

# 論文 付着劣化を模擬した ASR 劣化コンクリート梁の破壊挙動

水田 真紀<sup>\*1</sup>・藤井 洋介<sup>\*2</sup>・葛目 和宏<sup>\*3</sup>・児島 孝之<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、ASR 劣化が過度に進行し、鉄筋の付着劣化やスターラップ破断が生じた RC 梁の曲げ耐荷性能を把握することを目的とし、実験を行った。コンクリートには、ペシマムを生じる配合で反応性骨材を使用し、実際に ASR 膨張を生じさせた。また、鉄筋の付着劣化については、グリソとビニールテープで非付着部分を設けることにより模擬し、スターラップは供試体作製前に曲げ加工部分を切断し、設置した。その結果、コンクリートと鉄筋間の付着劣化は RC 梁の曲げ耐荷挙動に大きく影響し、ASR 劣化が過度に進行し、スターラップも破断すると、せん断ひび割れが卓越し、脆性破壊する可能性があることを示唆した。

**キーワード:** ASR, 付着劣化, スターラップ破断

## 1. はじめに

一般に ASR により劣化したコンクリート構造物において、膨張を拘束する鉄筋が適切に配筋されていれば、ケミカルプレストレスが導入され、耐荷力に顕著な低下はないと言われてきた。しかしながら近年、ASR による劣化が顕在化してきた橋脚や土中に埋設されたフーチングの鉄筋の曲げ加工部分に破断が生じている事例が報告されている<sup>1)</sup>。

さらに ASR による膨張は、発生するひび割れによりコンクリートと鉄筋との間の付着性状に大きく影響していると考えられる。また、ASR によるコンクリートと鉄筋間の付着劣化は、かぶりコンクリートの剥落、耐荷力の低下、破壊形式の変化など RC 構造物の曲げ耐荷挙動に悪影響を及ぼすことも懸念される。

そこで本研究では、過度に ASR 劣化が進行したコンク

リート構造物の安全性を評価することを目的として、スターラップ破断と主鉄筋の付着劣化を模擬した RC 梁の曲げ載荷試験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 ASR コンクリートの配合

本実験で使用した材料の一覧を表-1 に、示方配合を表-2 に示す。ここで、非反応性骨材のみを使用した No.7, 8 供試体の配合も同時に示している。反応性骨材には、JIS A 1145 (化学法) で無害でないと判定された安山岩系反応性骨材を使用した。また、供試体作製前にペシマム試験を実施し、粗骨材では反応性骨材：非反応性骨材=50：50、細骨材では 70：30 の割合を決定した。さらに、反応を促進させるために、コンクリートの目標アルカリ量を 12.0(kg/m<sup>3</sup>)となるよう NaCl を添加した。

表-1 使用材料一覧

供試体 No.	材料	略記	性質	
No.1~6	セメント	C	普通ポルトランドセメント	
	細骨材	非反応性	S1	野洲川産川砂
		反応性	S2	北海道産安山岩系砕砂
	粗骨材	非反応性	G1, G2	能登産砕石 (G1: 粒径 5~13mm, G2: 粒径 13~20mm)
		反応性	G3	北海道産安山岩系砕石
	混和剤	AD	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)	
	塩分	NaCl	精製塩	
No.7, 8	セメント	C	普通ポルトランドセメント	
	細骨材	S1	高槻産硬質砂岩砕砂	
	粗骨材	G1, G2	高槻産硬質砂岩砕石	
	混和剤	AD	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)	

\*1 立命館大学 理工学部都市システム工学科助教 工博 (正会員)

\*2 立命館大学大学院 理工学研究科創造理工学専攻 博士前期課程 2 年 (非会員)

\*3 (株) 国際建設技術研究所 代表取締役社長 (正会員)

\*4 立命館大学 理工学部建築デザイン学科教授 工博 (正会員)



