

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420442

研究課題名(和文) ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材のせん断耐力評価手法の構築

研究課題名(英文) Establishment of shear capacity evaluation method for RC beams affected 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じた橋梁では、鋼材腐食による安全性の低下が懸念され、さらに、鉄筋破断による構造物や部材の耐荷性能の低下による超過荷重の可能性があることから、補強が必要となる。そのような背景から、ASRと鋼材腐食による劣化が生じたRC部材の残存耐荷性能を把握することが重要である。

本研究では、ASRと鋼材腐食による劣化を生じた供試体のせん断耐力、作用せん断力と変形、ひび割れ状況を実験的に把握するとともに、有限要素解析により評価を行った。これらの結果から、ケミカルプレストレスを考慮した解析手法を用いることにより、最大作用せん断力や変形を予測することが可能であることが確認された。

研究成果の概要(英文)：The combined deterioration due to ASR and Corrosion are confirmed in some bridges. the safety of structures becomes questionable when the cross section areas of reinforcements are decreased due to corrosion. When many steel bars are fractured, strengthening is often required because of the problem of possible over-loading caused by the reduced performance of the member or structure due to decreased concrete strength and fracture of steel bars. In such a situation, it is important to clarify the residual performance of the loading capacity of RC members damaged by ASR and corrosion.

In this study, the shear capacity, the relationship between the applied shear force and the deflection, and the crack conditions in ASR and corrosion-affected specimens were evaluated experimentally and by using the finite element method. From these results, the calculated values that included the chemical prestress were able to predict the measured maximum shear force and the corresponding deflection.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：複合劣化 ASR 鋼材腐食 せん断 鉄筋破断

1. 研究開始当初の背景

1980年代に実施された建設省総合技術開発プロジェクトおよび日本コンクリート工学協会のアルカリ骨材反応調査研究委員会や2003年に実施されたASRの全国調査の結果、ASRによる劣化を受けた構造物は、我が国の幅広い地域に分布していることが指摘された。これらの構造物が沿岸部に建設されていれば、外部から塩化物イオンが供給され、ASRと塩害による複合劣化を生じることが懸念される。また、東日本高速道路(株)の調査では、劣化が確認された橋梁のうち、約40%の橋梁が凍結防止剤の散布による鋼材腐食が劣化の主要因であると判定され、そのうち、約10%の橋梁ではASRと鋼材腐食による複合劣化が確認された。以上のことから、ASRによる劣化を受けた構造物は海岸線からの距離にかかわらず、凍結防止剤の散布等により外部から塩化物イオンが供給され複合劣化が生じる可能性があると考えられる。

また、ASRにより劣化したコンクリート構造物において鉄筋の破断が確認されたことを受けて、土木学会コンクリート委員会アルカリ骨材反応対策小委員会では、鉄筋破断の原因究明に取り組んできた。その結果、鉄筋破断は、曲げ加工時における微細な亀裂の発生や水素脆化等の様々な要因が複合したものと推定されているが、ASRによるひび割れから水、酸素等の劣化因子が供給され、鋼材が腐食環境にあったことも要因の1つとして挙げられた。

以上のことから、ASRにより劣化したコンクリート構造物においては、ASRのひび割れにより水、酸素等の腐食因子が鋼材に供給されやすく、鋼材が腐食しやすい環境にあると言える。しかしながら、ASRや鋼材腐食等の個々の劣化に着目した研究は数多くされているものの、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じた部材の耐荷特性については、未だ不明な点が多い。

代表者は現在までにASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRC、PRCはりの曲げせん断耐荷特性について検討を行い、以下の点を確認した。

- ・ASR単独の劣化の場合は、ASRによる膨張の影響により、せん断補強筋が曲げ加工部で破断を生じていても、定着長が有効な範囲において、せん断補強筋として有効に機能するが、複合劣化を生じたはり部材は、せん断補強筋が腐食することにより、せん断補強筋の付着力が低下し、トラス機構が形成されにくくなり、せん断補強筋としての機能を果たさない場合があることを確認した。

