論文　ASRによる劣化を模擬したRCはり部材の耐荷性能に関する実験的研究

小林孝一[*1]，伊藤睦[*2]，水野英二[*3]

要旨：RC構造は本来，力学的，耐久的に優れた構造形式である。しかしながら，アルカリ骨材反応（ASR）により劣化したRC構造物で，鉄筋が破断している事例が発見された。そこで本研究では，ASRがRC構造の耐荷性能に与える影響を明らかにすることを目的として，コンクリートの強度と静弾性係数の低下および横拘束筋の破断を模擬したRC部材の耐荷性能を調査した。そのために気泡コンクリートや軽量骨材を使用したコンクリートを用い，横拘束筋の破断がポストピーク領域で部材の耐荷性能に与える影響について検討した。

キーワード：RCはり，アルカリ骨材反応，コンクリート劣化，鉄筋破断，ポストピーク

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造は力学的性能に優れており，我が国でも重要なインフラストラクチャーを形成している。またRC構造は本来非常に耐久性に優れた構造形式であるにもかかわらず，近年，アルカリ骨材反応により部材内部の鉄筋に破断が生じるという，従来想定していなかった劣化事例が報告されている。

このような状況の下で，著者らはブリーディング層やジャンカ，あるいは鉄筋破断が，RC部材の耐荷性能に与える影響について，実験的ならびに解析的に検討を行ってきており[1)2)3)4)]，鉄筋の破断やジャンカの存在により，断面内での横拘束力が減少し，部材の耐荷性能，特にポストピーク域における挙動が，内部欠陥がない供試体とは異なることを明らかにしている[3)4)]。

しかしながら，これまで実施してきた検討においては，ASRによるコンクリート自身の変状については考慮してこなかった。そこで本研究では，ASRによる横拘束筋の破断に加え，コンクリートの強度および静弾性係数の低下が，RCはり部材の耐荷性能，特にポストピーク域における挙動に対して与える影響を，さらに詳細に検討し，実験を通して明らかにすることを目的とした。

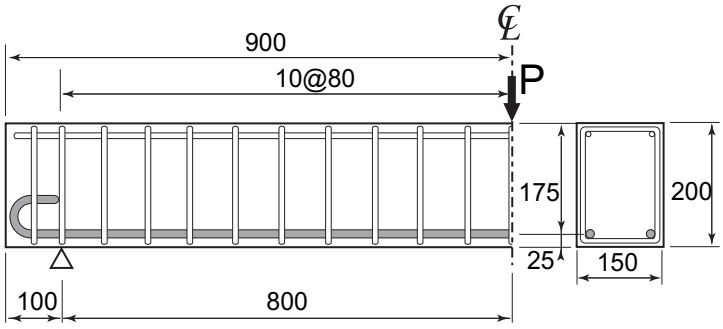
2. 実験概要

2.1 供試体

本研究で供試体として用いたRCはり部材の例を**図−1**に示す。供試体の引張側には主筋としてD16（SD295A）を2本，圧縮側には組立筋としてφ6を2本，いずれもかぶり17mmで配置した。また横拘束筋としてD6（SD295A）を，間隔60mm，80mm，100mmのいずれかで配置した。これらは

表−1　鋼材の性質

	静弾性係数 (kN/mm²)	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
D6	192	344	519
D16	190	345	505



図−1　供試体

*1　中部大学　工学部都市建設工学科　助教授　博士(工学)（正会員）
*2　中部大学　工学部都市建設工学科　講師　博士(工学)（正会員）
*3　中部大学　工学部都市建設工学科　教授　Ph.D（正会員）

表 −2　コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³）					
			W	C	S	G	減水剤	気泡
Aシリーズ	60	50.4	162	269	787	781	0.674	5.0
Bシリーズ	56	46.9	146	258	574	529	0.646	5.0

