

# 論文 促進養生によってアルカリ骨材反応を生じたプレストレストコンクリート部材の特性評価

小野里 みどり<sup>\*1</sup>・小林 俊秋<sup>\*2</sup>・小川 彰一<sup>\*3</sup>・松林 裕二<sup>\*4</sup>

**要旨:** アルカリ骨材反応によって劣化したプレストレストコンクリートの膨張やひび割れの発生, および耐荷力に対するプレストレスの効果を調べることを目的として反応性骨材およびアルカリ (NaOH) を含有するプレストレストコンクリート供試体を作製し, 温度 40°C, 湿度 95%の環境に静置する促進養生試験を行った。その結果, 膨張量はプレストレストコンクリート供試体の部位によって異なること, 膨張, ひび割れの程度による耐荷力の低下は少ないことが判明した。

**キーワード:** アルカリ骨材反応, 促進養生, プレストレストコンクリート

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応による劣化はコンクリート構造物の耐久性に大きな影響をもたらす要因の一つである。アルカリ骨材反応によってコンクリートにひび割れが発生している構造物の耐荷力については, 既往の研究からは, 種々の結果が得られている<sup>1)</sup>。しかし, プレストレストコンクリート部材に関しては報告が少なく, 外観の変状と耐荷力の関係は未だ明らかになっていない。

そこで, アルカリ骨材反応により劣化が生じたプレストレストコンクリート部材の外観の変状と耐荷力の関係を明らかにするため, 反応性骨材を使用した供試体を促進養生し, 劣化グ

ードによる膨張および耐荷力特性を検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>) を用いた。細骨材として非反応性骨材の岩瀬産砕砂 (表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>) を用いた。粗骨材には安山岩 (表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>, Rc=130mmol/l, Sc=519mmol/l) で, 骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法) によって「無害でない」と判定された反応性骨材と岩瀬産砕石 (表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>) の非反応性骨材を 1:1 (容積比) の割合で用いた。混和剤には遅延型ナフタレン系高性能減水剤を用いた。既往の研究<sup>2)</sup> から, 使用する反応性骨材に関わらず, コンク

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	細骨材	粗骨材		減水剤	アルカリ量
					反応性	非反応性		
45	47	174	388	841	487	478	6.2	8.0

\*1 オリエンタル建設 (株) 技術部メンテナンスチーム (正会員)

\*2 オリエンタル建設 (株) 技術研究所主任研究員 (正会員)

\*3 太平洋セメント (株) 研究開発部補修診断チーム (正会員)

\*4 太平洋マテリアル (株) 開発研究所補修・グラウト材グループ (正会員)

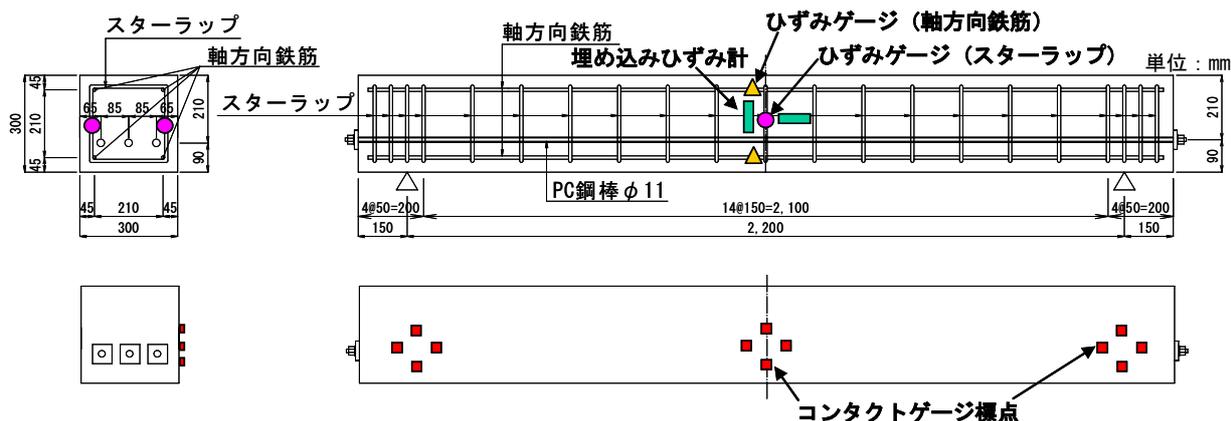


図-1 供試体概要図

リート中のアルカリ総量が  $4\text{kg/m}^3$  以上で顕著な膨張が見られること、一方、NaOH の過添加では強度発現性に影響を及ぼすことが懸念されたため、試験練りを行った。その結果を

