

応力解放法によるPC構造物の現有作用応力の推定方法の開発

長崎大学 大学院 生産科学研究科 正会員○出水 享
(株)K&T こんさると 正会員 肥田 研一
佐賀大学 大学院 工学系研究科 伊藤 幸広
長崎大学 工学部 構造工学科 松田 浩

Abstract : The PC bridge has high durability and it has been believed that a maintenance is unnecessary. However, PC bridge in which it is located near the seashore shows the example which PC tendon fractured by damage from chloride attack.

The damaged PC-tendon may lead not only to the reduction of pre-stress but also structural collapse of the bridge. In this research, the authors have further developed a method of measuring the existing stress state of the PC bridges by stress relief method and optical measurement techniques. The latter is a non-contact and full-field measurement method whereby the displacements on the structure are captured and used to analyze the stress state of the structure. This paper reports the fundamental experimental results which were carried out on the specimens in the laboratory based on the aforementioned technique.

Key words : Pre-stress concrete structure, Stress relief technique, Presumption of pre-stress

1. はじめに

コンクリート構造物は、耐久性が高く永久構造物と信じられてきた。しかし、近年、一部のコンクリート構造物において、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などの劣化により、ひび割れ、鉄筋腐食などの変状が見られるようになってきた。

特に、道路橋、鉄道橋、建築物など多種に渡り建設されてきたプレストレストコンクリート構造物（以下PC構造物）は、高張力鋼（以下PC鋼材）を緊張し構造物にプレストレスを導入するため、通常のコンクリート構造物に比べ、PC鋼材の腐食に敏感に反応し、耐久性能が落ちるとともに安全性にも直接影響する。海岸近くに位置するPC橋梁が、飛沫塩分の影響を受けて、PC構造物の安全性の要であるPC鋼材が破断した事例もある。このようなPC構造物の安全性を脅かす事態を回避するために、適切な診断と維持管理の必要性が求められている。

このため、社会資本であるPC構造物は、適切な維持管理を行い安全性能を維持するためには、導入されているプレストレス量を的確に確認することが重要であると考えられる。しかし、現状では、PC構造物のプレストレス量を的確に計測する技術は確立されていない。

本研究では、従来の現有応力推定法に比べ精度を向上させるために、光学的計測法と応力解放法を組み合わせ新しいPC構造物の現有応力測定法の開発を行った。

2. 既存の現有作用応力推定法

2.1 応力解放法

応力解放法とは、現在、鉱山業界で岩盤等に作用する応力を測定する方法として開発されたものである。この方法は、金属やプラスチックの分野にも用いられている。応力解放法の原理は単純である。測定対象物にスリット切削やオーバーコアリングなど行い部分的に応力を解放し、解放されたひずみや変位を測定することで応力解放前の初期応力を算出する方法である。代表的な測定方法を挙げ

ると、孔径変化法、孔壁ひずみ法、円錐孔底法などがあり、コンクリート構造物には、鉄筋切断法、スロットストレス法、コア周辺解放法等が適用されている¹⁾。

2.2 スロットストレス法²⁾

スロットストレス法とは、フランスで開発されたもので、図-1に示すように計測対象位置にフラットジャッキ挿入用のスロットを削孔し、削孔穴にフラットジャッキを挿入し、加圧することにより所定の検長区間が解放前の変位量となった時点での応力を現有応力とする方法である。しかし、スロットストレス法では、低応力状態の現有応力推定の精度が低いことや、測定にあたり装置がとても大がかりであり、測定作業が煩雑で熟練を要するなどの欠点も保有している。

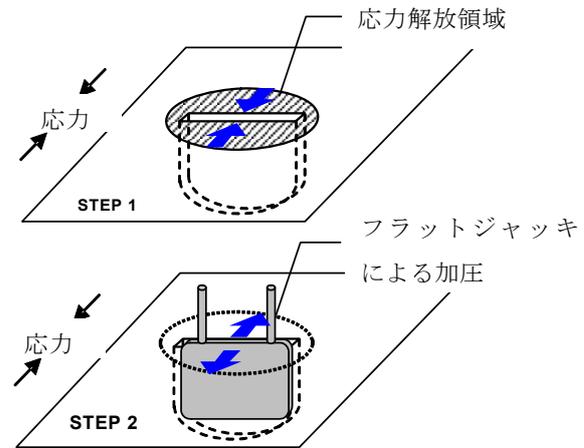


図-1 スロットストレス法の測定原理

2.3 コア応力解放法³⁾

PC構造物のコンクリート断面には、自重、プレストレスなど、一様な応力が作用している。一方、穴の開いた部材に σ の応力を作用させると、開口部周辺に 3σ の集中応力が発生する事が知られている。その事から、一様な応力が作用している部材に対して、削孔などにより部分的に応力を解放すると削孔部周辺に応力の再分配が生じ、応力状態が変化する。(図-2参照)