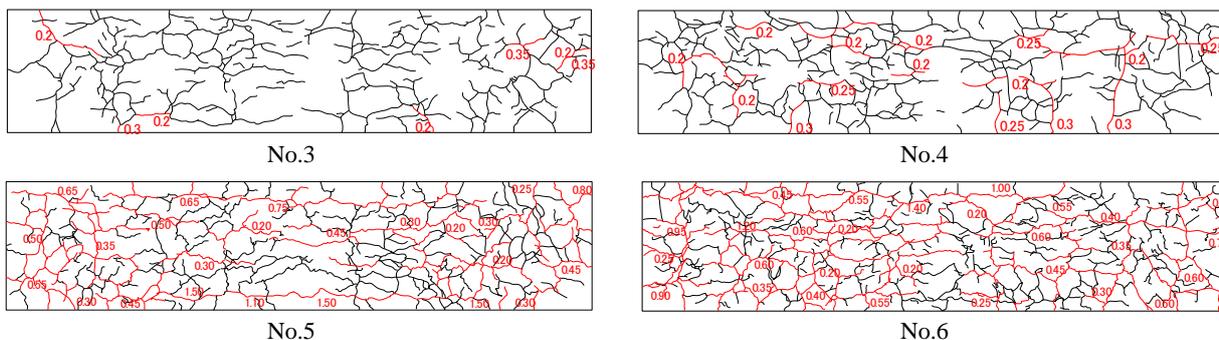


図-2 荷重試験前のASR劣化状況

表-4 コンクリートの圧縮試験結果

供試体 No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
No.1, 2	32.9	21.9
No.3, 4	31.9	16.6
No.5, 6	23.3	17.1
No.7	35.7	25.5
No.8	39.7	28.2

表-5 超音波伝播速度結果

供試体 No.	軸方向 (m/s)	軸直角方向 (m/s)	平均 (m/s)
No.1	4310	4360	4335
No.2	4320	4410	4365
No.3	3850	3830	3840
No.4	3870	3820	3845
No.5	3690	3890	3790
No.6	3500	3560	3530
No.7	4420	4470	4445
No.8	4430	4500	4465

すべての供試体は、打設2日後に脱型し、7日間の散水養生を行った。その後、荷重試験まで、No.1, 2 供試体は室内暴露、No.7, 8は散水養生、No.3~6は温度40℃、R.H.100%の環境で促進養生を行った。また、圧縮強度試験用の供試体として、φ100×200(mm)の円柱供試体を作製し、RC梁供試体と同様の環境条件下に暴露した。ここで、ASRにより膨張させたNo.3, 4 供試体は約100日後、No.5, 6は約1年後に目標膨張量に達したことを確認し、速やかに荷重実験を実施した。

### 3. 荷重試験前のASR劣化状況

#### 3.1 コンクリートの劣化

表-4に曲げ荷重試験実施時のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の結果、表-5に荷重試験時の超音波伝播速度の結果を示す。ここで、超音波伝播速度の結果とは、供試体軸方向の断面中央での測定値と、軸直角方向の3箇所（支点上と支点間中央）での測定値の平均値である。これより、ASR劣化していないNo.1, 2やNo.7, 8 供試体に比べ、ASR劣化したNo.3~6 供試体の圧縮強度、静弾性係数、超音波伝播速度すべての測定値が下回り、ASRによる膨張によりコンクリートが劣化している様子がうかがえた。

#### 3.2 ひび割れ性状

図-2に、No.3~6 供試体のひび割れ発生状況を示す。ここで、幅が0.2(mm)以上のひび割れは赤線で示している。すべての供試体で、亀甲状にひび割れが多数発生し、3.1節で示した圧縮強度、静弾性係数、超音波伝播速度

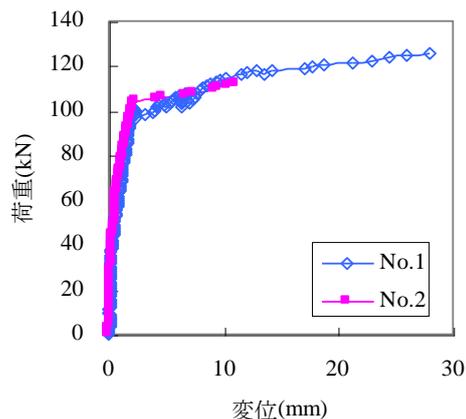


図-3 荷重-変位関係

の結果と同様、ASRによる劣化が進行していることが確認できた。

膨張量2000μ (ASR劣化レベルI)のNo.3, 4 供試体では、幅0.2(mm)以上のひび割れは少ないものの、供試体全面にわたって多数のひび割れが発生した。そして、さらに劣化を進行させた膨張量5000μ (ASR劣化レベルII)のNo.5, 6 供試体では、No.3, 4 供試体よりも多くのひび割れが発生し、幅0.2(mm)以上のひび割れも増加した。0.2(mm)以上のひび割れは、供試体軸方向に伸びているものが多く、中でも引張側鉄筋に沿ったひび割れで