もとに、添加するアルカリ総量は  $8.0\text{kg/m}^3$  とした。なお、アルカリ総量は  $\text{Na}_2\text{O}$  および  $\text{K}_2\text{O}$  の含有量の和をこれと等価な  $\text{Na}_2\text{O}$  の量 ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) に換算して表した値から算出したセメント中の全アルカリ量と NaOH 試薬の合計とした。配合を表-1 に示す。

## 2.2 供試体の種類と養生方法

本実験では図-1 に示すように、3本のPC鋼棒を配置した供試体を3体製作した。プレストレスは断面内に配置した3本のPC鋼棒によって与えた。軸方向鉄筋、スターラップ共にD10を使用した。促進養生中の膨張ひずみ、荷重試験時の圧縮強度、弾性係数を測定するため、円柱供試体 ( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ , 以下, TP) を製作した。

供試体はコンクリート打設後、約1ヶ月間常温でシート養生を行い、圧縮強度試験によって、所定の強度に達したのを確認してからプレストレスを導入した。その後、PC1とPC2は材齢3ヶ月で温度  $40^\circ\text{C}$ 、相対湿度95%以上の環境下の養生室にて促進養生を開始し、PC0は屋内気中養生を行った。表-2に供試体の種類を示す。養生室では湿度を保つためにシャワー噴霧を行っ

表-2 供試体の種類

供試体名称	養生方法	荷重試験を行う劣化過程	促進養生期間(日)
PC0	気中	潜伏期	0
PC1	促進	進展期	35
PC2	促進	劣化期	414

た。その際供試体に直接シャワー水がかかると供試体表面のアルカリが流出すると考えられたため、供試体上部に屋根を設置し、直接シャワー水がかからないように配慮した。

## 2.3 実験方法

### (1) 劣化過程の定義

劣化レベルの設定はコンクリート標準示方書[維持管理編]に示される、潜伏期、進展期、劣化期を想定した。ただし、これらの劣化過程を明確に定量化し、区分する方法が規定されていない。よってここでは、実験に先立ち行った試験結果に基づき、土木学会の定義を参考に、独自に検討劣化レベルを設けた。表-3に劣化の状態とひずみの参考値を示す。ひずみの参考値は、供試体の支間中央軸直角方向のひずみとした。

### (2) 経時変化測定

促進養生中、それぞれの供試体のコンクリートひずみおよび鉄筋のひずみを計測した。コンクリートひずみは、表面ひずみとしてプレストレス導入方向(以下、軸方向)、プレストレス導入方向の直交方向(以下、軸直角方向)の供試体表面にコンタクトゲージ標点(基準長:

表-3 劣化の状態とひずみの参考値

外観上のグレード	劣化の状態	ひずみの参考値 ( $\times 10^{-6}$ )
潜伏期	ASRは発生しているが、外観上の変状が見られない。	~1000
進展期	ASRによる膨張によってひび割れが発生し、変色、ゲルの滲出が見られる。	1000~2000
加速期	ASRによるひび割れが進展し、ひび割れの本数、幅および密度が増大する。	2000~3000
劣化期	ASRによるひび割れが多数発生し、構造物に段差、ずれなどが見られる。かぶりの部分的なはく離・はく落が発生する。鋼材腐食が進行し、錆汁が見られる。変位・変形が大きい。	3000~

100mm) を設置し、計測した。内部ひずみとして軸方向および軸直角方向にコンクリート埋め込み型ひずみ計 (標点距離: 100mm, 容量:  $\pm 5000 \times 10^{-6}$ ) を設置し、計測した。鉄筋ひずみはスターラップおよび軸方向鉄筋にひずみゲージを配置し、計測した。また、TPのひずみはコンタクトゲージリングを設置して、計測を行った。全てのひずみは促進養生開始時点を原点とした。

