

コンクリート構造物における  
メンテナンスシステムの構築に関する研究

(研究課題番号 15206052)

平成15年度～平成16年度科学研究費補助金

(基盤研究(A)(1))

研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 宮川 豊章

(京都大学大学院工学研究科 教授)

コンクリート構造物における  
メンテナンスシステムの構築に関する研究

(研究課題番号 15206052)

平成 15 年度～平成 16 年度科学研究費補助金

(基盤研究(A)(1))

研究成果報告書

平成 17 年 3 月

研究代表者 宮 川 豊 章

(京都大学大学院工学研究科 教授)

# 目 次

1. 研究課題	1
2. 課題番号	1
3. 研究組織	1
4. 交付決定額(配分額)	1
5. 研究発表	2
5.1 学会誌等	2
5.2 口頭発表	4
5.3 出版物	6
6. 研究成果	7
6.1 研究概要	7
6.2 コンクリート構造物の戦略的マネジメントに向けて	43
6.3 中性化による鉄筋腐食の自然電位による評価に関する研究	48
6.4 NUMERICAL ANALYSIS OF CORROSION RATE OF STEEL BAR SUFFERING FROM MACRO-CELL CORROSION USING POLARIZATION RESISTANCE	54
6.5 塩害が RC 部材の耐震性に与える影響について	62
6.6 電気化学的手法によるフライアッシュ混和コンクリート中の鉄筋腐食評価	68
6.7 CFRP 複合電極を用いたデサリネーションに関する研究	74
6.8 硫酸によるコンクリートの劣化に関する実験的研究	80
6.9 コンクリートに添加した重金属の長期溶出挙動	86
6.10 STUDY ON PROFILE OF RELATIVE HUMIDITY IN CONCRETE STRUCTURE DETERIORATED BY ALKALI-SILICA REACTION	92

6.11 ASR コンクリートの力学的特性と劣化度評価について	100
6.12 FUNDAMENTAL STUDY ON REPAIR TECHNOLOGY OF REINFORCED CONCRETE	106
6.13 海洋環境において ASR を生じたコンクリート構造物の調査事例と新しい表面被覆 工法の開発	114
6.14 HEM を用いた PC 緊張材の中間定着と定着機構に関する研究	120
6.15 疲労ひび割れ発生後に炭素繊維シートで補強した一方向 RC 版 の疲労挙動について	126
6.16 STRENGTHENING OF RC BEAM DETERIORATED BY CORROSION OF REINFORCEMENTS USING CFRP SHEET	132
6.17 鉄筋腐食の生じた RC 部材のせん断耐荷特性の検討	138
6.18 塩害による鉄筋腐食を考慮したコンクリート橋の劣化進行予測と安全性評価	144
6.19 塩害劣化 RC 橋の安全性評価と外ケーブル補強の最適化に関する検討	152

### 1. 研究課題

コンクリート構造物におけるメンテナンスシステムの構築に関する研究

### 2. 課題番号

15206052

### 3. 研究組織

研究代表者	宮川 豊章	京都大学大学院 工学研究科 教授
研究分担者	原田 哲夫	長崎大学・工学部・教授
	森川 英典	神戸大学・工学部・助教授
	河合 研至	広島大学大学院・工学研究科・助教授
	野口 貴文	東京大学大学院・工学系研究科・助教授
	服部 篤史	京都大学大学院・工学研究科・助教授
	小林 孝一	中部大学・工学部・講師
	上田 隆雄	徳島大学・工学部・助教授
	久保 善司	金沢大学・工学部・助手
	山本 貴士	京都大学大学院・工学研究科・助手
	守分 敦郎	東亜建設工業(株)・技術研究所材料構造研究室・室長(研究職)

計 11名

### 4. 交付決定額(配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 15 年度	19,200	5,760	24,960
平成 16 年度	12,200	3,660	15,860
総計	31,400	9,420	40,820

## 5. 研究発表

### 5.1 学会誌等

- 1) 宮川豊章：コンクリート構造物の戦略的マネジメントに向けて，コンクリート工学，Vol.42, No.5, pp.4-8, 2004.5
- 2) 荒巻 智，松下創一郎，服部篤史，宮川豊章：内的塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中での塩分移動性状，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3巻，pp.297-304, 2003.10
- 3) 中川元宏，高木猛志，服部篤史，宮川豊章：中性化による鉄筋腐食の自然電位による評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第4巻，pp.5-10, 2004.10
- 4) 中川元宏，生田周史，高木猛志，服部篤史，宮川豊章：中性化を主因とする鉄筋腐食の自然電位による推定に関する実験的研究，土木学会論文集 V, No.781/V-66, pp.21-34, 2005.2
- 5) 小林孝一，志知裕幸，榊原吉正：RC 部材の耐震性に対する塩害劣化の影響に関する実験的研究，総合工学，第16巻，pp.91-98, 2004.3
- 6) 小林孝一，志知裕幸，榊原吉正：塩害が RC 部材の耐震性に与える影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 26, No. 1, pp.1059-1064, 2004.7
- 7) Koichi Kobayashi, Toyo Miyagawa: Numerical Analysis of Corrosion Rate of Steel Bar Suffering from Macro-Cell Corrosion using Polarization Resistance, Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions, Vol. 1, pp. 249-256, 2004.6
- 8) Koichi Kobayashi: An experimental study on the seismic behavior of RC member deteriorated by chloride induced corrosion, Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation (ACF), Vol. 1, pp. 85-93, 2004.10
- 9) 上田隆雄，七澤 章，横田 優，水口裕之：電気化学的手法によるフライアッシュ混和コンクリート中の鉄筋腐食評価，材料，Vol.52, No.9, pp.1055-1060, 2003.9
- 10) 長尾賢二，上田隆雄，芦田公伸，宮川豊章：混和材がデサリネーションによる脱塩効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp. 809-814, 2003.7
- 11) 上田隆雄，長尾賢二，芦田公伸：混和材を用いたセメント硬化体からのデサリネーションによる脱塩効果，セメント・コンクリート論文集，No. 57, pp. 501-507, 2003.12.
- 12) 上田隆雄，庄野 秀，芦田公伸，宮川豊章：CFRP 複合電極を用いたデサリネーションに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp. 1493-1498, 2003.7
- 13) 庄野 秀，吉田幸弘，上田隆雄，芦田公伸：CFRP 複合電極を用いたデサリネーションによる補強効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.

- 1731-1736, 2004.7
- 14) 河合研至, 賀谷剛志, 松村健司: モルタルからの重金属溶出評価試験方法, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.731-738, 2004.2
  - 15) 山地伸弥, 河合研至, 新見龍男: 硫酸によるコンクリートの劣化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1125-1130, 2004.7
  - 16) 河合研至, 新見龍男, 吉牟田卓: 流水作用がセメント硬化体の硫酸劣化に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.241-246, 2005.2
  - 17) 河合研至, 松村健司, 田野彰一: コンクリートに添加した重金属の長期溶出挙動, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.636-641, 2005.2
  - 18) 久保善司, 服部篤史, 宮川豊章: ASR コンクリートの力学的特性と劣化度評価について, コンクリート工学年次論文集, Vo.25, No.1, pp.1799-1804, 2003.7
  - 19) 久保善司, 山梨竜揮, 森 寛晃, 佐藤 彰: ASR 劣化コンクリートの AE 発生挙動に基づく劣化評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vo.26, No.1, pp.951-956, 2004.6
  - 20) Kubo, Y., Hira, T., Nomura, M., Torii, K.: Study on Profile of Relative Humidity in Concrete Structure Deteriorated by Alkali-silica Reaction, Proc. of 4th Int'l. Conf. on Concrete under Severe Conditions- Environment & Loading, Vol.2, pp.2018-2025, 2004.6
  - 21) Dishin Hanaoka, Shinnichi Miyazato, Atsuro Moriwake: Fundamental Study on Repair Technology of Reinforced Concrete, Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Structures against Hazards, December 2004
  - 22) 羽瀧貴士, 守分敦郎, 土屋武史, 鳥居和之: 海洋環境において ASR を生じたコンクリート構造物の調査事例と新しい表面被覆工法の開発, 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, 2004.10
  - 23) 網野貴彦, 守分敦郎, 羽瀧貴士, 井澤克彦: 導電性カーボンを使用したひび割れモニタリング技術, 検査技術, pp.31-37, 2004.1
  - 24) 網野貴彦, 石川正顕, 羽瀧貴士, 守分敦郎: 帯状センサーを用いたコンクリート構造物のメンテナンスシステムについて, 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 3 巻, pp.145-150, 2003.10
  - 25) 網野貴彦, 守分敦郎, 羽瀧貴士: 劣化予測パラメータの不確定性を考慮した塩化劣化構造物の耐久性評価に関する基礎的研究, 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.169-174, 2004.10
  - 26) 守分敦郎, 羽瀧貴士, 櫛田政雄: PET ボトルのリサイクル材でつくる短繊維補強コンクリート, セメント・コンクリート, No.694, pp.20-25, 2004.12
  - 27) 久保田慶太, 原田哲夫, 添田政司, 木村 浩: 定着法の違いが CFRP より線の疲労性状に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.955-960, 2003.7
  - 28) 平井陽一郎, 原田哲夫, 永藤政敏, 岳尾弘洋: 疲労ひび割れ発生後に炭素繊維シート

- で補強した一方向 RC 版の疲労挙動について, 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 3 巻, pp.335-340, 2003.10
- 29) 久保田慶太, 原田哲夫, 生田泰清, 木村 浩: HEM を用いた PC 緊張材の中間定着と定着機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.847-852, 2004.7
- 30) 久保田慶太, 原田哲夫, 山崎一之, 生田泰清: 定着用膨張材を用いた中間定着工法に関する基礎的研究と適用事例, 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.491-494, 2004.10
- 31) 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食が炭素繊維シート補強 RC 曲げ部材の耐荷特性に与える影響, 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 3 巻, pp.357-362, 2003.10
- 32) T. Yamamoto, A. Hattori, T. Miyagawa: Strengthening of RC Beam Deteriorated by Corrosion of Reinforcements using CFRP Sheet, Proc. of the 17th KKCNN Symposium on Civil Engineering, pp.139-144, 2004.12
- 33) 佐藤吉孝, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食の生じた RC 部材のせん断耐荷特性の検討, 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 4 巻, pp.33-38, 2004.10
- 34) 森川英典・森田祐介・川本祐子: 塩害による鉄筋腐食を考慮したコンクリート橋の劣化進行予測と安全性評価, 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 3 巻, pp.377-384, 2003.10
- 35) 森川英典: 劣化予測技術の現状と課題, コンクリート工学, Vol.42, No.5, pp.52-62, 2004.5
- 36) 岡本早夏・森川英典・菊田亮一: 塩害劣化 RC 橋の安全性評価と外ケーブル補強の最適化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1705-1710, 2004.7

## 5.2 口頭発表

- 1) 高木猛志, 中川元宏, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: かぶりコンクリートの要因がかぶりコンクリートでの電位降下に与える影響, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, V-093, pp.183-184, 2004.9
- 2) 生田周史, 中川元宏, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 各種要因がコンクリートの比抵抗に与える影響に関する実験的研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, V-095, pp.187-188, 2004.9
- 3) 小林孝一: 正負交番載荷を受ける塩害劣化 RC 部材の耐荷性能に関する基礎的研究, 土木学会第 58 回年次学術講演概要集 V, 2003.9
- 4) 庄野 秀, 上田隆雄, 芦田公伸, 宮川豊章: CFRP 複合電極を用いたデサリネーショ

- ンに関する検討, 平成 15 年度土木学会四国支部技術研究発表会, 2003
- 5) 長尾賢二, 上田隆雄, 芦田公伸, 宮川豊章: 細孔溶液中のイオン濃度を考慮した電気化学的脱塩効果の評価, 平成 15 年度土木学会四国支部技術研究発表会, 2003
  - 6) 庄野 秀, 上田隆雄, 芦田公伸: 炭素繊維を組込んだ陽極材を用いたデサリネーションに関する検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集 V, 2003
  - 7) 長尾賢二, 上田隆雄, 芦田公伸: 混和材を用いたセメント硬化体からの電気化学的脱塩効果, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集 V, 2003
  - 8) 吉田幸弘, 上田隆雄, 庄野 秀, 芦田公伸: CFRP 複合電極を用いたデサリネーションによる補修・補強効果, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 V, 2004
  - 9) 河合研至, 山地伸弥, 新見龍男: 流水作用を受けるコンクリートの硫酸侵食の進行について, 第 31 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.11-16, 2004.11
  - 10) 新見龍男, 山地伸弥, 河合研至: 硫酸によるコンクリート侵食に関する実験的検討, 第 55 回平成 15 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.457-458, 2003.5
  - 11) 河合研至, 賀谷剛志, 松村健司: セメント硬化体からの重金属溶出試験方法の一提案, 第 55 回平成 15 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.459-460, 2003.5
  - 12) 河合研至, 賀谷剛志, 松村健司: モルタルからの重金属溶出の長期予測方法, 第 55 回平成 15 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.461-462, 2003.5
  - 13) 河合研至, 新見龍男, 吉牟田卓: コンクリートの硫酸侵食に及ぼす流水の影響, 第 56 回平成 16 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.491-492, 2004.5
  - 14) 河合研至, 松村健司, 田野彰一: セメント硬化体中における重金属の固定形態, 第 56 回平成 16 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.493-494, 2004.5
  - 15) 河合研至, 新見龍男, 吉牟田卓: セメント硬化体の硫酸侵食に及ぼす流水作用の影響, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 V, pp.433-434, 2004.9
  - 16) 河合研至, 松村健司, 田野彰一: コンクリートからの重金属溶出における溶出評価, 第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.689-691, 2004.11
  - 17) 久保善司, 嶋瀬啓祐, 中島俊和, 鳥居和之: ASR 膨張力のコンクリート-鉄筋間のひずみ伝達機構, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集 V, pp.121-122, 2003.9
  - 18) 久保善司, 嶋瀬啓祐, 中島俊和, 鳥居和之: 膨張材を用いた ASR 膨張力のコンクリート鉄筋間の伝達機構について, 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 3 巻, pp.13-16, 2003.10
  - 19) 山梨竜揮, 小池正俊, 久保善司, 森 寛晃, 鳥居和之: アルカリ骨材反応により劣化したコンクリートの AE 発生挙動について, 平成 16 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.455-456, 2004.3
  - 20) 花岡大伸, 宮里心一, 矢野真義, 守分敦郎: 鉄筋コンクリートのマクロセル腐食に対する合理的な補修技術の確立に関する基礎的研究, 第 58 回セメント技術大会講演要旨, 2004.
  - 21) 花岡大伸, 宮里心一, 矢野真義, 守分敦郎: 腐食形態および塩分浸透深さを考慮した

