

機関番号：34406
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20760293
 研究課題名(和文) ASRと鋼材腐食による複合劣化が生じたはり部材の耐荷特性と付着強度モデルの構築
 研究課題名(英文) Evaluation of Loading Capacity and Bond Strength for Beams Damaged by Combined Deterioration due to ASR and Corrosion
 研究代表者
 三方 康弘(MIKATA YASUHIRO)
 大阪工業大学・工学部・准教授
 研究者番号：60434784

研究成果の概要(和文)：ASR単独の劣化、鋼材腐食単独の劣化、ASRと鋼材腐食による複合劣化が生じたはり供試体を作成し、それらの載荷試験を行い、ASRと鋼材腐食による複合劣化が生じたはり供試体における曲げ耐荷特性を把握した。さらに、はり部材と同様の断面形状を模擬した付着強度試験供試体を用いた付着強度試験の結果から、鉄筋とコンクリートの付着特性について把握するとともに、付着劣化を生じたはり部材に対する有限要素解析の整合性を示した。

研究成果の概要(英文)：Beam specimens, which are damaged by ASR, corrosion and combined deterioration due to ASR and corrosion, are tested. From these results, flexural capacity of beam specimens, which have combined deterioration, is evaluated. Bond strength specimens, which are same section to beam specimens, are tested. Bond strength between reinforcing steel bar and concrete are evaluated. In the case of beam specimens affected deterioration of bond strength, calculation values used FEM Analysis are evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

1. 研究開始当初の背景

既設のコンクリート構造物を適切に維持管理するためには、既設構造物の性能を適切に評価することが求められているが、材料劣化と性能低下との関係について定量的に明らかにされているとは言い難く、合理的な維持管理を実施するのは困難である。

とりわけ、複合劣化を生じたコンクリート

構造物については、様々な材料劣化が耐荷特性に及ぼす影響が不明であるのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRC、PRCはり部材の耐荷性能を評価することを目的として、以下の検討課題について取り組む。

(1) A S Rと鋼材腐食による複合劣化を生じたRC、PRCはり部材による載荷試験を実施するとともに、A S R、鋼材腐食の単独の劣化モデルとの比較を行う。その結果から、A S Rによる材料劣化や鋼材腐食によるコンクリートと鉄筋の付着強度の低下が、部材の耐荷特性に及ぼす影響について検討する。

(2) はり部材と同様の断面形状を模擬した付着強度試験供試体を用いた試験結果から、コンクリートと鉄筋の付着特性について把握する。さらに、A S Rや鋼材腐食による付着劣化を生じたはり部材に対する有限要素解析の整合性を示す。

3. 研究の方法

(1) 付着強度試験供試体

はり供試体(2)RCはり供試体にて記述)と同様の劣化要因(3種類)の付着強度試験供試体を作成した。さらに、それぞれの劣化要因に対して、付着強度試験供試体の種類として、以下に示す2種類を選定した。

- ・JSCE-G503 準拠供試体
- ・梁断面模擬引抜き供試体

なお、梁断面模擬引抜き供試体は、フープ筋でコアコンクリートと軸方向鉄筋が拘束されたはり部材を模擬した引抜き供試体であり、はり供試体における主鉄筋の付着特性を検証することを目的とした。