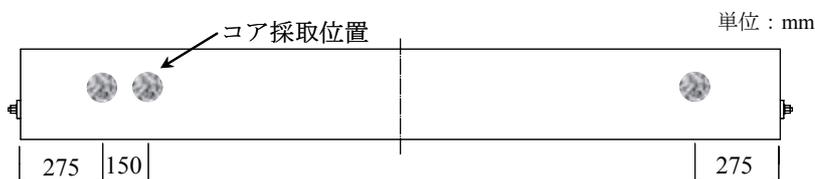


図-2 コア採取位置

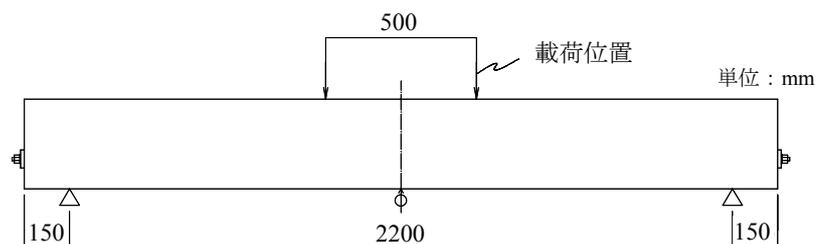


図-3 荷重位置概要図

### (3) 材料試験

それぞれの供試体と同材齢、同環境で養生した TP と静的荷重試験終了後に供試体から採取したコアの圧縮強度と弾性係数を測定した。コアの採取位置を図-2 に示す。試験は TP については静的荷重試験実施前に、コアについては静的荷重試験実施後に行った。

### (4) 静的荷重試験

静的荷重試験は図-3 に示すようにスパン 2200mm の単純梁に対称 2 点集中荷重方式とし、破壊までの供試体中央のたわみを測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 経時変化測定

PC0, PC1, PC2 のコンクリート表面ひずみの

経時変化を図-4 に示す。支間中央軸直角方向のひずみの変化である。PC1, PC2 のひずみは両供試体ともに促進養生直後から膨張をはじめ、その後ひずみは材齢とともに増大している。PC2 に関しては約 100 日後には膨張が収束する傾向を示した。そこで、供試体を覆った敷布に 2 週間に 1 回水分を供給すると、顕著な膨張を示した。約 200 日後に再度膨張が収束する傾向を示し始めたため、水分の供給を 1 週間に 1 回にしたところ、さらに顕著な膨張を示した。これは、ある程度 (本実験ではひずみが約  $2000 \times 10^{-6}$ ) まではコンクリート内部の水分によってゲルが生成され、膨張するが、それ以降は外部からの水分の供給が無いと顕著な膨張は起こらず、その傾向は劣化が進むほど、顕著になることを示唆

している。

次に、TP のひずみと PC2 供試体のひずみの関係を図-5 に示す。供試体ひずみは支間中央軸直角方向のひずみである。ひずみが約  $1500 \times 10^{-6}$  まではコンクリート表面、コンクリート内部共に TP と同程度の膨張を示していたが、約  $2000 \times 10^{-6}$  から TP ひずみと比較してコンクリート表面ひずみは小さく、コンクリート内部ひずみは大きくなり、その差は大きい時で  $2000 \times 10^{-6}$  程度となった。これは、直接外気に触れているコンクリート表面に比べてコンクリート内部は水分の逸脱が少なく、反応に必要な水分が十分存在した、あるいは、供試体に水分を供給する際、コンクリート表面のアルカリが流出し、反応速度に差がでた可能性がある。一般の環境下の構造物においても、同様の現象が起きることは十分に考えられ、構造物の表面の膨張で劣化状態を管理する場合などは、内部の状態も考慮する必要があることを示唆している。