は、最大幅 1.5(mm)のものを確認した。

非付着部を設けることにより、付着劣化を模擬した引張側鉄筋の定着部周辺に着目すると、引張側鉄筋に沿ったひび割れが確認できるものの、ランダムな方向に多くのひび割れが発生していた。それに対し、支間中央部の非付着部を設けていない部分では引張側鉄筋に沿ったひび割れが卓越し、ひび割れ幅も大きくなった。これは、非付着部を設けていない圧縮側鉄筋に沿ったひび割れについても、同様の傾向が見られた。このように非付着部とそれ以外の部分のひび割れ発生状況が異なったのは、ASR による膨張量が  $2000\mu$  あるいは  $5000\mu$  以上であっても、コンクリートと鉄筋間の付着が消失していなかったことを示唆している。

#### 4. 曲げ載荷試験結果および考察

##### 4.1 スターラップ破断の影響

図-3 に、コンクリートが劣化していない、引張側鉄筋に非付着部を設けていない No.1, 2 供試体の荷重-変位関係を示す。ここで変位は、支点間中央と支点部分の RC 梁供試体下縁に取り付けた変位計によって測定した。そして、図-3 に示す変位とは、支点間中央の変位から支点の変位を差し引いた値であり、他の供試体でも同様とした。

いずれの供試体も、引張側鉄筋が降伏した後、載荷点間の圧縮側コンクリートが圧壊する曲げ引張破壊により終局に至った。ここで、図-3 には最大荷重までの挙動を示しており、その後、圧縮側コンクリートの破壊によって荷重が減少した。また、鉄筋が降伏するまでの挙動はほぼ同じであった。しかし、スターラップを破断させた No.2 供試体では、破壊時の変位が No.1 供試体の半分以下に低下した。このことより、一般的にはスターラップの配筋により RC 梁の靱性率が向上するが、破断していると大きな変形能力を發揮できないことがわかった。

##### 4.2 ASR 劣化と付着劣化の影響

###### (1) 終局荷重

図-4 に終局荷重と ASR 劣化レベルの関係を示す。これより、付着劣化レベルごとに示す。これより、付着劣化レベル I において、コンクリートが ASR 劣化していない健全なものに比べ、膨張量  $2000\mu$  の ASR 劣化レベル I では 10%程度、膨張量  $5000\mu$  の ASR 劣化レベル II では 20%程度、終局荷重が低下した。そして、付着劣化レベル II については、ASR 劣化レベルに拘らず、コンクリートが健全な場合より ASR 劣化した供試体の終局荷重は約 30%低下した。