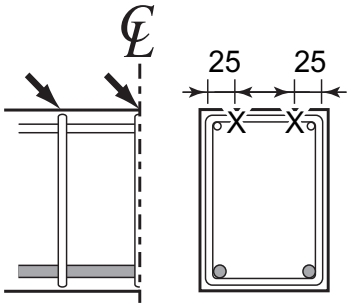


図 −2　鉄筋切断の位置の例（横拘束筋３本切断の場合，→で示す横拘束筋をＸの位置で切断，単位：mm）

それぞれ横拘束筋体積比1.55%，1. 17%，0.93%に相当する。主筋と横拘束筋の力学的性能を**表 −1**に示す。

供試体は2つのシリーズからなり，Aシリーズの供試体は，早強ポルトランドセメントと砕石，川砂を用いたW/C=0.6のコンクリートを用いたが，予め発泡装置にて発泡剤溶液から微細気泡（密度：0.05g/cm³）を作り，それをコンクリート体積の10%，ミキサに投入して練混ぜを行なうプレフォーム方式で気泡コンクリートとすることによって，強度の低下を図った。一方，Bシリーズのコンクリートは，軽量細骨材（絶乾密度：1.70 g/cm³，表乾密度：1.95g/cm³）と軽量粗骨材（絶乾密度：1.25 g/cm³，表乾密度：1.59g/cm³）を用いる軽量コンクリート2種に対して，同様に体積比10%の気泡を混入し，軽量・気泡コンクリートとすることによって強度と静弾性係数の低下を図った[5)]。これらコンクリートの配合を**表 −2**に示す。

また，供試体の一覧を**表 −3**に示す。鉄筋の破断を模擬するためにコンクリート打設前に横拘束筋を切断した供試体を作製した。供試体中央の横拘束筋を1本だけ切断したものと，その左右に隣接する横拘束筋も含めて計3本を切断したものの2種類を作製した。横拘束筋を3本切断する場合の切断位置を一例として**図 −2**に示す。

表 −3　供試体一覧

供試体名	横拘束筋間隔(mm)	横拘束筋切断本数
A(B)-60-0	60	0
A(B)-60-1		1
A(B)-60-3		3
A(B)-80-0	80	0
A(B)-80-1		1
A(B)-80-3		3
A(B)-100-0	100	0
A(B)-100-1		1
A(B)-100-3		3

表 −4　コンクリートの力学的特性

	圧縮強度 (N/mm²)		静弾性係数 (kN/mm²)	
	範囲	平均	範囲	平均
Aシリーズ	14.0-19.2	16.1	14.2-19.1	16.1
Bシリーズ	7.5-12.5	9.5	7.5-10.3	8.7

供試体はAシリーズ，Bシリーズともに，一要因につき，それぞれ2体ずつ，計36体作製した。

2.2 実験方法

供試体に対して一方向曲げ載荷実験を行った。載荷スパンは1600mmとし，スパン中央に一点集中載荷を行った。最大耐力近傍までは荷重制御により，一方，ポストピーク領域においては変位制御により荷重−変位関係を得た。載荷は部材のたわみが少なくとも部材降伏変位の10倍である50mm程度に達するまで，もしくは荷重が最大耐力の1/2程度に低下するまで続けた。

なお本研究においては，一部の部材では引張鉄筋が降伏することなくコンクリートの圧壊が開始されているが，その場合にも部材の塑性変形が開始し，荷重-たわみ関係が急変することを，部材の降伏と定義することとする。

3. 実験結果および考察

φ 100 × 200mm の円柱コンクリート供試体に対する圧縮強度試験の結果，RC はり部材の載荷実験実施時のコンクリートの圧縮強度，静弾性係数は**表 −4** に示す値であった。

また，RC はり部材は，いずれも載荷点近傍でコンクリートの圧壊が生じ，曲げ破壊した。

3.1 気泡コンクリート供試体（A シリーズ）

(1)横拘束筋間隔の影響

図 −3 に，気泡コンクリートを用いて作製した A シリーズの供試体のうち，鉄筋切断のない供試体の荷重 - たわみ関係を示す。いずれの供試体も部材の降伏と最大荷重を示す点がほぼ一致しており，降伏直後から載荷荷重の低下が生じてポストピーク領域となっている。部材の曲げ靭性率の定義を，荷重が降伏荷重に等しくなるまで低下した点の変位の降伏変位に対する比と考えると，その値は非常に小さい。

図 −4 に既報 4)で報告した，部材寸法が本報の供試体と全く同一であり，コンクリート強度が普通強度で横拘束筋切断の無い供試体の荷重 - たわみ関係を示すが，本研究の結果と比較すると，若干降伏荷重が大きいことに加え，部材の降伏後も載荷荷重の増加が見られる点が異なる。また**図 −4** の凡例中の数字 60，80 および 100 は，横拘束筋間隔（mm）を示すが，普通強度のコンクリートの場合には，横拘束筋間隔が大きいほどポストピークに移行する変位が小さいのに対し，低強度の気泡コンクリートを用いた本研究の供試体では，上記のように，いずれの横拘束筋間隔でも，部材の降伏直後にポストピークへの移行が見られた。なお，A シリーズの供試体に関しては，部材の降伏と主鉄筋の降伏がほぼ同時に生じていることを確認している。