供試体寸法を図1に、引抜き試験の状況を図2に示す。

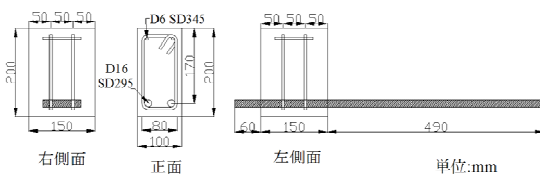


図1 梁断面模擬引抜き供試体

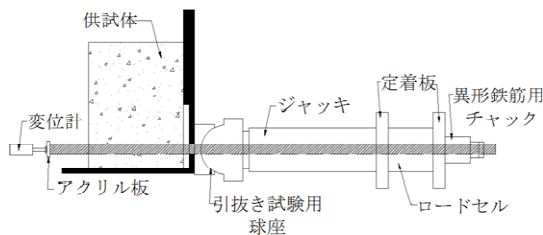


図2 引抜き試験の状況

(2) RC はり供試体

・実験供試体

A S Rと鋼材腐食を生じたはり供試体は、反応性骨材を用いA S Rを早期に発生させるための促進養生(温度約40℃、相対湿度約95%)を行った。さらに、打設時に塩化ナトリウムを添加することに加えて、鋼材腐食を促進させるために養生時に塩水散布等を行

った。

また、比較検証用としてA S R、鋼材腐食単独の劣化を生じたはり供試体を作成した。

実験要因として、A S Rについては材齢1年、2年の2種類を選定した。さらに、定着の有無の2種類を選定した。これらの要因から合計10体の供試体を作成した。その一覧を表1に示す。すべての供試体は計算上、曲げ破壊先行型とした。載荷試験は対称2点集中荷重方式($a/d=3.53$)とし、一方向単調載荷を行った。

付着強度試験、各種物性試験は、はり供試体と同一環境で養生を行ったテストピース等にて実施した。なお、はり供試体の寸法を図3に、供試体の断面形状を図4に示す。

・解析モデル

各種劣化が生じコンクリートと鉄筋の付着力が低下した供試体をモデルとし、汎用有限要素解析プログラムDIANA Ver. 9.3において2次元非線形解析を行った。

コンクリートと鉄筋の付着力低下を模擬するため、主鉄筋とコンクリートの間に付着要素を設定し、付着-すべり量関係を考慮することとした。とりわけ、コンクリートと鉄筋の付着応力-すべり関係を表現するモデルとして、島モデル、梁断面模擬引抜き供試体の実験結果から提案する簡便なモデル(以下、実測モデルと記す)、島モデルにコンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会が提案する付着強度比を乗じたモデルの3種類を設定し、非線形有限要素解析の結果と付着応力-すべり関係のモデルの整合性を検証することとした。

解析モデルにおいて、圧縮特性は破壊エネルギー G_{fc} を要素の等価高さ h で除することにより、要素寸法によらず一定の破壊エネルギーを消費し、解析結果が要素寸法の大きさの影響を受けないように配慮した斉藤、Nakamuraらのモデルを用いた。一方、引張特性については、コンクリート標準示方書で定めているモデルを使用した。

コンクリートのひび割れは、分散ひび割れモデルにて表現し、鉄筋の応力-ひずみ関係には、バイリニアモデルを用いた。

なお、梁断面模擬引抜き供試体の実験結果において、同一の劣化種類の付着応力-すべり関係から簡便なモデル(実測モデル)を設定した。各供試体の付着応力-すべり関係から下記の各点の平均値を算出しモデルを設定した。

- ① 最大付着応力度の1/3の値
- ② 最大付着応力度の0.9倍の値
- ③ 最大付着応力度
- ④ 自由端変位2mmの値
- ⑤ 自由端変位5mmの値

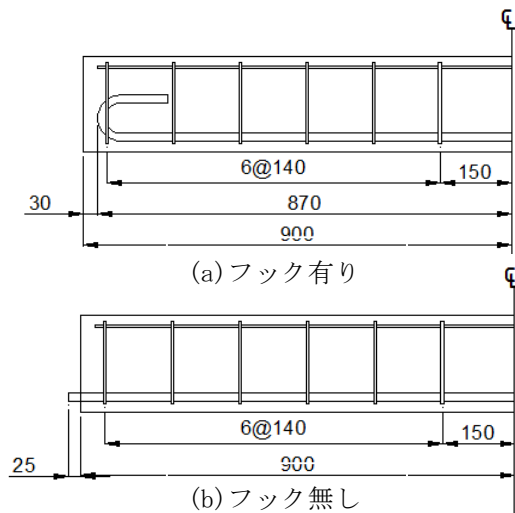


図3 供試体の寸法 (単位: mm)

