

小型加力装置によるコンクリートに作用する圧縮応力の測定に関する実験研究

神戸大学大学院 正会員 博士(工学) ○三木 朋広
神戸大学 Nur Izyan Syazwani binti Julkifli

Abstract : Rebar corrosion and applied loads will create great stress within concrete and finally lead to cracking. In order to maintain the safety of existing structures a new method to evaluate the stress within concrete structure in-situ is required. The strain distribution in a mortar was investigated experimentally through loading tests and expansion pressure tests using a newly develop small cylindrical jack. The experimental results were compared with the analysis then the applied pressure was assessed in terms of the stress, strain distributions and stress concentration factor.

Key words : expansion jack, thick-wall theory, stress concentration factor, prediction of applied pressure

1. はじめに

本研究では、コンクリートに作用する圧縮応力を推定する新しい微破壊計測手法の提案に向けた基礎検討を行った。本手法は、将来的には、プレストレストコンクリート構造において内在応力を測定し、その値の経時変化を構造物の維持管理に用いるといった際に適用することを目指すものである。

実験では、円孔を有するモルタル供試体に対して圧縮載荷試験を行った。さらに、写真-1に示す新たに開発した小型円筒形の加力装置（以後ジャッキと称す）を用いて膨張載荷試験を行い、加力に伴って供試体に生じるひずみを測定した。いずれの載荷試験においても、モルタルにひび割れが生じる前の弾性領域を対象としている。実験で得られたひずみ分布と弾性厚肉円筒理論¹⁾から求めたひずみ分布の理論値を比較し、実験結果の妥当性を検証した。さらに、実験によって得たひずみ分布と応力集中係数の理論値を利用して、圧縮応力を推定することを試みた。

本研究で用いる手法では、円孔を有する弾性体における円孔周辺の応力集中係数^{2, 3)}を用いる。つまり、弾性体が外部、もしくは円孔内部から圧力を受けると、その弾性体の幾可形状や境界条件によって円孔周辺において応力の分布が大きく変化することを利用するものである。この手法と同様な方法はこれまでにいくつか提案されている。例えば、対象とするコンクリートにおいて、新たに円孔をコア採取してコンクリートに生じていた応力をいったん解放し、それに伴う円孔周辺のひずみ値の変化



写真-1 開発したジャッキとハンドポンプ

を捉えることによって、コンクリートに生じていた応力を逆解析で推定しようとする方法がある^{4,5)}。一方、本手法では、採取することによるコンクリート構造物への損傷を最小限とするよう、できる限り小さい直径の円孔とするとともに、設けた円孔周辺のコンクリートにおける応力状態を元に戻すよう円孔内側から加圧し、このときの円孔周辺のひずみ値の変化によって

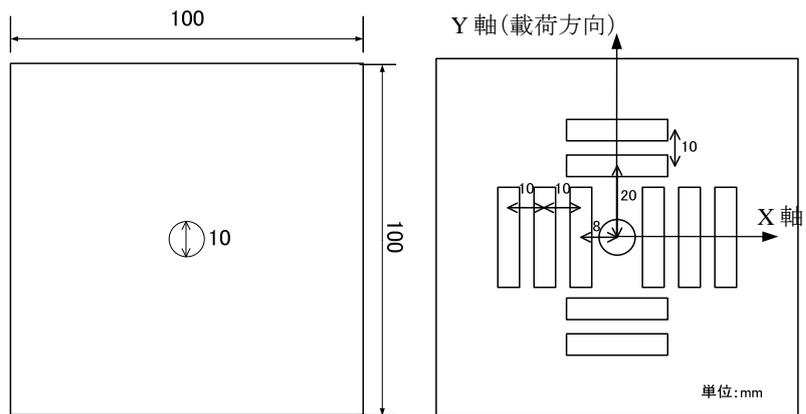


図-1 供試体寸法とひずみゲージの配置

作用応力を推定しようとするものである。本研究では、本手法による応力推定の基礎的な検討として、モルタル供試体を対象として圧縮載荷試験、ならびに円孔内部に加圧した膨張載荷試験を行った結果について示すとともに、それらの結果に基づいてモルタル供試体に作用する一軸圧縮応力を推測することを試みている。

