

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：平成 22 年度～平成 24 年度

課題番号：22246059

 研究課題名（和文） アルカリシリカ反応による劣化を受けるコンクリート構造物の
維持管理シナリオの構築

 研究課題名（英文） Maintenance Scenario of Concrete Structures Affected by Alkali
Silica Reaction

研究代表者

宮川 豊章 (Miyagawa Toyoaki)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80093318

研究成果の概要（和文）：コンクリート構造物の劣化機構であるアルカリ骨材反応(以下、ASR)による劣化が見られる構造物の一部で過大な膨張による鉄筋破断の被害が報告された。本申請課題では、ASRにより劣化したコンクリート構造物について、耐荷性能を明らかにするとともに、鉄筋が破断した場合を含めた耐荷性能に問題が生じる状況下での補修・補強ならびにこれらの対策適用後の維持管理も含めた総合的な維持管理シナリオを検討した。

研究成果の概要（英文）：The fracture of reinforcing steels in concrete structures deteriorated by alkali silica reaction (ASR) has been reported. That may be attributed to the excessive expansion due to ASR. This study describes a load carrying capacity of concrete structures affected by ASR. The maintenance scenario, which can consider the remedial measures for the deteriorated structures and the maintenance after applying the remedial measures, was also proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
平成 23 年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
平成 24 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
年度			
年度			
総計	35,400,000	10,620,000	46,020,000

研究分野：工学・土木工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：アルカリシリカ反応，維持管理シナリオ，鉄筋破断，耐荷性能，補修・補強

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の劣化機構であるアルカリ骨材反応(以下、ASR)による劣化が見られる構造物の一部で過大な膨張による鉄筋の破断の被害が報告された。鉄筋コンクリート構造物の耐荷力の前提条件となる鉄筋における被害は、構造物の性能、とりわけ耐荷性能を考える上できわめて重要な問題である。したがって、劣化予測をもとに適用が検討されるべき補修・補強を含む維持管理対

策においては、いつ、どのような劣化状態になったとき、どの補修・補強工法を選定し、どのような効果がどれだけの期間保持できるか、といった維持管理のシナリオに関する解決すべき技術課題が多く残されている。

2. 研究の目的

そこで本研究課題では、ASRにより劣化したコンクリート構造物について、耐荷性能を明らかにするとともに、鉄筋が破断した場合

を含めた耐荷性能に問題が生じる状況下での補修・補強ならびにこれらの対策適用後の維持管理も含めた総合的な維持管理シナリオの作成を目的とした。

3. 研究の方法

(1) ASR 劣化コンクリートの力学特性に関する検討

反応性骨材として、細骨材および粗骨材を使用し、その混入割合が ASR 劣化コンクリートの力学特性に与える影響について、異なる膨張レベルにおいて圧縮試験によって明らかにすることとした。これらの関係を把握するため、各膨張レベルにおける載荷試験結果から、圧縮強度、弾性係数、最大応力時のひずみ、ポアソン比、限界応力、吸収エネルギー、応力-ひずみ曲線などの力学的パラメータなどを求めた。

(2) ASR 劣化コンクリートと鉄筋の付着特性

ASR 膨張に伴うコンクリートのひび割れについて、引抜き作用を受ける鉄筋に沿ったひび割れ、比較的方向性のない膨張ひび割れを模擬あるいは発生させたコンクリート中の鉄筋に対して引抜き試験を行い、付着強度や破壊形式を検討した。また、膨張ひび割れの幅あるいは鉄筋周囲のコンクリートの強度をもとに付着強度を推定することを検討した。

(3) ASR 劣化したはり部材の耐荷性能とその補強に関する検討

反応性骨材を用い、また主鉄筋およびせん断補強筋が破断している場合と破断していない場合を模擬した供試体を作製し、屋外曝露環境（曝露期間 1 年、3 年）で ASR を促進させた供試体に非破壊検査を行い、供試体間・供試体内における劣化状態を評価した。また、載荷試験を行い、劣化状態を考慮した上で力学的性能を評価した。さらに、ASR 劣化した RC はりの解析手法を検討するため、汎用コードを用いて、実験結果に対して 2 次元および 3 次元弾塑性 FEM 解析を適用した。