A シリーズの供試体の引張鉄筋比は p=0.0151 であるのに対し，**表 −1** および**表 −3** に示した鉄筋とコンクリートの強度を用いて求められる釣合鉄筋比は，p_b=0.0213 であり，両者の値が近く曲げ靭性が非常に小さい部材となっているために，このような挙動を示したと考えられる。

また，**写真 −1** に普通強度コンクリート供試体（図中 80sound）と A シリーズの供試体の試験終了後の外観の例を示す。低強度のコンクリートを用いた場合には，コンクリートの圧壊が広範囲に生じているのが特徴であった。

また**図 −3** から明らかなように，横拘束筋間隔

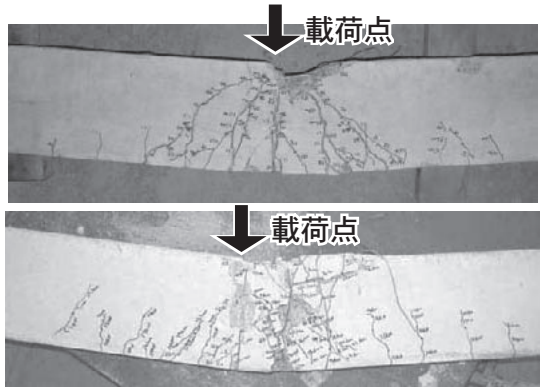


写真 −1　載荷実験終了後の供試体（上：80sound[4]，下：A−60−0）

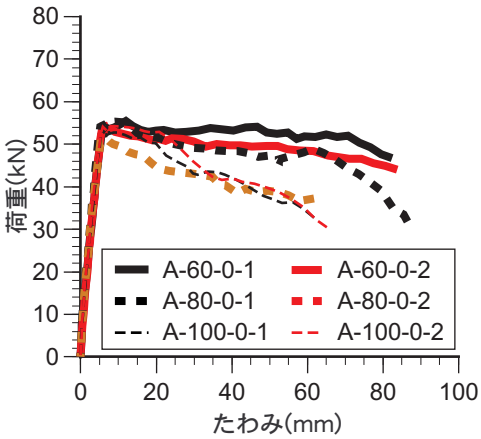


図 −3　横拘束筋間隔が荷重 − たわみ関係に与える影響（気泡コンクリート）

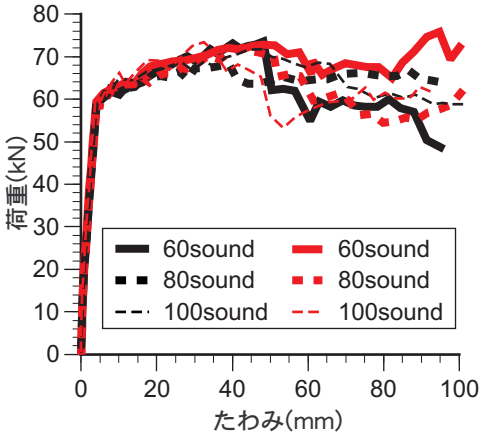


図 −4　横拘束筋間隔が荷重 − たわみ関係に与える影響（普通コンクリート）[4]