2. 実験方法

2.1 供試体

供試体には、断面中心に直径約10 mmの円孔を有する、1辺100 mmのモルタル製立方体を用いた。このとき、型枠の所定の位置に直径10 mmのみがき棒鋼を設置しておき、モルタルが硬化した後、型枠を取り外す際にその供試体から引き抜くことによって円孔を設けた。圧縮載荷試験では、この円孔を側面とするように配置し、鉛直方向に圧縮応力を作用させた。モルタルの配合は、W/C = 0.5, S/C = 3.0 (いずれも質量比) とし、早強セメントを用いた。載荷試験時の圧縮強度は、55.0 N/mm²であった。

2.2 円孔周辺のひずみ測定方法と載荷条件

実験結果の妥当性を弾性解によって検証するために、図-1に示すように、供試体の表面にX軸、Y軸上において鉛直、ならびに水平方向に20 mmのゲージをそれぞれ貼り付けて、円孔周辺のひずみ分布を測定した。

載荷試験の様子を写真-2に示す。載荷実験では、表-1に示す3つの載荷条件、つまり、ケースNo.1は外圧(一軸圧縮応力)のみ、ケースNo.2は内圧(ジャッキによる膨張圧)のみ、そしてケースNo.3は外圧と内圧を同時に作用させた条件を設定した。



写真-2 載荷試験の様子(ケース No.3)

表-1 載荷条件

No.	載荷条件	載荷手法
1	一軸圧縮応力のみ載荷	円孔の位置を側面としたモルタル供試体を対象とした圧縮載荷試験
2	ジャッキによる膨張圧のみ載荷	モルタル供試体の円孔にジャッキを挿入し、膨張圧を加えた膨張載荷試験
3	圧縮応力と膨張圧を同時に載荷	ある応力レベルまで圧縮載荷を行なった後に膨張載荷を実施

ケースNo.1では、供試体にモルタル圧縮強度の1/5程度である10 N/mm²まで荷重し、その後0 N/mm²まで除荷することを数回繰り返した。また、ケースNo.2では、外力を作用させない状態で、供試体中心の円孔にジャッキ加力部を挿入して、膨張圧を作用させた。今回開発したジャッキによる膨張圧の許容値40 N/mm²まで加圧し、その後除荷することを数回繰り返した。

ケースNo.3では、ケースNo.1とNo.2の荷重を同時に行い、そのときの円孔周辺のひずみを測定した。この荷重実験では、まず1 N/mm²まで一軸圧縮応力を作用させ、その後円孔に膨張圧を40 N/mm²まで作用させて、その後除荷するといった一連の荷重を行なった。その後、同様にして、作用させる一軸圧縮応力を2~5 N/mm²と変化させて、円孔周辺のひずみを測定した。

3. 実験結果と考察

圧縮応力を評価するため、円孔中心からの距離に伴う応力集中係数の変化量が大きい、X軸上に荷重軸方向に設置したゲージによる測定結果を用いる。ここで示す実験結果は、供試体前後の両側面におけるそれぞれの位置で測定したひずみ値、ならびにそれらの平均値である。また、弾性厚肉円筒理論に基づく理論値より求めたひずみ分布もあわせて示している。理論値の算出の際、モルタル供試体を弾性体とし、さらに中央に1つの円孔を有する平板に様の圧縮応力が作用しているものと仮定する。

3.1 ケースNo. 1 (一軸圧縮応力のみ荷重した場合)

図-2には、ケースNo.1において外圧として5 N/mm²、ならびに10 N/mm²の圧縮応力を作用させたときの各位置におけるひずみ値の実験値、ならびに理論値を示す。この図から、円孔中心からの距離 $r = 8 \text{ mm}$ (円孔端部から3 mm)、ならびに18 mmにおいて、実験値と理論値がほぼ一致していることがわかる。例えば、測定点における荷重軸方向の応力集中係数 k の理論値は式(1)より求めると、 $r = 8 \text{ mm}$ においては1.42となるが、実験で得られたひずみ値から求めた応力値を荷重圧縮応力で除した値として応力集中係数を算出すると、その値は1.53であった。実験結果のほうが若干大きい値を示しているものの、おおよそ妥当な結果であるといえる。

$$k = \frac{\sigma}{p_{ex}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} + \frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} \tag{1}$$