一方、ASR 劣化した供試体に、後施工型鉄筋または UFC パネル接着によるせん断補強を行い、その補強効果についても検討を行った。

(4) 磁気法による鉄筋破断の非破壊診断に関する検討

健全・亀裂・破断状態の鉄筋に対し、磁気法片面診断を適用した場合の測定結果のばらつき把握およびその原因の検討を行うとともに、測定値のばらつきを考慮した判断基準を作成し、実橋脚での計測データとの比較を行った。また、複数本の対象鉄筋に対して行う場合の診断指標の適用性の解明および診断の作業性向上を目的とし、鉄筋のピッチ、主鉄筋の有無、着磁終了位置（簡易な y 方向（鉄筋横断方向）に磁石ユニットをスライドさせる着磁方法を含む）を要因とした実

験および解析による検討を行った。

さらに、磁気法片面診断による鉄筋隅角部破断の判定では、現場では実験にはないいくつかの要因が原因で判定が難しくなることがある。考え得る影響要因のうち、診断鉄筋位置の測定誤差程度のずれに着目し、その判定への影響を検討した。この手法は鉄筋の径やかぶり等の要因による影響を受けるため、これらの情報を知っていることが診断の前提となる。それらの情報をより確かにするために、磁気法片面診断における磁束密度の測定結果からフィードバックし、鉄筋径およびかぶりを推定する方法について検討を行った。

(5) ASR 劣化コンクリートの補修とその耐久性に関する検討

NaCl を初期添加した反応性骨材含有コンクリートに丸鋼鉄筋を埋め込み、RC 供試体を作製した。このような供試体に対して、各種リチウム塩（LiOH, Li₂CO₃）含有電解液を用いて、通電処理を行った時の、供試体コンクリート中の各種イオン（Na⁺, K⁺, Li⁺, Cl⁻）濃度分布の変化と、コンクリートの膨張率経時変化を測定した。また、通電時の電解液温度が実験結果に与える影響についても、併せて検討した。

4. 研究成果

(1) ASR 劣化コンクリートの力学特性に関する検討

各種パラメータの算出元となった応力-ひずみ曲線には、下記の主な結果の特徴が認められる（図-1 参照）。各種パラメータから得られた主な成果を以下に示す。

反応性骨材が細骨材の場合には、膨張初期段階から強度低下が生じるとともに、圧縮強度の低下も反応性粗骨材のみの場合よりも大きく、骨材の混入形態が与える影響は大きいことが明らかとなった。

また、反応性骨材が細骨材である場合（粗骨材の両方が反応性の場合も含む）には、粗骨材のみが反応性であるものよりも、破壊が生じやすいことが明らかとなった。

さらに、弾性係数および最大応力時のひずみなど変形抵抗性に関する力学パラメータの結果から、変形特性に与える骨材の混入形態の影響は比較的軽微であったものの、粗骨材のみのものとは若干の相違が認められた。

骨材の種類によっても異なる可能性があること、さらには実構造物においては鉄筋等の拘束の影響を受けるため、力学的モデルの構築を行う際には、それらの影響も考慮する必要があるものの、適切なモデルの構築には（対象コンクリートの力学的評価）、対象とする構造物の反応が粗骨材であるのか、細骨材であるのかを見極めることが重要である。

