に示す様に上面側ひずみが切削深さ 1mm 増す毎に約 $1 \sim 2 \mu / \text{mm}$ のペースで圧縮ひずみが増加し てゆき,下面側ひずみは[3] に示す様に約 $8 \mu / \text{mm}$ のペ ースで圧縮ひずみが減少してゆく。これは,下面側から コア抜きされることにより,切削されていない上面側に 作用する圧縮量が増加してゆき,下面側は圧縮力が作用 しなくなることでひずみが解放され,上側圧縮,下側引 張の擬似的な曲げ挙動を示すためと考えられる。コア抜 き中盤の切削深度 $20 \rightarrow 40 \text{mm}$ は,[4] に示す様に上面側 が序盤と同様のひずみ挙動であるが,[5] に示す様に下 面側はひずみが引張方向に $2 \mu / \text{mm}$ 程度で変化してゆく。

これは、下面側は序盤で大部分の圧縮ひずみを解放し ており、上面側に大きく偏心した圧縮力による曲げ作用 の増加分によるものと考えられる。コア抜き終盤では、 中盤の状況がさらに進展し、[6]に示す様に上面側の圧 縮ひずみが最大値 100 μ 程度となり、[5]に示す様に下 面側は逆に圧縮から引張ひずみになる。また、コア貫通 直前では、コアに作用する圧縮力を受ける面積が小さく なることで、コア全体として作用する圧縮力が小さくな り上下面側ともにひずみの絶対値が小さくなる。そして、 コアが貫通した瞬間に上面側に作用していた圧縮力が 一気に解放され、コア全体のひずみが全て解放されると 考えられる。

今回実験した PC 版-A~D は、初期導入ひずみ量の大 きい下面側からコア抜きしたことから、下面側のひずみ の大きな変化を緩やかに計測でき、初期導入ひずみ量の 小さな上面側を最後まで接触させておくことで、曲げ作 用によるひずみ変化を小さくできたと考えられる。また、 計測の信頼性に欠けると推定された PC 版-E は、初期導 入ひずみ量の小さい上面側からコア抜きしたことから、 コア抜き序盤でのひずみ変化が小さく、中盤以降にひず みが急速に変化したため、その変化を精度良く捉えられ なかったと考えられる。これらのことから、有効プレス トレス量をコア抜き前後のひずみ量の差により推定す る場合は、初期導入ひずみ量が大きいと推定される側よ りコアを抜き始める方が、比較的信頼性のある計測が可 能となる。

5. まとめ

コア抜きによる有効プレストレス推定方法の適用性 について検討した結果,以下の結論が得られた。

- ・PC版の応力開放法により有効プレストレス推定は、手法1のφ66mmコアを下面から上面に抜く方法を用いて、下面ゲージより推定する方法が比較中最も信頼性を確保できると考えられ、この方法による有効プレストレス比は、0.7程度である。
- ・手法 1,2 の計測中のひずみ変化を多く測定できたの は、初期導入ひずみ量が大きいと想定される側よりコ



図-11 コア抜き中のひずみ変化イメージ

アを抜き始める方が、コア抜き終盤での曲げ作用によるコアのひずみ変化を小さくすることができ、初期導入ひずみ量の大きな面のひずみ変化を緩やかに計測 できるためと考えられる。

 コア径が小さい方が計測精度を確保できたのは、コア が小さい方がコア内に残存する PC 鋼線の本数及び長 さが少なく、 PC 鋼線のクサビ効果により付着の影響 が少なかったためと推定される。計測精度を向上させ るためには、コア径を小さくすることが考えられるが、 コアが小さい分コア抜き作業にはより慎重さが求め られる。

参考文献

- 1) 建設省: 関門トンネル工事誌, 1960.12
- 二井谷教治:コンクリートに作用する有効応力の推 定法に関する研究,博士論文,岡山大学大学院, 2008.3