

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)	
研究期間：2006～2008	
課題番号：18560454	
研究課題名 (和文)	腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力と破壊性状評価モデルの構築
研究課題名 (英文)	PREDICTION OF RESIDUAL STRENGTH AND FRACTURE MODE BASED ON CRACK WIDTH OF CONCRETE SURFACE FOR RC BEAM CORRODED REINFORCEMENT
研究代表者	
大下 英吉 (OSHITA HIDEKI)	
中央大学・理工学部・教授	
研究者番号：40253108	

研究成果の概要：

本研究では、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力と破壊性状評価を目的として、鉄筋腐食率に加えて腐食ひび割れ性状、付着応力性状、せん断補強筋、部材の形状寸法、腐食の不均一性について実験的検討を行った。また、得られた結果に基づき鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の曲げ耐荷性能ならびにせん断耐荷性能の簡易評価手法を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	600,000	4,100,000

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：耐久性、構造性能、鉄筋腐食、残存耐力、定着、付着応力

1. 研究開始当初の背景

各種劣化性状と材料或いは構造性能の関係に関する研究は、各方面で精力的に実施されている。特に、鉄筋腐食によるコンクリート部材の構造性能変化に関する研究はその典型であり、残存耐力の推定は現時点での構造性能を評価する他に、補修・補強時においては LCC を含めた適用工法の選定から事後の機能回復評価、構造物の将来に渡る劣化予測においても重要な位置付けにある。

鉄筋腐食による既存コンクリート構造物の残存耐力を詳細に評価するには、コンクリートのはつりによる鉄筋腐食率の調査、構造

細目や構造形式および調査された鉄筋腐食率に基づく小型試験体を用いた室内実験を実施することが最適である。しかしながら、この方法では、鉄筋腐食率の調査に際しては構造物に大きな損傷を及ぼすばかりか、耐力推定までに多くの時間と費用を要することとなり現実性に乏しい。したがって、簡便でかつ高精度な残存耐力推定手法の確立が望ましい。

戦後復興期或いは高度経済成長期を典型に、我が国の 20 世紀は社会資本の整備ならびに拡充の時代であり、大量のコンクリート構造物が建造された。なかでも、高度経済成

長期に建造されたコンクリート構造物の多くは建造後40年余りが経過し、「ストックメンテナンスの世紀」に位置付けられている。21世紀はこれらコンクリート構造物を維持管理することが重要な課題である。このような中で、既存コンクリート構造物の残存耐力を適切に評価することは、維持管理という観点においても非常に重要な位置付けにある。

簡便かつ高精度な残存耐力推定手法の確立する一手法として、本研究の全体構想では、既存コンクリート構造物の腐食ひび割れ幅、腐食ひび割れ発生領域、腐食ひび割れ先端位置等に代表されるコンクリートの腐食ひび割れ性状から構造細目や構造形式に応じた残存耐力を推定可能なモデルの構築を目指している。この全体構想の中で重要な課題は、鉄筋腐食率に基づく破壊性状評価モデルであり、本研究課題ではその全般を対象とする。

2. 研究の目的

破壊挙動や残存耐力性状は、鉄筋腐食率のみで一義的には決定されず、鉄筋腐食に起因した腐食ひび割れの存在、付着性能劣化が影響することは勿論のこと、鉄筋腐食の不均性や各種補強筋の影響、さらには部材の形状寸法についても検討する必要がある。

本研究においては、残存耐力性状に影響を及ぼし得るこれら因子について検討を重ね、破壊性状や残存耐力に及ぼす影響を定量的に評価した。そして、破壊性状や残存耐力といった残存耐荷性能を定量的に予測可能とする簡易手法を提案した。