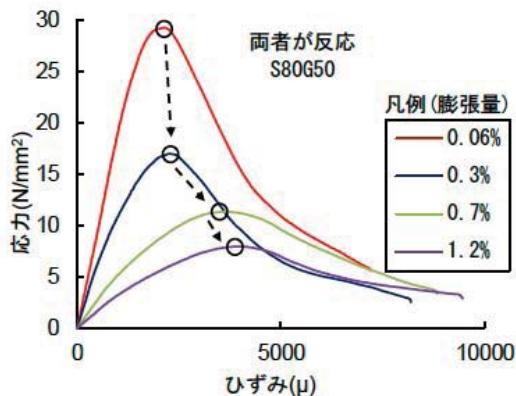
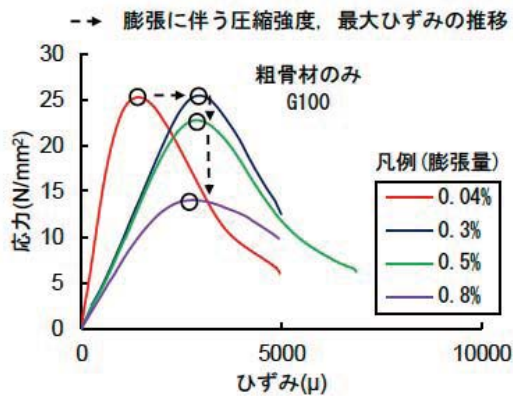


図1 ASRコンクリートの応力-ひずみ関係

(2) ASR劣化コンクリートと鉄筋の付着特性
鉄筋が降伏せずに付着割裂破壊に至る条件で、断面の鉄筋位置を通過して供試体表面に現れる鉄筋に沿った膨張ひび割れが存在すると、平均付着強度は大きく低下した。また、鉄筋周囲に生じた膨張ひび割れの影響を、その幅を膨張率に換算し、それに相当するコンクリートの引張強度の低下とみなすことによって、膨張ひび割れと平均付着強度の関係を表現することができた(図2参照)。

一方、鉄筋に沿ったひび割れのない軸方向膨張率0.13%までのASR膨張では、付着強度の大きな低下はなかった。図3に示すように、ASR膨張劣化によって超音波伝播速度が3,500m/sを下回った供試体では、付着強度の低下が若干大きくなるものが見られた。

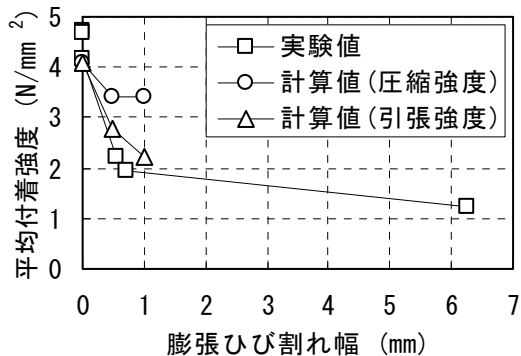


図2 膨張ひび割れ幅と付着強度の関係

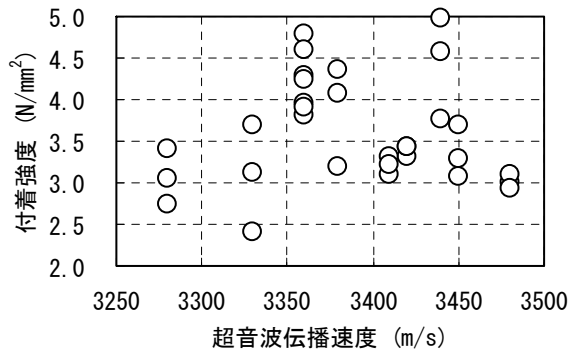


図3 超音波伝播速度と付着強度の関係

(3) ASR劣化したはり部材の耐荷性能とその補強に関する検討

ASR劣化したはり部材における膨張量は、部材軸直角方向、部材軸方向圧縮側、部材軸方向引張り側の順に大きい結果となった。せん断補強筋では、せん断補強筋量の少ないものの方が平均的に膨張量が大きい。また、ASRによる劣化状態のばらつきは大きい。ASR劣化によるコンクリートの静弾性係数の著しい低下を確認し、曲げ載荷時の降伏前の部材の剛性も低下した。ただし、ASR劣化によるせん断耐力の低下はみられないことを確認した。特に、本研究で用いたせん断補強筋量の少ないはり供試体では、コンクリートの膨張に伴い、ケミカルプレストレスが作用したことや、膨張で部材にそりが生じ、アーチが形成されたこと、載荷によりせん断ひび割れが導入されるであろう箇所に、ASR劣化によるひび割れが元々入っていたことなどの理由から、ASR劣化したことによりせん断耐力が向上し、せん断破壊から曲げ破壊に移行する場合もあった。しかし、最終的には望ましくない破壊形態である付着・割裂破壊で終局するものもあった。付着・割裂破壊は急激で脆性的な破壊形態であるだけでなく、維持管理をしていくという観点において望ましい破壊形態であるとはいえない。さらに、ASRが生じた供試体の中でも、引張鉄筋位置にASR先行ひび割れが生じた供試体では付着すべりが生じやすく、付着・割裂破壊で終局しやすいことがわかった。