鉄筋コンクリートの補修技術に関する基礎的研究第, 土木学会第 59 回年次学術講演会  
講演概要集 V, 2004.9

- 22) 網野貴彦, 羽瀨貴士, 守分敦郎, 長野善徳, 吉田拓史: ポリマーセメント系被覆材を用いた鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価に関する基礎的研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 V, pp.55-56, 2004.9
- 23) 土屋武史, 羽瀨貴士, 守分敦郎, 長野善徳: FRP 複合パネルを用いた表面被覆工法の基礎的検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 V, 2004.9
- 24) 菱沼頌夫, 十勝克行, 山田雅裕, 守分敦郎: 中性子水分計を用いた単位水量測定法の開発 その 1. 測定の原理および基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.609-610, 2003.9
- 25) 久保田慶太, 原田哲夫, 添田政司, 青井裕美: 定着法の違いが CFRP より線の疲労性状に及ぼす影響について, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集 V, 2003.9
- 26) 久保田慶太, 原田哲夫, 阪上直美, 生田泰清: 定着用膨張材を用いた中間定着工法の定着機構に関する研究, 平成 15 年度土木学会西部支部研究発表会, No.1, pp.534-535, 2004.3
- 27) 鈴木太朗, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食が炭素繊維シート横拘束コンクリートの圧縮耐荷特性に与える影響, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, V-264, pp.525-526, 2004.9
- 28) 川本祐子, 森川英典: 塩害による鉄筋腐食を考慮したコンクリート橋の劣化進行予測と安全性評価, 平成 15 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2003.5.
- 29) 菊田亮一, 森川英典: 外ケーブル工法による塩害劣化 RC 橋の最適補強の検討, 平成 15 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2003.5.
- 30) 小島大祐, 森川英典, 森田祐介: 実橋における変状を考慮した塩害劣化 RC 橋の劣化予測と安全性評価, 平成 16 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2004.5.
- 31) 岡本早夏, 森川英典: 塩害劣化 RC 橋の安全性評価と外ケーブル補強の最適化に関する検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, 2004.9.

### 5.3 出版物

なし。

## 6. 研究成果

### 6.1 研究概要

#### 6.1.1 コンクリート構造物のメンテナンスとシナリオデザイン

広義のセメントは古代エジプトやローマの時代から用いられていたが、近代セメントは19世紀にポルトランドセメントとして発明され、用いられ始めた。このポルトランドセメントを用いたコンクリート構造物は、適切に設計・施工・維持管理された場合、きわめて豊かな耐久性を発揮し、我が国においても、京都のアーチ橋、神戸のケーソンなど数々の“丈夫で美しく長持ち”した構造物の実績を有している。しかし、不幸にも適切には設計・施工・維持管理されなかった場合、きわめて高い耐久性を発揮できないことは言うまでもない。

不適切な設計・施工が行われた場合には、その悪影響を補うに足る適切な維持管理が要求される。高度経済成長時代に、劣悪な施工環境の結果建設されるに至った、耐久性が極めて乏しいコンクリート構造物群はその典型的な例である。維持管理技術者に、適切に設計・施工された場合には到底想像も出来ないような、多大の真摯な労力を要求している厳しい現実がある。

また、適切に設計・施工された場合であっても、供用年数の増加とともに、種々の劣化は生じ、次第に予算における維持管理の比率は増大する。19世紀から建設され始め、20世紀特に第2次世界大戦後の復興期から高度成長時代に建設された膨大なコンクリート構造物群は、このような維持管理対象の予備軍であり、今後その比重は次第に高くなっていくものと推定される。

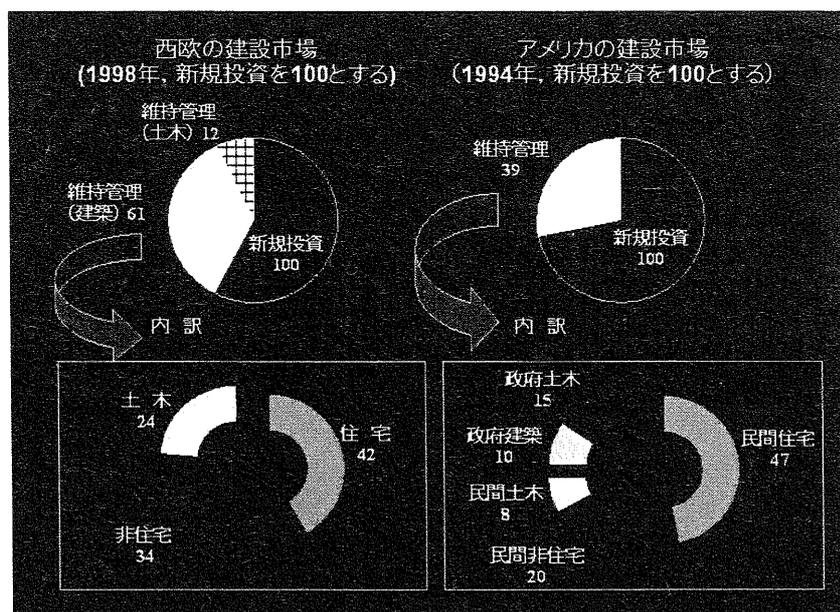


図 6.1.1 西欧諸国と米国における建設市場における投資の内訳

従来、土木構造物の寿命は、物理・化学的な劣化から定まる寿命よりも、容量や線形変更などに伴って要求される、機能から定まる寿命の方が短い場合が多く、維持管理はあまり重要視されてきてはいなかった嫌いがあった。スクラップ・アンド・ビルドの時代だったのである。しかし、供用年数の長期化および設計・施工において不適切であった構造物群のため、維持管理の重要性が極めて大きくなってきた。しかも、“持続可能な発展”が要求される時に至って、ますますその重要性は高まったと言ってよい。

図 6.1.1 に西欧諸国と米国における建設市場における投資の内訳を示す。西欧諸国においては新規投資の 7 割、米国においても 4 割が維持管理関係となっており、両地域ともに全投資額の約 3 割が維持管理関係となっている。これに対して我が国においては、維持管理対策の出遅れのためもあって、将来は全投資額の 7 割以上を占めるのではないかと推定され、憂慮されている。我が国においても新規投資はまだ必要であるためである。

このような事態に陥らないようにするため、維持管理投資の経年的な平準化を計る必要がある。このためには、コンクリート構造物の適切な生涯シナリオを提案した上で、戦略を持ったメンテナンスシステムを構築し、建設投資の先行きのバランスをとる必要があることが明らかとなった。

コンクリート構造物にとって適切なシナリオを基としたメンテナンスシステムの構築が待たれる。今こそ、シナリオデザインが要求されているのである。

(担当：京都大学・工学研究科・教授、宮川 豊章)

## 6.1.2 中性化とその複合劣化に関する評価と対策

### 1) 研究の目的

近年、高度経済成長期に大量に建設された鉄筋コンクリート（以下、「RC」と記す。）構造物の早期劣化による変状が、施設管理者にとって切実な問題となっている。これらの変状は、海砂の使用による塩害、高い水セメント比による中性化、およびこれらの複合劣化によるRC構造物中の鉄筋腐食により生じているものと考えられる。RC構造物においては、鉄筋腐食が性能を低下させる最大の要因であるため、腐食状態の的確な把握が重要である。

そこで、RC構造物中の鉄筋の腐食状態を調べるための非破壊検査手法に関する研究が行われており、自然電位法および分極抵抗法などの電気化学的手法の有用性が確認されている。このうち、自然電位法は、簡便に測定を行えるため、実務への適用性が高く、適用実績も多い。

一方で、自然電位の測定方法については規準化されているものの、鉄筋腐食の推定方法については、同規準にも具体的な定めはなく、検討の余地が残されている状態である。自然電位による鉄筋の腐食状態の推定については、ASTM基準が一般に用いられている。しかし、同基準は、塩害による鉄筋腐食事例に基づいて定められたものであり、特に、中性化による鉄筋腐食への適用性については、現状では明確ではなく、さらなる検討を必要とする状態である。

本論文は、自然電位法を中性化による鉄筋腐食状態の推定に適用するための課題を明らかにし、その課題について検討することにより、自然電位により中性化を主因とする鉄筋腐食状態を推定するための手法を提案することを目的としたものである。

そのため、自然電位法を中性化による鉄筋腐食状態の推定に適用するための課題について、従来より主な検討対象とされてきた塩害による鉄筋腐食との比較により明らかにした。さらに、その課題について検討を行い、自然電位法を中性化による鉄筋腐食状態の推定に適用した場合に、塩害による鉄筋腐食に適用した場合とは異なる傾向を示す原因を明らかにし、中性化による鉄筋腐食を自然電位により推定するための手法について提案した。

### 2) 研究内容

本研究では、自然電位法を、中性化による鉄筋腐食状態の推定に適用する場合における問題点および課題を明らかにするために、各種要因を有する促進中性化下の小型RC供試体を用いた実験を行った。

その結果、自然電位法を中性化による鉄筋腐食状態の推定に適用した場合、主に以下の点において、従来より主な検討対象とされてきた塩害による鉄筋腐食に適用した場合とは異なる傾向が認められた。

① 中性化による鉄筋腐食は、塩害による鉄筋腐食とは異なり、既往の基準および提案よりも大幅に貴な電位で生じる。この原因として、かぶりコンクリートにおける電位変

化が大きくなることが考えられる。

しかし、かぶりコンクリートでの電位変化を既往の提案により補正した場合においても、既往の基準等よりも貴な電位で腐食が生じている。したがって、中性化を主因とする鉄筋腐食が、既往の基準等よりも貴な電位で生じることには、鉄筋とコンクリートの界面における状態の相違による影響も含まれているものと考えられる。

② 自然電位とコンクリート抵抗との間には、相関関係が認められた。したがって、かぶりコンクリートにおける電位変化は、コンクリート抵抗による影響を大きく受けているものと考えられる。

これらの点が、自然電位法を中性化による鉄筋腐食状態の推定に適用する場合における問題点、つまり、具体的な検討課題であると考えた。

そこで、各種要因がコンクリート比抵抗に与える影響について検討するため、無筋供試体を用いた実験を行った。ここで、それぞれの要因が、コンクリートの比抵抗に与える影響については、既往の研究により明らかにされている部分もあるが、本章では、ある要因とコンクリート比抵抗の関係に、その他の要因が与える影響に着目して検討を行った。

その結果、含水率とコンクリート比抵抗の関係には、中性化による影響は認められないこと、塩分を含む場合には、コンクリート内部における比抵抗の差が小さくなること、および水セメント比と比抵抗の関係には、含水率および含有塩分量が大きな影響を与えることなどが認められた、自然電位と表面含水率およびコンクリート抵抗の関係と一致する傾向が認められた。したがって、コンクリート比抵抗は、かぶりコンクリートにおける電位変化に大きな影響を与えていることを明らかになった。

一方、各種要因を有する促進中性化下の小型RC供試体を用い、コンクリート表面での自然電位と併せて、鉄筋近傍での自然電位を測定した。

その結果、中性化による鉄筋腐食が、既往の基準および提案より貴な電位で生じる主な原因は、かぶりコンクリートでの電位変化によるものであることを明らかにした。また、鉄筋断面方向における腐食部と非腐食部間のマクロセル腐食が、かぶりコンクリートでの電位変化に影響を与えている可能性が高いことを示した。さらに、マクロセル腐食による電位変化の影響を考慮することで、かぶりコンクリートでの電位変化の影響を、要因によらない一定の関係にて示すことができる可能性があることを示した。

### 3) 研究の成果

本研究は、大気中に存在する全ての鉄筋コンクリート構造物で起こり得る、中性化による鉄筋腐食に着目し、塩害による鉄筋腐食状態の推定に対する適用性が明らかにされている自然電位法により、中性化による鉄筋腐食状態を推定するための手法を提案することを目的として研究を行ったものである。

- 1) 中性化による鉄筋腐食状態を既往の基準により推定した場合、腐食が生じていないと判定される自然電位で鉄筋が腐食し、実務上、危険側の判定となることを明らかにした。
- 2) 自然電位法を塩害による鉄筋腐食状態の推定に適用した場合との比較検討により、コン

クリートの電気抵抗が原因の一つであること、および、その他にも原因があることを明らかにするとともに、中性化による場合の自然電位には、水セメント比やかぶりが必要な影響を与えることを明らかにした。

3) 塩分を含まない場合には、コンクリート内部における比抵抗の変化が大きくなり、比抵抗の変化がかぶりコンクリートでの電位変化に大きな影響を与えていることを明らかにするとともに、コンクリート表面からの比抵抗の測定によりコンクリート内部における比抵抗の変化を把握することで、水セメント比やかぶり等の要因によらずに、かぶりコンクリートでの電位変化を推定できることを明らかにした。

4) 中性化により鉄筋が腐食している場合には、鉄筋横断面における腐食部と非腐食部の電位差によりかぶりコンクリートでの電位変化が大きくなることを明らかにするとともに、コンクリート表面からの測定により、電位差によるかぶりコンクリートでの電位変化を推定できることを明らかにした。