また、図-6 は PC2 供試体の支間中央と端部のひずみの関係を示したものである。軸直角方向のひずみと比較して軸方向のひずみが小さい

のは、プレストレスにより軸方向の膨張が拘束されているためであると考えられる。また、供試体中央部のひずみは端部ひずみよりも小さな値を示した。特に軸方向ひずみに関しては供試体中央部のひずみは端部ひずみの約  $1/4 \sim 1/3$  となった。写真-1 に供試体側面のひび割れ発生状況と供試体中央部と端部のひび割れ密度を示す。ひび割れ密度は四角で囲った範囲に生じたひび割れの総延長を測定し、(1)式で算出した。

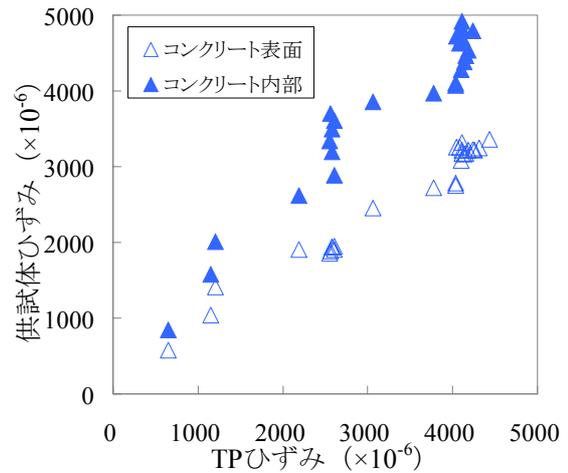


図-5 TP ひずみと供試体ひずみの関係

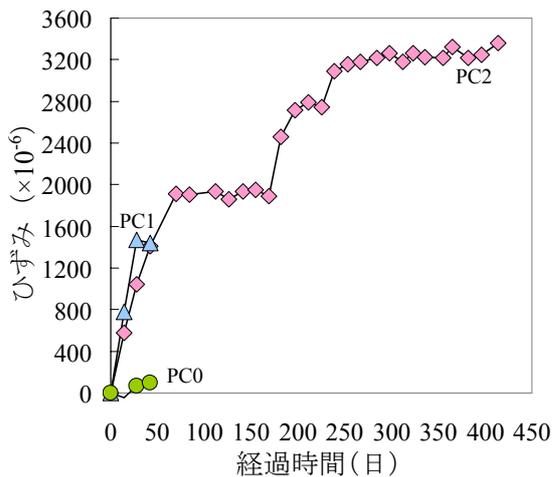


図-4 コンクリート表面ひずみ

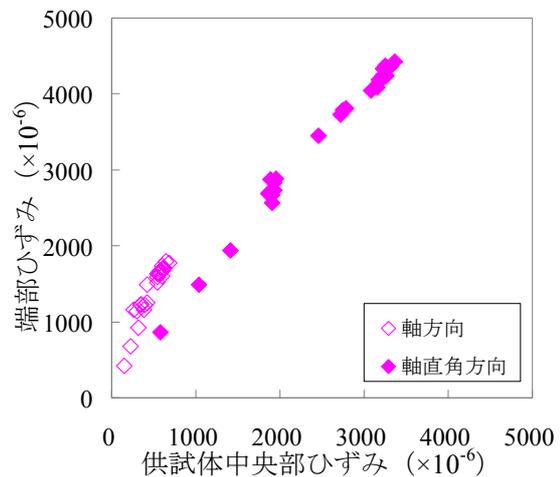


図-6 供試体中央部と端部ひずみの関係

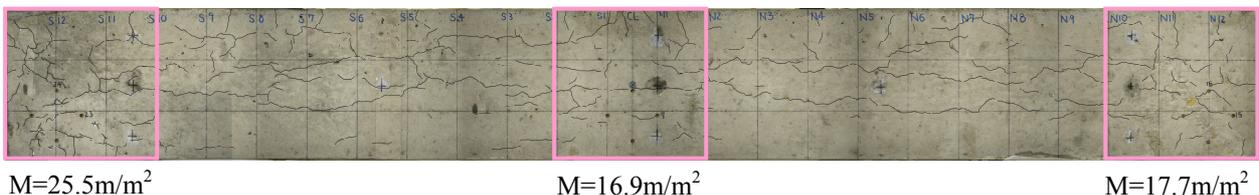


写真-1 ひび割れ発生状況 (促進養生期間 3 ヶ月)

$$M = L_{cr} / A_c \quad (1)$$

ここで、 $M$ ：ひび割れ密度 ( $m/m^2$ )、 $L_{cr}$ ：ひび割れ総延長 ( $m$ )、 $A_c$ ：面積 ( $m^2$ )