ASRによる鉄筋の付着劣化モデル、また、ASRによるケミカルプレストレスを熱ひずみ導入による膨張を考慮することで、実験結果を概ね表現できることを明らかにした。

一方、引張鉄筋の端部定着の有無により、せん断耐力の低下は見られなかったが、ASRの影響で定着部における割裂破壊で終局し、その兆候も終局よりかなり前に生じた。加えて、端部の定着を確保していない供試体においてその兆候は早く見られた。後施工型せん断補強を実施したが、劣化によりコンクリートや部材の一体性が失われている時には、必

ずしも効果的でない場合もあった。また、UFC パネル接着によってせん断補強した供試体は、端部の定着の有無に関わらずその補強効果が確認された。

(4) 磁気法による鉄筋破断の非破壊診断に関する検討

破断箇所の片面からの着磁・測定による簡易的な手法でも複数の診断指標を用いて診断することで、従来の両面診断と同様に診断できる可能性が示された。また、複数本の鉄筋を対象とした際の着磁区間の短縮可能程度を明らかとした。さらに、FEM 解析により鉄筋ピッチの影響を明らかにし、正規化距離に基づいていくつかの診断指標の適用性を評価した。

一方、かぶりにずれがある場合は、補正ピーク値による診断の有効範囲が広いが、着磁開始位置にずれがある場合は、最大変化率は影響を受けにくく、有効であることがわかった。なお、磁気法による鉄筋破断の片面診断の過程で得られる磁束密度分布から鉄筋径・かぶりを十分な精度で推定できる可能性のある指標を提案した。

(5) ASR 劣化コンクリートの補修とその耐久性に関する検討

ASR 膨張抑制効果を期待して、リチウム塩含有電解液からコンクリート中に電気化学的にリチウムを供給することを試みた。この結果、電解液種類によらず、通電を行った供試体は、無通電の場合よりもコンクリートの膨張率が抑制され、特にリチウムの浸透が顕著な暴露面付近の膨張抑制効果が大きかった。また、LiOH を用いた場合には、リチウムの浸透深さが浅く、表面から 2cm 程度であったが、Li₂CO₃ の電解液で温度を 40℃とした場合にはリチウムの浸透が大きく、かぶり 43mm で配置された鉄筋近傍にもリチウムの集積が認められた。

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 9 件)

1. 小島太郎, 久保善司: 反応性粗骨材と細骨材の混入割合が ASR 劣化コンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, 2013.7 (掲載決定済)
2. Y., Kubo, H., Mori: Study on the mechanical properties of a confined concrete deteriorated by Alkali-aggregate reaction, Proc. of IABSE Conference in Rotterdam, 2013. 6 (CD-ROM)
3. 鈴木辰彦, 寺澤広基, 廣瀬誠, 服部篤史, 河野広隆: 磁気法片面診断による隅角部の複数本の鉄筋を対象とした破断検出の適用性と簡易化に関する研究, コンクリート構造物

の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 12 巻, pp. 375-380, 2012. 11.

4. 寺澤広基, 廣瀬誠, 服部篤史, 河野広隆, 宮川豊章: 磁気法片面診断による鉄筋破断非破壊検査の確率論的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 12 巻, pp. 477-482, 2012. 11.

5. Jian Wang and Hidenori Morikawa: Study on Shear Behavior of deteriorated RC Beams due to Alkali-Silica Reaction, Proceedings of the 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, CD-ROM, 2012. 8.