5) 以上の結果を基に、中性化による鉄筋腐食状態を自然電位法により推定するための手法について、提案を示した。

(担当：京都大学・工学研究科・助教授，服部 篤史)

### 6.1.3 塩害とその複合劣化に関する評価と対策(その1)

#### 1) 研究の目的

鉄筋コンクリート (RC) 構造は適切に設計, 施工, 維持管理された場合には, 極めて耐久性に富む構造形式であり, 我が国においても社会資本整備の中で重要な役割を果たしてきている。しかし, 近年その早期劣化が問題となっており, 早急な対策が求められているのが現状である。

このような状況の下で, 既存の構造物を適切に維持管理してゆく技術の確立が, ますます重要となっている。そこで, RC 構造の劣化要因の中でも比較的被害が大きな塩害を対象として, 劣化度を定量的に把握することを目的とした。その上で, まず, 塩化物イオンの作用により発生する鉄筋の腐食の速度を, 交流インピーダンス法を用いて把握することを試みた。部材の曲げひび割れに起因するマクロセル腐食が生じていても, 鋼材の腐食量を精度良く推定することを可能にした。

また, 構造物の維持管理を適切に行ない, 対策をたてる上では, 劣化の進行と性能の低下との関係を定量的に明らかにしておく必要がある。そこで, 塩害の進展が RC 部材の耐荷性能, 特に大変位が繰返し作用した場合の耐震性能に与える影響を明らかにし, 劣化度と耐震性能との定量的な関係を把握することを目指した。

#### 2) 研究内容

##### RC 部材中の鉄筋の腐食速度の評価

RC 構造が塩害によって劣化する際, マクロセル腐食が生じる場合には劣化はさらに激しくなる。そこでスパン中央部分に曲げひび割れを有する RC はり部材を対象とし, 外来塩化物イオンによる鉄筋腐食状況を実験的に検討することとした。また非破壊的に測定したコンクリート中の鋼材の見掛けの分極抵抗と自然電位を用いることにより, マクロセル腐食速度, あるいはマイクロセル腐食速度を解析的に求めた。

その結果, 水セメント比が 40% の場合には鉄筋はほぼひび割れの近傍のみにて発錆したのに対し, 水セメント比が 50%, 60% の場合には供試体全長にわたって発錆が見られた。また, 水セメント比が 40% の場合にはひび割れ幅と腐食量との間により相関関係が見られたが, 水セメント比が 50%, 60% の場合には相関は低かった。ただしその場合にもひび割れの有無の影響は認められた。

さらに交流インピーダンス法を用いた電位や分極抵抗の測定結果を用いたマクロセル腐食解析によれば, 水セメント比が 40% の場合にはひび割れ位置が常にマクロセル腐食のアノードとなっているが, 水セメント比が 50%, 60% の場合にはアノードの位置は一定しないが, その解析量とひび割れ幅との間にはよい相関関係があった。その上, マクロセル腐食が生じている場合にも, マクロセル腐食回路の形成による鉄筋の分極量を考慮することによって, 正しいマイクロセル腐食量を求めることができることを明らかにし, 腐食全体に対してマクロセル腐食とマイクロセル腐食がそれぞれ寄与する割合は, 水セメント比によっ

て異なることを明らかにした。

### RC 部材の塩害劣化による耐震性の低下

RC 構造における各種要因による劣化の進展に対しては各種モデルが提案され、劣化が耐荷性能に与える影響についても検討されているものの、定量的に明らかにされているとは言い難い。そこで、塩害劣化 RC 柱部材の劣化度と耐震性の関係を明らかにすることを目的とした。

引張鉄筋比 0.75%、せん断補強筋比 0.47%、曲げ区間の横拘束筋比 1.6%の RC はり部材を、塩水散布、あるいは塩分プレミクスにより劣化させ、正負交番載荷試験を実施した。その上で、鉄筋の腐食後の強度や腐食減量率、かぶりコンクリートの軸方向ひび割れ幅等と、耐荷性能との関係について検討を行なった。なお、ここで検討を行なったのは、腐食減量率 3.5%、ひび割れ幅 1.5mm までの範囲についてである。

その結果、腐食劣化の進展にともない、RC 部材の耐荷力、靱性率、累積消散エネルギーは低下し、特に、腐食減量 3.5%までの範囲において、耐震性能に密接に関係する累積消散エネルギーは当初の 50%程度まで低下した。これら指標のうち、耐荷力は鉄筋の引張強度の低下ともっとも良い関係にあったものの、終局までの累積消散エネルギーの低下は、かぶりコンクリートの腐食ひび割れ幅の拡大とよい関係にあった。これは、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリート間での離れの発生、あるいはかぶりコンクリートにおけるひび割れの発生により、載荷中のかぶりコンクリートの剥落が著しくなり、部材剛性が低下したためであると考えられる。また、劣化の進展にともない、RC 部材の破壊形式は曲げせん断破壊から鉄筋破断による破壊に移行した。

### 3) 研究の成果

マクロセル腐食の生じている供試体において、電気化学的手法を用いた非破壊検査の結果から、マクロセル腐食量とマイクロセル腐食量を求めることを目指し、ある程度その目標は達することができたと考えている。この成果は、RC 建造物の維持管理を行なう上で非常に有用であると考えられる。

一方、塩害により劣化した RC 部材の耐荷性能に関しては、鉄筋の腐食量、あるいは、かぶりコンクリートのひび割れ幅といった劣化指標と、耐震性能の関係を、半定量的に明らかにした。今後は部材の断面寸法やかぶりを要因とした検討を行ない、さらには、数値解析により橋脚等の大断面部材の検討を行なうこと等が必要となろう。その上で、塩害による劣化に対する現実的でシステムティックな対応策を構築することが望まれる。

(担当：中部大学・工学部・講師，小林 孝一)

## 6.1.4 塩害とその複合劣化に関する評価と対策(その2)

### 1) 研究の目的

鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化現象に対して、適切な維持管理を遂行していくためには、まず精度の良い劣化進行予測が必要になる。塩害による劣化進行予測については、他の劣化メカニズムに比べると研究が進んでいると言えるが、近年、利用が進んでいるフライアッシュや高炉スラグ微粉末を添加したコンクリートに関しては、基礎的なデータも不足しているのが現状である。そこで、フライアッシュを混和したコンクリートを対象として、塩害による内部鉄筋の腐食状況を電気化学的手法により評価することを試みた。また、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートに電気化学的補修工法を適用した時の補修効果について検討を行った。

塩害により劣化したコンクリート構造物の補修工法として脱塩工法が開発され、実構造物への適用実績も増加しつつあるが、この工法では構造物の力学的な性能向上は望めない。そこで、陽極システムに炭素繊維を組込んで、補強効果を付与した脱塩工法について、その補修効果および補強効果について検討を行った。

### 2) 研究内容

#### フライアッシュを混和したコンクリート中の鉄筋腐食評価

本研究では、特にセメント代替である内割り、または、細骨材代替である外割りでコンクリートにフライアッシュを混和したときのコンクリート中の鉄筋腐食挙動を、自然電位法あるいは分極抵抗法といった電気化学的非破壊検査手法を用いて評価することを試みた。

本研究結果をまとめると次のようになる。

(1) フライアッシュを内割りで混和したコンクリートの中酸化速度は、無混和の場合よりも大きくなったが、外割りの場合には中酸化速度の増大は見られなかった。

(2) フライアッシュを混和することにより、外来塩分のコンクリートへの浸透は抑制され、その効果は外割りで混和した場合に特に大きかった。

(3) フライアッシュを混和することにより、腐食速度指標の値は概ね抑制される傾向を示したが、フライアッシュを内割りで混和した場合の鉄筋腐食減量はフライアッシュ無混和の場合と同程度かそれ以上の値を示した。フライアッシュを外割りで混和した場合には鉄筋腐食減量も抑制され、良好な鉄筋防食効果が確認

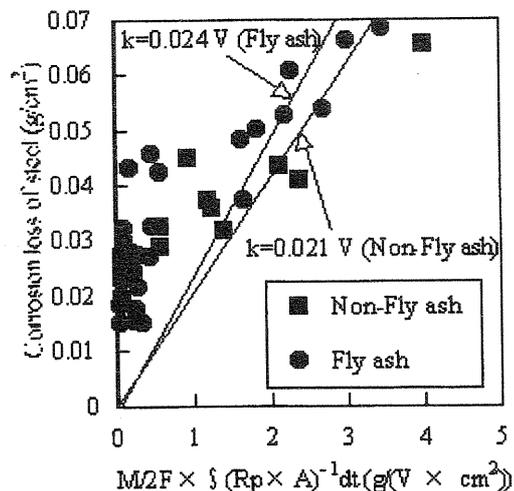


図 6.1.2 分極抵抗と腐食減量の相関性

された。

(4) 腐食量が比較的大きい場合にはフライアッシュの有無によらず統一的な  $k$  値で概ね腐食減量の評価が可能であった (図 6.1.2 参照) が、腐食量が比較的小さい場合には本研究で用いた手法による精度の良い腐食減量評価は困難であった。

#### 混和材を含むコンクリートに対する脱塩工法の適用

本研究では、混和材がデサリネーションによる補修効果に与える影響を明らかにすることを目的として、フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を混和した内在塩分を含むコンクリート供試体およびモルタル供試体を作製し、通電処理前後におけるコンクリート中の全塩分量分布やモルタルから高圧抽出した細孔溶液中の自由  $\text{Cl}^-$  濃度から、混和材を用いたセメント硬化体中における  $\text{Cl}^-$  の固定化性状ならびに電気泳動挙動を把握することとした。本研究で行った実験では、劣化状態として、内在塩分による塩害単独劣化に加えて、塩害と中性化の複合的な劣化作用を受ける場合についても想定し、併せて検討した。

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

##### (1) 内在塩分による塩害単独劣化

の条件では、混和材を用いない場合にはコンクリートからの脱塩率が供試体全体で 55% に達したのに対し、混和材を用いた場合には  $\text{Cl}^-$  抽出量が小さくなり、脱塩率も 35~40% 程度にとどまった。また、混和材を用いたモルタル細孔溶液中で測定された通電処理後の残存  $\text{Cl}^-$  濃度も無混和の場合に比べて大きくなった (図 6.1.3 上図参照)。

(2) 内在塩分による塩害と中性化の複合劣化条件では、中性化の影響で固定  $\text{Cl}^-$  の遊離が生じるため、モルタル細孔溶液中の自由  $\text{Cl}^-$  濃度が大きくなったが、通電処理により、これらの遊離  $\text{Cl}^-$  が優先的に除去されることで脱塩量も大きくなった (図 6.1.3 下図参照)。コンクリートからの脱塩率も中性化部分を中心に向上し、供試体全体の脱塩率は無混和の場合で 60%、混和材を用いたものでも 50~55% に達した。

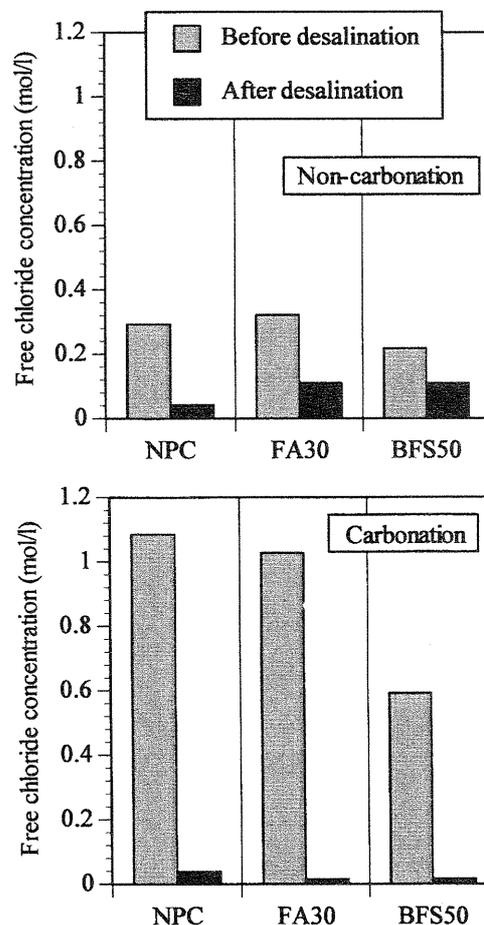


図 6.1.3 モルタル供試体から抽出した細孔溶液中の  $\text{Cl}^-$  濃度

### 接着型 CFRP 複合電極を用いた電気化学的リハビリテーション手法による効果

チタンメッシュと炭素繊維にアクリル樹脂を含浸させた CFRP 板を組合わせて作製した CFRP 複合電極 (図 6.1.4 参照) を用いて、電気化学的脱塩工法であるデサリネーションを適用した時の補強効果に関して実験的検討を行った。鉄筋コンクリート供試体に CFRP 複合電極を接着してデサリネーションを適用した後に CFRP 複合電極とコンクリートとの接着強度試験および静的曲げ載荷試験を行った。本研究から得られた結果を以下に要約する。

(1) 吸水率を変化させたアクリル樹脂を用いて CFRP 複合電極を供試体に接着し、これを陽極としてデサリネーションを適用したところ、所定の電流を供給するための電極間電位差は接着用アクリル樹脂の吸水率の違いに関わらずほぼ一定であり、安定した電流供給性能を示した。

(2) 8 週間の通電処理を適用した結果、コンクリートからの脱塩量は接着用アクリル樹脂の吸水率の違いに関わらずほぼ同程度であり、従来型のデサリネーションにより得られる脱塩効果ともほぼ同程度であった。また、供試体中の鉄筋自然電位からも十分な防食効果が得られていることがわかった。