ここで、 σ : 図-1中のX軸上の円孔中心からの距離 r の位置における鉛直方向(円孔の接線方向)の応力値(N/mm²)、 p_{ex} : 外圧として作用する圧縮応力(N/mm²)、 a : 円孔の半径(mm)、 r : 円孔中心からの距離(mm)

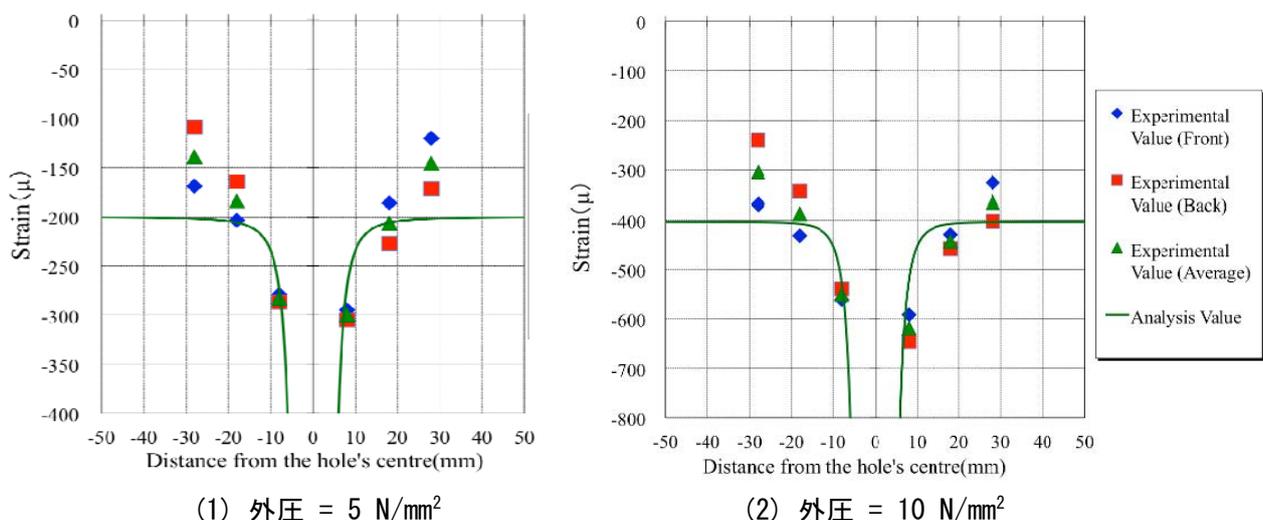
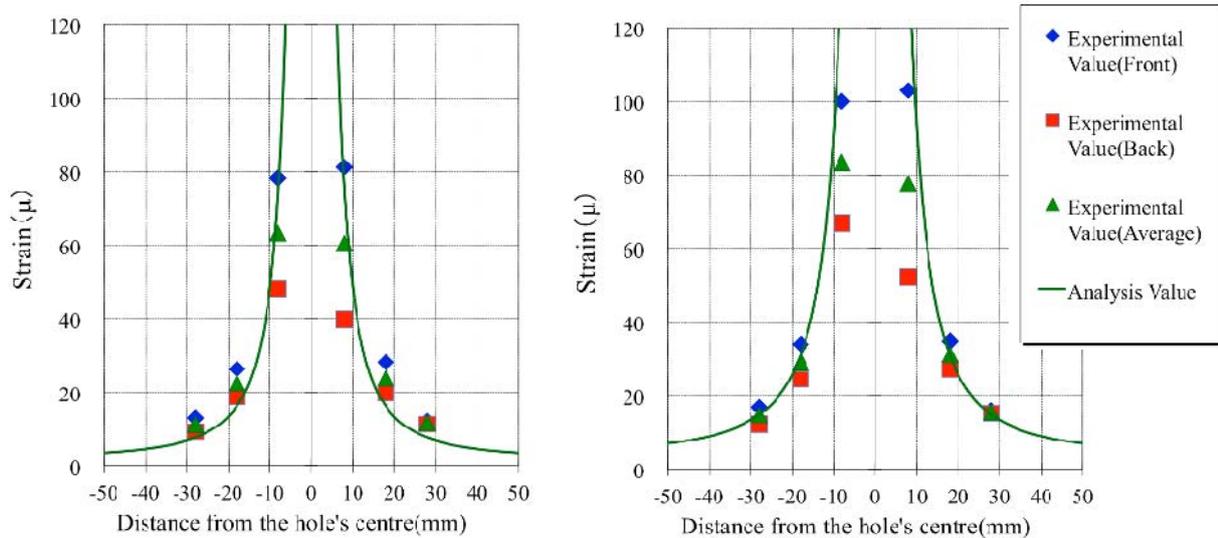