6. Y., Kubo and M., Nakata, : Effect of types of reactive aggregate on mechanical properties of concrete affected by alkali-silica reaction, Proc. Of 14th ICAAR, 2012. 6

7. 森川英典・松田豊樹・王健・川口哲生: ASR が生じた RC 部材のせん断耐荷性能および補強に関する研究, 建設工学研究所論文報告集, Vol. 53, pp. 57-78, 2011. 11.

8. 松田 豊樹・森川英典・王健: ASR が生じた RC 部材のせん断耐荷性能に関する実験的検討, 神戸大学工学研究科紀要, 第 3 号, 電子ジャーナル, 2011. 9.

9. 松田豊樹・森川英典・淵靖文・川口哲生: ASR が生じた RC はり部材のせん断耐荷機構と UFC パネル接着による補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 995-1000, 2010. 7.

[学会発表] (計 11 件)

1. 小島太郎, 久保善司: 反応性細骨材による ASR 膨張が生じたコンクリートの力学的特性, 土木学会中部支部研究発表会, pp383-389, 2013. 3
2. K. Kobayashi, T. Fukushima, K. Rokugo: Shear Strength of ASR-deteriorated RC Members and Shear Reinforcing Effect of Repair by Adding Rebar, Proceedings of FraMCoS-8 (VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures), Toledo, Spain, 4-7th, Mar. 2013
3. 福嶋孝啓, 小林孝一, 六郷恵哲: ASR 劣化した RC 部材のせん断耐荷性能および後施工型鉄筋によるせん断補強効果に関する検討, 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 12 巻, pp. 495-502, 2012. 11
4. Koki Terasawa, Makoto Hirose, Toshiyuki Ishikawa, Atsushi Hattori, Hirotaka Kawano and Toyoaki Miyagawa: Non-destructive Test for Rupture of Reinforcing Bar by Magnetic Flux Density

Method Applied to Single Surface, Proc. of the 9th German-Japanese Bridge Symposium, 2C_01, 2012. 9

5. 西原知彦, 森川英典, 王健: ASRが生じたコンクリート部材の劣化状態とせん断耐荷性状に関する基礎的検討, 土木学会第67回年次学術講演会概要集, 2012. 9.

6. 王健, 森川英典: ASRによるケミカルプレストレスがRC部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響に関する解析的検討, 平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2012. 6.

7. Takao Ueda and Akira Nanasawa: Effect of electrochemical penetration of lithium ions on concrete expansion due to ASR, Proc. of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2012. 5

8. 王建, 森川英典, 松田豊樹: CFRPシート補強したASR劣化RC部材のせん断耐荷機構に関する解析的評価, 土木学会第66回年次学術講演会概要集, 2011. 9.

9. 王健, 森川英典, 松田豊樹: CFRPシート補強したASR劣化RC部材のせん断耐荷機構に関する解析的評価, 平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2011. 6.

10. 松田豊樹, 森川英典, 澁靖文, 近藤克大, 川口哲生: ASRにより劣化したRCはりのせん断耐荷性状とUFCパネル接着による補強効果, 土木学会第65回年次学術講演会概要集, 2010. 9.

11. 松田豊樹, 森川英典, 澁靖文, 近藤克大, 川口哲生: ASRが生じたRCはり部材のせん断耐荷機構とUFCパネル接着による補強効果に関する検討, 平成22年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2010. 5.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

なし.

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮川 豊章 (MIYAGAWA TOYOAKI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80093318

(2)研究分担者

森川 英典 (MORIKAWA HIDENORI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70220043

上田 隆雄 (UEDA TAKAO)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授

研究者番号: 20284309

黒田 保 (KURODA TAMOTSU)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30263487

服部 篤史 (HATTORI ATSUSHI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30243067

小林 孝一 (KOBAYASHI KOICHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 20283624

久保 善司 (KUBO YOSHIMORI)

金沢大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 50324108

山本 貴士 (YAMAMOTO TAKASHI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70335199

(3)連携研究者

なし.