- ・複合劣化を生じたはり部材では、ASRと鋼材腐食の双方の影響により、同一部材の他

の部分と比較して、主鉄筋位置のひび割れ幅が大きくなる場合があることが確認され、定着部の付着割裂ひび割れを伴ったせん断付着破壊に至る可能性があることを確認した。

したがって、ASRや鋼材腐食の単独の劣化に基づく研究成果のみでは、複合劣化を生じたコンクリート構造物の耐荷特性を評価する上で、十分な知見が得られていないと言える。とりわけ、せん断破壊は脆性的な破壊性状を示すことから、構造物は設計上、曲げ破壊先行型の破壊を呈することが要求されている。そのため、既設構造物の安全性を評価する場合や補強の必要性を判断する上で、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材のせん断耐力の評価手法を構築することが求められている。

2. 研究の目的

アルカリ骨材反応(以下、ASR)と鋼材腐食による複合劣化を生じた橋梁が数多く確認されているものの、様々な材料劣化が構造物の耐荷特性に及ぼす影響が不明であるのが現状である。また、既往の研究より、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材において、せん断補強筋としての機能が低下することやせん断付着破壊に至る可能性があることが報告されている。そこで、本研究では、以下の検討課題について取り組んだ。

- ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材のせん断耐荷特性に及ぼす影響因子について評価する。

- ASRや鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材のせん断耐力評価手法を検討する。

3. 研究の方法

平成26年度、平成27年度

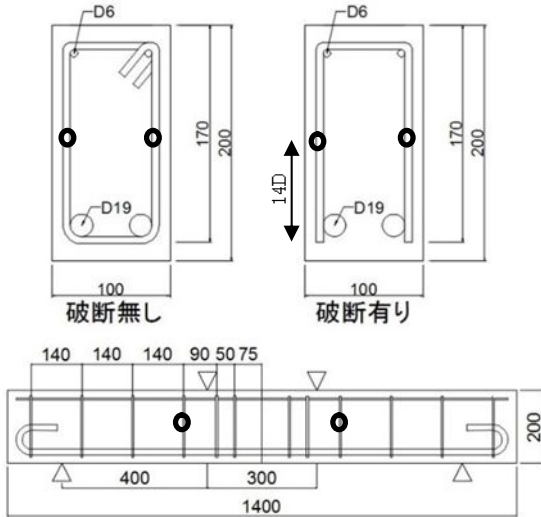
(1) はり供試体の作成および促進養生

ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり供試体は、ASRを生じさせるために反応性骨材を用いたRCはり部材を作成し、ASR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%)を行うとともに、打設時に塩化ナトリウムを添加する。鋼材腐食の方法として、1~2年の養生期間中は週5日塩水散布を行う。鉄筋ゲージは接着剤の劣化の影響の無い溶接ゲージを用いる。

実験要因は、劣化の種類として、ASRと鋼材腐食による複合劣化、ASR単独の劣化、劣化無し(健全)の3種類を選定した。さらに、せん断補強金の定着破断がせん断耐荷特性に及ぼす影響を検討するために、せん断補強筋として、隅角部の破断あり、破断無し(健全)の2種類を選定した。はり供試体の側面図・断面図を図.1に示す。はり供試体の種類を表.1に示す。

(2) 付着供試体の作成

代表者の既往の研究より、ケミカルプレストレスの影響により鉄筋とコンクリートの付着強度が向上する場合があることを確認している。そこで、付着割れひび割れを伴ったせん断付着破壊について、破壊メカニズムの解明と耐荷力の算定方法を検討するために、土木学会規準に準じた付着供試体に加えて、せん断補強筋による拘束効果を模擬した付着供試体（カンチレバー型引抜き供試体）を製作し、鉄筋とコンクリートの付着力を把握することを試みる。図.2にカンチレバー型引抜き供試体を示す。



○: スターラップひずみ
(単位: mm)

図.1 はり供試体の側面図・断面図

表.1 はり供試体の種類

名称	コンクリートの種類	せん断補強筋の破断	作製年度
N-1-14	健全	無し	2014
N-2-14		有り	
A-1-14	ASR	無し	
A-2-14		有り	
AC-1-14	ASR+鋼材腐食	無し	
AC-2-14		有り	
N-1-15	健全	無し	2015
N-2-15		有り	
A-1-15	ASR	無し	
A-2-15		有り	
AC-1-15	ASR+鋼材腐食	無し	
AC-2-15		有り	