図-2 円孔周辺におけるX軸上の鉛直方向ひずみの分布 (ケース No. 1)

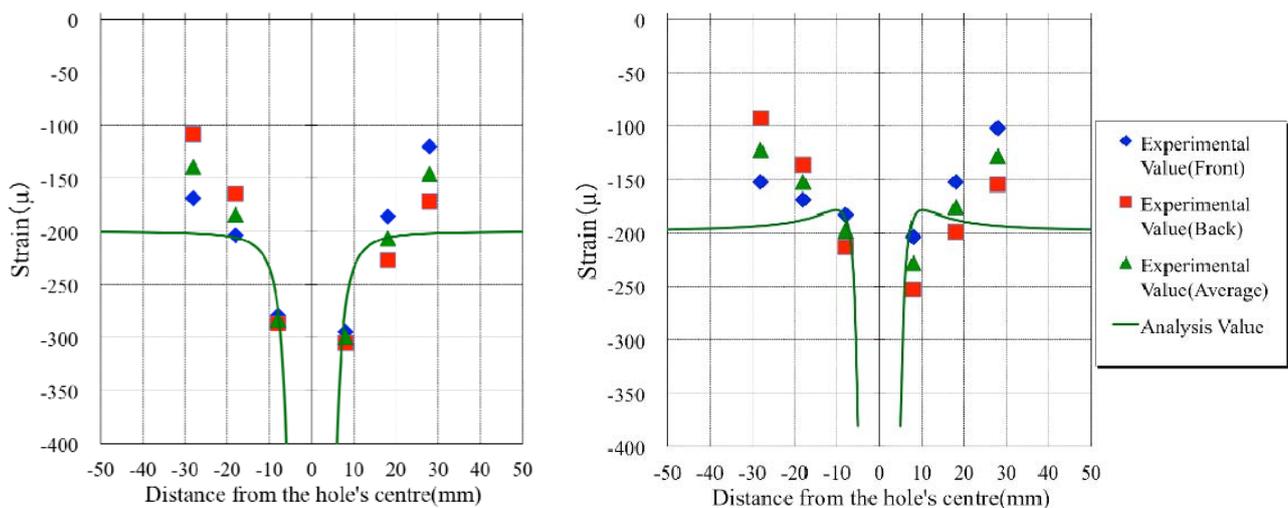


(1) 膨張圧 = 5 N/mm² (2) 膨張圧 = 10 N/mm²
 図-3 円孔周辺における X 軸上の鉛直方向ひずみの分布 (ケース No. 2)

一方、 $r = 28 \text{ mm}$ では、実験値は理論値より小さくなっていることがわかる。本実験で用いた供試体では、供試体両端では円孔の直径と比較して円孔の中心から十分離れており、その位置での応力集中係数は1.0である。しかし、供試体両側面において実験値では0.8および0.9となっており、理論値より小さな値となった。この理由として、実験において圧縮応力が供試体断面に一樣に作用しておらず、ひずみの計測結果に供試体端部における境界条件が影響したことが考える。そのため、今後、より精度の高い加力・境界条件での検討が必要と考える。ただし、本検討では、円孔中心から比較的近い位置に配置した $r = 8 \text{ mm}$ 、ならびに 18 mm におけるひずみゲージによる測定値を考察に用いることにする。

3.2 ケースNo. 2 (ジャッキによる膨張圧のみ載荷した場合)

次に、ケースNo.2において、内圧として円孔に膨張圧 5 N/mm^2 を作用させたときの結果を図-3に示す。ほぼ全ての点で理論値と実験値が一致していることがわかる。これにより、厚肉円筒理論から求めたひずみ分布の理論値が妥当であるといえる。したがって、以後の検討では、外圧を予測するときに、厚肉円筒理論を用いることにする。