3. 研究の方法

試験体は、図-1に示すように複鉄筋矩形断面である。その形状寸法及び実験パラメータは表-1に示す通りである。また主鉄筋の腐食率は0%から20%の範囲内とした。

ここで、腐食率とは試験前後の鉄筋の質量減少率である。なお、腐食前の鉄筋の質量は配筋の前に直接計測し、単位長さ当りの質量は一樣と仮定した。載荷試験終了後、試験体からは取り出した鉄筋は、20℃の10%濃度クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に質量を計測した。主鉄筋の腐食率の測定箇所は、主鉄筋を50mm間隔に切断し、一本あたり42ヶ所を対象とした。測定項目は、腐食ひび割れ性状、荷重、たわみ、鉄筋ひずみ、コンクリート縁ひずみ、ひび割れ幅及び荷重載荷に伴うひび割れ進展状況である。なお、鉄筋腐食は、電食方法による。

鉄筋の軸方向ひずみの測定にあたり、ひずみゲージを鉄筋表面へ貼り付けた場合、鉄筋腐食に伴いゲージは破損する。したがって、

その貼り付け位置は鉄筋内部とし、図-2に示すように鉄筋を軸方向に切断した後、その断面に2×4mmの溝を掘り、ひずみゲージ(検長2mm)を貼り付けた。ひずみゲージのリード線は、鉄筋内の溝を這わせて、端部から取り出した。その後、2対の切断された鉄筋をエポキシ樹脂接着剤により接合し一本の鉄筋とした。

載荷は、図-1に示すように載荷点間隔350mm、支点間距離1800mmとした静的4点曲げ載荷であり、載荷速度0.5mm/minとした変位制御により実施した。

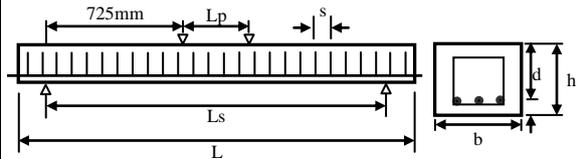


図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータ

試験体シリーズ	L (mm)	Ls (mm)	h (mm)	b (mm)	d (mm)	s (mm)	Lp (mm)	a (mm)	鉄筋比 (%)	鉄筋径	
										主鉄筋	せん断補強筋
L-S0	2100	1800	200	240	160	-	350	725	1.55	D16	D6
L-S80						80					
L-S160						160					
L-S240						240					
L-S2						定着筋のみ 端面プレート					
L-SF						定着筋のみ 端面プレート					
H-S0	260	210	220	-	-	-	-	0.86	-	-	
H-S110				110							
H-S2				定着筋のみ 端面プレート							
H-SF				定着筋のみ 端面プレート							

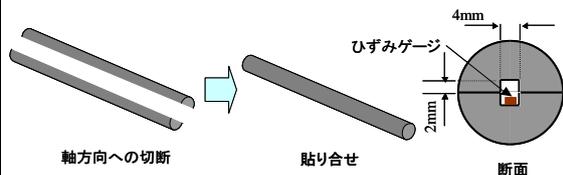


図-2 貼り合わせ鉄筋概要

4. 研究成果

(1) 主鉄筋の腐食の影響

図-3に主鉄筋のみを有するL-S0シリーズ腐食試験体の荷重と中央変位の関係を示す。いずれの腐食試験体においても、鉄筋が非腐食時に比べて耐力は大幅に低下するとともに、極めて脆性的な破壊性状を示した。このように鉄筋腐食はRC梁部材の構造性能に大きな影響を及ぼす。

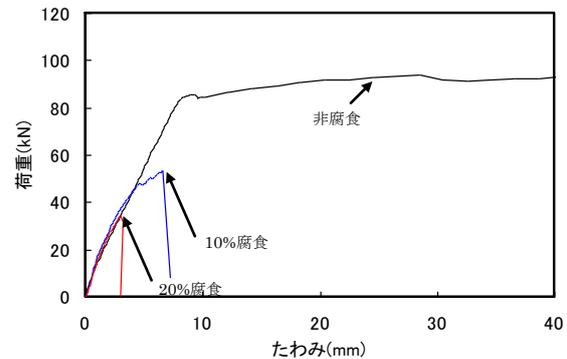


図-3 荷重と中央変位(L-S0)