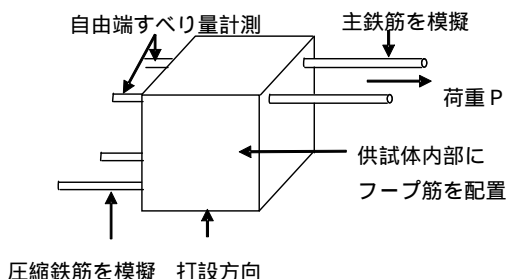


図.2 カンチレバー型引抜き供試体

平成 27 年度, 平成 28 年度

- ・ひび割れ状況の記録を行うとともに、コンタクトチップや鉄筋ゲージから膨張量を把握し、ASRによるケミカルプレストレス量を算定する。
- ・せん断補強筋の破断を模擬した供試体とせん断補強筋が健全な供試体の双方において、せん断補強筋に添付した溶接ゲージの計測値からせん断補強筋が負担するせん断耐力を算定する。
- ・せん断補強筋に作用する応力について、鉄筋とコンクリートの付着劣化を考慮した有限要素解析を行い、実験値と比較する。
- ・JSCE-G503 準拠した付着供試体によるコンクリートと鉄筋の付着応力を測定する。
- ・カンチレバー型引抜き供試体による測定値から、鉄筋とコンクリートの付着応力について検討する。

(3) 解析的検討

劣化により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化し、汎用有限要素解析プログラム DIANA Ver.9.6 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。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、カンチレバー型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（以下、塩害モデルと記す）の 2 種類を設定し、実験結果に対する付着応力-すべり関係モデルの整合性を検証することとした。

カンチレバー型引抜き供試体の実験結果から、下記の各点の平均値を算出しモデル（実測モデル）を設定した。

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

解析モデルにおいて、圧縮特性は破壊エネルギー G_c 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 Nakamura¹⁾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。

ケミカルプレストレス量の評価には上田²⁾らが提案する膨張予測モデルを用いた。

(4) 大型供試体への適用

せん断耐力の評価では、部材の寸法効果の影響を受けることから、テキサス大学で実施されたASRの単独劣化を生じた大型はり部材のせん断試験結果に対して、(3)で前述した有限要素解析を実施し、モデルの適用性を検討した。

なお、適用する供試体の寸法は、幅 635mm × 高さ 1067mm × 長さ 8433mm である。

4. 研究成果

(1) 実験結果

最大荷重と破壊状況

はり供試体の最大荷重と耐力計算値を表.2、荷重 - 中央変位関係を図.3、載荷試験後のひび割れ状況を図.4 に示す。なお、曲げ破壊荷重はファイバーモデル、せん断破壊荷重は示方書式を用いて算定した。すべての供試体において実測値が計算値を上回った。N-2-15 供試体はせん断ひび割れ発生後に圧縮斜材で荷重に抵抗していたものの、最終的にせん断補強筋の破断位置に割裂ひび割れが発生し、せん断引張破壊に至った。このことから、せん断補強筋が破断することにより、ひび割れ幅が破断位置において増大しトラス機構が形成しにくくなると考えられる。A-2-15, AC-2-15 供試体では主鉄筋位置に生じた劣化によるひび割れが載荷によるせん断ひび割れと繋がり、主鉄筋位置のひび割れ幅が増大した。AC-2-15 供試体は AC-1-15 供試体と比較して、最大荷重が小さくなり破壊形式が異なった。これは、同一のコンクリートを使用しているものの、せん断補強筋が破断しているため、せん断補強の機能が低下したこと、ケミカルプレストレス力が作用しにくくなったことから斜め引張破壊に至ったと考えられる。また、ASR のひび割れが生じている供試体では、斜めひび割れが ASR のひび割れに繋がる場合も見られた。このことから、せん断スパン内のせん断応力の伝達は ASR のひび割れが生じてない場合と比較して、複雑な経路となっていることが考えられる。