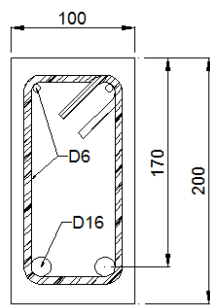


図4 供試体の断面形状 (単位: mm)

表1 供試体の種類

供試体名	劣化の種類	フックの有無	材齢 (年)
N-F-0	なし	有	0
N-0	なし	無	0
C-F-1	鋼材腐食	有	1
C-1	鋼材腐食	無	1
ASR-F-1	アルカリ骨材反応	有	1
ASR-1	アルカリ骨材反応	無	1
ASR-F-2	アルカリ骨材反応	有	2
ASR-2	アルカリ骨材反応	無	2
AC-F-2	鋼材腐食+ アルカリ骨材反応	有	2
AC-2	鋼材腐食+ アルカリ骨材反応	無	2

(3) PRCはり供試体

ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じた供試体 (以下、ACシリーズと記す) の粗骨材および細骨材には反応性骨材 (岩種: 輝石安山岩、反応性鉱物: クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス) を使用した。

実験要因として、(1) 劣化の種類: 健全な供試体 (以下、Nシリーズと記す)、ASRによる劣化を生じた供試体 (以下、Aシリーズと記す)、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じた供試体の3種類を選定した。(2) せん断補強筋の性状: 健全なもの (図6(a))、ASR損傷による鉄筋破断を模擬するため、せん断補強筋の引張側隅角部を切断したもの (図6(b)) の2種類を選定した。(3) せん断補強筋間隔: $s=100\text{mm}$ (せん断補強筋比: $p_w=0.51$) と $s=150\text{mm}$ ($p_w=0.34$) の2種類を選定した。(4) 断面引張縁側の応力: 2N/mm^2 と 4N/mm^2 の2種類を選定した。これらの要因から、合計9体の供試体を作製した。供試体の一覧を表2に示す。なお、いずれの供試体も、計算上は曲げ降伏後にせん断破壊に至り、PC鋼材は降伏しないように設計した。

作製した供試体は4週間湿布養生後、ACシリーズ供試体は促進養生を実施し、その後、材齢715日から3%濃度の塩水を週5日の散布養生を行った。なお、材齢715日時点では、ASR膨張はほぼ収束していた。

なお、ACシリーズ供試体の自由膨張量は約 4900μ (載荷時の材齢は1088日) となり、Aシリーズは約 4600μ となった。

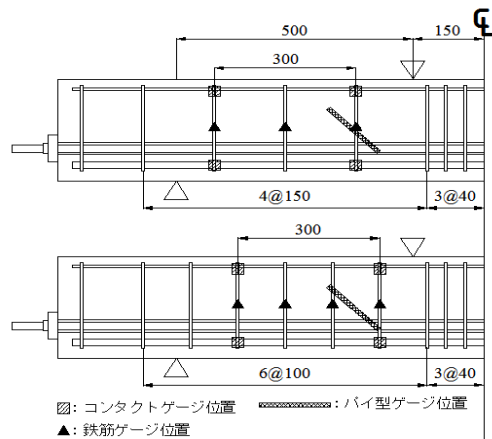
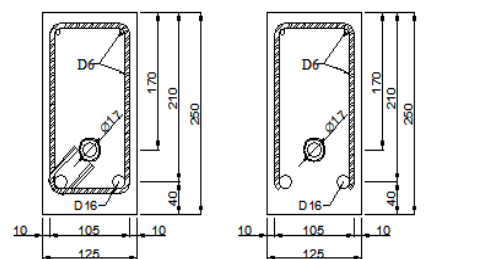


図5 配筋図 (単位: mm)