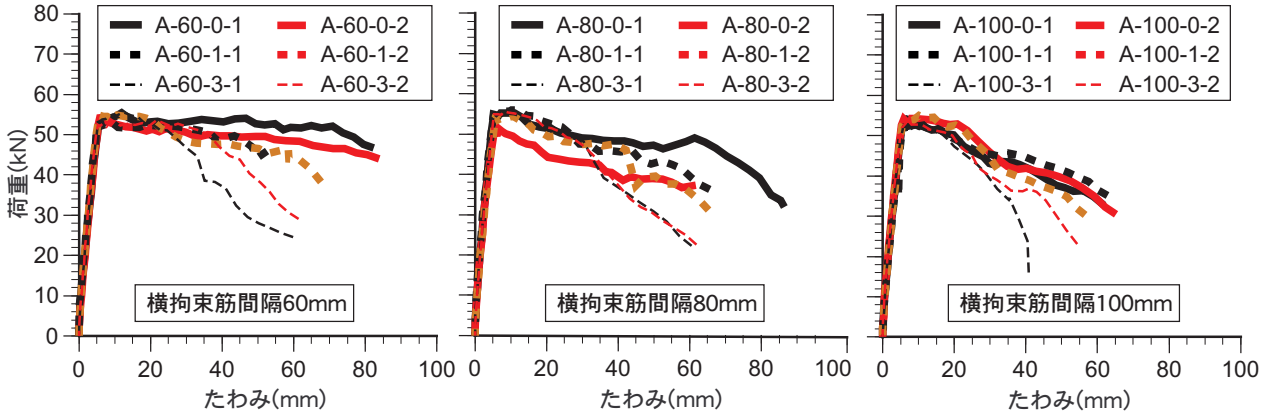


図 −5　横拘束筋切断が荷重 − たわみ関係に与える影響（気泡コンクリート，A シリーズ）

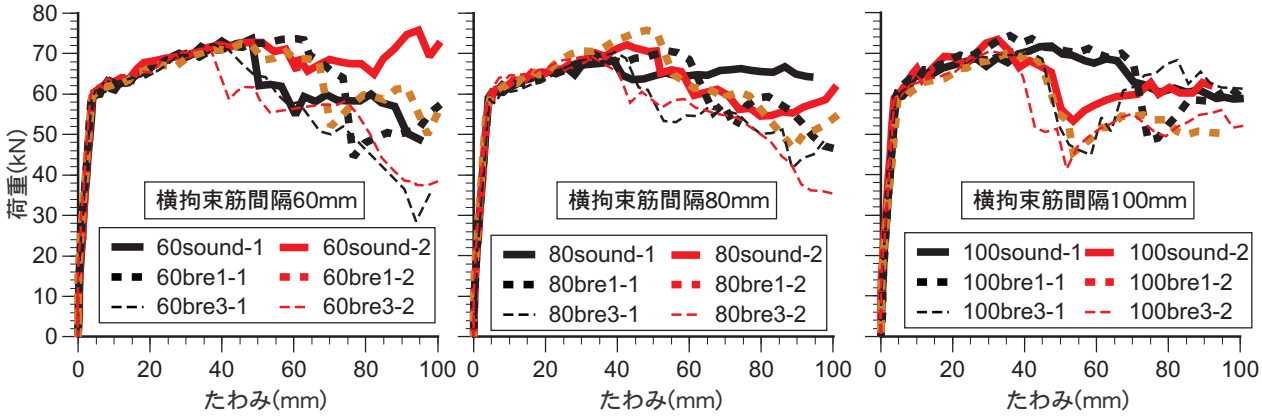


図 −6　横拘束筋切断が荷重 − たわみ関係に与える影響（普通強度コンクリート）[4]，凡例は横拘束筋間隔（mm）− 横拘束筋切断本数（sound は 0 本，bre1 は 1 本，bre3 は 3 本）を表わす

が 80mmn の場合には供試体間の結果のばらつきが大きいものの，おおむね横拘束筋間隔が大きな供試体ほど部材降伏後の荷重の低下が早い。横拘束筋の間隔が広い場合には，部材の圧縮域のコンクリートに対する横拘束効果が小さいために，このような結果となったと考えられる。

以上の結果より，コンクリート強度の低下により降伏荷重には若干の低下しか見られないが，特に横拘束筋量が小さい場合には部材の曲げ靭性率は非常に小さくなるため，弾性範囲を超える外力が作用すれば，構造物の破壊が急激に生じ，危険な破壊形態となることが明らかとなった。

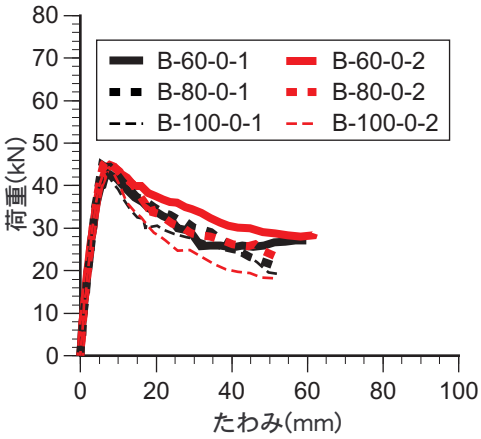
(2)横拘束筋切断の影響

図 −5 に，横拘束筋間隔がそれぞれ 60，80，100mm の場合に，横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に与える影響について示す。

また**図 −6** に，既報 4)で報告した，普通強度のコンクリートを用いた部材における，横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に与える影響について示す。普通強度コンクリートの場合には，特に横拘束筋間隔が小さい場合に，横拘束筋の切断によってポストピークへの移行が早まるが，横拘束筋間隔が小さいほど横拘束筋切断の影響が大きいという結果が得られている。