コア周辺応力解放法は、削孔によって再分配されるコア周辺部のひずみ変化量をストレインゲージで計測する。削孔により再分配されたコア周辺部のひずみ計測値をFEM解析などにより逆算することから部材に作用している応力状態を推定することができる。しかし、コア周辺の微小な範囲の応力変動を把握するためゲージ長の短いストレインゲージを用いることから計測値は、骨材の影響を大きく受け精度よく測定することができない。さらに、ストレインゲージは、ゲージ長の平均したひずみ値であり、1枚のストレインゲージに対して、1点1方向のみの情報を得ることしかできず、多くの情報を得るためには、多数のストレインゲージを設置する必要があり、配線作業等が複雑になる。

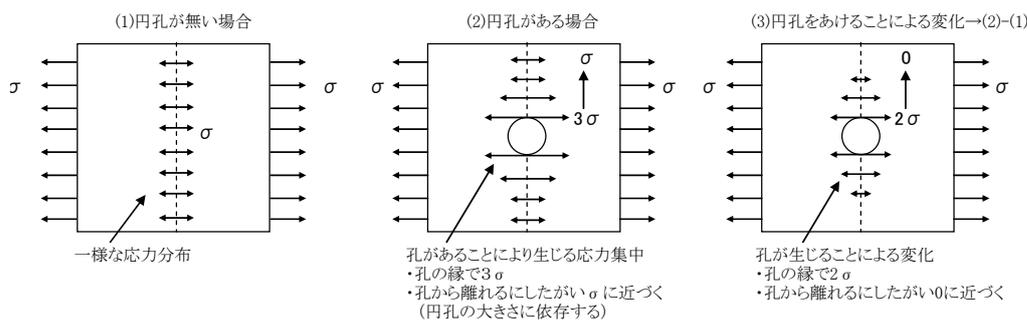


図-2 水平方向の応力度の変化

3. 新しい現有作用応力推定法

3.1 概要

今回開発した現有作用応力推定法(以下スリット応力解放法と呼ぶ)は、既存の計測手法に比べ精度の向上を図るため、光学的全視野計測法を用いるところに特徴がある。光学的全視野計測法を用いることによりスリット近傍の微小領域まで高精度に解放ひずみ分布を計測することができる。

スリット応力解放法は、切削するスリットの周辺部をデジタルカメラやスキャナーなどで計測し、計測したデジタル画像から光学的全視野計測法の一つであるデジタル画像相関法によって解放ひずみ

分布を求める。また、FEM解析による逆解析を行い、計測した解放ひずみ分布を元に部材に作用している現有作用応力を算出する。手順は、以下のとおりである。

- (1) 鉄筋探査により計測位置を特定する。
- (2) ひずみ計測位置を洗浄液（アセトン等）にて清掃する。
- (3) スリット切削位置のマーキングを行う。
- (4) デジタルカメラ又は、スキャナー（写真-1）により、応力解放前のコンクリート表面の計測を行う（初期画像）。
- (5) 応力作用方向に対して直角方向にコンクリートカッターで深さ30mmのスリットを切削する（写真-2）。
- (6) 再度デジタルカメラ又は、スキャナーにより応力解放後のコンクリート表面の計測を行う（変形画像）。
- (7) 初期画像と変形画像によりデジタル画像相関法で解析し、解放ひずみ分布を得る。
- (8) FEM解析により逆解析を行い現有作用応力を推定する。



写真-1 計測状況



写真-2 切削状況

3.2 プレテンション桁での実証実験

3.2.1 実験概要

今回、開発したスリット応力解放法の精度を確認するために、プレストレス導入量が既知のプレテンション桁を用いて現有作用応力推定の実証実験を行った。実験に使用したプレテンション桁の諸元を図-3に示す。また、写真-3に示すようにプレテンション桁を支間7.0mとした。また、スリット応力解放法による現有作用応力の推定をスパン中央部の桁の下面で実施した。なお、今回、スリット切削前後のコンクリート表面の画像をスキャナーにより計測を行った。