(a) 健全スターラップ (b) 定着不良スターラップ

図6 断面図 (単位: mm)

表 2 供試体の詳細

供試体名	劣化の種類	せん断補強筋		断面下縁の応力 (N/mm ²)
		鉄筋破断	配置間隔 (mm)	
N150-2	健全	無	150	2
A150-2	A S R	無	150	2
A150T-2	A S R	有	150	2
A150T-4	A S R	有	150	4
A100T-2	A S R	有	100	2
AC150-2	複合劣化	無	150	2
AC150T-2	複合劣化	有	150	2
AC150T-4	複合劣化	有	150	4
AC100T-2	複合劣化	有	100	2

4. 研究成果

(1) 付着強度試験供試体

・ JSCE-G503 準拠供試体

鋼材腐食供試体においては、今回の腐食の程度であれば、健全供試体と比較しほぼ同等の最大付着応力度を有していた。また、A S R 供試体においては、平均付着応力度が低下し、また破壊形式においても、A S R によるひび割れにより、拔出し破壊を生じる場合が多いことを確認した。しかし、ケミカルプレストレスが生じる場合もあり、健全供試体と同等の最大付着応力度を有した。一方、複合劣化供試体においては、A S R により発生したひび割れから内部に塩分が侵入したため、他の供試体と比較して、最大付着応力度が最も小さくなった。

・ 梁断面模擬引抜き供試体

鋼材腐食供試体においては、2年間塩水散布を行っていたため、主鉄筋位置に1mmを超えるひび割れが確認できた。しかし、コンクリート内部にスターラップを配置していたため、健全供試体と比較して最大付着応力度の低下が見られなかった。また、A S R 供試体においては、スターラップを有しているため全供試体で、ケミカルプレストレスが発生し、健全供試体と比較して、最大付着応力度が大きく向上する結果となった。しかし、最大付着応力度到達時以降において、応力が急激に低下する挙動を示した。一方、複合劣化供試体においては、スターラップを有していたため、全供試体でA S R によるケミカルプレストレスが生じ、健全供試体より、最大付着応力度が増加する結果となった。しかし、

最大付着応力度到達時以降において、A S R 供試体と同様に応力が急激に低下する挙動を示した。さらに、同一荷重時における自由端変位が大きくなる結果となった。

以上の結果より、梁断面模擬引抜き供試体から得られた付着応力度-すべり関係はスターラップ等の拘束筋の影響を評価していることから、はり部材における付着特性により近いことが考えられ、曲げ耐荷挙動を評価する上で有用であることを確認できた。

(2) R C はり部材

・ 実験結果

複合劣化を生じたフックを有しない AC-2 供試体は、主鉄筋沿いに生じたひび割れの幅および質量減少率が大きかったため、付着力が低下し、ひび割れ分散性が顕著に低下した。また、A S R 膨張によるケミカルプレストレスの影響により、斜めひび割れがあまり生じず、ひび割れの本数が顕著に少なくなり、健全供試体と比較して最大耐力比が 85% に低下した。一方、フックを有する AC-F-2 供試体は、主鉄筋沿いに生じた腐食ひび割れやA S R によるひび割れおよび鋼材腐食による付着力の低下が生じて、フックによる主鉄筋の定着により、鉄筋の端部からの拔出しが拘束された。そのため、健全供試体と比較して、最大耐力比は 90% となり、フックを有しない供試体と比較して、曲げ耐力の低下が抑制された。また、破壊性状として鋼材腐食およびA S R 劣化によるひび割れに沿って、曲げ圧縮部が圧壊する挙動が見られた。

・ 解析結果

代表的な事例として、鋼材腐食を生じた C-F-1、C-1 の荷重-たわみ関係の実測値と、付着応力-すべり関係に C-F-1、C-1 を模擬した梁断面模擬引抜き供試体から得られた実測モデルを用いた有限要素解析による計算値を図 7 に示す。また、A S R 劣化を生じた ASR-F-2、ASR-2 の実測値と解析値を図 8 に、鋼材腐食と ASR による複合劣化を生じた AC-F-2、AC-2 の実測値と解析値を図 9 に示す。なお、図中の S あり、S なしとはスターラップの有無を示す。

