【土木構造·材料論文集 第 21 号 2005 年 12 月】

論文・報告

# 有ヒンジ PC 箱けた橋の応力開放法による 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

Presumption of Prestress and Cause of Large Displacement in Center Hinge PC Box Girder by Released Stress Method

肥田 研一\*、神野 人志\*\*、永吉 竜二\*\*、高橋 洋一\*\*\*、出水 享\*\*\*\* Kenichi Hida, Hitoshi Kamino, Ryuji Nagayoshi, Yoichi Takahashi, Akira Demizu

\*正会員(株)千代田コンサルタント西日本地区橋梁保全部長 (〒812-0041 福岡市中央区大名1丁目) \*\*正会員(株)千代田コンサルタント鹿児島支店技術部構造課 (〒890-0064 鹿児島市鴨池新町 21-7) \*\*\*正会員(株)計測リサーチコンサルタント九州事業部事業部長 (〒812-0007 福岡市博多区東比恵2丁目) \*\*\*\*正会員(株)計測リサーチコンサルタント九州事業部 (〒812-0007福岡市博多区東比恵2丁目)

昭和54年に建設された有ヒンジPC箱けたラーメン橋の中央ヒンジ部に異常たわみが生じて いる。本論文では、この異常たわみの原因を推定するために、応力開放法である鉄筋切断法お よびスロットストレス法を用いて開放ひずみを計測することにより、死荷重時の応力状態及び、 残存プレストレス量の推定を行った。

さらに、PC 橋梁に配置された鉄筋にはクリープ・乾燥収縮ひずみが作用していることから、 鉄筋切断法により得られたひずみを用いてクリープ係数を推定し、このクリープ係数から中央 ヒンジ部の建設時から現在までのたわみ量を解析により求めた。この結果、本橋梁に生じてい る異常たわみは、クリープによる影響が主因であることを確かめた。

## 1. まえがき

対象とする橋梁は、昭和54年に建設された山間部に 位置する3径間有ヒンジPC箱けたラーメン橋であり、 中央ヒンジ部に異常なたわみが生じている。既存の有ヒ ンジ PC 橋の一部には、数十年経過すると中央ヒンジ部 に大きなたわみの発生に加え、中央ヒンジ部の支承であ るゲレンク沓の磨耗による段差および衝撃音や振動が 発生するなどの現象が見受けられる。本橋梁では、建設 時より追跡調査が行われており、図-1に示すように中 央ヒンジ部のたわみは、昭和 61 年に 200mm 程度、平成 5年に 240mm 程度であり、平成 15年には 300mm のたわ み量になる経過をたどっている。

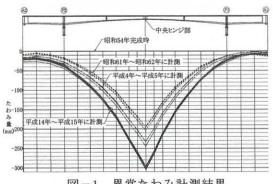


図-1 異常たわみ計測結果

本論文は、応力開放法による死荷重時の応力状態の測 定および解析を行い、プレストレスおよびクリープ係数 の推定を行い、中央ヒンジ部の異常たわみ現象を解明し たものである。

#### 2. 応力開放法による死荷重時の応力測定

応力開放法とは、元来、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、金属やプラスティックにも用いられている。応 力開放法の原理は単純である。測定対象物にスリットや オーバーコアなどで応力を開放し、開放されたひずみや たわみを測定することで応力開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る。今回用い た応力開放法は、これらの手法をコンクリート構造物用 に応用・開発したものであり、鉄筋応力は鉄筋切断法を、 コンクリート応力は、スロットストレス法を用いて死荷 重時の応力測定を行った。

# 2.1 鉄筋切断法

鉄筋切断法とは、計測対象の鉄筋にひずみゲージを 貼付し、同鉄筋を切断することにより現在作用してい る応力を測定する方法である。

肥田、神野、永吉、高橋、出水:

手順は、鉄筋探査器で計測対象鉄筋位置の特定を行い、ハンドブレーカーで鉄筋をはつり出し、はつり出した鉄筋にひずみゲージを貼付する(図-2、写真-1)。そして、鉄筋切断(写真-2)前後ひずみの測定を行うことで開放されたひずみを計測する。切断された鉄筋は、特殊接続金具を用いて機械的に接続したのち(写真-3)、ポリマーセメントモルタルで断面修復を行う $^{1}$ )。はつり出しによる鉄筋への曲げ等の影響を考慮して、1 断面に 4 箇所のゲージを貼付し、軸方向、曲げひずみを分離しひずみを測定した。また、はつり出された鉄筋を溶接で接続すると鉄筋に降伏応力を超える熱応力が発生するため、この問題を解決するために開発された特殊接続金具で鉄筋を接合した $^{1}$ )。(写真-3)



図-2 ゲージ貼付位置(断面)



写真-1 ゲージ貼付状況



写真-2 鉄筋切断状況



写真-3 接続治具設置完了

# 2.2 スロットストレス法

スロットストレス法とは、図-3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開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。

手順は、計測対象位置に鉄筋がないことを鉄筋探査器により確認し削孔位置を定め、変位計を取り付ける。 そして削孔およびスリット(写真-4、5)を作成する。

(終了後、開放変位量を読み取る)。同部にフラットジャッキ(写真-6)を挿入し開放前の変位量となるまで加圧し、押し戻す力と表面変位の関係から開放時に生じた変位に相当する作用応力を算出する。

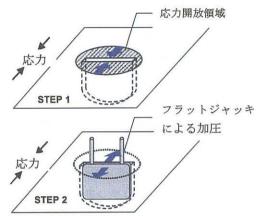


図-3 スロットストレス法による測定原理



写真-4 スロット削孔状況



写真-5 削孔完了時



写真-6 フラットジャッキ挿入状況

有ヒンジ PC 箱けた橋の応力開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推定

圧縮応力の場合、図-3 に示すように、切削したスロット両端間距離は縮まり、これを初期状態に戻すのに要した圧力はスロットと直角方向の圧縮応力と密接に関係している。フラットジャッキで数回の加圧/減圧を行うことで、図-4 に示すように圧力と標点間距離の傾きを求め、コンクリートに作用している圧縮応力は、式(1)により求めることが出来る。

$$\sigma_0 = F/D = A_j \cdot S \cdot (d_0 - d_s)/D \tag{1}$$

$$\Xi \subseteq \{\Xi_s\}$$

σ<sub>0</sub>: コンクリートの死荷重時の応力(N/mm<sup>2</sup>)

F: フラットジャッキで与えた力 (N)

D: 応力拡大係数(mm<sup>2</sup>)

A<sub>1</sub>: フラットジャッキの受圧面積(mm²)

S: フラットジャッキ圧力と変位との関係の 傾き  $(= \angle P/ \angle d)$   $(N/mm^2/mm)$ 

/P:フラットジャッキの圧力変化量(N/mm²)

△d:標点間変化量(mm)

d<sub>0</sub>: 応力解放前標点間距離(mm) d<sub>e</sub>: 応力解放後標点間距離(mm)

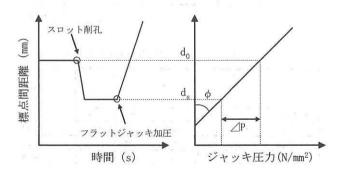
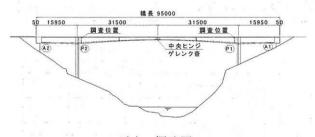


図-4 標点間距離の変化とジャッキ圧力の関係



(a) 概略図

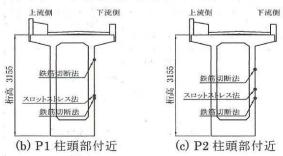


図-5 調査位置図

係数 D は、フラットジャッキで与えた力(F)とその面に作用していた応力度( $\sigma_0$ )との関係を表す係数で、これを応力拡大係数と呼ぶこととする。応力拡大係数は、削孔したコンクリート断面形状とフラットジャッキの寸法によって決まる定数で、スロットの形状を正確に削孔し、同一形式のフラットジャッキを正確にセットした場合一定を示すと考えている。