(3) 通電処理後は無通電の場合と比較して、CFRP 複合電極とコンクリートとの接着強度が低下しており、この傾向は接着用アクリル樹脂の吸水率が小さいほど顕著に見られた。

(4) 無通電の場合には、CFRP 複合電極の接着により、RC はりの曲げ補強効果が見られたが、通電処理を行った場合には、接着用樹脂の吸水率が小さい場合に、得られる補強効果の低下が見られた (表 6.1.1 参照 (供試体名で、N は無通電、D は通電を表し、その後の数字は、接着用樹脂の吸水率を表す))。

本研究の結果、比較的大きな吸水率を有するアクリル樹脂を用いて CFRP 複合電極をコンクリート表面に接着することにより、補修効果と補強効果を同時に有するデサリネーションの適用可能性が示されたといえる。今後はより実構造物に近いケースで検討を行うとともに、補修効果および補強効果の持続性についても検討を進める予定である。

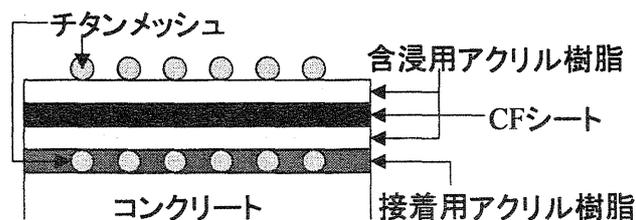


図 6.1.4 陽極システムの断面構成図

表 6.1.1 静的曲げ載荷試験結果

供試体名	平均最大荷重 (kN)	破壊モード
無補強 (NR)	28.6	曲げ
N5	35.3	せん断
N10	35.1	せん断
N20	33.1	せん断
D5	31.3	曲げ
D10	34.0	せん断
D20	35.5	せん断

### 3) 研究の成果

以上の検討成果から、フライアッシュを混和したコンクリートに対して、自然電位法や分極抵抗法といった電気化学的手法により、コンクリート中の鉄筋腐食状況を概ね把握することができることが分かった。また、細骨材代替としてフライアッシュを混和することにより、塩害や中性化に対する抵抗性の向上が可能であるものと考えられる。

フライアッシュや高炉スラグ微粉末といった混和材を用いたコンクリートが塩害で劣化した場合に、デサリネーションによる脱塩効果が低下する可能性が指摘された。鉄筋防食効果の観点から、より長期的に補修効果を検証していく必要がある。

炭素繊維による補強効果を付与した電気化学的リハビリテーション手法に関して、補修効果と補強効果が確認された。補強効果については、さらに実部材レベルでの検証が必要になるが、付加価値の高い高機能リハビリテーション手法が提案できた。

(担当：徳島大学・工学部・助教授，上田 隆雄)

## 6.1.5 化学的侵食とその複合劣化に関する評価と対策

### 1) 研究の目的

コンクリート構造物において、化学的侵食が最も顕在化し問題となるのは下水道関連施設である。下水道関連施設においては、下水中に含まれる含硫アミノ酸や硫酸塩から嫌気性微生物である硫酸塩還元細菌が硫化水素を生成し、下水中に溶存する硫化水素が下水の乱れ等によって気相部に放散された後、気相において好気性微生物である硫黄酸化細菌によって硫化水素が硫酸にまで酸化され、この硫酸がコンクリートを侵食する。いわゆる微生物腐食が進行する。

微生物腐食の進行が著しくなりやすい箇所では、気相に硫化水素が滞留し臭気を伴うため、構造物には一般的に気密な覆蓋がなされる。換言すれば、硫化水素濃度が高くなる場所であるため労働安全衛生上の問題もあり、容易には構造物内に人間が入りづらく、また換気がなされないためさらに微生物腐食が生じやすい環境が形成され、点検がなされないままに侵食が進行する結果となる。そのため、点検を行った段階では、すでに著しい劣化となっていることが少なくない。

微生物腐食に代表される硫酸侵食に限らず、酸性劣化では一般に劣化の進行は $\sqrt{t}$ 則に従うとされている。すなわち、侵食の深さは酸にさらされる時間の平方根に比例して大きくなるとされる。これは、酸がコンクリートを表面から侵食していく際に、劣化生成物が表面に生成されていくため、コンクリート内部への酸の浸透はこの劣化生成物内を拡散して起こり、この拡散が律速となって劣化が進行するためである。既往の研究報告も、これを裏付ける結果となっている。現在のコンクリート標準示方書〔維持管理編〕における化学的侵食でも、劣化の進行予測としてこの $\sqrt{t}$ 則を採用している。

上記の研究報告等においては、供試体を酸性溶液の中に浸せきして実験が行われているが、下水関連施設等の現場では、コンクリートに接する酸性溶液には下水等の流れが伴っている。構造物の天井部などで生じる微生物腐食では、上記の酸性劣化のメカニズムが適用できることも考えられるが、構造物の側面など下水との接触がある箇所においては、下水の流れに伴うせん断力が腐食生成物を取り去り、酸性劣化を著しく促進させることが予想される。すなわち、上記の $\sqrt{t}$ 則よりも早く酸性劣化が進行することが懸念される。

そこで本研究では、供試体を浸せきする硫酸溶液に流水作用を加え、流水作用を受けるコンクリートに生じる酸性劣化について実験的検討を行った。

### 2) 研究内容

#### 研究概要

実験には $\phi 150 \times 300 \text{mm}$ のコンクリート円柱供試体を使用した。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、混和材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームを使用した。細骨材、粗骨材には、それぞれ砕砂、砕石を使用した。供試体の水結合材比は、0.35、0.50、0.65とし、混和材の置換率に関しては、高炉スラグ微粉末で30%、

フライアッシュで 30%, 45%, 60%, シリカフュームで 15%とした。これらの供試体を打設し材齢 1 日で脱型後、所定の期間、水中養生を行った。

実験に供する供試体は同一材齢で比較するのではなく、普通ポルトランドセメントを用いた供試体の同一水結合材比における材齢 28 日圧縮強度とほぼ同一の圧縮強度を有する材齢で比較することとした。すなわち、水結合材比 35%においては、シリカフューム 15%置換供試体は材齢 14 日で、水結合材比 50%においては、高炉スラグ微粉末 30%置換供試体は材齢 42 日、フライアッシュ 30%置換、45%置換、60%置換供試体はそれぞれ材齢 91 日、188 日、396 日で、水結合材比 65%においては、高炉スラグ微粉末 30%置換供試体は材齢 42 日、フライアッシュ 30%置換供試体は材齢 417 日で実験に供した。これは、同一材齢での比較では、混和材置換供試体の結果が、シリカフュームを用いた場合を除いて劣ることとなることは明白であり、硬化体の骨格構造がある程度同一となった材齢における比較を行うべきとの判断に基づくものである。そのため、本来ならば、同一細孔構造を有する供試体によって比較を行うべきであるが、同一細孔構造となる材齢を逐次検討していくことは容易ではないため、圧縮強度を可能な限り同一とすることによって、細孔構造についてもある程度の同一性は保証されるものとみなすこととした。

所定の材齢に達した供試体は、側面のみから侵食するよう上下端面を耐酸性樹脂（アクリロイル変性アクリル樹脂系ライニング材）でコーティングした後、硫酸溶液に浸せきした。硫酸濃度は 2.0mol/L, 1.0mol/L, 0.1mol/L の 3 種類とした。現実にコンクリート構造物が接触する酸濃度よりは極めて高い濃度であるが、促進試験を実施するために上記の濃度に設定した。浸せき方法は、静水条件と流水条件の 2 種類である。ただし、静水条件は硫酸濃度 2.0mol/L についてのみ実施した。静水条件とは、供試体をそれぞれの濃度を有する硫酸溶液中に浸せきし静置するものであり、流水条件とは、それぞれの濃度を有する硫酸溶液をポンプを用いて循環させている中に供試体を静置するものである。ポンプの吐出量は、槽内の硫酸溶液 200L に対して 3L/min となっている。それぞれの濃度の硫酸溶液は、実験期間中に pH メーターを用いてモニタリングし、pH 値が初期の値と常に同一となるよう、適宜硫酸を添加した。

静水条件、流水条件に浸せきした供試体については、1 週間ごとに侵食深さの測定を行い、また所定の浸せき期間を経た供試体については回収し硫酸イオン含有量の定量を行った。侵食深さの測定では、測定精度 0.05mm のノギスを用い、供試体中央部の 2 箇所を測定して、その平均値を侵食深さとした。なお、ここでは、硫酸との反応により初期表面から剥落、欠損した深さを侵食深さと定義しており、腐食生成物が供試体表面に残存している場合には、これを供試体の一部とみなした。硫酸イオン含有量の測定では、回収した供試体を表面から 5mm ずつオイルカッターを用いて切断し、微粉碎した後、2N 硝酸溶液に溶解させ、ろ過後のろ液中の硫酸イオン濃度をイオンクロマトグラフィーを用いて測定した。

## 結果および考察

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートについて硫酸濃度 2.0mol/L における流

水条件と静水条件を比較したとき、いずれの水セメント比においても、浸せき期間約 10 週まではほぼ同じ侵食深さを示すものの、それ以降、明らかに流水条件の方が静水条件と比較して侵食深さは大きくなる結果となった。また、このときの侵食深さの増加は、ほぼ時間に比例するものであった。静水条件に浸せきした供試体表面では、いずれの水セメント比においても腐食生成物が剥落せずに付着しているのが確認されたのに対して、流水条件に浸せきした供試体表面では、いずれの水セメント比においても腐食生成物が確認されなかった。よって、硫酸との反応による生成物が流水に伴うせん断力によって取り去られ、常にコンクリートの健全な面が硫酸にさらされるため、流水条件下では劣化が促進されたものと思われる。このことは硫酸イオン含有量の測定結果においても裏付けられ、硫酸イオンは表面から約 10mm 以深にはほとんど浸透しておらず、表面付近のみで高濃度となった。すなわち、酸の侵食を受けた部分は長く表面に残留せず、硫酸の浸透が進行する以前に供試体から剥落していることを示しており、この結果として、侵食の進行が酸の拡散律速による $\sqrt{t}$ 則とはならず、時間にほぼ比例する形となったものと思われる。

また、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートについて硫酸濃度 2.0mol/L, 1.0mol/L, 0.1mol/L の流水条件における水セメント比の相違を比較したとき、いずれの硫酸濃度においても、水セメント比の小さな供試体の方が大きな供試体よりも侵食深さが大きくなることが確認された。これは既往の蔵重らの研究結果と同じ結果を与えるものであり、細孔構造が緻密な水セメント比の小さい供試体の方が、硫酸との反応によって生成された二水石膏の膨張圧を吸収できる空間が少ないため、より早く硬化体の崩壊が生じてしまうためであると考えられる。

一方、混和材を添加したコンクリートにおいては、無添加のコンクリートと比較して侵食深さが小さくなる傾向が認められた。これは、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性あるいはフライアッシュ、シリカフュームのポゾラン反応によって、硬化体の水酸化カルシウムが消費されたために、硫酸に対する抵抗性が増したことによるものと思われる。硫酸濃度 2.0mol/L でフライアッシュ置換率を 30%, 45%, 60%と変化させた水結合材比 50%の供試体では、フライアッシュ置換を行った供試体が無置換の供試体と比較して侵食深さが小さくなったことに加え、置換率が高いほど侵食深さが小さくなることが確認された。すなわち、養生材齢は極めて異なるものの、フライアッシュ無置換の供試体と同一圧縮強度を有する程度まで養生を行った場合には、ポゾラン反応によって水酸化カルシウムの消費が一層進行するフライアッシュ高置換の供試体の方が硫酸抵抗性は高くなることが明らかとなった。

### 3) 研究の成果

コンクリート構造物において、化学的侵食が最も顕在化し問題となる下水道関連施設を想定し、構造物の維持管理の観点から、コンクリートの硫酸侵食の劣化進行予測を行うにあたっての基礎資料を得るための実験的検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

硫酸侵食を受ける環境にあるコンクリートにおいて、コンクリート表面に接する硫酸溶

液が流れを伴う場合、流れのない場合と比較して侵食は早期に進行し、侵食深さはさらさらされている溶液と接する時間にほぼ比例することが明らかとなった。また、硫酸溶液にさらされる期間が同一の場合、侵食深さは水セメント比が小さいほど大きくなることが確認された。さらに、圧縮強度がほぼ等しい材齢での比較においては、混和材を用いることにより侵食が低減されることを確認した。本研究の範囲では、コンクリートの硫酸侵食に流れの作用が及ぼす影響を、流速が非常に限られた範囲でのみ確認しているため、今後はさらに流速を変化させた場合について検討を行う必要があると考えられる。

(担当：広島大学・工学研究科・助教授，河合 研至)

## 6.1.6 アルカリ骨材反応とその複合劣化に関する評価と対策

### 1) 研究の目的

アルカリ骨材反応はコンクリート構造物の代表的な劣化原因として挙げられ、近年では、過大なアルカリ骨材膨張により、内部のコンクリート強度の低下、鉄筋とコンクリートと付着性能の低下、さらには鉄筋の降伏・破断など著しく劣化した構造物も報告され、これらに対する補修・補強を含めた維持管理手法の確立が急務とされている。

一方、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の評価・診断方法については種々の手法が提案されているものの、劣化評価手法については十分に確立されていないのが現状である。また、アルカリ骨材反応においては局所的な使用・環境条件がその劣化進行に大きな影響を与えるとされており、特に外部からの水分供給の影響はきわめて大きい。しかし、実構造物における環境条件、特に水分供給条件については詳細に検討されていないのが現状である。

そこで、アルカリ骨材反応により劣化した構造物の評価・診断技術の確立を念頭におき、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリートの力学的挙動を把握し、同時に非破壊的手法を用いた劣化度評価手法について検討を行った。また、実構造物における環境条件がアルカリ骨材反応の劣化進行に与える影響について検討も行った。