図-5 に終局荷重と付着劣化レベルの関係を、ASR 劣

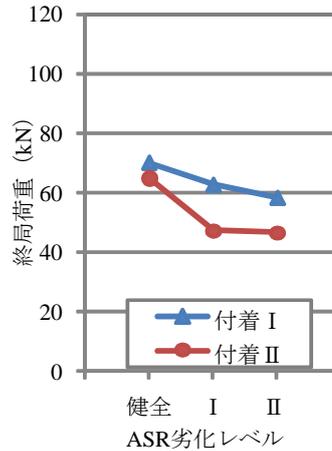


図-4 終局荷重と ASR 劣化レベルの関係

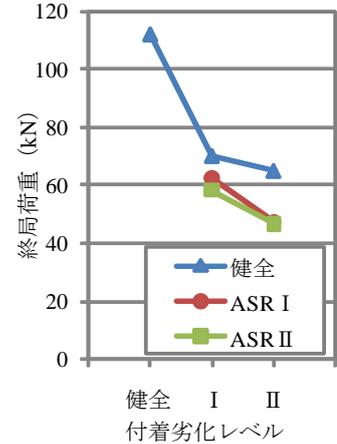


図-5 終局荷重と付着劣化レベルの関係

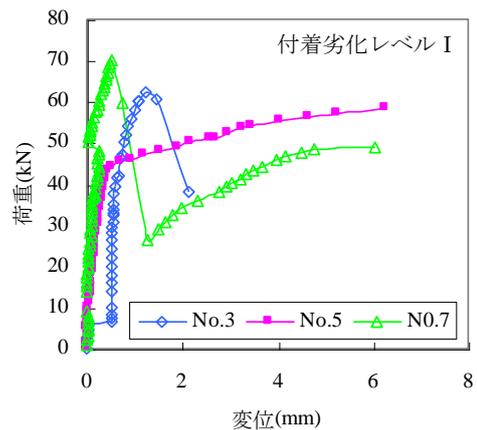


図-6 荷重-変位関係

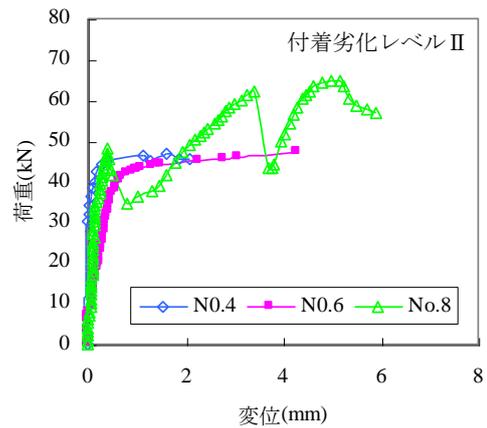


図-7 荷重-変位関係

化レベルごとに示す。これより、コンクリートが ASR 劣化していない健全な供試体について終局荷重を比較すると、非付着部を 30%とした付着劣化レベル I、非付着部を 50%とした付着劣化レベル II、いずれの場合も 40%程度、付着劣化を模擬していない No.2 供試体より低下した。このような傾向は、ASR 劣化させた供試体についても同様に観察され、また同じ付着劣化レベルでは終局荷重に差異がなかった。このことから、ASR による膨張量が  $5000\mu$  程度までであれば、ASR による劣化レベルよりも、付着劣化を模擬した非付着部の範囲の方が終局

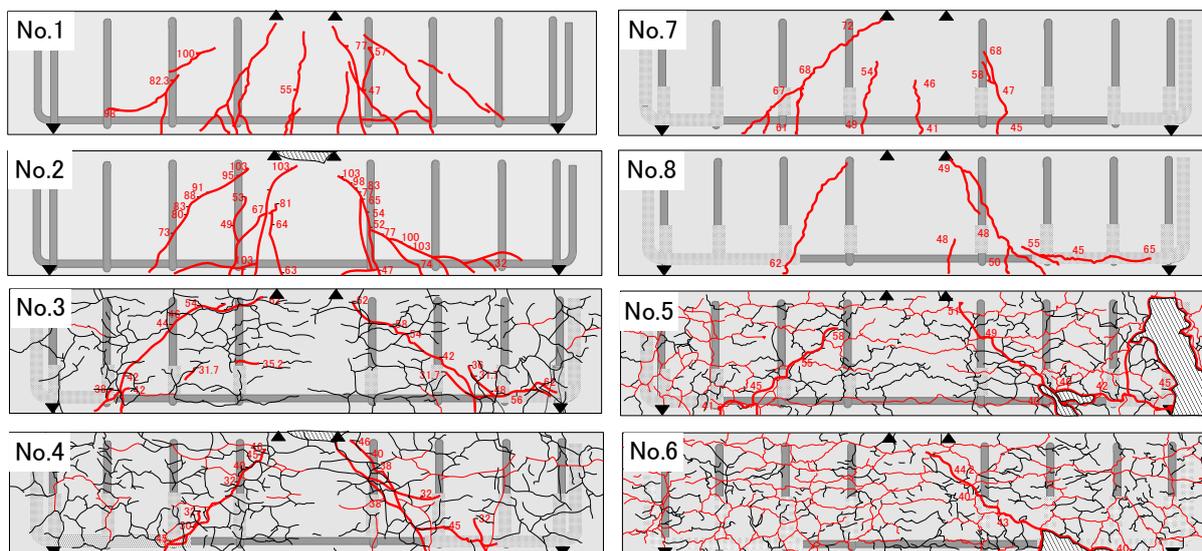


図-8 載荷試験終了後のひび割れ状況

表-6 終局荷重の実験値と計算値

供試体 No.	実験値 (kN)	計算値 (kN)			
	Pu	曲げ	せん断		
		Pu	Vc	Vs	Vc+Vs
No.1	125.4	90.7	88.7	57.4	146.1
No.2	111.7	90.7	88.7		146.1
No.3	62.6	90.6	87.8		145.2
No.4	47.2	90.6	87.8		145.2
No.5	58.25	89.1	79.1		136.5
No.6	46.5	89.1	79.1		136.5
No.7	70.0	91.0	91.2		148.6
No.8	64.9	91.4	94.5		151.9