気泡コンクリートを用いた場合には，横拘束筋切断の無い部材においても部材降伏が荷重のピークとほぼ一致しているため，横拘束筋切断がピーク位置に与える影響は見られなかった。しかしながら，例えば横拘束筋間隔が 60mm（**図 −5** 左）で横拘束筋の切断がない場合には，部材の降伏後の荷重の低下は比較的緩やかであるのに対し，横拘束筋の切断本数が 1 本，3 本と増加するのにともない，部材降伏後の荷重低下の進行が大きくなっている。横拘束筋間隔が 80mm の場合（**図 −5** 中央）も同様の傾向であり，これは横拘束筋の切断により，コンクリートに対する横拘束力が減少したためであると考えられる。

一方，横拘束筋間隔が 100mm で（**図 −5** 右），横



図－7　横拘束筋間隔が荷重－たわみ関係に与える影響（軽量・気泡コンクリート）

拘束筋を1本切断した場合と切断していない場合では，荷重-たわみ関係はほぼ同一である。これは，横拘束筋間隔が大きな場合には，元々横拘束力が小さいため，横拘束筋切断による横拘束力の減少が小さいためであると考えられる。しかしながら横拘束筋を3本切断した場合には，無切断，1本切断の供試体よりも部材降伏後の荷重低下が急激であるため，本研究で設定した最も小さな横拘束筋体積比（0.93%）においても，コンクリートに対してある程度は横拘束効果が発生しているものと考えられる。

3.2 軽量・気泡コンクリート供試体（Bシリーズ）

(1)横拘束筋間隔の影響

図－7に，軽量・気泡コンクリートを用いたBシリーズの供試体のうち，横拘束筋の切断のないものの荷重-たわみ関係を示す。**図－3，4**と比較して分かるように，降伏荷重はAシリーズのものよりもさらに低下した。これは，コンクリートの強度がAシリーズよりもさらに小さいためである。

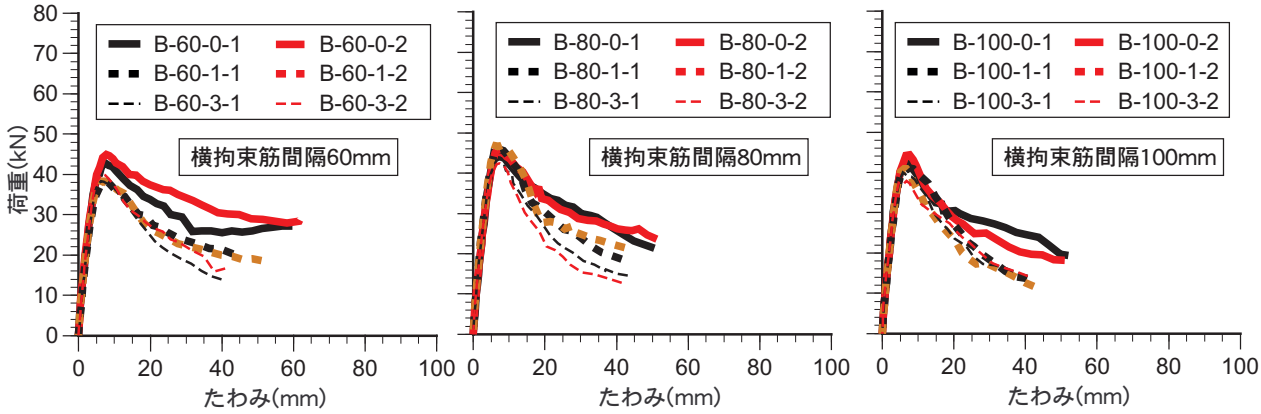
また，部材降伏後の荷重の低下も急激である。主筋に貼付したひずみゲージにより載荷中の主筋のひずみを測定したところ，載荷終了まで主筋は降伏しなかった。Bシリーズの供試体の引張鉄筋比は，Aシリーズの供試体と同様に$p=0.0151$であるのに対し，**表－1**および**表－3**に示した鉄筋とコンクリートの強度を用いて求められる釣合鉄筋比は，$p_b=0.0125$であり，部材断面がオーバーレインフォースメントで，鉄筋が降伏することなくコンクリートが圧壊した。それに加え**表－4**に示したように弾性係数も非常に小さいため，横拘束筋による拘束効果が小さいためであると考えられる。