(2)せん断補強筋の影響

図-4 にせん断補強筋を有する L-S80 シリーズ試験体の荷重と中央変位の関係を示す。腐食試験体は、L-S0 シリーズ腐食試験体に比べて残存耐力の低下は抑制され、変形性能についても大幅に改善されたことが確認される。

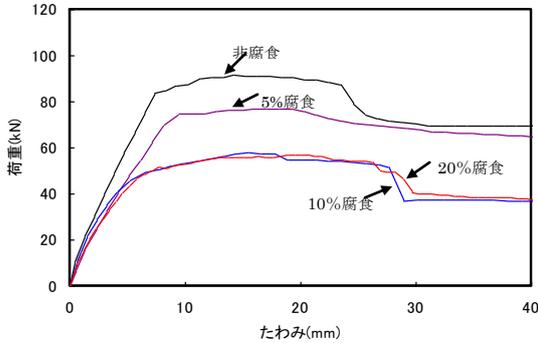


図-4 荷重と中央変位 (L-S80)

図-5 に一例として L-S0 シリーズと L-S80 シリーズにおける主鉄筋の平均腐食率が約 10% の試験体のひずみ分布性状を示すように、主鉄筋のみを有する試験体においては、荷重が 51kN の時点においてスパン全長にわたってひずみの一様化が生じたことに対して、せん断補強筋を有する試験体のひずみ分布は破壊に至るまで上に凸の放物線的な性状を示した。このことは、せん断補強筋の拘束により、腐食鉄筋とコンクリートの付着が保持されているとともに定着が十分に確保されていることによる。

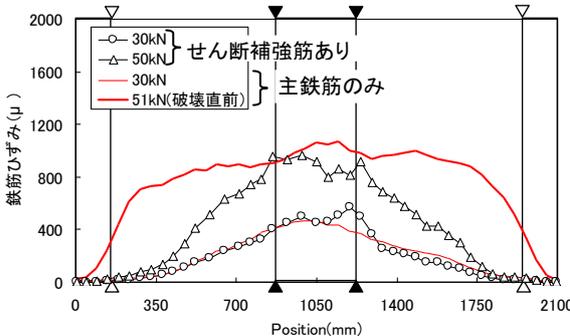


図-5 ひずみ分布性状 (腐食率 10%)

(3)形状寸法の影響

図-6 に主鉄筋のみを有する H-S0 シリーズ試験体の荷重と中央変位の関係を示す。H シリーズにおいても主鉄筋のみを有する腐食試験体の破壊性状は設計時の破壊モード (曲げ破壊) とは異なり、せん断あるいは付着割裂破壊を生じた。しかしながら、耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響は、L シリーズ (図-3 参照) と H シリーズでは大きく異なっている。まず、L シリーズ腐食試験体では、非腐食試験体に比べて耐力が大幅に低下し、極めて脆性的な破壊性状を示したことに対して、H シリーズ

腐食試験体に関しては、鉄筋腐食に伴う耐力の低下割合は L シリーズ腐食試験体に比べて小さく、破壊も延性的な挙動を示した。

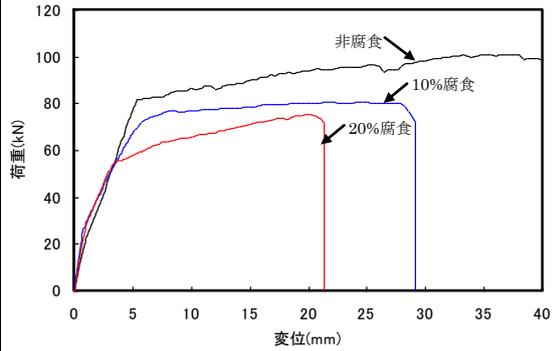


図-6 荷重と中央変位 (H-S0)