荷重に与える影響が大きいことがわかった。

## (2) 荷重-変位関係

図-6 と図-7 に、各付着劣化レベルの荷重-変位関係を示す。4.2(1)より、本研究の範囲内では、終局荷重に関して ASR 劣化レベルよりも付着劣化レベルの方が大きく影響したが、荷重-変位関係の初期剛性や終局荷重までの変形挙動には違いが見られた。

いずれの付着劣化レベルにおいても、ASR 劣化レベル I の場合の初期剛性は健全なコンクリートの場合と同程度であったが、ASR 劣化レベル II ではわずかに低下した。さらに、膨張量が  $5000\mu$  の ASR 劣化レベル II の No.5, 6 供試体では、45(kN)付近で荷重-変位関係が大きく変化し、緩やかに変位が増加したが、コンクリートが健全あるいは膨張量が  $2000\mu$  (ASR 劣化レベル I) の供試体では、No.4 供試体を除いて急激に荷重が低下した。一方、健全なコンクリートの No.7, 8 供試体の場合、急激な荷重の低下の後も荷重が増加し、ASR 劣化した供試体とは異なる挙動を示した。これは、スターラップに曲げ加工部分の破断や非付着部が設置されていたものの、その他

の部分の付着は健全であることから、スターラップがせん断力に対してある程度抵抗したものと考えられる。

コンクリートが健全で、スターラップを破断させない No.1 供試体のように曲げ引張破壊する RC 梁では、引張側鉄筋が降伏することにより荷重-変位関係が大きく変化し、急激に変形が増大する。しかし、図-6 と図-7 に示した供試体はすべて、支点間中央の引張側鉄筋が降伏せず、No.1 供試体に比べて変形も小さかった。それにも拘らず、コンクリートの ASR 劣化レベルによって荷重-変位関係に違いが見られたのは、コンクリートと鉄筋間の付着性状が異なることを示唆している。コンクリートが健全あるいは膨張量  $2000\mu$  (ASR 劣化レベル I) の場合の荷重-変位関係は、異形鉄筋の片引き付着試験を行って得られる荷重-すべり関係に似ており、膨張量  $5000\mu$  (ASR 劣化レベル II) の場合のそれは、丸鋼の付着試験で得られる荷重-すべり関係に類似している。つまり、ASR による膨張量が  $2000\mu$  程度であれば、コンクリートと鉄筋間の付着は健全なコンクリートと同等であるが、膨張量が  $5000\mu$  にもなると付着劣化が相

当進行しているものと考えられる。

以上より、ASR 劣化に伴うコンクリートと鉄筋間の付着劣化は、RC 梁の曲げ耐荷性状に大きく影響することがわかった。しかし、本研究では、付着劣化をグリスとビニールテープで模擬したため、設定した ASR 膨張量で予想される付着劣化を過大に評価した可能性がある。したがって、今後、ASR 劣化レベルと付着の関係を実験や解析により確認する必要があるであろう。

### (3) 破壊状況

図-8 に、曲げ載荷試験終了後のすべての供試体のひび割れ状況を示す。まず No.1 と No.2 供試体を比較すると、スターラップを破断させることによりせん断スパンのひび割れ本数が減少し、引張側鉄筋に沿ったひび割れが観察された。このようなひび割れ発生状況の違いが、図-3 の変形性状の相違に繋がったものと推察される。