せん断補強筋ひずみ

荷重 - せん断補強筋ひずみ関係を図.5 に示す。せん断補強筋の降伏ひずみは 2250(μ) であるが N-1-15 供試体はひずみが 2000(μ) 程度に達しており、せん断ひび割れ発生後にせん断補強筋がせん断力を適切に負担した。一方、N-2-15 供試体はひずみが 1700(μ) 程度となり、せん断補強筋が健全な N-1-15 供試体と比較して、ひずみが小さくなった。また、A-1-15, AC-1-15 供試体は曲げ引張破壊に至ったため、N-1-15 供試体と比較して、ひずみが小さくなった。A-2-15, AC-2-15 供試体は斜め引張破壊に至ったが、せん断補強筋を破断させたため、ひずみが 1000(μ) に達しなかった。これは、せん断補強筋の端部から 14D の位置(図.1 参照)にひずみゲージを添付しているが、その位置では鉄筋の定着

表.2 はり供試体の最大荷重と耐力計算値

名称	最大荷重 Pu(kN)	曲げ* 破壊荷重 計算値 Pub(kN)	せん断* 破壊荷重 計算値 2Vy(kN)	せん断耐力* 計算値 (kN)			破壊形式
				Vy	Vs	Vc	
N-1-14	159	108.77	101.60	50.80	30.51	20.30	せん断圧縮
N-2-14	166	109.32	101.60	50.80	30.51	20.30	せん断引張
A-1-14	118	105.31	100.94	50.47	30.51	19.97	斜め引張
A-2-14	112	105.21	100.94	50.47	30.51	19.97	斜め引張
AC-1-14	146	111.25	101.96	50.98	30.51	20.48	斜め引張
AC-2-14	118	111.36	101.96	50.98	30.51	20.48	斜め引張
N-1-15	176	150.38	113.46	56.73	30.51	26.23	斜め引張
N-2-15	137	150.38	113.46	56.73	30.51	26.23	せん断引張
A-1-15	164	124.38	105.20	52.60	30.51	22.09	曲げ引張
A-2-15	144	125.61	105.20	52.60	30.51	22.09	斜め引張
AC-1-15	169	103.83	100.86	50.43	30.51	19.92	曲げ引張
AC-2-15	141	103.43	100.86	50.43	30.51	19.92	斜め引張

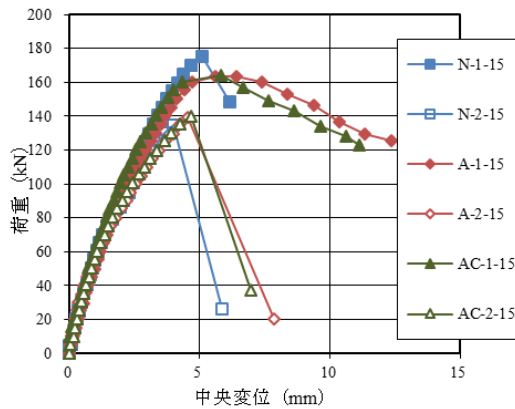
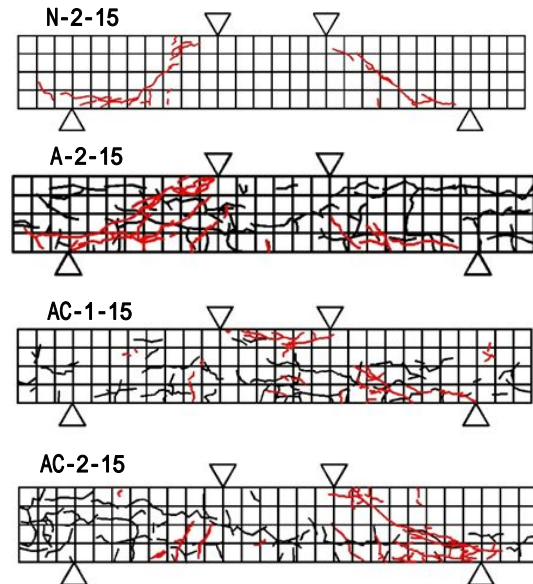


図.3 荷重-中央変位関係



—: 載荷前のひび割れ
—: 載荷によるひび割れ

図.4 載荷試験後のひび割れ状況

長が不足しており、せん断補強筋の機能が低下したと考えられる。

(2) 解析結果

複合劣化供試体への適用

代表的な事例として、せん断補強筋の破断を模擬し複合劣化を生じた AC-2-14 の荷重試験後のひび割れ状況を図.6 に示す。また、有限要素解析によるひび割れひずみを図.7 に示す。実験ではせん断補強筋の破断を模擬していることから、荷重によるひび割れは破断位置において、割裂ひび割れが生じるとともに、荷重点に向けて斜めひび割れが生じた。一方、解析によるひび割れひずみ図では、せん断補強筋の破断位置における割裂ひび割れと荷重点に向かってせん断ひび割れが進展している状況を再現している。