(4)腐食の不均一性の影響

図-7 は曲げ破壊を生じた試験体の耐力比と等曲げ区間の平均腐食率との関係を示したものである。ここで、耐力比とは各試験体の耐力を非腐食試験体の耐力で除することにより正規化した値である (腐食時の耐力/非腐食時の耐力)。同図より、各試験体の耐力比は主鉄筋の平均腐食率の増加とともにほぼ線形的に低下するとともに、耐力の低下割合は梁の寸法によらずほぼ同一である。すなわち、せん断スパンの付着が保持され、曲げ破壊を生じるような場合には、腐食に伴う主鉄筋の材料劣化が耐力に支配的な影響を及ぼし、耐力の低下割合は試験体の形状および寸法に依存しないと言える。

一方、図-7 には、曲げ理論から算出した耐力比を実線で示しており、算出には主鉄筋の断面減少および見かけの降伏応力の低下を考慮している。図-7 によれば、実測値は理論値と比較的に近い値を示しているが、理論値に比べて実測の耐力比が若干小さい値を示している。これは、腐食の不均一性によるものであり、作用モーメントの大きい等曲げ区間において主鉄筋の腐食の不均一性が生じた場合、その領域において変形が局所化し曲率が増大することにより、圧縮縁コンクリートが早期に圧壊するためであると考えられる。一般に実構造物においては、鉄筋腐食の不均一性はより顕著に生じることから、平均的な腐食率を用いた残存耐力評価は、現有性能を過大に評価する恐れがある。

そこで、本研究では鉄筋腐食の不均一性が残存耐力に及ぼす影響に関して、式(1)に示す偏差率を指標として評価することとした。

$$k = (\alpha - \alpha_{avg}) / \alpha_{avg} \quad (1)$$

ここで、 k : 偏差率、 α : 主鉄筋の局所的な平均腐食率、 α_{avg} : 主鉄筋全長の平均腐食率

である。

図-8 は図-7 に示した試験体における耐力比の実測値の曲げ理論からの偏差率（以下、耐力比偏差率と称す）と主鉄筋の最大偏差率との関係を示したものである。同図より、梁の形状寸法によらず、最大偏差率の増加にしたがって、耐力比偏差率は最大偏差率が 0.9 の時点からほぼ線形的に低下しており、鉄筋腐食の不均一性が残存耐力に影響を及ぼす偏差率のしきい値は 0.9 と定義できる。

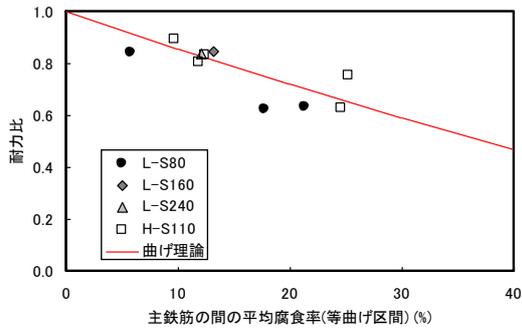


図-7 耐力比～平均腐食率

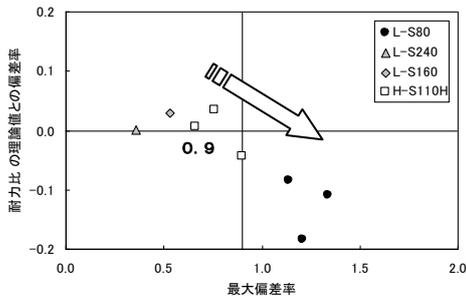


図-8 鉄筋腐食の不均一性の影響

(5) 定着性能の影響

曲げ破壊を生じた試験体の残存耐力は、主鉄筋の材料劣化が支配的であることを述べた。しかしながら、鉄筋腐食に伴い、破壊モードが曲げからせん断或いは付着割裂破壊に遷移した場合にはその限りではない。図-9 はせん断破壊或いは付着割裂破壊を生じた腐食試験体の単位幅当りの耐力と主鉄筋の平均腐食率の関係を示したものである。同図に示すように、全体的な傾向としては、いずれの試験体も平均腐食率の増加に伴い単位幅当りの耐力は低下している。しかしながら、耐力と主鉄筋の腐食率との間には一義的な関係は認められない。このことは、単に主鉄筋の平均腐食率のみで残存耐力を評価することはできないことを示唆している。これら試験体が破壊に至った要因は、せん断領域の付着劣化により定着領域まで荷重が伝達されたためである。すなわち、残存耐力に支配的な要因は、主鉄筋とコンクリートの付着応力性状であり、特に定着領域近傍の付着応力性状であるためである。