鋼材腐食による材料劣化を生じた R C はり部材の非線形有限要素解析を行う上で、腐食鉄筋の材料特性を評価し鉄筋とコンクリートの付着特性に島モデル、実測モデル、島モデルに付着強度比を乗じたモデルを適用した解析結果は、曲げ耐力を精度良く推定できることが確認された。また、梁断面模擬引抜き供試体とはり供試体の鉄筋の腐食状況等が同等であれば、梁断面模擬引抜き供試体から得られる付着応力-すべり関係をはり部材の解析に用いることによって、はり部材の曲げ変形を推定できると考えられる。

一方、ASRによる材料劣化を生じた RC はり部材に対して、非線形有限要素解析を行うためには、上述の腐食鉄筋の材料特性の評価や鉄筋とコンクリートの付着特性の評価に加えて、ASR膨張によって生じる部材内のケミカルプレストレス量の評価が必要であると考えられる。

さらに、鋼材腐食とASRによる複合劣化を生じたRCはり部材であっても、鋼材腐食による劣化が支配的であれば、鋼材腐食単独の劣化と同様に腐食鉄筋の材料特性の評価や鉄筋とコンクリートの付着特性の評価によって、曲げ耐力や変形挙動を精度良く評価することが可能である結果となった。

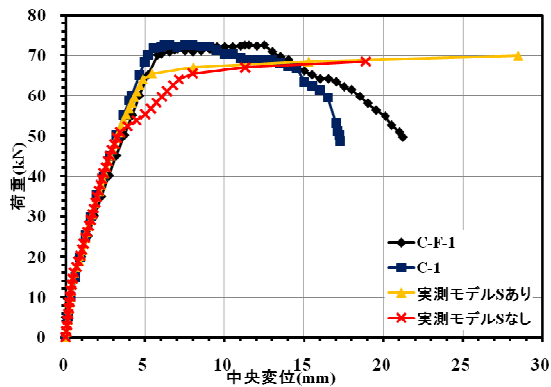


図7 供試体の断面形状 (単位: mm)

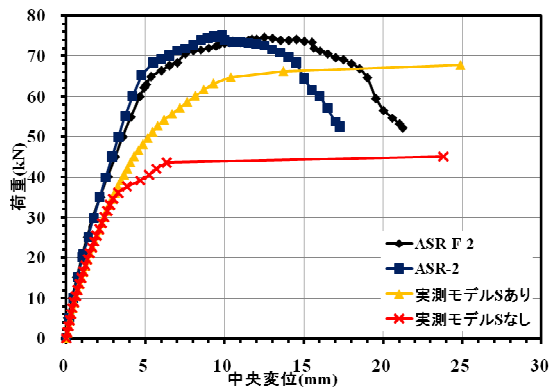


図8 供試体の断面形状 (単位: mm)

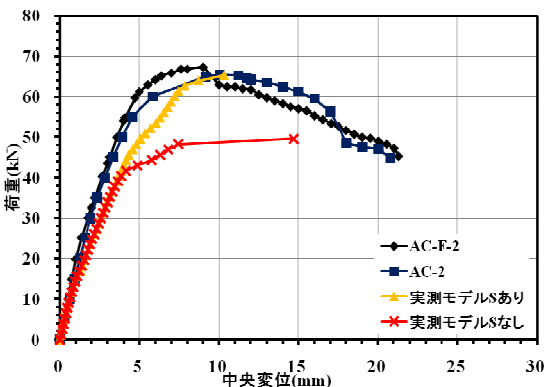


図9 供試体の断面形状 (単位: mm)