さらには、アルカリ骨材反応により劣化した構造物の維持管理において深刻な問題となっている、アルカリ骨材膨張による鉄筋破断機構の解明についての検討も行った。

### 2) 研究内容

#### アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物の内部湿度分布の検討

アルカリ骨材反応を生じた構造物の膨張抑制対策としてコンクリート中の水分制御を目的とした表面処理工法が適用されてきたが、十分な効果を発揮せず、再劣化を生じた事例

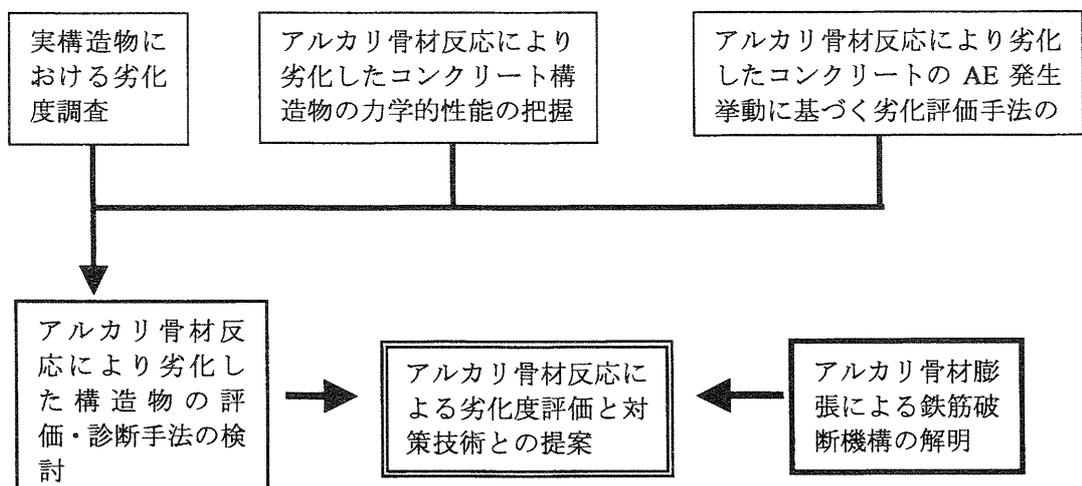


図 6.1.5 アルカリ骨材反応の劣化評価とその対策に関する検討の流れ

も多い。これらの原因として、補修の選定において環境条件の評価は重要であるのに対して、アルカリ骨材反応を生じた実構造物においては、環境からの水分供給はきわめて複雑であり、目視による調査では十分に評価できないことが挙げられる。外部からの水分供給の影響を把握し、水分供給を中心とした環境条件の影響を評価する手法として、携帯型湿度センサを用いたコンクリート構造物の内部湿度分布測定の適用について検討した。その結果、コンクリート内部湿度測定によって外部からの水分供給の影響を把握することが可能であり、外部からの水分供給条件の違いが構造物内の湿度分布に反映されていることが明らかとなり、環境条件が劣化進行に与える影響を明らかにすることができた。また、今後のデータの蓄積によって、外部からの水分供給の影響について、内部湿度測定を用いてより詳細な情報が得られものと考えられ、アルカリ骨材反応を生じた構造物の維持管理における本手法の有効性が明らかとなった。

#### アルカリ骨材反応により劣化したコンクリートの力学的性状と劣化度評価の検討

アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の力学的性能を定量的に評価する方法は十分に確立されていない現状にある。アルカリ骨材反応を生じた構造物内部の劣化状況を非破壊的に診断する手法、あるいは、実構造物より採取したコンクリートコアを FRP シートにより横拘束し、横拘束コンクリートの性状からアルカリ骨材反応劣化度を判定する手法に関する検討がなされているものの、今後のさらなる研究が必要とされている。横拘束を与えたアルカリ骨材反応により劣化したコンクリートの膨張挙動および力学的性能を把握した上で、従来から用いられている超音波伝播速度測定法に加えて動弾性係数測定法および AE 法による ASR 劣化度評価手法について検討を行った。

その結果、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリートにおいては、横拘束による最大耐力の向上はあるものの、最大耐力の向上は、アルカリ骨材膨張による強度低下に比して小さい。一方、横拘束を行う補修時期の影響に関する検討から、炭素繊維シートによる補修・補強を行う場合には、膨張抑制および最大耐力の向上の観点から早期の適用が望ましいことが明らかとなった。また、非破壊試験方法については、構造物内でのばらつきを考慮することで、超音波伝播速度測定および動弾性係数測定はアルカリ骨材反応劣化モニタリングに利用可能であることが明らかとなった。AE 法については、精度の向上を含めて今後のデータの蓄積が必要であるものの、AE 法によるイベントレートピーク時の荷重レベルは、力学的な挙動も同時に評価しており、アルカリ骨材反応を生じた実構造物の膨張量推定、あるいは劣化指標としての有効性が明らかとなった。

#### アルカリ骨材反応劣化コンクリートの AE 発生挙動に基づく劣化評価手法の検討

AE 法に基づくアルカリ骨材反応劣化評価手法は、上記の検討によって実験室で作製した供試体レベルについては明らかにされたものの、これらの実構造物における適用性に関する検討は行われていない。そこで、アルカリ骨材反応を生じた実構造物において、外観観察、超音波伝播速度測定、採取コアの外観観察および強度試験などの劣化度調査を実施す

るとともに、対象構造物から採取したコンクリートコアにAE法を適用し、載荷時のAE発生挙動を把握した。両者の検討結果からAE発生挙動に基づく劣化評価手法を検討した。

その結果、実構造物においては、同一構造物内、さらには、同一箇所においても劣化進行の程度にばらつきが存在し、加えてコンクリートの品質のばらつきも存在するため、これらのばらつきを適切に考慮し、劣化評価を行う必要があることが明らかとなった。AE法によって得られたイベントレートピーク時の荷重レベルは、構造物の特性を踏まえ、ばらつきを考慮して適切に用いるならば、より詳細な劣化グレーディングの判定が可能であり、劣化度評価に有用であることが明らかとなった。

### 膨張材を用いたアルカリ骨材膨張力のコンクリート-鉄筋間の伝達機構の検討

過大なアルカリ骨材膨張によって、コンクリートの強度低下、鉄筋とかぶりとの付着性能の低下、鉄筋の降伏・破断などを生じた構造物も報告されており、これらの構造物に対して適切な維持管理を行うために、過大なアルカリ骨材膨張が生じた場合に、鉄筋に伝達される膨張力の伝達機構を明らかにする必要がある。そこで、アルカリ骨材膨張の影響を膨張材を用いて模擬し、過大膨張時における鉄筋ひずみ挙動および鉄筋曲げ加工部近傍のひずみ挙動を詳細に把握し、膨張力のコンクリート-鉄筋間の伝達機構を検討することとした。

その結果、配筋および拘束量による膨張挙動は、粗骨材の使用の有無など材料によって異なる傾向を示すことが明らかとなった。それらの対応関係については十分に明らかにすることができなかったものの、膨張が発生した場合には、鉄筋の曲げ加工部に大きなひずみが発生し、内側は引張りとなり、外側では圧縮となることが明らかとなった。さらに、曲げ加工部近傍の鉄筋ひずみの分布から、内部に発生した膨張力は、鉄筋の曲げ加工部を起点として、外側へ押し広げるように、曲げ加工部に作用することが明らかとなった。

### 3) 研究の成果

以上の検討結果から、アルカリ骨材反応により劣化した構造物において、環境条件および構造条件等が劣化進行に与える影響、および構造条件あるいは構造物内での局所的な影響を含む劣化の特徴を明らかにすることができ、これらの成果はアルカリ骨材反応劣化調査手法の改善や評価・判定の精度の向上に有用なものとなる。

さらに、劣化評価手法に関する研究成果によって、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物のより合理的な劣化度評価手法を構築し、今後のアルカリ骨材反応により劣化した構造物における補修・補強の有無の判断、補修・補強工法の選定等に重要な情報を与えることができる。一方、膨張力が鉄筋に伝達される特徴を明らかにしたことにより、より合理的な補修・補強方法の選定において基本的な情報を与えることができる。

したがって、これらの検討による成果によって、アルカリ骨材反応により劣化した構造物のより合理的な維持管理が可能となる。

(担当：金沢大学・工学部・助手、久保 善司)

## 6.1.7 劣化構造物の耐荷性能評価

### 1) 研究の目的

実際の構造物には色々な使用荷重が作用しており、その荷重に伴うコンクリートのマイクロ及びマクロ的な変化が鉄筋の腐食速度や腐食のパターンに大きく影響を与えることと判断される。よって、構造物での使用荷重を考慮した持続荷重が鉄筋腐食の開始および進行に与える影響を定量的に把握し、持続荷重下での梁部材のたわみが鉄筋の腐食によりどの程度まで影響されるかに対し把握することは重要である。これは鉄筋コンクリート構造物の性能検証設計や残存寿命評価のために今まで研究されて来た鉄筋腐食による構造耐力低下の評価において実際の使用条件をもっと考慮することができ、長期たわみによる使用性低下の評価にも活用できる。

しかしながら、既存の鉄筋腐食に関する研究では持続的な荷重下で行われた定量的研究はほとんどなされていない。したがって、本研究では持続荷重下での単筋梁の鉄筋腐食実験結果に基づいて鉄筋腐食によるたわみの増加を有限要素法によって解析的に求めることとした。

### 2) 研究内容

#### 実験結果の概要

本解析で検討した試験体の形状および持続荷重の適用方法を図 6.1.6 および図 6.1.7 に示した。また、使用した試験体の基本的な材料物性の測定結果を表 6.1.2 に示した。持続荷重は図 6.1.6 に示した単筋梁の最大曲げモーメントの 45% と 75% に当たる荷重を適用した。単筋梁中での鉄筋腐食は最初の適用荷重がかけられてから 50 日くらい後に開始された。静的載荷による梁の曲げ試験結果、持続荷重下での梁のクリープたわみ及び鉄筋腐食によるたわみ増加の結果は表 6.1.3 および図 6.1.8 に現れた。

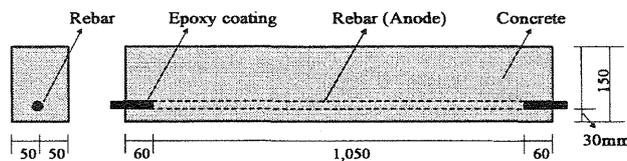


図 6.1.6 試験体の形状

表 6.1.2 材料物性の測定結果

材料物性	コンクリート	圧縮強度 (MPa)	33
		ヤング係数 (MPa)	22000
	鉄筋	降伏強度 (MPa)	413.7
		断面積 (cm <sup>2</sup> )	2.835
		ヤング係数 (MPa)	204000

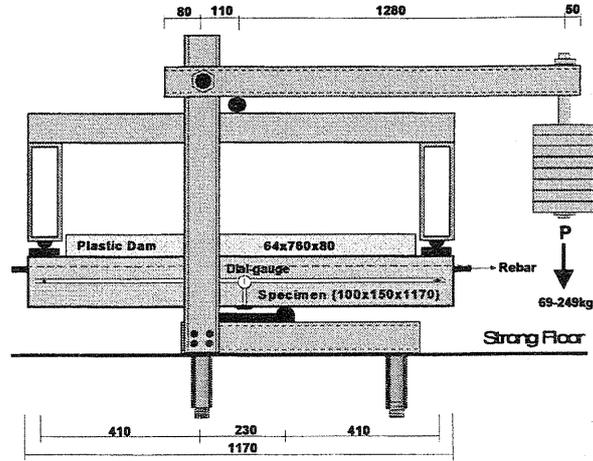


図 6.1.7 持続荷重の載荷装置

表 6.1.3 梁試験体の実験結果

静的荷重による 曲げ破壊試験	最大荷重	41.08KN	
	最大たわみ	3.22mm	
持続荷重による たわみ	初期瞬間たわみ	P45	0.889mm
		P75	1.351mm
	腐食開始時点の たわみ	P45	1.806mm
		P75	2.578mm
鉄筋腐食率とそ の時点のたわみ	P45	4.61%	2.108mm
	P75	7.75%	3.155mm

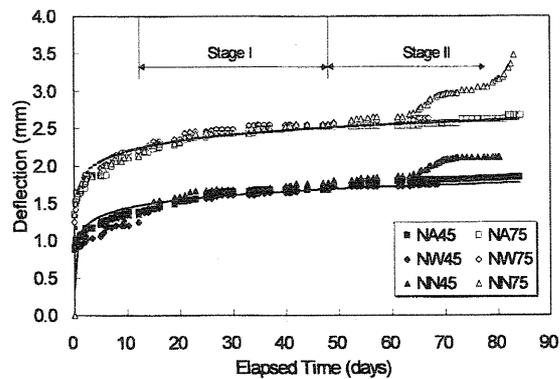


図 6.1.8 持続荷重下での梁のたわみ変化

### 有限要素解析の概要

#### [解析方法及び要素分割]

解析試験体は上記の表 6.1.3 に示した 45%試験体(P45),75%試験体(P75)であり,対称性を考慮し左半分を解析対象とした。解析方法は材料の非線形性を考慮した 2次元平面応力

弾塑性解析とし、外力は一定な大きさの荷重状態を持続させるためにその荷重段階まで荷重増分法を用いた。ただし、実験により求められた材料要素のデータが不十分なので、逆解析を通じて材料要素の物性データを変化させながら単筋梁の荷重-変位の関係、変形図、応力図、クラック図などの実験結果との比較を行った。これを表現するための外力は強制変位を与えた。

本研究ではクリープ要素を考慮し持続荷重下での鉄筋腐食を考慮するために次の通り 3 段階で区分して解析を行った。

- ① 逆解析を通じた試験体の力学的特性の確認
- ② 持続荷重下でのクリープたわみの発生
- ③ 鉄筋腐食によるたわみの増加

[材料要素の物性]