図-10 は主鉄筋の定着領域のみに補強筋（定着筋）を配筋した試験体の荷重と中央変

位の関係を示したものである。いずれの腐食率においても、定着筋を配筋した腐食試験体は、残存耐力の低下が大幅に抑制された。また、プレートにより、主鉄筋の拔出しを完全に抑止した場合には、変形性能も大幅に改善しており、定着性能が梁の残存耐荷性能に大きな影響を及ぼしていることは明らかである。

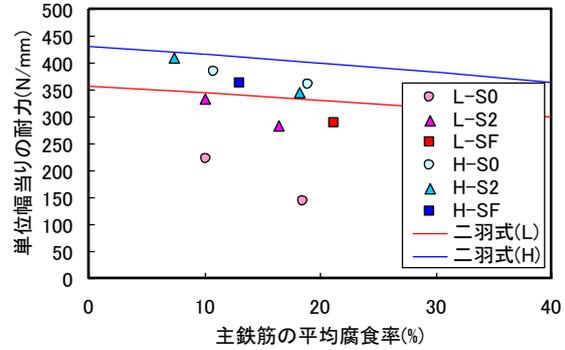


図-9 破壊モードが遷移した試験体の耐力

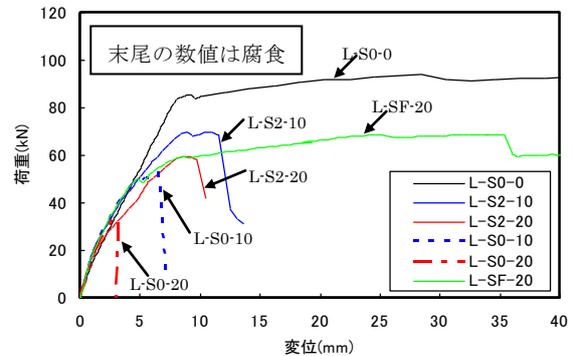


図-10 荷重と中央変位の関係（定着性能の影響）

(6) 破壊性状評価手法

鉄筋腐食を生じた RC 梁部材は設計時に想定した破壊モードから遷移する場合があることを述べた。そこで、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐荷機構を整理することとする。鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐荷機構の流れは図-11 のように表すことができる。鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の破壊モードは、主鉄筋の軸方向における腐食の不均一性（分岐 1）により異なり、本研究においては偏差率を導入して整理した。主鉄筋の腐食性状が均一な状態（偏差率 0.9 以下）では、せん断補強筋の有無により分岐が生じる（分岐 2）。せん断補強筋を有する場合、せん断補強筋の腐食率（分岐 3）が小さいと、せん断区間の付着劣化が抑制され、定着領域まで荷重が伝達されないことにより曲げ破壊を生じる。この際の曲げ耐力は、主鉄筋の材料劣化を加味した曲げ理論により評価可能である。一方、せん断補強筋の腐食率が大きいと、その拘束効果がなくなり、せん断補強筋を有しない場合と同様の破壊性状を示すこととなる。すなわち、せん断補強筋を有しない或