(3) PRCはり部材

・ 載荷前のひび割れ状況

載荷前の供試体のひび割れ状況を図10に示す。せん断補強筋の定着が健全であること、せん断補強筋比および導入プレストレス量が大きいことが、ASR膨張によるひび割れを抑制する効果があることが示された。

とりわけ、せん断補強筋比が大きい場合、ひび割れ抑制効果が高まる結果となった。

ASR単独の劣化を生じたAシリーズ供試体と比較すると、複合劣化したACシリーズ供試体は、全体のひび割れ密度が増加するとともに、ひび割れ幅1mm以上のひび割れが主鉄筋沿いに発生した。これは、ASR膨張および鋼材腐食により、主鉄筋に沿ったひび割れ幅が顕著に開口したものと考えられる。

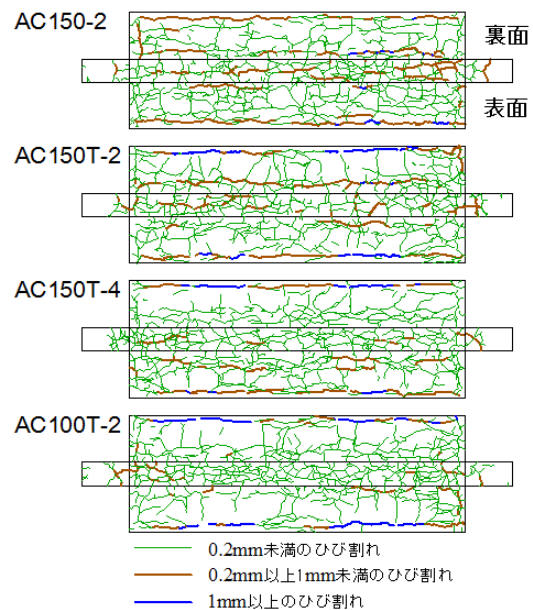


図10 載荷前ひび割れ図

・ 破壊状況

供試体の破壊状況を図11に示す。

健全なN150-2供試体は、荷重の増加とともに、せん断スパン内のひび割れが進展したが、曲げスパン内のコンクリートが圧壊し曲げ引張破壊に至った。一方、複合劣化を生じたACシリーズ供試体は、N150-2供試体と比較して、表面および裏面ともにせん断スパン内のひび割れの進展があまり顕著でなかった。これは、ASR膨張によるケミカルプレストレスの影響からコンクリート負担せん断力が向上したものと考えられる。

せん断補強筋が健全なAC150-2供試体は、せん断補強筋の定着不良を模擬したAC150T-2供試体と比較すると、せん断補強筋が健全なため、せん断補強筋が有効に機能し、せん断ひび割れの進展が顕著に表れなかったと考えられる。また、導入プレストレス量が大きいAC150T-4供試体で付着割裂ひび割

れが確認された。これは、導入プレストレス量が大きいことおよびせん断補強筋の引張側隅角部の切断による主鉄筋の拘束効果の低下に伴うダウエル作用の低下および鉄筋腐食による付着力の低下により、付着割裂ひび割れが発生しやすくなったと考えられる。