- ① コンクリート；コンクリート要素は等方性材料で 4 節点アイソパラメトリック平面応力要素を用いた
- ② 鉄筋；鉄筋はトラス要素で表現し、降伏条件としては Von Mises の降伏条件を用いた。
- ③ 鉄筋とコンクリートの付着；コンクリートから鉄筋への応力伝達として、4 節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用い、その物性は実験で得られなかったもので、一般的な条件での物性値を基で逆解析して実験結果とよく合う値を用いた。

### 3) 研究の成果

#### 単筋梁試験体の力学的特性の確認

- ① 荷重段階別のひび割れおよび主応力分布の解析結果と実験結果の比較
- ② 使用した梁試験体の荷重-変位の特性

持続荷重下でのクリープたわみ；現在、進行中

#### 今後の検討

コンクリート中での鉄筋腐食が開始された以降の梁のたわみ特性をパラメータ解析によって検討する。

- ① 鉄筋腐食程度
- ② 鉄筋比
- ③ 付着要素
- ④ 腐食開始時点
- ⑤ 腐食速度

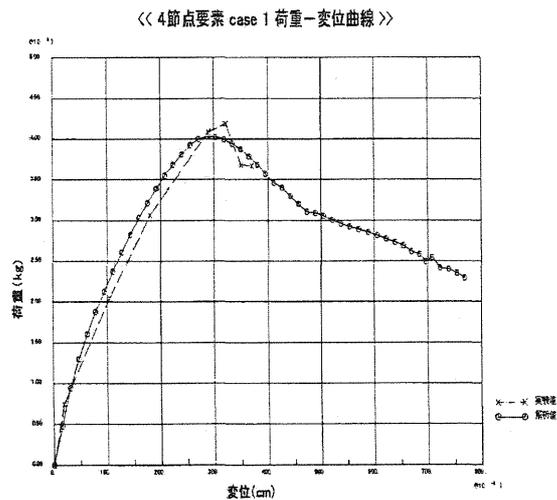


図 6.1.9 曲げ破壊試験による梁試験体の荷重-変位の解析と実験結果の比較

(担当：東京大学・工学系研究科・助教授，野口 貴文)

## 6.1.8 補修材料および工法の性能評価

### 1) 研究の目的

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象に対して、適切な補修材料、補修工法について検討するために、まず劣化の進行プロセスを実験により確認し、その劣化進行に対して適切と思われる材料及び工法について検討を行った。また、対策後の維持管理をより精度よく行うためのモニタリングシステムや構造物の劣化進行の不確定性を考慮に入れたマネジメントの検討を行った。

これら維持管理を効率的に行うためには、コンクリートの品質が当初設計時に考慮された品質と同程度でなければならず、そのためにはコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすフレッシュコンクリートの単位水量の管理が重要となる。そこで、効率的な維持管理に向けた、コンクリート打設時の単位水量の測定技術に関する検討を行った。さらに、第三者影響度に対する性能が強く求められる構造物においては、目視のみによる維持管理が不十分となる可能性が高く、この種の構造物の維持管理を経済的に行うために、コンクリート打設時に有機系短繊維を混入する方法についても検討を行った。

### 2) 研究内容

#### 塩害の劣化進行プロセスの評価

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物においては、マクロセル腐食が大きな問題となっ

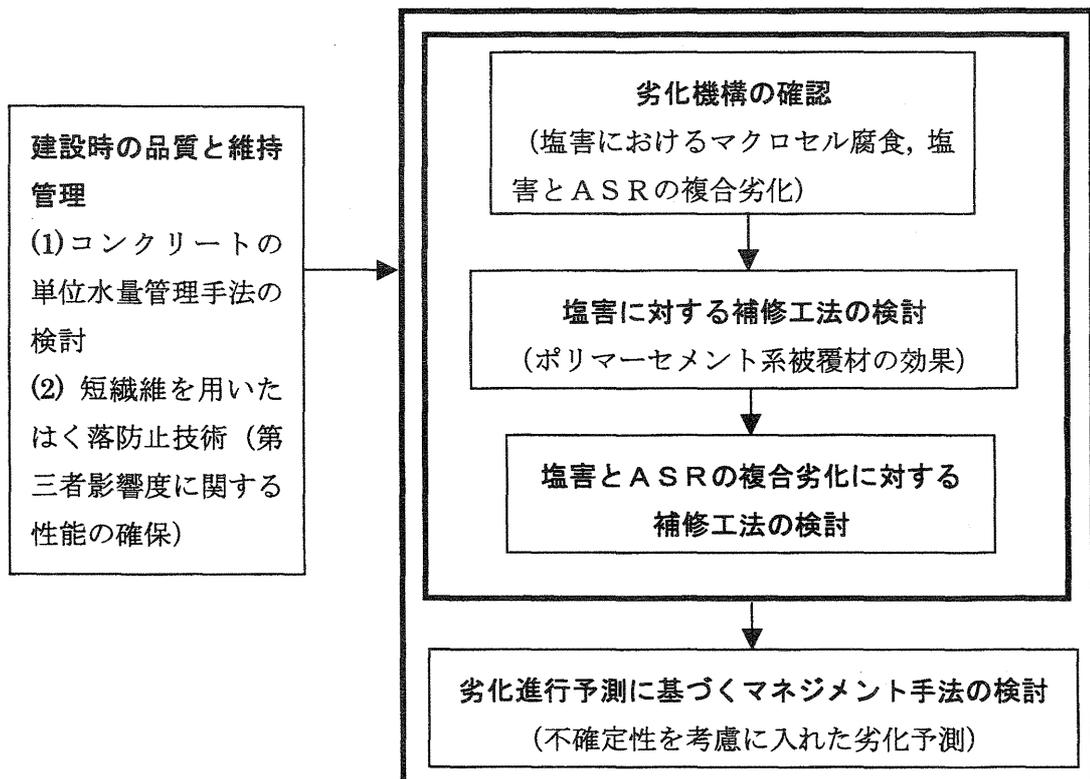


図 6.1.10 補修材料・工法に関する研究の流れ

ている。マクロセル腐食の問題は、塩害劣化を受けた構造物に対して断面修復工法を適用した場合、早期の再劣化の原因として挙げられており、断面修復工法の効果的な適用を考える上で大変重要な課題である。

そこで、本研究ではモルタル中に埋設した分割鉄筋の腐食電流を測定することにより、「防錆剤を混和した場合の鋼材腐食の防止効果」「ひび割れ部のみに浸透した塩化物イオンの鋼材腐食に及ぼす影響と補修効果」「ひび割れ部およびその周辺に浸透した塩化物イオンの鋼材腐食に及ぼす影響と補修効果」さらには「鉄筋のかぶり不足に対する各種補修工法の効果」について実験を行い検討した。その結果、ひび割れ部に浸透した塩分量が少なく、初期の段階であればひび割れ注入などの工法が適用できるが、浸透量が多くなるとひび割れ注入だけでは補修効果が得られず、その段階では表面を被覆する補修工法でも内部の鋼材腐食を抑制することが難しいものと想定された。これらの結果から、腐食性因子をコンクリート中に入れない「予防保全的対策」が有効であることがわかった。

#### ポリマーセメント系被覆材による塩害防止効果

上記実験の結果、予防保全的に腐食因子をコンクリート中に浸透させない工法が効果的であると推測された。しかし、一般的な表面被覆材料として使用されてきた樹脂系の表面被覆材は耐用年数が10年程度と短いため、コンクリート表面との親和性が高いと考えられるポリマーセメント系被覆材に被覆効果について検討を行った。使用したポリマーセメントは、ポリマーセメント比が、20%、40%、90%の市販の材料を用いて、拡散セルによる遮塩性を測定し、得られた塩化物イオンの拡散係数を用いて、差分法により表面被覆による塩化物イオンの遮断効果を数値的に確認した。その結果、ポリマーセメント比が40%以下の材料では十分な遮塩性が得られず、塗布しても耐久性増加にほとんど寄与しないことが確認された。表面被覆材として効果を発揮するポリマーセメント材料としては、ポリマーセメント比が90%程度以上であり、その場合には、厳しい環境条件下におけるシミュレーション結果では20年程度以上の耐久性向上が解体できることが分かった。

#### 塩害とアルカリ骨材反応の複合劣化の現状把握とその対策

港湾構造物では、厳しい塩害環境にさらされるため、塩害劣化が卓越する場合が多いが、特に関西地区ではアルカリ骨材反応との複合劣化が発生している。そこで、具体的な事例を調査し、複合劣化の現状認識を行い、補修工法に対する基本的な考え方を整理した。

調査は、アルカリ骨材反応によるひび割れが顕在化した瀬戸内海に面した護岸の上部工を対象に行った。劣化調査の結果、亀甲状のひび割れ付近はすでに微細なひび割れや骨材の緩みが進んでおり、残存膨張量は少ないが、このようなひび割れが見られないところでは残存膨張量が0.1%以上の比較的大きい膨張が確認された。

さらに、海洋環境では海水中の硫酸塩がアルカリ骨材反応を促進することが考えられ、人口海水による実験によってその影響を評価することができた。この結果は、実際の構造物が直接海水の作用を受ける環境ではない場合には過大な結果を与えるが、逆に、海水の

作用が直接及ぶ可能性がある場合には大きな膨張が発生する可能性があり、補修においては海水作用をできるだけ防ぐこと、仮に海水作用を完全に防止できない場合には、膨張に対しても十分余裕を持つ工法を適用品ければ、十分な補修効果が得られないと推測された。

そこで、FRP版を柔軟形エポキシ樹脂で接着させる、表面被覆工法を開発しその効果を確認した。この工法であれば、ゼロスパンテンション試験で6mm以上のひび割れ追従性が確認されており、表面を被覆することによる海水作用の防止と、仮に海水作用を受けて膨張が発生しても、その膨張に追従して十分な被覆効果を発揮できるものと推測された。

#### 対策後のモニタリング技術の開発

塩害あるいは塩害とアルカリ骨材反応の複合劣化に対しては、現状においては「完璧な補修工法」というものが確立されておらず、構造物の劣化状況に応じた補修を行い、その後も適切に維持管理する必要がある。とくにアルカリ骨材反応を伴う劣化に対しては、膨張のモニタリングが重要となる。そこで、ひび割れモニタリング技術を開発した。今後、この種の技術を併用しながら、対策をより確実にできると考えられる。

#### 不確定性を考慮に入れた構造物のマネジメントに関する基礎的検討

上記までの検討を踏まえると、構造物建設後の早い段階で劣化進行予測を行ない、適切なタイミングで対策を実施することが、構造物をマネジメントする上で重要であると想定された。その一方で、劣化の信幸には大きなばらつきを有している。そこで、劣化進行の不確定性を考慮に入れた劣化予想を行ない、どのタイミングで補修工法を適用すべきか検討を行った。検討に当たっては、実際の構造物の調査事例から劣化のばらつきに関する情報を収集し、予測と実際の劣化進行を比較し予測の精度を検討した。検討の結果、実際の劣化現象のばらつきをある程度の精度で予測することが可能であることが分かった。この結果を発展させれば、劣化現象に伴う構造物の補修面積や供用不能となる面積の予測が可能となり、構造物から得られる便益とコストとの関係から最適な維持管理のシナリオを検討できるものと推測された。

#### 予防保全のための検討

鉄筋コンクリートの維持管理は必要不可欠であるが、対策は劣化が進行した後では経済性や補修効果が劣るため、比較的早い時期に適切な対策を適用することが重要である。維持管理を効果的に実施するには、コンクリート構造物が早期劣化を起こすことがなく、点検結果を踏まえた対策の実施に時間的余裕があることが不可欠である。そのためには、コンクリートを打設する段階で、耐久性照査を満足する品質のコンクリートを打設することが重要な項目のひとつである。この場合、コンクリートの品質を大きく支配し、またコンクリート製造時に変動する可能性の高い「単位水量」を正確に測定することが重要である。これまで開発されてきた装置は、測定のための労力が多大であり、結果が出るまでの時間が長いために実用的でなかった。ここでは、中性子を用いた水分計を使用し、容易にしか

も短時間の計測が可能な装置の適用化のう性を検討した。実験の結果、比較的精度よく測定することが可能であり、これにより施工するコンクリートの品質が明確になり、劣化予測もより正確に行えるため、効果的な維持管理が可能になると考えられる。

また、第三者影響度に対する性能が強く求められる構造物では、初期のコンクリートの品質確保だけでは、必ずしも十分でない場合がある。そこで、コンクリートのはく離・はく落を防止するために、リサイクル材料である PET 繊維をコンクリート中に混入して第三者影響度を確保することを考えた。検討の結果、適切に用いれば十分な硬貨を発揮することが確認された。

### 3) 研究の成果

以上の検討成果を踏まえると、打設時のコンクリートの品質を明確に評価し、不確定性を考慮に入れた劣化予測を行なうことにより、構造物に最適な維持管理シナリオを設定することが可能となる。さらに、第三者影響度に対する性能が強く求められる構造物に対しては、短繊維の混入により維持管理の時間を確保する方法を検討した。

これらのプロセスを経た後に、塩害あるいは塩害と ASR の複合が予測される構造物では、セメント材料との親和性の良いポリマーセメント系の被覆材やひび割れ追従性の高い FRP による被覆が効果を発揮するものと考えられる。

これら、補修材料や補修工法の検討により、より信頼性の高い構造物の維持管理が可能となる。

(担当：東亜建設工業(株)・技術研究所材料構造研究室・室長，守分 敦郎)

## 6.1.9 補強材料および工法の性能評価(その 1)

### 1) 研究の目的

ここでは主として、i) 定着用膨張材を用いた PC 緊張材の定着法に関する研究、特に今後需要が増えてくると予想される「中間定着工法」と、ii) 疲労劣化した RC 一方向版の炭素繊維シート接着工法による補強効果に関する研究、それぞれの成果について報告する。