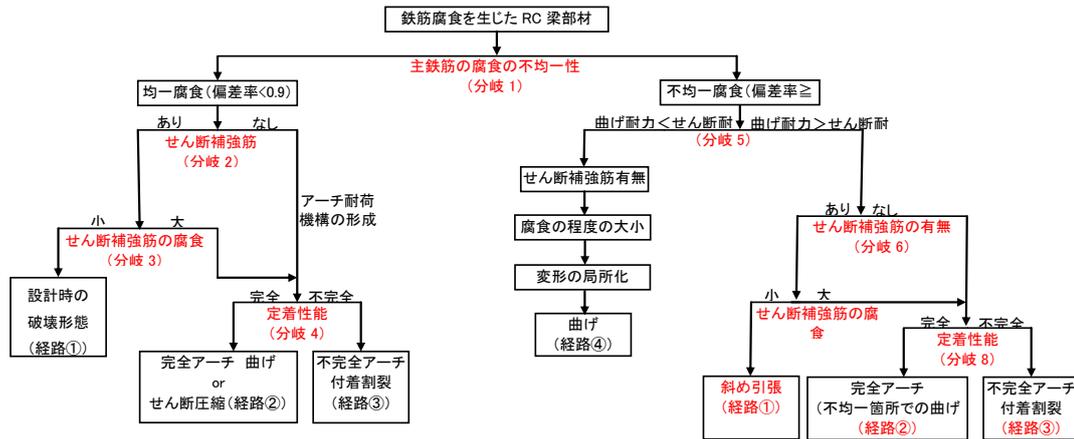


図-11 鉄筋腐食を生じたRC梁部材の耐荷機構の流れ

いは過度に腐食が生じた場合、定着領域まで荷重が伝達され、梁の耐荷機構はアーチ機構に移行することとなる。この際、定着性能(分岐 4)によって破壊形態が異なり、定着が完全な状態では完全なアーチ耐荷機構が形成されることに対して、定着が不完全な状態では不完全なアーチとなる。前者においては、鉄筋が降伏しなければせん断圧縮破壊となり、鉄筋降伏が生じれば曲げ破壊となる。この際の耐力は、アーチの形成により曲げ理論よりも大きくなり、その値は a/d に依存する。後者では、定着劣化の程度に応じた付着割裂破壊を生じる。

主鉄筋の腐食性状が不均一な状態(偏差率 0.9 以上)では、現有の曲げ耐力とせん断耐力の大小関係により分岐が生じる(分岐 5)。曲げ耐力がせん断耐力に比べて小さい場合、せん断補強筋の有無や腐食率によらず、腐食が過度に生じた箇所(偏差率 0.9 以上となる箇所)において変形が局在化し、曲げ破壊を生じる。仮に偏差率が 0.9 以上となる箇所が多く存在すると、等曲げ区間或いはその近傍において偏差率が最も大きい箇所での破壊が支配されることとなる。逆に、主鉄筋の不均一な腐食により曲げ耐力がせん断耐力に比べて大きくなるような試験体は、本研究の範囲内では存在せず、恐らく、曲げ耐力がせん断耐力に比べて小さくなる状態のみを対象としてもよいであろう。

(7) 曲げ耐力評価手法

前掲図-7 に示したように、残存曲げ耐力は主鉄筋の材料劣化を考慮した曲げ理論によりある程度評価可能であり、偏差率を指標とすることで、不均一性の影響もある程度評価することが可能である。

(8) せん断耐力評価手法

せん断領域の付着劣化に伴って主鉄筋の定着領域まで荷重が伝達され、せん断破壊或いは付着割裂破壊を生じるような場合、定着性能は残存耐力性状に極めて大きな影響を及ぼすこととなり、その影響は梁の寸法によっ

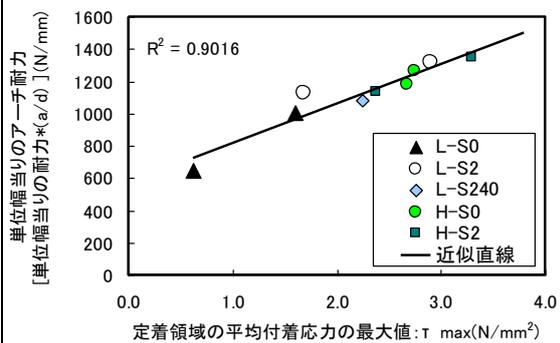


図-12 定着性能と耐力の関係 (a/d 考慮)

ても異なっていた。

単位幅当りの耐力にせん断スパン比を乗ずることにより、梁の寸法効果を考慮した耐力と定着領域の平均付着応力の最大値との関係を図-12 に示す。ここで、縦軸の物理的な意味はアーチによる単位幅当りの耐力である。また、定着領域の最大平均付着応力は、計測した鉄筋ひずみを用いて算出した値である。