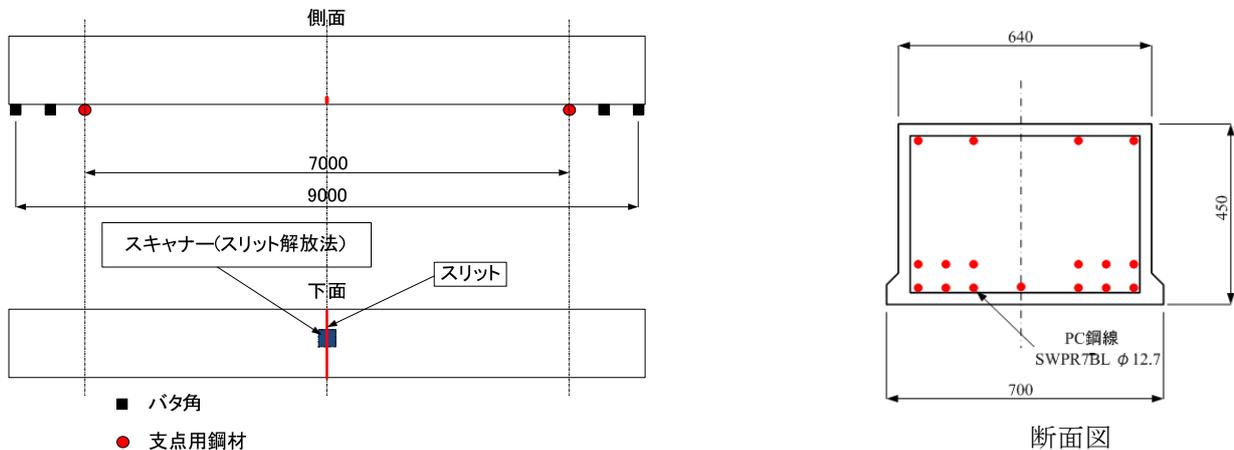


図-3 スキャナー計測位置



写真-3 実験桁全景

3.2.2 現有作用応力の推定

図-4に示す2次元FEM解析モデルにより実験と同様のスリットによる応力解放試験のシミュレートを行った。図-5に解析結果を示す。図-5より解放ひずみのピーク(約260 μ)は、スリットから約15mmの位置にあり、ピークより以後は、解放ひずみは減少しているのが確認できる。

図-6は、計測における解放ひずみ分布を示す。図-6より解放ひずみのピーク(約400 μ)は、スリット周辺にあり、解析値と同様に、スリットから遠ざかるにつれて減少しているのが確認できる。よってスキャナーによる解放ひずみ分布は、FEM解析結果と同様なひずみ分布を示している。

これらの解析と計測を踏まえてスリット深さ30mm切削時のスキャナーによる計測値と解析結果の比較検討を行った。スリットを挟んだ対象点間距離変化率の計測値と解析値の分布を図-7に示す。

FEM解析から得られた支間中央下縁応力度は、10.33N/mm²であった。図-7に示す0~20mm間での計測値は、解析値の平均107.5%であり標準偏差1.5%と精度の良い計測結果であった。0~20mm間での計測値は、解析値の107.5%であることから