(1) 外圧 = 5 N/mm², 膨張圧 = 0 N/mm² (2) 外圧 = 5 N/mm², 膨張圧 = 5 N/mm²

図-4 円孔周辺における X 軸上の鉛直方向ひずみの分布 (ケース No. 3)

3.3 ケースNo. 3 (圧縮応力と膨張圧を同時に 載荷した場合)

内圧と外圧を同時に作用させたときの結果を図-4に示す。図-4(2)は内圧(膨張圧)がゼロの場合の結果であるため、前出の図-2(1)と同様の結果となっている。ケース No.3の一連の結果を使用して、以降では $r = 8 \text{ mm}$ と 18 mm の位置の実験値を用いて、外圧として作用している圧縮応力を推測していく。その手順を図-5に示す。以下ではその方法について説明する。

コンクリートに作用する圧縮応力を予測するために、まずケース No.3の実験で測定されたひずみ値 $\varepsilon_{ex+in}^{exp}$ と、厚肉円筒理論によって求めた膨張圧が作用したときのひずみ値 ε_{in}^{ana} の差分から、外圧の圧縮応力のみが作用することにより生じたひずみ値 ε_{ex}^{exp} を式(2)より求めた。

$$\varepsilon_{ex}^{exp} = \varepsilon_{ex+in}^{exp} - \varepsilon_{in}^{ana}$$

また、このひずみ値にモルタルの弾性係数を乗ずることにより、その点における応力値を式(3)より算出した。

$$\sigma = \varepsilon_{ex}^{exp} \times E_m \tag{3}$$

ここで、 E_m はモルタルの弾性係数である。なお本実験では、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱供試体から得た実測値 $25,000 \text{ N/mm}^2$ を用いることとした。

最後に、その点の応力値を着目点における応力集中係数 k_r で除することにより、外から作用した圧縮応力値 $p_{ex}^{predict}$ を式(4)を用いて求める。ここで、 $r = 8 \text{ mm}$ における k_{r8} は式(1)より 1.42 であり、 $r = 18 \text{ mm}$ における k_{r18} は 1.05 である。

$$p_{ex}^{predict} = \frac{\sigma}{k_r} \tag{4}$$

この方法で推定された圧縮応力値 $p_{ex}^{predict}$ の一例を表-2にまとめる。各点でのひずみ値の結果を用いて圧縮応力値を推定すると、その誤差は約 20%以下であることがわかる。特に、今回の実験条件において最も円孔に近い位置で測定したひずみ値を用いると、8%程度の誤差で応力を推定できおり、作用応力が大きくなると、測定誤差が小さくなっていることがわかる。

ただし、実際のコンクリート構造物では、作用している圧縮応力の初期値は未知であるため、実験で行なったように各測定点

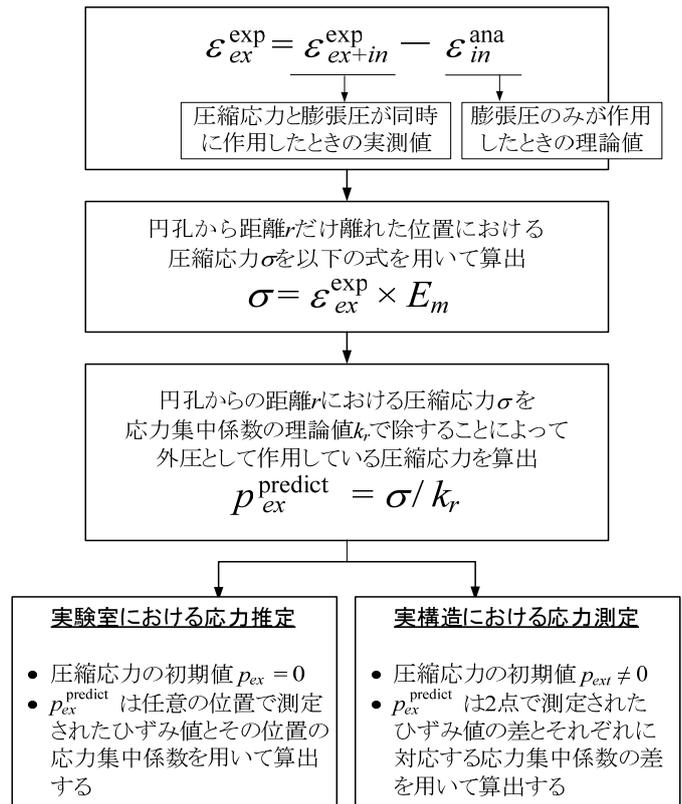


図-5 作用した圧縮応力推測のフロー (2)