#### 2. 3 測定位置

鉄筋切断法、スロットストレス法は、図-5に示すように、中央径間側のP1、P2柱頭部付近で行った。

#### 2. 4. 測定結果

表-1 に鉄筋切断法とスロットストレス法の測定結果を示す。図-2 を見て分かるように、奥のゲージは、スペースが狭く、正確にゲージが貼付できないことが考えられ、安定した値を得ることができなかった。そのため奥のデータを除く上下前の平均値を測定値として採用した。

## 3. プレストレスとクリープ係数の推定

#### 3.1 概要

プレストレスとクリープ係数は、応力開放法である鉄筋切断法とスロットストレス法により推定した。鉄筋切断法による開放ひずみは、自重・プレストレスによるひずみ+クリープ・乾燥収縮によるひずみである<sup>1)</sup>。次にスロットストレス法は、コンクリート部の現有応力を測定するものであり<sup>2)</sup>、自重およびプレストレスからなる死荷重時の応力を測定するものである。

このため、鉄筋切断法の開放ひずみとスロットスストス法の開放ひずみの差が、実際に作用しているクリープ・乾燥収縮によるひずみと考えることができる3)。

鉄筋切断法によって測定される開放ひずみは、式(2)に示すように死荷重時(自重+プレストレス)の弾性ひずみとコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるひずみが鉄筋に作用している。

$$\varepsilon_{\rm r} = \varepsilon_{\rm e} + \varepsilon_{\rm c} + \varepsilon_{\rm s} \tag{2}$$

表-1 測定結果

		P1柱頭	部付近	P2柱頭	部付近
	ゲージ 位置	上側	下側	上側	下側
	上	1021	1118	994	1017
鉄筋切断法	下	1232	1438	1152	1200
による鉄筋 ひずみ (µ)	前	1282	1124	1065	1313
	奥	657	307	919	-24
	平均 (奥含む)	1048	997	1033	877
	平均 (奥除外)	1178	1227	1070	1177
スロットス による応力		10.7		7. 9	

肥田、神野、永吉、高橋、出水:

ここに、ε<sub>r</sub>:鉄筋切断法による測定ひずみ

 $\epsilon_{o}$ : 死荷重時の弾性ひずみ (=  $\sigma_{cd}/E_{c}$ )

ε .: クリープによるひずみ

ε。: 乾燥収縮によるひずみ

 $\sigma_{cd}$ :計測位置での死荷重時(自重+プレストレス)のコンクリート応力( $N/mm^2$ )

E<sub>a</sub>: コンクリートの静弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

カンチレバー施工された PC 箱けたのクリープひずみは、施工段階と完了後の経時変化において複雑な動きをする。しかし、中央ヒンジ部の異常たわみの原因を推定するために、計測されたクリープひずみは、計測された弾性ひずみに比例すると仮定すると、スロットストレス計測位置での鉄筋開放ひずみは、式(3)の通りとなる。

$$\varepsilon_{r} = \varepsilon_{e} \cdot (1 + \phi) + \varepsilon_{s}$$

$$\varepsilon_{c} = \varepsilon_{e} \cdot \phi$$
(3)

ここに、φ:クリープ係数である。

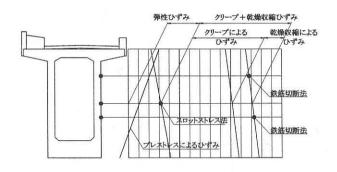
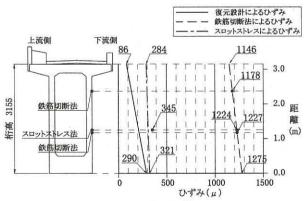


図-6 プレストレス推定の概念図



(a) P1橋脚部調査結果

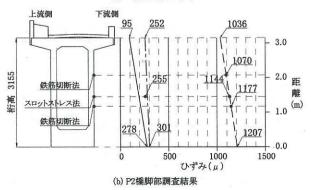


図-7 死荷重時のひずみ分布

式(3)より、乾燥収縮ひずみを仮定すれば計測結果よりクリープ係数を求めることができる。

図-6は、断面に作用しているひずみ分布の概念である。クリープ係数は断面で一定と仮定すれば、死荷重時の弾性ひずみの分布が求められる。この死荷重時の弾性ひずみの分布から自重応力分布を差し引くことによりプレストレスを把握することができる。