$$10.33 \times 1.075 = 11.10 \pm 0.15 \text{ N/mm}^2$$

の応力が作用していると計測結果から推定できる(表-1)。

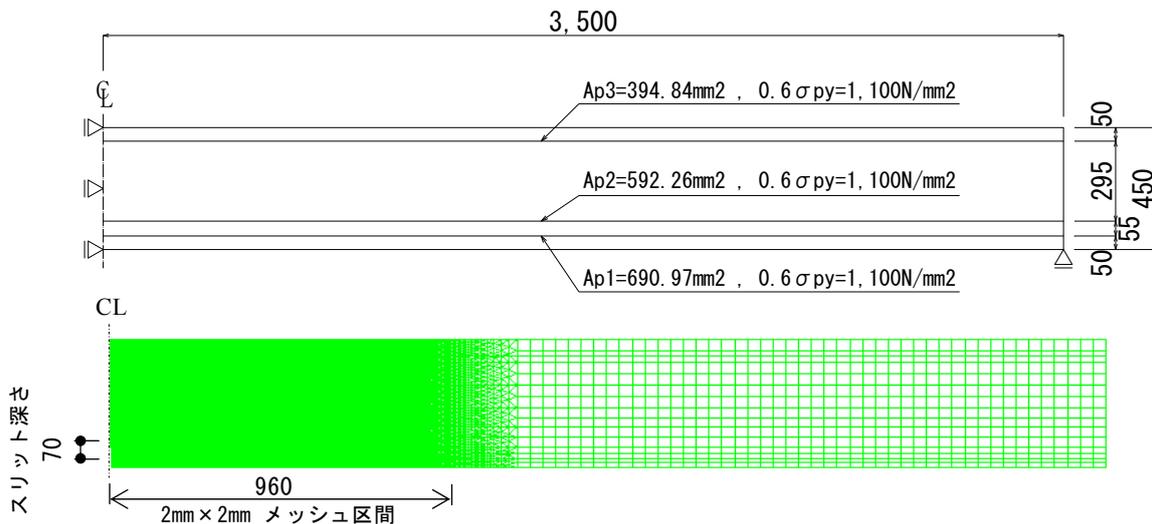


図-4 2次元FEM解析モデル

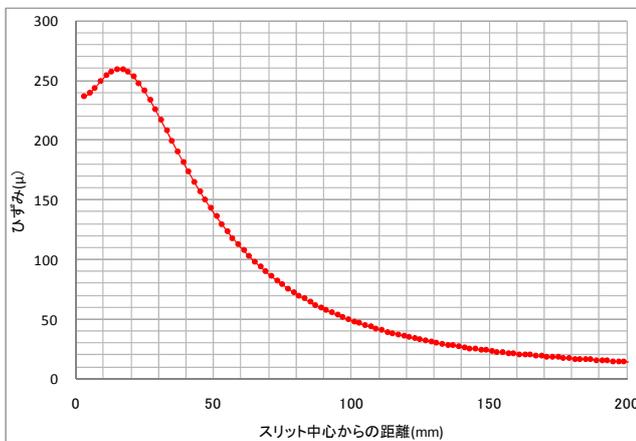


図-5 FEM解析による解放ひずみ分布

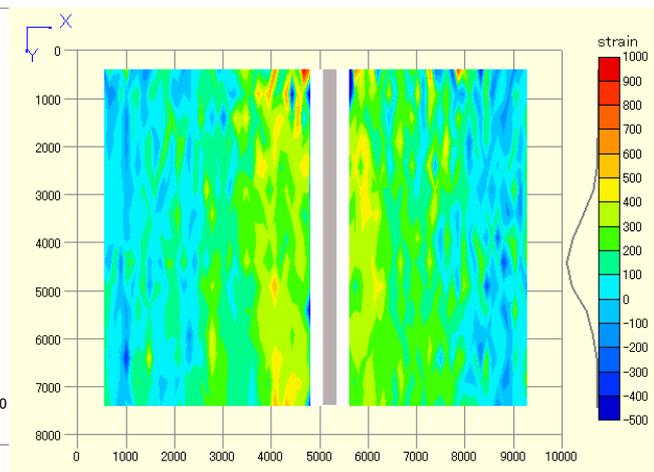
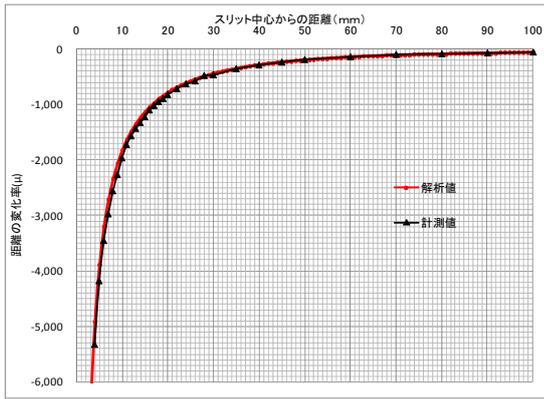
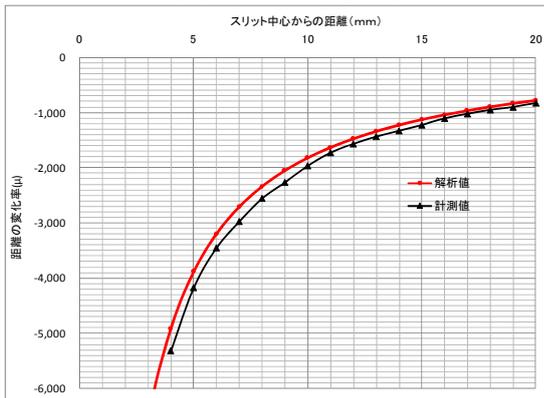