供試体中央部は軸方向のひび割れが卓越しているのに対して端部のひび割れの方向は一様ではない。また、ひび割れ密度は供試体中央部の方が小さくなっている。これは、供試体中央部と端部ではプレストレスの影響に差があることを示唆していると考えられる。

### 3.2 材料試験

ひずみと圧縮強度の関係を図-7に示す。ひずみは、各供試体の静的载荷試験直前の軸直角方向の値である。圧縮強度に関しては、TPではひずみが大きいものほど大きくなったが、コアに関してはPC2がもっとも小さくなった。PC2のコアについては、表面的には微視的なひび割れが多く見られ、それらのひび割れが連結し、強度低下をもたらしたと考えられる。ひずみと弾性係数の関係を図-8に示す。弾性係数に関しては、ひずみが約  $1500 \times 10^{-6}$  で約70%、 $3500 \times 10^{-6}$  で約60%まで低下した。既往の研究においても膨張ひずみによる弾性係数の低下が報告されており<sup>3)</sup>、本実験は既往の研究との整合性が認められる。TPおよびコアの圧縮強度と弾性係数の平均値を表-4に示す。TPと比較してコアは圧縮強度、弾性係数共に小さくなっている。

### 3.3 静的载荷試験

PC0, PC1, PC2の荷重-たわみ曲線を図-9に、最大荷重と最大荷重時のたわみを表-5に示す。

材料試験結果では劣化が進むにつれてTP、コア共に弾性係数が小さくなったが、供試体の静的载荷試験の結果、たわみ性状に大きな変化はなく、最大荷重については劣化が進むほど大きくなるという結果になった。既往の研究においてアルカリ骨材反応によって劣化した鉄筋コンクリート部材の耐力は健全なものと比較して

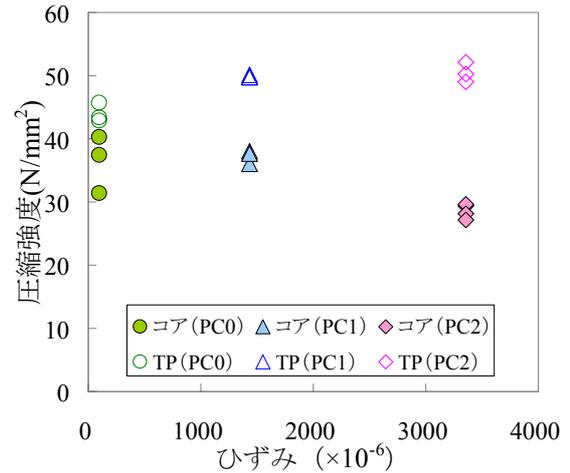


図-7 ひずみと圧縮強度の関係

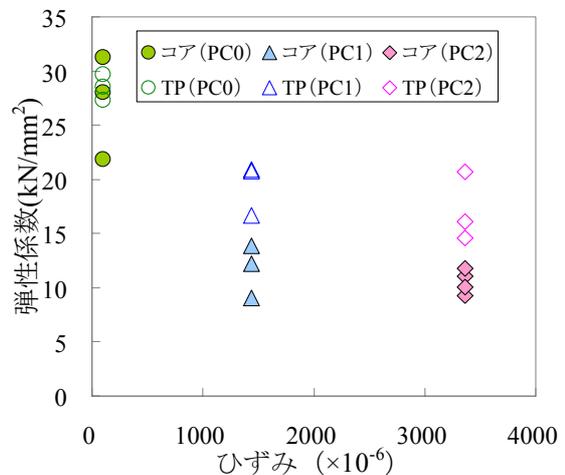


図-8 ひずみと弾性係数の関係

表-4 材料試験結果

供試体名称	TP		コア	
	圧縮強度 ( $N/mm^2$ )	弾性係数 ( $kN/mm^2$ )	圧縮強度 ( $N/mm^2$ )	弾性係数 ( $kN/mm^2$ )
PC0	43.9	28.5	36.6	27.0
PC1	49.9	19.4	37.3	11.7
PC2	50.5	17.1	29.0	10.7