次に、健全なコンクリートである No.7, 8 供試体と膨張量が  $2000\mu$  (ASR 劣化レベル I) の No.3, 4 供試体では、せん断スパン内の付着部と非付着部の境目からせん断ひび割れが発生し、図-6 と図-7 に示したように急激に荷重が低下した。しかしその後も荷重、変位ともに多少増加し、荷重が増加しなくなったことから試験を終了した。一方、膨張量  $5000\mu$  (ASR 劣化レベル II) の No.5, 6 供試体では、付着劣化レベルの違いによる大きな違いは観察されなかった。また、ASR 劣化レベル I の場合と比較すると、曲げ載荷により新たに発生したひび割れの本数が少なくなり、せん断スパンの大きな斜めひび割れのみが発生、進展した。このことから、4.2(2) 項で述べたのと同様に、膨張量が  $2000\mu$  程度であれば、健全コンクリートと同程度のコンクリートと鉄筋間の付着が見込めるが、膨張量  $5000\mu$  程度になると相当に付着劣化が進行しているものと推察できる。

表-6 に、終局荷重の計算値と実験値を示す。計算では、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  には載荷試験時の実験値、鉄筋の降伏点強度  $f_y$  には規格値  $295(\text{N}/\text{mm}^2)$  を用いた。また、せん断耐力については参考文献<sup>2)</sup>を参照し、斜め引張破壊する場合のせん断耐力を算出した。本研究では、基準となる No.1 供試体について、曲げ破壊荷重とせん断に対するコンクリートの負担分がほぼ同程度になるように、RC 梁の断面形状および主鉄筋比を設定した。したがって、ASR 劣化によるコンクリート圧縮強度の低下、そして破断や付着劣化によるスターラップのせん断負担分の減少により、破壊形式がせん断破壊へと移行する可能性がある。

予想していたように、コンクリート、スターラップともに健全な RC 梁 (No.1 供試体) では曲げ引張破壊に至ったが、その他の No.3~8 供試体では破壊形式が変化した。スターラップを破断させ、引張側鉄筋の定着部分や

スターラップの一部に非付着部を設けることにより、ASR 劣化レベルに拘らず、変形能力が小さくなり、せん断スパンの斜めひび割れの進展が顕著に観察された。しかし、斜めひび割れが載荷点付近を貫く、一般的なせん断破壊の一つである斜め引張破壊とは少し異なった破壊であった。このような破壊となった理由として、①スターラップを破断させ、一部を非付着部としたものの、その他の部分ではある程度の付着が保たれ、せん断力を負担し、斜めひび割れの進展を妨げたこと、②引張側鉄筋の一部を非付着部としたものの、端部の曲げ上げにより十分な定着が得られ、タイドアーチ機構を形成したこと、③ASR 劣化により生じたひび割れが、外力を受けることにより発生するひずみを分散させたこと、の可能性が考えられる。しかしながら、コンクリート、スターラップ、コンクリートと鉄筋間の付着が健全であれば曲げ破壊を生じる RC 梁であっても、ASR によりコンクリートと鉄筋との付着が劣化し、スターラップが破断した場合、せん断ひび割れが卓越し、破壊が脆性的になる可能性があることを示唆した。

## 5. 結論

本研究では、ASR 劣化が過度に進行し、スターラップの破断や深刻な主鉄筋の付着劣化が見込まれる RC 梁の曲げ載荷試験を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1) コンクリートは健全で、スターラップを破断させた場合、大きな耐力低下は見られなかったが、脆性的な破壊になった。
- (2) コンクリートと鉄筋間の付着劣化が RC 梁の曲げ耐荷挙動に大きな影響を与えることがわかった。しかし、ASR 劣化レベルによりコンクリートと鉄筋の付着性状が異なり、本研究では ASR 膨張量が  $2000\mu$  程度であれば、健全なコンクリートと同等の付着を見込めることがわかった。
- (3) 曲げ破壊を生じる RC 梁であっても、ASR 膨張によりコンクリートと鉄筋間の付着が劣化し、スターラップが破断した場合、せん断ひび割れが卓越し、破壊が脆性的になる可能性があることを示唆した。

## 参考文献

- 1) 葛目和宏ら：「ASR 劣化の生じた道路橋の維持管理について」、コンクリート工学, Vol.42, No.6, 2004
- 2) 二羽淳一郎：「コンクリート構造の基礎」、数理工学社, pp.77, 2006

## 謝辞

本論文は、(株)ピーエス三菱・山村智氏が実施した結果も含めたものであることを記し、ここに謝意を表します。