(2)横拘束筋切断の影響

図－8に，横拘束筋間隔がそれぞれ60，80，100mmの場合に，横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に与える影響について示す。

横拘束筋間隔がいずれの値であっても，横拘束筋の切断本数が増えるに従い，部材降伏後の荷重の低下がより急激になっている。上記のように，軽量・気泡コンクリートを用いたBシリーズの供試体については，横拘束筋が無切断であっても，横拘束筋による横拘束力が極めて小さいと考えられるが，横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に影響を与えていることから，横拘束筋は若干の横拘束効果は有していると考えられる。

写真－2に，Bシリーズ供試体の載荷試験終了後の外観例を示すが，曲げ圧縮破壊であるため，外



図－8　横拘束筋切断が荷重－たわみ関係に与える影響（軽量・気泡コンクリート）

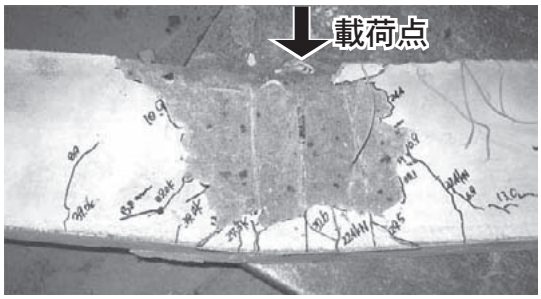


写真 −2　載荷実験終了後の供試体（B−60−0）

観上の破壊が生じた領域が非常に広範であった。

3.3 今後の課題

これまでASRが生じた部材に関しては，引張鉄筋比，横拘束筋量が通常の値であれば，コンクリートの体積膨張に起因するケミカルプレストレスやケミカルコンファイン効果により，耐荷力はそれほど低下しないという報告が数多くなされている[6]。本研究における鉄筋破断の無い供試体に関しては，コンクリートの体積膨張がないため，実際の ASR 劣化の場合よりも耐荷性能が低いと考えられる。一方，ASRにより横拘束筋の破断が生じた場合には，少なくとも部材軸直角方向に作用するケミカルコンファインは失われるため，本研究でモデル化された供試体は実現象に近似した状況を再現しているものと考えるが，今後は体積膨張も含めた検討を行なう必要があるものと考えられる。

4. 結論

本研究では，ASRによるコンクリートの強度と静弾性係数の低下，および横拘束筋の破断を模擬したRC はり部材の耐荷特性を検討することによって，以下のような結論が得られた。

1) コンクリートが低強度となることによって，部材の曲げ靭性が低下し，部材降伏後に直ちにポストピークに移行した。
2) コンクリートが低強度の場合にも，横拘束筋間隔が大きくなることによって，ポストピーク後の荷重の低下が早くなった。
3) この場合，横拘束筋の切断によって，ポストピーク後の荷重の低下がさらに急激になった。
4) コンクリート強度がさらに小さく，オーバーレインフォースメントとなるような部材では，部材降伏後の荷重低下が急激である。
5) この場合，横拘束筋の切断によって，ポストピーク後の荷重の低下がさらに急激になった。

謝辞

本研究の実施にあたり，日本私立学校振興・共催事業団からの学術研究振興資金（代表：水野英二），科学研究費補助金（基盤研究(B)17360218，代表：水野英二）および中部大学総合工学研究所からの研究助成金の援助を得た。発泡剤と発泡装置についてはポゾリス物産から，軽量骨材については太平洋マテリアルからご提供いただいた。実験の遂行には，中部大学都市建設工学科水野・伊藤研究室および小林研究室の学生の助力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 吉田幸夫，水野英二，畑中重光：ブリーディング層を導入した寸法の異なる円形プレーンコンクリートの三次元FEM 解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，2003.
2) 吉田崇，吉田幸夫，水野英二，畑中重光：内部欠陥を有する角柱コンクリートの三次元FEM 解析，DIANA ユーザー会議，2003.
3) 水野英二他:内部欠陥を有する鉄筋コンクリート部材のポストピーク挙動に関する実験的ならびに解析的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.49-54，2004.
4) 小林孝一，伊藤睦，水野英二：内部欠陥を有するRCはり部材の耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 27，No. 2，pp. 331-336，2005.
5) 西園達男他：ASR劣化を模擬したPC梁部材の基本的耐荷特性，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第4巻，pp. 123-128，2004
6) 例えば，小柳洽他：著しいAAR 損傷を生じたRCはりの挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 947-952，1993.