表-2 応力推測結果の一例

実測値 圧縮応力 p_{ex}^{exp} (N/mm^2)	実測値 膨張圧 p_{in}^{exp} (N/mm^2)	推測値 圧縮応力 $p_{ex}^{predict}$ (N/mm^2)		
		位置 r_8	位置 r_{18}	差 $\Delta r_8 - r_{18}$
3.0	5.0	2.62 (8%)	2.05 (20%)	4.22 (25%)
4.0	5.0	3.89 (2%)	3.25 (15%)	5.68 (34%)
5.0	5.0	5.08 (1%)	4.29 (13%)	7.25 (43%)

※応力の推定値とともに示す()内の値は、推定された圧縮応力値の実測値に対する誤差である

での応力値の絶対値を直接知ることができない。そのため、圧縮応力を推定する際、 $r = 8 \text{ mm}$ と 18 mm におけるひずみ値の差を、両点での応力集中係数の差で除することにより、圧縮応力を推定することを試みる。ここで、 $r = 8 \text{ mm}$ と 18 mm での応力集中係数の差は前出の式(1)より 0.37 である。2つの点での応力集中係数の差、ならびに測定したひずみ値の差を利用して作用圧縮応力を推定するとき、実測値より大きい圧縮応力値が算出され、その推定誤差も 25%~43% と非常に大きいことがわかる。これは、 $r = 18 \text{ mm}$ における実測値の理論値との測定誤差によるためと考える。

このように、2つの点でのひずみ値の差を利用して外圧を予測するとき、円孔に膨張圧を加えた際に測定されるひずみ値の差が大きい箇所でも測定することで、測定誤差を軽減することができるものと考ええる。そのため、例えばこの実験では $r = 28 \text{ mm}$ における測定値を用いると良いが、今回の载荷条件では供試体端部の影響が見られたため、実用化に向けては、より精度の高い加力・境界条件における本手法の検証が今後必要である。

4. 結論

本研究では、円孔を有するモルタル供試体に対して、一軸圧縮载荷試験、ならびに新たに開発した小型加力装置を用いた膨張载荷試験を実施し、本装置の適用性を検証した。さらに、それらの結果に基づいてコンクリートに作用する一軸圧縮応力を推測することを試みた。

外圧として 10 N/mm^2 程度の一軸圧縮応力のみを作用させた場合、もしくは、加力装置を用いて円孔に膨張圧のみを作用させた場合、供試体端部の影響が小さい比較的円孔中心に近い位置では、理論値と実験値がほぼ一致しており、モルタル供試体に生じるひずみ値を妥当な精度で推定できることがわかった。さらに、各点での実験結果を利用して、外から作用した圧縮応力値を推定すると、 5 N/mm^2 程度の応力レベルにおける測定誤差は 20% 程度以内であることがわかった。ただし、実構造のように外圧の初期値が不明な場合、2つの点での応力差を利用して外圧を推測する方法を用いて圧縮応力値を推定したが、そのときの測定誤差は非常に大きくなることがわかった。

謝辞：本研究は、平成24年度JST研究成果最適展開支援プログラムA-STEP FSステージ（探索タイプ）の支援を受けて行ないました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Timoshenko, S.: Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Company, third ed., 1951
- 2) Griffith, G.E.: Experimental Investigation of the Effects of Plastic Flow in a Tension Panel with Circular hole. National Advisory, Committee for Aeronautics, Technical Note No.1705, 1948
- 3) Stowel, E.Z.: Stress and Strain Concentration at a Circular Hole in an Infinite Plate, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note, 2073, 1950
- 4) 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, Vol.20, No.2, pp.27-37, 2009
- 5) 伊藤始, 石田雅大, 高島依里, 若井航: 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解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.340-345, 2012