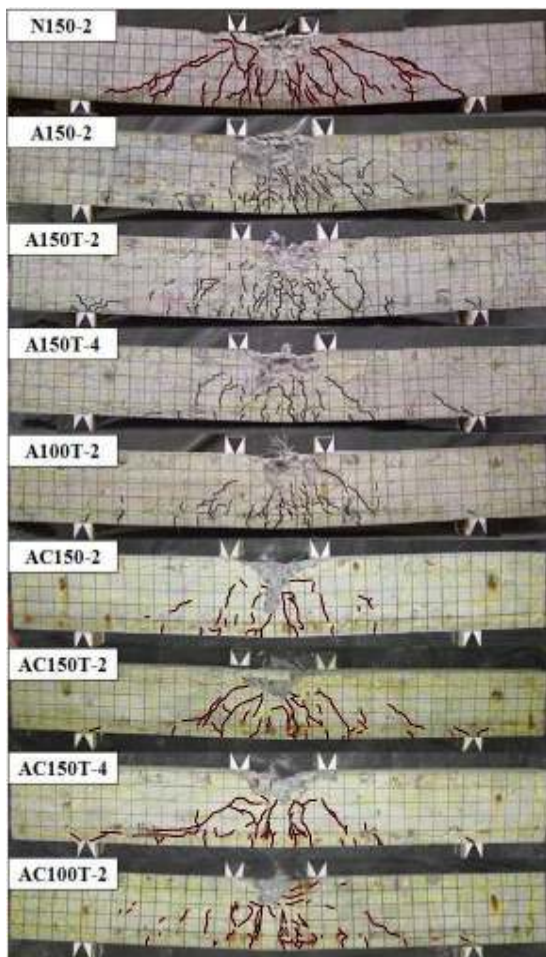


図 11 破壊状況

P R C はり部材の試験によって得られた主な結果を以下にまとめる。

・複合劣化を生じた供試体は、A S R 単独による劣化を生じた供試体と比較して、鋼材腐食の影響により、主鉄筋位置のひび割れ幅が大きくなった。

・複合劣化を生じた供試体は、A S R 単独による劣化を生じた供試体と比較して、曲げひび割れの分散性が低下したことや、せん断補強筋の腐食によってせん断補強筋の機能が低下する傾向が見られた。

・複合劣化を生じた供試体は、主鉄筋が腐食しているものの質量減少率が 1%程度であったため、曲げ破壊荷重にほとんど影響を及ぼさなかった。

・A S R 単独の劣化が生じた供試体では、せん断補強筋に定着不良が生じて、せん断ひび割れの発生位置によって、定着長が確保さ

れる場合には、せん断補強筋として機能するが、さらに、せん断補強筋の腐食による複合劣化が生じると付着力が低下し、せん断補強筋の機能が低下する場合がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 島津 祥徳、波多野 雄士、三方 康弘、井上 晋、A S R と鋼材腐食による複合劣化を生じた P R C はりの曲げせん断耐荷特性、コンクリート工学年次論文集、査読有り、Vol. 32、No. 1、pp. 1001-1006、2010

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 島津 祥徳、波多野 雄士、三方 康弘、井上 晋、A S R と鋼材腐食による複合劣化を生じた P R C はりの曲げせん断耐荷特性、土木学会第 65 回年次学術講演会、2010 年 9 月 3 日、北海道大学 (北海道)
- ② 上原 良介、王 佐、三方 康弘、井上 晋、鋼材腐食と A S R による複合劣化が生じた R C はりのひび割れ性状と曲げ耐荷特性、土木学会第 65 回年次学術講演会、2010 年 9 月 3 日、北海道大学 (北海道)
- ③ 島津 祥徳、波多野 雄士、三方 康弘、井上 晋、A S R と鋼材腐食による複合劣化を生じた P R C はりの曲げせん断耐荷特性、土木学会関西支部年次学術講演会、2010 年 5 月 22 日、京都大学 (京都府)
- ④ 王 佐、上原 良介、三方 康弘、井上 晋、鋼材腐食が R C はり部材の曲げ耐荷特性に及ぼす影響、土木学会関西支部年次学術講演会、2010 年 5 月 22 日、京都大学 (京都府)
- ⑤ 島津 祥徳、川口 千大、井上 晋、三方 康弘、鋼材腐食が R C はりの曲げ耐荷特性に及ぼす影響、土木学会第 64 回年次学術講演会、2009 年 9 月 3 日、福岡大学 (福岡県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三方 康弘 (MIKATA YASUHIRO)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号：60434784

(2) 研究協力者

島津 祥徳 (SHIMADU YOSHINORI)
大阪工業大学・工学研究科・博士前期課程
上原 良介 (UEHARA RYOUSUKE)
大阪工業大学・工学研究科・博士前期課程