定着領域の平均付着応力の最大値(定着性能)と a/d を考慮したせん断耐力は、試験体シリーズによらずほぼ一義的な関係を示しており、定着性能から残存せん断耐力を評価することが可能であること示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ①村上 祐貴、大下 英吉、鈴木 修一、堤 知明、鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究、土木学会論文集 E、Vol. 64、No. 4、pp.631-649、2008、査読有

- ②若林 泰光、村上 祐貴、大下 英吉、堤 知明、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断スパン比の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 30、No. 3、pp.727-732、2008、査読有
- ③村上 祐貴、山内 佑樹、堤 知明、大下 英吉、鉄筋腐食した RC 梁部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、pp.727-732、2006、査読有
- ④村上 祐貴、木下 哲秀、鈴木 修一、福本 幸成、大下 英吉、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究、コンクリート工学論文集、vol.17、No.1、pp.61-74、2006、査読有
- ⑤村上 祐貴、木下 哲秀、鈴木 修一、福本 幸成、大下 英吉、鉄筋腐食を生じた RC 梁の残存曲げ耐力性状に及ぼす重ね継手の影響評価に関する研究コンクリート工学論文集、vol.17、No.1、pp.75-88、2006、査読有
- ⑥福井 亨平、佐藤 優、鈴木 修一、大下 英吉、定着を有する腐食鉄筋とコンクリートの付着応力性状に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、pp.667-672、2006、査読有
- [学会発表] (計 10 件)
- ①今関 達也、村上 祐貴、大下 英吉、腐食ひび割れに基づく鉄筋腐食推定に関する研究、第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-55、2009 年 3 月 13 日
- ②池田 春樹、村上 祐貴、大下 英吉、鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着応力性状に関する研究、第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-58、2009 年 3 月 13 日
- ③川合 健司、村上 祐貴、大下 英吉、局所的に鉄筋腐食が進行した RC 梁部材の残存曲げ耐荷性能に及ぼす影響に関する研究、第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-67、2009 年 3 月 13 日
- ④董 衛、池田 春樹、村上 祐貴、大下 英吉：鉄筋腐食を生じた RC 梁の残存せん断耐荷性能に関する研究、第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-68、2009 年 3 月 13 日
- ⑤若林 泰光、村上 祐貴、大下 英吉、堤 知明、鉄筋腐食有する RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすかぶり厚の影響、第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-22、2008 年 3 月 10 日
- ⑥伊是名 亮太、大下 英吉、村上 祐貴、鈴木 修一、鉄筋腐食した RC 構造物の付着性能に及ぼすかぶり厚の影響、第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-25、2008 年 3 月 10 日
- ⑦村上 祐貴、大下 英吉、鈴木 修一、堤 知

明、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着構成則モデルの構築、第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会、V-26、2008 年 3 月 10 日

- ⑧鈴木 修一、村上 祐貴、大下 英吉、堤 知明、腐食鉄筋を有する RC 部材の残存耐力にせん断補強筋の及ぼす影響について、土木学会第 62 回年次学術講演会、V-38、2007 年 9 月 12 日
- ⑨村上 祐貴、鈴木 修一、大下 英吉、堤 知明、鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の定着性能に及ぼすせん断補強筋の影響、土木学会第 62 回年次学術講演会、V-310、2007 年 9 月 12 日
- ⑩鈴木 修一、村上 祐貴、大下 英吉、堤 知明、腐食鉄筋を有する RC 部材の耐力低下と耐力算定式の関係について、その 2、土木学会第 61 回年次学術講演会、V-48、2006 年 9 月 20 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大下 英吉 (OSHITA HIDEKI)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号：40253108

(2) 研究分担者

平野 廣和 (HIRANO HIROKAZU)
中央大学・総合政策学部・教授
研究者番号：80256023
平成 20 年度から連携研究者
石川 靖晃 (ISHIKAWA YASUAKI)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号：00257651
平成 20 年度から連携研究者