## 3.2 クリープ係数の推定

中央ヒンジ部の異常たわみの原因を推定する目的から、断面に作用するクリープ係数は一定であると仮定し、弾性ひずみであるスロットストレス法によるひずみと 鉄筋切断法による開放ひずみより求められるクリープ ひずみより、式(4)でクリープ係数を算定することができる。

表-2 クリープ係数の推定値

		ε,	εe	ε <sub>s</sub>	εc	φ
スロット ストレス位置	P1橋脚柱塔部	1224	345	150	729	2.11
	P2橋脚柱塔部	1144	255	150	739	2.90
			•		平均	2.51

表-3 P1, P2 橋脚柱頭部の弾性ひずみ分布

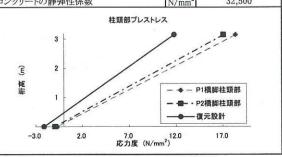
		ε <sub>r</sub> (μ)	ε s (μ)	$= \frac{\varepsilon_{c+e}}{\varepsilon_{r} - \varepsilon_{s}}$ $(\mu)$	φ	$= \frac{\epsilon_{e}}{\epsilon_{c+e}}/\phi$ $(\mu)$
P1橋脚 柱塔部	上縁	1146	150	996	2.51	284
	下縁	1275	150	1125	2.51	321
P2橋脚 柱塔部	上縁	1036	150	886	2.51	252
	下縁	1207	150	1057	2.51	301

表-4 復元設計による死荷重時の応力

	P1橋脚柱	塔部付近	P2橋脚柱塔部付近		
	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	ひずみ (μ)	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	ひずみ (μ)	
主けた上縁	2. 68	86	2. 94	95	
主けた下縁	8, 99	290	8. 62	278	

表-5 プレストレスの推定

			単位	上縁応力	下縁応力
		死荷重時のひずみ (ε。)	μ	284	32
	P1 橋	死荷重時の応力 (σ <sub>d+p</sub> =ε <sub>e</sub> ·E <sub>c</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	9.2	10.4
開放	脚脚	自重 (σ <sub>d</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	-9.2	11.1
法	14-4-	プレストレス (σ <sub>p</sub> = σ <sub>d+p</sub> - σ <sub>d</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	18.4	-0.7
トレスト		死荷重時のひずみ (ε 。)	μ	252	301
	P2 橋	死荷重時の応力 (σ <sub>d+p</sub> =ε <sub>e</sub> •E <sub>c</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	8.2	9.8
	脚	自重 (σ <sub>d</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	-8.9	10.7
		プレストレス (σp=σd+p-σd)	N/mm <sup>2</sup>		-0.9
復元設	計に	よるプレストレス	N/mm <sup>2</sup>	11.8	-2.1
コンクリ		の静弾性係数	N/mm <sup>2</sup>		500



有ヒンジ PC 箱けた橋の応力開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推定

$$\phi = \varepsilon_c / \varepsilon_c \tag{4}$$

式(4)によりクリープ係数を推定すると、表-2に示す通り $\phi=2.51$ となった。なお、クリープ係数の推定は、表-1の測定結果を基にスロットストレス法位置でのひずみを算定し、スロットストレス法の位置でクリープ係数を推定した。

本橋梁は、図面等の設計資料が残っていなかったため、建設当時の示方書および基準等に基づき設計を復元した。この、復元設計おけるクリープ係数は $\phi=1.43$ と算出され、計測結果の方が 1.8 倍に大きくなっていることが確認できた。

なお、コンクリートの静弾性係数  $3.10\times10^4 \text{N/mm}^2$  としてスロットストレスからの応力をひずみに換算し、乾燥収縮ひずみは、 $\epsilon_s=150\times10^{-6}$  とした。静弾性係数および乾燥収縮ひずみは、コンクリート標準示方書 構造性能照査編4)を参考に仮定した。