### 2) 研究内容および成果

#### 定着用膨張材を用いた PC 緊張材の定着法に関する研究

##### [中間定着工法への HEM 定着法の適用]

道路の拡幅や改修工事では、片側車線はそのまま残した状態で工事を行うことがあり、その場合、例えば PC 横桁を半分有効に残した状態で工事を行う事例が多い。また、一般に構造物の改修や改築にともなって、局所的に解体・撤去する場合には、PC 桁を部分的にカットし、撤去しなければならないケースが増えてきている。上記の場合、ほとんどがポストテンション方式の PC 桁であり、PC 桁の一部を取り除き、残りはそのままの状態を使用するために、必ず途中で定着する必要がある。緊張状態にある PC 鋼材を途中で定着することから、「中間定着工法」と呼んでいる。

ポストテンション方式の PC 桁でグラウトが施されている場合には、PC 鋼材とグラウトとの付着定着で、いわゆるプレテンション方式と同様のボンド定着の可能性も考えられるが、グラウトの充填状態に大きく依存するため、不確実な定着とならざるを得ない。したがって、緊張状態にある PC 鋼材を途中で確実に定着する方法が必要となってくる。

中間定着工法には、従来の PC 定着工法は端部定着用であるため適用できない。中間定着には、新たな定着工法の開発が必要になってくる。そこでまず、筆者らが連続繊維緊張材の定着のために開発した「定着用膨張材」(Highly Expansive Material: HEM)を用いる定着方法(以後、HEM 定着法と略記)を中間定着工法に適用することについて検討した。HEM 定着法は、水・定着用膨張材比 27%で練り混ぜ、スラリー状態の HEM を鋼管に挿入した PC 緊張材との隙間に充填するだけで、スラリー状態から硬化膨張し、常温では 48 時間後には 40MPa 以上の高膨張圧を発生する。この場合、膨張圧の伝播は液圧的であり、応力集中のないソフトタッチで確実な定着が可能となる。HEM 定着法は、PC 緊張材が緊張状態で定着されるか否かで便宜的に (I) 法、(II) 法の 2 通りに分けている。(II) 法は、PC 緊張材が緊張状態で膨張圧が作用し定着する方法で、中間定着工法は、HEM 定着 (II) 法に相当する。

中間定着工法、すなわち HEM 定着 (II) 法では、中間定着具内で充填した HEM が所定の膨張圧に達した後、片側(実構造物では、解体撤去される側)の PC 緊張材の緊張力を緩めることによって、中間定着具で解放荷重をすべて保持して定着することになる。この場合、緊張力に見合った中間定着具の必要定着長と膨張圧の大きさの関係および定着機構の解明が重要となる。

本研究では、PC 緊張材に CFRP より線 ( $\phi 15.2$ )、PC 鋼より線 ( $\phi 15.2$ )、PC 鋼棒 ( $\phi 15.0$ ,  $\phi 23$ ) を用い、中間定着に関する基礎的な事項について実験的および解析的な検討を行い、以下のような知見を得た。

(1) 中間定着具内では、プレテンション方式と同様に付着長が存在し、膨張圧が 50MPa 程度の場合、CFRP より線 ( $\phi 15.2$ ) では約 110mm、PC 鋼より線 ( $\phi 15.2$ )、PC 鋼棒 ( $\phi 15.0$ ) では約 90mm であった。したがって、中間定着具としてのスリーブ長は、この付着長以上必要である。

(2) 中間定着具での定着状態は、力学的には、PC 鋼材のみが緊張された状態と中間定着具と PC 鋼材が一体となった状態に PC 鋼材の端部に圧縮力を作用させた状態とを重ね合わせた状態で、いわゆる重ね合わせの原理を用いて定着機構を説明できる。これは、プレテンション方式のプレストレス導入の原理と同様である。

(3) HEM 層をせん断伝達バネと考え、上記(2)の場合の微分方程式を誘導した。微分方程式による解の妥当性は、鋼管スリーブ表面のひずみの測定値と比較することで検証できた。

(4) また、解放荷重が大きくなるにつれて、端部では HEM 層のせん断伝達バネが次第に非弾性の状態になるため、このことを考慮した FEM モデルを構築した。解析結果は、緊張荷重の低い段階からすべての荷重段階で、鋼管スリーブひずみ値の測定値と合致することがわかった。このことより、HEM 層をせん断伝達バネと考えた FEM モデルは有効な解析方法であることがわかった。本解析法を用いれば、必要定着長の数値シミュレーションが可能となる。

#### [定着法の違いが CFRP より線の疲労性状に及ぼす影響について]

CFRP より線などの連続繊維補強材は、高強度、高耐食性、軽量、非磁性などの特長を有するため、補強材料としての重要性は極めて高い。連続繊維補強材の材料特性を試験する場合、あるいは実用に供する場合、いずれの場合においても「定着」をいかに行うかが問題となる。これは、一般に連続繊維補強材は一方向性材料であって、局所的な支圧やせん断に対して弱いためである。このような問題点を解決するために、筆者らは、定着用膨張材を用いる定着法を開発し、基礎的な検討を行ってきた。

これまでの研究では、CFRP より線の静的引張強度には、エポキシ樹脂定着法と HEM 定着法による定着法の違いはみられなかった。しかしながら、引張疲労試験を行った結果、CFRP より線の疲労特性は、HEM 定着の方が格段に向上することがわかった。

特に、土木構造物では材料の疲労特性は、補強設計上も重要であり、定着法の違いが CFRP より線の疲労性状に及ぼす影響について検討しておく必要がある。ここでは、定着法の違いによって CFRP より線の疲労特性が異なってくる理由について、定着部内の応力状態と摩擦熱による温度上昇の観点から考察を行った。その結果、本研究の範囲内で下記のような知見が得られた。

(1) CFRP より線  $\phi 12.5$ ,  $\phi 15.2$  の引張疲労試験の結果、平均応力が 1300 N/mm<sup>2</sup> 以

下では、定着法の違いが顕著に現れる。

(2) HEM 定着の場合、膨張圧が継続的に作用しているため、HEM層のせん断伝達バネの剛性低下がなく、また、繰返し载荷に伴って負の摩擦力が残留し、相対変位幅が小さく抑えられる。一方、エポキシ樹脂定着では、エポキシ樹脂層のせん断伝達バネの剛性が低下することで、相対変位幅が大きくなる。

(3) 応力範囲が  $1210 \text{ N/mm}^2$  では、エポキシ樹脂定着の場合、相対変位幅が大きくなることによって、口元部分では温度上昇は  $80^\circ\text{C}$  にも達し、温度上昇は HEM 定着の場合より著しいことが確かめられた。このような著しい温度上昇が、CFRP より線のマトリックス樹脂の特性を変化させ、結果的に CFRP より線の疲労特性に悪影響を及ぼしていると考えられる。平均応力が高い領域では応力範囲が小さいために定着体の相対変位幅が小さく、摩擦熱の発生も小さく抑えられるために定着法の違いによる差は小さくなると考えられる。

### 疲労劣化した RC 一方向版の炭素繊維シート接着工法による補強効果に関する研究

RC 床版の補強工法には、床版の支持間隔を短くする増桁工法や、鋼板を RC 床版に取り付け接着する鋼板接着工法、RC を床版の上面もしくは下面に増設する増厚工法などがあるが、軽量かつ高強度で耐腐食性に優れている炭素繊維シート（以下 CFS と略記）を用いる CFS 接着工法が注目されている。現在、CFS 接着工法を適用した施工は着実に実績を積んでいるが、その補強効果については不明な点が多く、補強設計法も十分とは言えない。道路橋床版の補強に CFS 接着工法を適用する場合、疲労荷重に対する補強となる。これまでの CFS 接着工法に関する研究では、輪荷重载荷方式で階段载荷による疲労実験が行われている。この場合、RC 床版を用い CFS の層数を変化させた試験体と他の補強工法を施した試験体とで、たわみの進行や疲労耐久性向上の比較検討が行われているが、定性的な評価にとどまっている。また、疲労劣化後に CFS 補強を施した場合の補強効果に関する研究も十分とはいえない。

本研究では、疲労ひび割れを与えた後に CFS 補強を施した場合の、鉄筋ひずみやひび割れ幅などの疲労挙動の改善を定量的に評価することを目的として実験的な検討を行った。実験では一方向 RC 版を用い、一定荷重振幅の 2 定点载荷方式による疲労試験を行った。筆者らのこれまでの研究で、繰返し载荷後も引張鉄筋と CFS の引張力負担割合が静的载荷の場合と同じであること、疲労による CFS の付着の劣化がないことがわかっている。また、荷重-鉄筋ひずみ関係に注目し、除荷過程の最小二乗近似直線がひび割れ発生荷重のマイナス値を指向しており、その近似直線の傾きの繰返しに伴う変化率が、どの試験体でも同じであることもわかっている。これより、平面保持の仮定、引張側コンクリート無視の条件下での鉄筋ひずみの計算値に、実験から得られた繰返し回数の増加に伴い変化する疲労係数を与えることで、繰返し回数-鉄筋ひずみ関係の疲労挙動が定式化されている。しかし、上記の知見は有効高さ、鉄筋比、無補強時の作用鉄筋応力が全ての試験体で同じであったため、限定された範囲での定式化である。

そこで、本研究では有効高さ、鉄筋比を変化させた試験体を作成し、作用鉄筋応力を変

化させて疲労試験を行った。また、本研究では鉄筋ひずみの計算値の物理的意味を明確にし、設計法へも反映させるべく、荷重－鉄筋ひずみではなくモーメント－鉄筋ひずみに注目した。疲労試験の結果より、パラメータを変化させた場合でもモーメント－鉄筋ひずみの近似直線が、ひび割れ発生モーメントのマイナス値を指向することが確認できた。また、1回目除荷時を基準とする近似直線の傾きの変化率もパラメータに関係なく同様であることも確認できた。さらに、CFS補強後における近似直線の傾きの変化率が、無補強時と同様であることが明らかになった。これらより、新たな繰返し回数－鉄筋ひずみ関係式を提案した。

提案式は本実験の範囲内ではあるが、CFS補強の有無によらず繰返し回数の増加に伴う鉄筋ひずみの変化を表現している。これより、CFS補強後の鉄筋ひずみの低減を定量的に評価できるようになった。また、上述の鉄筋ひずみの疲労挙動を表現した式と、土木学会示方書の曲げひび割れ幅算定式を用いて、CFS補強後のひび割れ幅の減少量も定量的に評価できるようになった。

(担当：長崎大学・工学部・教授，原田 哲夫)

## 6.1.10 補強材料および工法の性能評価(その2)

### 1) 研究の目的

コンクリート橋脚などの曲げを受ける RC 部材において鉄筋腐食が顕在化した場合、補強を検討しなければならないことがある。これに対して、炭素繊維シートを曲げ部材の周方向に巻立てる靱性補強により、部材の変形性能が向上することが知られている。また、この工法では腐食ひび割れの拘束や劣化因子の侵入抑制などの補修効果もあわせて期待できると考えられる。しかし、補強による靱性の改善には、曲げ圧縮部コンクリート終局ひずみの向上に対して、引張主筋の十分な伸びが必要とされることから、引張主筋の腐食下では、伸び性能が低下することで、主筋破断をともなった破壊形式となり、補強に期待される変形性能の十分な向上が得られない可能性がある。このような場合、腐食鉄筋の取替えや断面修復などの補修をあわせ用いる必要があるが、これらの適用を判断するためには、炭素繊維シート補強部材の耐荷特性に与える腐食の影響についての知見が重要となる。

本研究では、鉄筋腐食 RC 曲げ部材への炭素繊維シート補強の適用性を明らかにすることを目的として、主筋の腐食をシミュレートした RC 曲げ部材に、炭素繊維シート靱性および曲げ補強を適用し、正負交番曲げ載荷試験結果をもとに、補強部材の耐荷特性を検討した。また、靱性補強設計における主筋腐食とそれにとまなう伸び性能の低下に関する考慮方法について検討した。

### 2) 研究内容

主筋腐食を電食法によりシミュレートし、(1) 主筋の腐食量、(2) 炭素繊維シートの補強量を実験要因とした RC 曲げ部材(100<sup>B</sup>×200<sup>H</sup>×1400<sup>SL</sup>mm の 2-D10(SD295A)複鉄筋 RC はり)に対して、対称 2 点正負交番曲げ載荷試験を行った。なお、腐食量の影響に関する検討では、腐食ひび割れの有無による影響を検討するために、あらかじめ主筋のみを曲げ区間(700mm)について塩水散水により腐食させ、この鉄筋を用いて供試体を作製したものを用意した。

#### 曲げ載荷試験の結果と考察

曲げ載荷試験の結果、最大荷重は質量減少率の増加にとまない、炭素繊維シート靱性補強の有無に関わらず低下した。また、腐食ひび割れの有無が最大荷重に与える影響では、鉄筋のみを腐食させて作製したものよりも腐食ひび割れが存在する電食の方が、最大荷重の低下の割合が大きく、局所的な主筋の断面欠損および引張主筋とコンクリートの付着低下が影響しているとともに、腐食ひび割れの存在により、曲げ圧縮部コンクリートが受け持つ圧縮力が低下した可能性が示された。

また、靱性補強したものについて、断面分割法により求めた計算値と比較した結果、腐食ひび割れのない供試体の最大荷重の低下率(低下直線の傾き)は、鉄筋の断面欠損の考慮のみで推定できた。しかし、腐食ひび割れを有する電食供試体の最大荷重の低下率は、計算値の低下率よりも大きく、最大荷重の推定には鉄筋の断面欠損以外の要因も考慮する必要