図-6 スキャナー計測による解放ひずみ分布



(a) 0~100mm区間



(b) 0~20mm区間の拡大図

図-7 対称点間距離変化率分布

表-1 解析値と計測値の比較

スリット中心からの距離(mm)	解析値(μ)	計測値(μ)	計算値/解析値×100 (%)	
4	-4918	-5328	108.3%	
5	-3887	-4181	107.6%	
6	-3201	-3457	108.0%	
7	-2709	-2978	109.9%	
8	-2341	-2559	109.3%	
9	-2054	-2268	110.4%	
10	-1824	-1967	107.8%	
11	-1635	-1728	105.7%	
12	-1477	-1569	106.2%	
13	-1345	-1436	106.8%	
14	-1230	-1331	108.2%	
15	-1130	-1226	108.5%	
16	-1043	-1105	105.9%	
17	-967	-1023	105.8%	
18	-898	-952	105.9%	
19	-838	-901	107.6%	
20	-783	-827	105.6%	
22	-688	-722	104.8%	
24	-610	-633	103.7%	
26	-545	-581	106.8%	
28	-489	-482	98.6%	
30	-441	-472	107.0%	
35	-348	-360	103.3%	
40	-281	-293	104.1%	
45	-232	-241	103.9%	
50	-194	-195	100.3%	
60	-142	-147	103.9%	
70	-108	-103	95.5%	
80	-86	-93	109.1%	
90	-70	-77	110.0%	
100	-58	-61	105.7%	
			平均値	標準偏差
0~20mm 区間			107.5%	1.5%
22~100mm 区間			104.1%	3.9%
全区間			105.9%	3.3%

3.3 供用中のPC桁橋での現有作用応力の推定

3.3.1 概要

PC桁橋でスリット応力解放法による現有作用応力推定を実施した。PC桁橋の諸元を表-2に示す。なお、このPC桁橋では、ストレインゲージによるコア応力解放法での現有作用応力の推定が実施されていた。

3.3.2 現有作用応力の推定

スリット応力解放法の解放ひずみは、写真-2に示すスキャナーにより計測し、計測した画像をデジタル画像相関法により解析し、対称点間距離変化率分布(図-9)を得た。

一方、2次元FEM解析モデルにより解析を行い、計測結果の対称点間距離変化率分布と同一となる作用応力を逆解析にて求めた。逆解析の結果、PC桁橋の支間中央部の下縁には3.6 N/mm²の応力が作用していることが推定できた。

図-9に示すように、対称点間距離変化率分布の計測結果は、解析と極めて近

表-2 PC桁橋の橋梁諸元

橋梁形式	ポストテンション方式単純T桁橋
橋等級	1等級 (TL-20)
幅員	12.00m
橋長	33.3m
桁支間長	32.50m
主桁本数	7主桁(主桁間隔 1.84m)

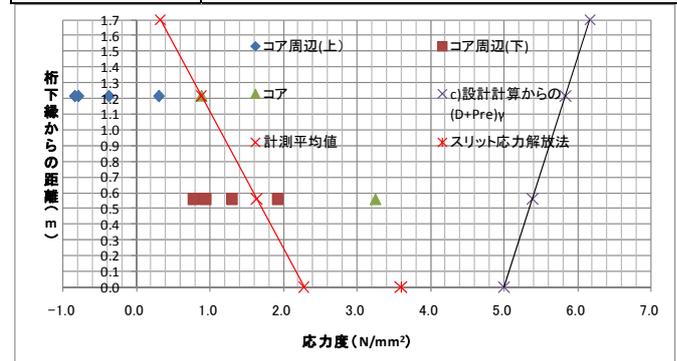


図-8 PC桁橋のひずみ分布

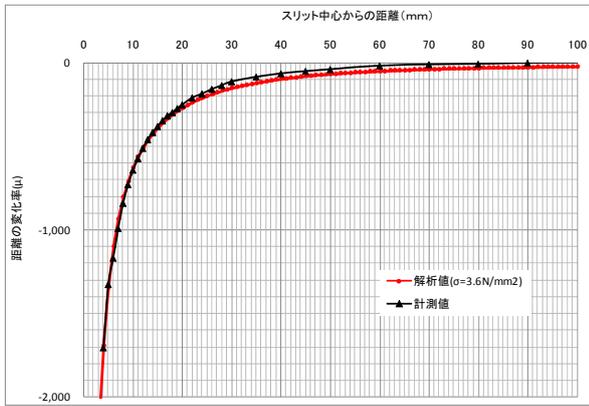
表-3 PC桁橋の下縁応力度(計測位置)