同等、あるいは上回るという報告がされている<sup>4)</sup>。本実験におけるPC部材に関しても同様な結果となった。供試体から採取したコアには微視的なひび割れが多数発生しており、弾性係数、圧縮強度も低下していた(劣化期)が、鋼材に拘束された状態では、アルカリ骨材反応によるひび割れが発生していても、拘束効果によって、見

かけ上の弾性係数に変化はなく、耐荷力に影響を与えなかったと考えられる。図-10にPC0とPC2の、最終破壊状況を示す。PC0と比較してPC2の供試体ではひび割れの分散性が悪く、ひび割れの発生状況は、载荷試験によって新たにひび割れが入るといよりも、既に入っていた膨張によるひび割れが広がっていくという形態であった。

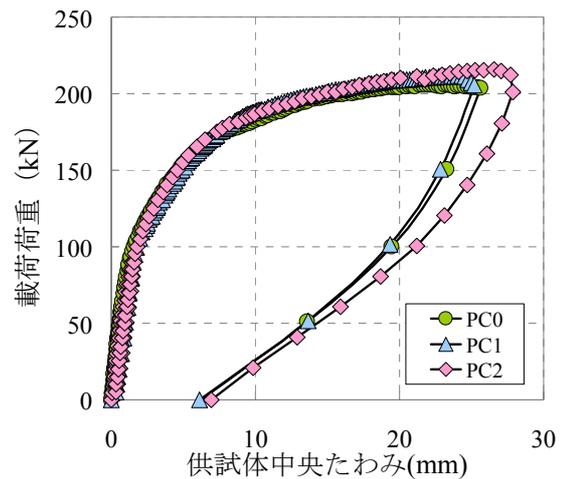


図-9 荷重-たわみ曲線

#### 4. まとめ

- (1) 本実験においては、PC 供試体のコンクリート表面ひずみが約  $2000 \times 10^{-6}$  で収束傾向を示したが、外部からの水分供給を行うと、顕著な膨張を示した。
- (2) 本実験のPC 供試体のコンクリート表面とコンクリート内部ではコンクリート内部の方がひずみが大きい。
- (3) 供試体中央部と端部では膨張ひずみおよびひび割れ密度に違いが見られた。
- (4) 採取したコアの圧縮強度、弾性係数が小さくなっているにもかかわらず、たわみ性状に変化はなく、供試体の耐荷力の低下はみられなかった。

表-5 最大荷重とたわみ

供試体名称	最大荷重		最大荷重時のたわみ (mm)	実測値/計算値
	実験値 (kN)	計算値 (kN)		
PC0	205.8	185.5	22.5	1.109
PC1	211.6	186.1	24.1	1.137
PC2	215.7	187.8	26.6	1.149

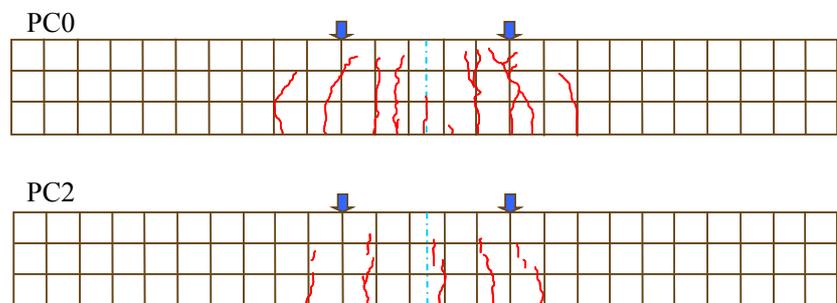


図-10 供試体の最終破壊状況

#### 参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究会：兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.28-41，1997.4
- 2) (社)セメント協会コンクリート専門委員会報告書(F-42)コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その1)-40℃湿空条件における試験結果-：(社)セメント協会，pp.40-44，1988.1
- 3) 久保善司ほか：アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1691-1696，2006
- 4) 村角保行ほか：アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート部材の物性確認試験と部材試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1-6，2005