死荷重時のひずみ分布は、クリープひずみが断面に作用している弾性ひずみに比例することから、表-3に示すように、表-2で求めた平均クリープ係数より主けた上縁および下縁の弾性ひずみを求めた。

#### 3.3 プレストレスの推定

復元設計により PC 鋼材配置を仮定し、計測位置での応力度を算定し、コンクリートの静弾性係数  $3.10 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  としてひずみを求めた。表-4 に復元設計よる死荷重時の応力を示す。

図-7は、P1橋脚とP2橋脚の応力開放法から得られた死荷重時のひずみ分布、鉄筋切断法によるひずみ分布、復元設計による死荷重時のひずみ分布を示している。プレストレスの推定は、図-7の死荷重時のひずみ分布より、復元設計で求めた自重分を差し引き求めた。表-5にプレストレス推定結果を示す。

応力開放法により推定した P1 橋脚、P2 橋脚柱頭部のプレストレスは、復元設計によるプレストレスを上回っていることが分かる。一般に、有ヒンジ PC 橋ではプレストレスの低下により中央ヒンジ部に異常たわみが生じることが言われている。しかし、本橋梁では、想定以上のプレストレスが導入されていることから、本橋梁に発生している中央ヒンジ部の異常たわみの原因はプレストレスの低下ではないと推測される。

#### 4. 異常たわみ原因の推定

#### 4.1 概要

既設の有ヒンジ PC 橋では、中央ヒンジ部の異常たわみは経年とともに起こりうる現象である。この異常たわみの原因としては、プレストレスの低下、想定以上のクリープ、静弾性係数の低下などが考えられる。

3.3 節により本橋梁の異常たわみがプレストレスの 低下ではないことが明らかにされた。このため、異常た わみの原因を推定するため、クリープによるたわみ、お よびコンクリートの静弾性係数について次節において 検討した。

#### 4. 2 たわみ量の推定及び原因の推定

建設時に P1 橋脚の支持地盤が想定以上に悪く深礎 杭とされた経緯もあり、昭和 60 年頃から橋面の形状測量が実施された。この結果、P1 橋脚での若干の支点沈下と中央ヒンジ部付近で 20 c m程度の異常なたわみが確認された。

その後の追跡調査で、平成4年~平成5年では24cm程度にたわみ量は大きくなったが、クリープは収束したものと考えられ走行性を改善のためオーバーレイを実施した。しかし、平成14年から平成15年の計測では約30cmにも及ぶたわみ量となった。

図-8 は、中央ヒンジ部のたわみの変化を図示したものである。図中実線は、昭和 61 年と平成 4 年 $\sim$ 5 年の計測結果の指数関数の近似曲線であり、たわみの増加傾向はほぼ収束したものとした。計測結果より推定したクリープ係数  $\phi=2.51$  を用い、たわみ量の解析を行う(表-6)と、中央ヒンジ部のたわみ量は、260mmであり、実線に近いことが分かる。

しかし、平成 14 年 $\sim$ 15 年の計測結果から、再び、たわみの増加傾向が見られることが分かる。応力開放測定付近のコアを採取して静弾性係数試験を実施したところ、静弾性係数は  $2.16\times10^4$  N/mm² であり、想定した静弾性係数  $3.10\times10^4$  N/mm²より低い結果であった。

村角らによると、アルカリ骨材反応を生じているコンクリートの圧縮強度は、健全なコンクリートと比較して圧縮強度が下回る傾向があるが、静弾性係数は健全なコンクリートの約50%も低下することが報告され

表-6 中央ヒンジ部のたわみ

	中央ヒ	ンジ部
弾性たわみ	49	mm
クリープ、乾燥収縮たわみ	165	mm
オーバーレイによるたわみ	5	mm
支点沈下によるたわみ	41	mm
合計	260	mm