付着応力 - すべり関係にカンチレバー型引抜き供試体から得られた実測モデルを用いた荷重 - 中央変位関係を図.8 に示す。

実測モデルを用いた計算値は、作用荷重 80kN のせん断ひび割れの発生による剛性低下を生じた点を適切に評価し、作用荷重の最大値 118kN まで荷重と中央変位関係を精度良く推定できることを確認した。

今回の試験データは鋼材の腐食量が軽微であったが、上述の付着特性の評価に加えて、腐食鉄筋の弾性係数や降伏強度、引張強度を適切に評価すること、ASR膨張によるケミカルプレストレス量やコンクリートの圧縮強度、弾性係数を適切に評価することによって、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材のせん断耐荷特性と変形挙動が精度良く推定できることを確認した。

大型供試体への適用

ASRの単独劣化を生じた大型供試体に対して、3.(3)で前述した解析モデルを適用し、モデルの適用性を検討した。とくに、ケミカルプレストレスを考慮したモデルと考慮しないモデルによるケーススタディーを実施した。解析結果の一例として、作用せん断力と変形関係について、図.9 に示す。なお、鋼材腐食は発生していないことから、鉄筋とコンクリートの付着は完全付着としている。

ケミカルプレストレスを考慮していない計算値は初期剛性は正確に評価しているものの、作用せん断力の最大荷重は過小評価する結果となった。一方、ケミカルプレストレスを考慮した解析値は初期剛性については、部材のそりの影響により正確に評価できなかったが、作用せん断力の最大値とその変形量を精度良く評価するとともに、最大荷重以降の荷重低下挙動も推定出来ることを確認した。

以上のことから、3.(3)で前述したモデルを用いることにより、ASRを生じた大型はり部材に対しても、ASR膨張によるケミカルプレストレスを適切に考慮することにより、せん断耐力が適切に評価できることを確認

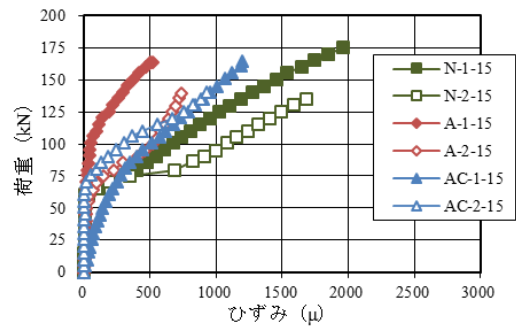
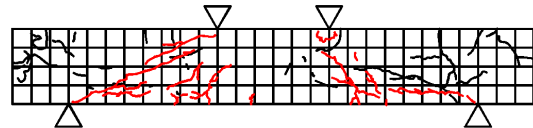


図.5 荷重 - せん断補強筋ひずみ



- : 荷重前のひび割れ
- : 荷重によるひび割れ

図.6 荷重試験後のひび割れ状況

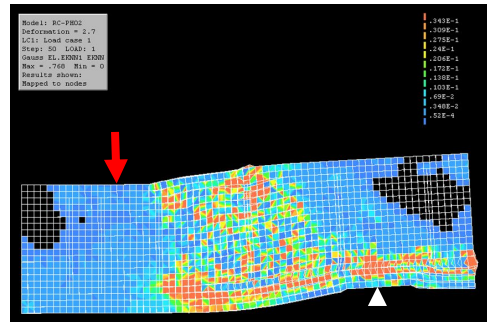


図.7 解析によるひび割れひずみ図

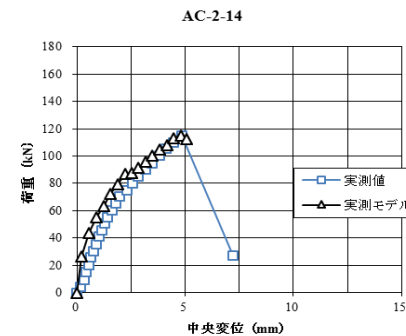


図.8 荷重 - 中央変位関係 (実測モデル)