応力算出方法	現有作用応力 D+Pre (N/mm ²)	プレストレス (N/mm ²)
コア応力解放法	2.3	18.3 (87.1%)
スリット応力解放法	3.6	19.6 (93.3%)
設計計算書	5.0	21.0 (100%)

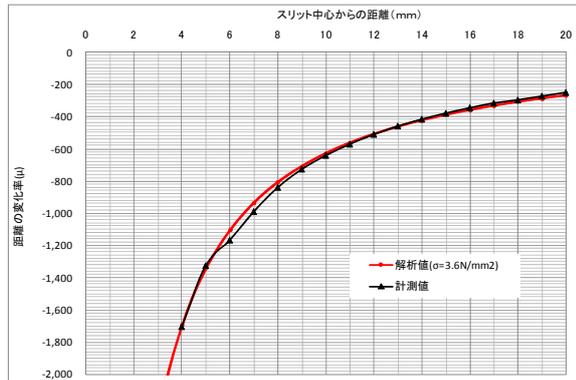
(%) は、設計計算書の値に対する割合を示す。

似しており、計測値の標準偏差は、3.8%となっている。スリット応力解放法よりPC桁下縁に3.6±0.1N/mm²の応力が作用していると推定される。

表-3に示すように、ストレインゲージによるコア周辺の解放応力測定法では、現有作用応力は、2.3N/mm²と推定されているが図-8に示すように誤差が極めて大きい。一方、スリット応力解放法の推定値は、標準偏差3.83%であり信頼性が高い。したがって、PC桁橋には、3.6±0.1 N/mm²の応力が作用していると推定される。



(a) 0~100mm 区間



(b) 0~20mm 区間の拡大図

図-9 対称点間距離変化率分布

表-4 解析値と計測値の比較

スリットからの距離(mm)	解析値 (μ)	計測値 (μ)	計算値/解析値 ×100 (%)
2	-3468.0	-	-
3	-2285.6	-	-
4	-1694.4	-1706.4	100.7%
5	-1339.7	-1327.2	99.1%
6	-1102.4	-1169.0	106.0%
7	-933.3	-991.2	106.2%
8	-805.8	-840.7	104.3%
9	-706.9	-727.6	102.9%
10	-627.4	-641.8	102.3%
11	-562.3	-572.4	101.8%
12	-508.0	-511.2	100.6%
13	-461.9	-458.9	99.3%
14	-422.4	-416.5	98.6%
15	-388.2	-380.4	98.0%
16	-358.0	-345.6	96.5%
17	-331.6	-316.0	95.3%
18	-308.1	-297.1	96.4%
19	-287.1	-272.6	94.9%
20	-268.2	-250.5	93.4%
標準偏差 S _{te}			3.83%
作用応力 σ (N/mm ²)			3.60
作用応力誤差 Δ=σ・S _{te} (N/mm ²)			0.14

4. 結論

開発した光学的全視野計測法と応力解放法を組み合わせた現有作用応力推定法（スリット応力解放法）は、スリット近傍の微小領域まで高精度に解放ひずみ分布を計測できるため、解放ひずみ分布から現有作用応力を精度よく推定できた。

今回は、光学的全視野計測をPC構造物の現有作用応力計測に適用したが、今後は特徴を活用して多くの分野で応用していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 肥田研一・神野人志・永吉竜二・高橋洋一・出水亨：有ヒンジPC箱けた橋の応力解放法によるプレストレス推定と中央ヒンジ部の異常たわみ原因の推定，土木構造・材料論文集 第21号，pp.119-128，2005
- 2) 浅井洋・藤田学・Thomas Le Diouren・宮本則幸：フラットジャッキを併用した応力解放法によるコンクリート部材の現有応力測定，コンクリート工学，Vol.42，No.4，pp.26-32，2004
- 3) 肥田研一・上島睦・永吉竜二・高橋洋一・松田浩：削孔によるコア周辺の解放応力測定法を用いたPCT桁橋の残存プレストレス量の推定，土木学会第62回年次学術講演会，5-061，pp.121-122，2007