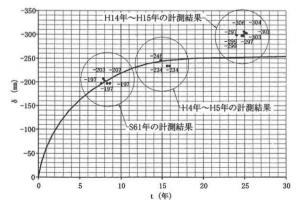


図-8 中央ヒンジ部の経年変化グラフ

ている 5。さらに、鉄筋コンクリート梁供試体の強度 試験結果は、アルカリ骨材反応が生じている供試体と 健全な供試体の曲げ強度、せん断強度の差異は見られ なかったと報告している 50。本橋梁では写真-7に示 すようなひび割れが発生しておりアルカリ骨材反応が 発生している可能性が高いといえる。なお、アルカリ 骨材反応に関しては調査を実施しており別の機会に報 告する予定である。

上記のことを考慮して、静弾性係数を低減させてたわみ量を解析した。その結果が表-7である。静弾性係数が低下した場合の解析値のたわみ量は約360mmになった。このことから、クリープによるたわみ増加はほぼ収束しているが、静弾性係数が低下することにより、たわみ量は260mmから現在の300mm(+40mm)まで進行し、この後も360mm(+60mm)に向かって進行する可能性があることが推測される。したがって、静弾性係数の低下が原因である時期より、たわみは進行したものと推測される。

以上より、本橋梁の異常たわみは、想定以上のクリープによる影響が主因であり、静弾性係数の低下も異常たわみの一因であると推定される。静弾性係数の低下が進行すれば中央ヒンジ部のたわみも今後進行する可能性もあると考えられる。

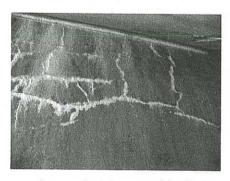


写真-7 主けたのひび割れ状況

表-7 中央ヒンジ部のたわみ (静弾性係数が低下した場合)

静弾性係数 E (N/mm2)	2.16×	$10^{4}$	$3.10 \times 10^4$	
弾性たわみ	68	mm	49	mm
クリープたわみ	242	mm	165	mm
オーバーレイによるたわみ	5	mm	5	mm
支点沈下によるたわみ	41	mm	41	mm
合計	356	mm	260	mm

## 5. まとめ

今回の検討結果を以下に示す。

1) 応力開放法である鉄筋切断法およびスロットストレス法を組み合わせることにより、PC 橋のプレストレス及びクリープの影響を推定することができた。

肥田、神野、永吉、高橋、出水:

- 2) プレストレス量およびクリープ係数の推定結果から 中央ヒンジ部のたわみ挙動の経年変化を再現するこ とができた。
- 3) プレストレス、クリープ係数および中央ヒンジ部の たわみ挙動から本橋梁に発生していた中央ヒンジ部 の異常たわみの主因は、想定以上のクリープである ことを推定できた。
- 4) 本橋梁では、静弾性係数の低下が確認され、静弾性 係数の低下も異常たわみの一因であることが推測さ れた。この静弾性係数の低下は、アルカリ骨材反応 の疑いがあり、今後もたわみが増加する懸念がある と推測される。

有ヒンジPC箱けた橋の応力状態を把握した事例は少なく、今回、精度等の種々の問題は含むが、仮定のもとで応力開放法により死荷重時の応力状態とクリープひずみを把握する一例を示すことができた。これは、応力開放法による測定結果は、種々の情報が含まれており、PC 構造物に作用している死荷重時応力状態とクリープ・乾燥収縮ひずみ状態を精度良く把握できる可能性を示唆していると考えられる。このため、応力開放法の計測精度の向上および鉄筋開放ひずみからのクリープ・乾燥収縮ひずみ推定方法の精度向上等の課題に研究を進め、別の機会に報告したい。

なお、本橋梁では、今後、劣化の進行が予想されるため、異常たわみの抑制と劣化の抑制を図っていくための対策工法の検討を実施することとなっている。

## 参考文献

- 中井督介ほか: PC 構造物のはつりおよび断面修復 に関する実験的検討,第13回プレストレスコンク リートの発展に関するシンポジウム,PP.495-500, 2004
- 2) 浅井洋ほか: 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) 横山和昭ほか: 鉄筋切断法による実PC橋の残存プレストレス測定に関する検討, 第13回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム, PP.501-504, 2004
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書構造性能照査編, PP30, 2002
- 5) 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, Vol. 27, No2, PP. 1-6, 2005

(2005.7.1 受付)