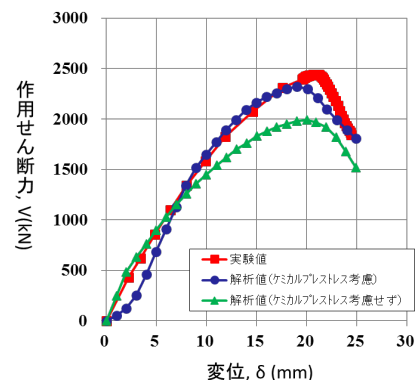


図.9 作用せん断力 - 変位関係

した。しかしながら、ケミカルプレストレス力の発生に伴う部材のそり量の評価について更なる検討が必要である。

4.3 まとめ

研究目的に対して本研究により得られた成果をまとめると以下のとおりである。

研究目的

ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材のせん断耐荷特性に及ぼす影響因子について評価する。

上述の目的に対して、実験結果から、ASR単独の劣化、ASRと鋼材腐食の複合劣化を生じた供試体において、せん断補強筋の定着部が破断している場合には、主鉄筋位置に生じた劣化によるひび割れが載荷によってさらに開口すること、せん断補強筋ひずみがあまり増加せず、せん断補強筋の機能が低下すること、せん断補強筋の拘束効果によるケミカルプレストレスの効果が低下する場合があると考えられる。また、大型供試体のせん断試験結果に同モデルを適用した結果、ASR膨張によるケミカルプレストレスがせん断耐荷特性に及ぼす影響が大きいことを確認した。

研究目的

ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材のせん断耐力評価手法を検討する。

上述の目的に対して、有限要素解析結果から、3.(3)に前述したモデルを用いて、鉄筋とコンクリートの付着特性、腐食鉄筋の強度特性、コンクリートの強度特性、ASR膨張によるケミカルプレストレス量を適切に評価することによって、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材のせん断耐荷特性と変形挙動が精度良く推定できることを確認した。

さらに、実物大スケールの大型供試体においても、ケミカルプレストレス量を適切に考慮することにより、せん断耐力が適切に評価できることを確認した。しかしながら、ケミカルプレストレス量が大きい場合には、ケミカルプレストレス力の発生に伴う部材のそりの影響により、初期剛性が適切に評価出来ない場合があり、そり量の評価について更なる検討が必要であることを確認した。

引用文献

Nakamura, H, and Higai, T: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001

上田 尚史, 澤部 純治, 中村 光, 国枝 稔: アルカリ骨材反応によるRC部材の膨張予測解析, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.532-548, (公社)土木学会 2007.10

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

的場 良太, 裏 泰樹, 三方 康弘, 麓 隆行, ASRと鋼材腐食による複合劣化が生じたRCはり部材の耐荷特性やひび割れ特性, コンクリート工学年次論文集, 査読有り, Vol.39, No.1, pp.925-930, 2017

〔学会発表〕(計4件)

的場 良太, 三方 康弘, 井上 晋, ASRと鋼材腐食による複合劣化が生じたRCはり部材のせん断耐荷特性, 土木学会関西支部年次学術講演会, V-17, 2017.5.27, 大阪工業大学(大阪府・大阪市)

Yasuhiro Mikata, Dean J. Deschenes, Oguzhan Bayrak, Effect of ASR on Shear Behavior of Large Scale RC Beams, Proceedings of the 11th International German Japanese Bridge Symposium, 054, 2016.8.31, Osaka Institute of Technology (Osaka, Japan)

Yasuhiro Mikata, Dean J. Deschenes, Oguzhan Bayrak, SHEAR CAPACITY OF LARGE-SCALE RC BEAMS AFFECTED BY ASR, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, Judged paper, 181, 2016.7.6, Maksoud Plaza Hotel (Sao Paulo, Brazil)

的場 良太, 三方 康弘, 井上 晋, ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材のせん断耐荷特性に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会 V-9, 2016.6.11, 立命館大学(滋賀県・草津市)

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

的場 良太 (MATOBA, RYOUTA)
大阪工業大学大学院・大学院生