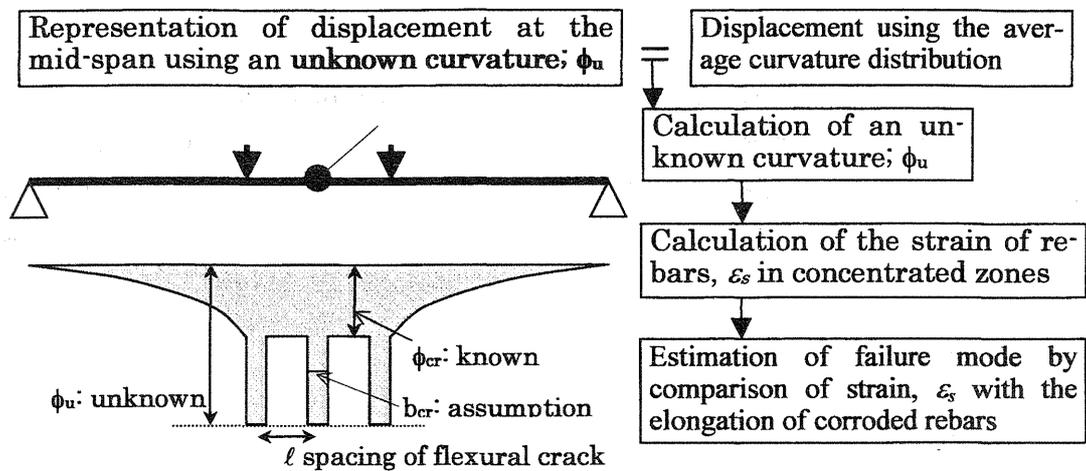


図 6.1.11 計算のフロー

があると考えられる。

曲げ補強を併用した供試体の最大荷重は、質量減少率の増加にともなって低下しているものの、同一の質量減少率では、靱性補強のみよりも曲げ補強を併用した方が、最大荷重が大きく、また、二つの質量減少率において、最大荷重の増加量は同程度であった。しかし、最大荷重の低下率は、鉄筋の断面欠損のみを考慮した計算値よりも大きく、曲げ補強の併用による最大荷重の向上を算定するためには、断面欠損以外に、腐食鉄筋とコンクリートの付着や腐食ひび割れの影響を考慮する必要があることが示唆された。

質量減少率が変位靱性率に与える影響では、質量減少率の増加にともない、炭素繊維シート靱性補強の有無に関わらず低下した。引張主筋の伸び能力の低下によって主筋破断が生じて終局に至ったことから、主筋腐食部材に対する炭素繊維シート靱性補強では、主筋破断が先行するため、大幅な靱性の向上は期待できない可能性が示された。

#### 靱性補強における主筋腐食の考慮方法に関する検討

本研究の供試体の曲げ変形を、断面分割法で解析する場合、等曲げ区間内には平均的にひび割れが分散した断面を仮定し、区間内曲率一定とすることが一般的である。しかし実際には、ひび割れ断面とひび割れの発生していない断面が存在し、ひび割れ断面周辺の曲率は、平均曲率分布で仮定される曲率よりも大きくなる。ひび割れ断面周辺の曲率集中領域では、破壊形式が曲げ圧縮部コンクリートの圧潰となるために引張主筋に必要とされる伸びは大きくなることから、曲率集中領域での終局時引張主筋ひずみを求め、腐食鉄筋を有する炭素繊維シート横拘束曲げ部材の破壊形式を推定することが、鉄筋腐食 RC 部材への靱性補強の適用可否を判断するにおいて重要であると考えられる。

計算のフローを図 6.1.11 に示す。曲率集中領域の幅  $b_{cr}$  を仮定し、終局時のはり中央変位を曲率  $\phi_u$  (未知数) を用いて表す。この変位の値が、平均曲率分布から求められる変位の計算値に等しくなると仮定し、終局時の曲率  $\phi_u$  を算出した。曲率  $\phi_u$  に対応する引張主筋のひずみを求め、腐食鉄筋の伸び-質量減少率関係と比較することによって、破壊形式を推定し

た。

計算の結果、曲率集中領域を仮定した方が、また曲率集中領域の幅が小さい方が、質量減少率の小さい段階で主筋破断になることが示された。このとき、曲率集中領域の幅を30mmとした方が、主筋破断となる質量減少率の実験値( $\rho_{CF}=0.66\%$ , 質量減少率 3.7%)に近くなった。しかし、炭素繊維シートを巻き立てていることや、載荷終了後の内部の損傷が大きかったことから、この曲率集中領域の幅 30mm を実験上確認することはできなかった。

### 3) 研究の成果

本研究の範囲内で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 主筋が腐食した供試体の最大荷重は、質量減少率の増加にともない低下することが明らかとなった。また、腐食鉄筋の断面積に、一様腐食を仮定し、質量減少率を断面欠損率とすることにより推定した残存断面積を用いた断面分割法による計算値によって、腐食ひび割れのない供試体の最大荷重の低下率を推定できることが示された。
- (2) 主筋が腐食した供試体の変位靱性率は、質量減少率の増加にともない低下することが明らかとなった。このことから、主筋腐食部材に対する炭素繊維シート靱性補強では、主筋破断が先行するため、大幅な靱性の向上は期待できない可能性が示唆された。
- (3) 曲げ圧縮部コンクリートが終局ひずみに達した時の引張鉄筋ひずみを求め、これと腐食鉄筋の質量減少率・伸び関係を比較することによって炭素繊維シートで靱性補強した曲げ部材の破壊形式の推定を行うにあたって、曲率集中領域を仮定した曲率分布を用いる方法を検討した。これによって、腐食量が小さい段階においても、ひび割れ断面周辺の曲率が大きくなる領域では、靱性補強された部材の引張主筋には大きな伸びが必要とされるため、靱性補強の適用にあたっては注意が必要であるとの知見が得られた。

(担当：京都大学・工学研究科・助手, 山本 貴士)

### 6.1.11 コンクリート構造物の維持管理フレームワーク

#### 1) 研究の目的

性能規定あるいはそのツールとなる性能照査は、構造物の「機能」を「性能」という形で工学的に翻訳することによって成り立っている。コンクリート構造物の良さをうまく引き出すためには、性能の経時変化について、つまり、コンクリート構造物の時空間内において要求される挙動をあらかじめシナリオとして設定し、これが荷重的、環境的、また経済的に達成可能かどうかを評価し、判定する、という手順を取るのが最もわかりやすい。これによって、コンクリート構造物を空間的にも時間的にも設計することが可能となり、また同時にライフサイクルコストの算定も可能となり、21世紀に求められる“持続可能な発展”を達成することができるのである。

コンクリート標準示方書[維持管理編]においては、評価する性能の対象として、図6.1.12に示すように、安全性能、使用性能、第三者影響度に関する性能、美観・景観とこれら4つの性能に関する耐久性能を取り上げている。コンクリート構造物の維持管理は、計画、建設、供用（維持管理）、解体、廃棄あるいは再利用といった一連のサイクルの一過程であり、この一連のサイクルにおける総合的な考え方のもとに要求される性能を確保するための行為である。特に解体から再利用の過程においては、資源の有効利用を進めるとともに、排出される二酸化炭素、エネルギー消費、環境負荷の低減を目指す必要があり、“持続可能な発展”を実現するためには、これらのことに十分に配慮した維持管理が求められる。このことに関する基本的な考え方、方法については、近年盛んに研究が行われ、議論が展開されているところであるが、コンクリート構造物の建設における環境負荷などの評価技術が確立され、また[維持管理編]、[構造性能照査編]、[施工編]の有機的な関係がより一層整理され、一貫したコンクリート構造物の建設・保全規準として体系化される段階にお



図 6.1.12 構造物(部材)の性能の分類

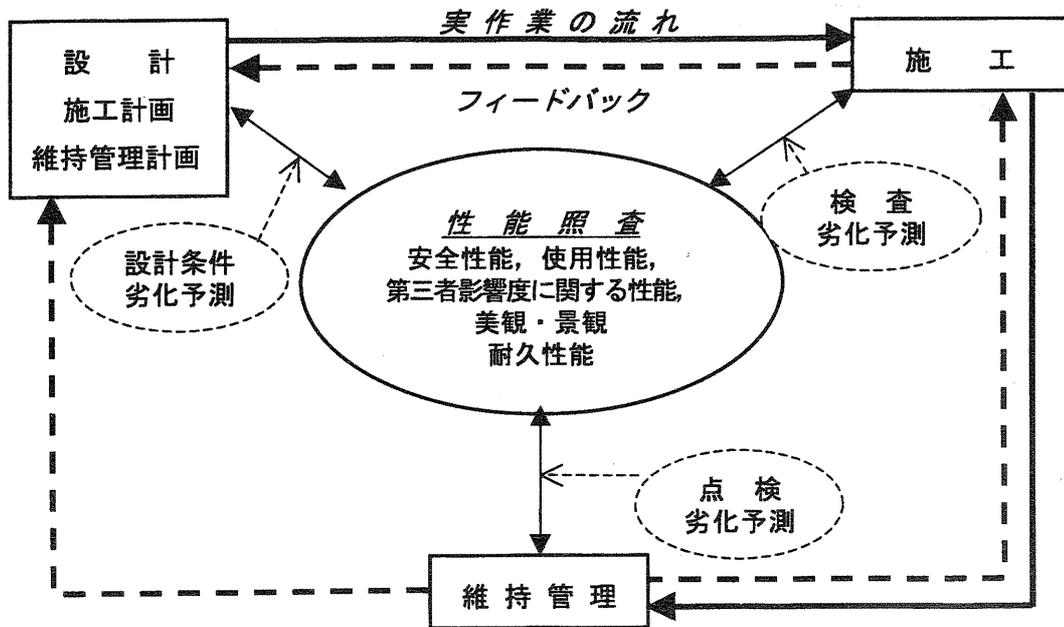


図 6.1.13 性能照査を核とした設計、施工および維持管理の統合による性能保証の枠組み

いて、コンクリート標準示方書全体に取り込まれる必要がある。

コンクリート構造物の性能保証にとって、維持管理は重要な役割を果たす。これからの新設構造物については、耐久性能を照査することが前提となり、基本的に、適切な設計、施工がなされた場合には、維持管理に要する労力はそれほど大きなものとはならない。しかしながら、所定の期間、所定の水準に性能を保持することを保証するためには、適切な維持管理を行うことは必要不可欠となる。維持管理を行うことによって、たとえば竣工時に検出できなかった初期欠陥などによる早期劣化を初期段階で把握し、当初の性能水準を維持するために必要な処置を講じることが可能である。

一方、既設構造物においては、すでに劣化が進行しているものも多く存在し、当初想定された耐用期間が満足されない場合もある。このような場合においても、現時点において適切な維持管理計画を作成し、すみやかに実行していくことにより、要求水準を満足することが期待される。場合によっては、耐用期間延長の可能性も考えられる。

このように、維持管理は性能保証のための一種のツールであると言える。設計、施工等からなる従来のコンクリート標準示方書の体系に「維持管理編」が加わったことは、まさにこのような性能保証を具現化するための枠組みを構築したことに他ならない。

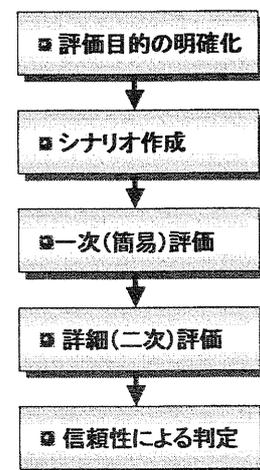


図 6.1.14 IS013822 における既設構造物の評価の流れ

図 6.1.13 は、設計、施工および維持管理における性能照査と性能照査を核としたそれら三者の相互関係について示したものである。この図から明らかなように、予定供用期間中、コンクリート構造物の性能を適切な許容限度内で要求される水準に維持することがこれら三者の共通の課題であり、それぞれの場面で、それぞれの条件、方法により、この課題に取り組む必要がある。さらに、これらの連関を完成させ、設計、施工、維持管理を一貫した概念の下に体系化するためには、図中にあるようなフィードバックによる相互作用を常に働かせなければならない。

ISO/DIS 13822 「既設構造物の評価方法」は、ISO2394 「構造物の信頼性に関する一般原則」に準じた安全性および使用性の要求性能に関する評価と判定の基準案について示されたものである。図 6.1.14 は、この中で示された基本的な評価の流れを簡略的に表したものである。評価は簡易レベルと詳細レベルの 2 段階で行い、最終的に判定を行う際には必ず信頼性を評価することを要求している。つまり、性能保証をするためのシステムを構築することを目的として一連の維持管理技術を統合化していく際には、信頼性を指標として、より合理的な評価および判定を行えるようにすることが重要であるといえる。コンクリート標準示方書 [維持管理編] においても、これに対応するように、2 段階評価とし、判定において、適切な安全余裕を考慮して、性能を許容範囲内に維持することを基本としている。

## 2) 研究内容および成果

### 塩害劣化 RC 橋の安全性評価に関する研究

近年、RC 構造物の劣化が社会問題化し、その維持管理基準の制度化が急がれるとともに、合理的な維持管理法の実用化が望まれている。本研究では、多主桁 RC 橋の塩害劣化に着目し、既往の研究を基礎とし、劣化の促進要因として荷重による曲げひび割れを考慮した経時的な多主桁 RC 橋の劣化進行モデルの構築を試みた。また、多主桁 RC 橋では、塩害による劣化速度やそれによる安全性の低下が桁ごとで不均一となり、複雑な状態となる。このような状態においては、各桁の剛性の変動による荷重の再配分が起こり、各桁に発生する断面力にもばらつきが生じると考えられる。既往の研究では、この点が考慮されていなかったが、本研究では、橋梁モデルの確率論的シミュレーションにより、劣化による断面力再配分、断面力のばらつき、耐荷力低下とそのばらつきを評価し、各桁の安全性の低下の特性を評価した。また本研究では、この点に主眼を置き、既往の研究で考慮された潜伏期のばらつきの影響については考慮しないものとした。

本研究により、以下のことが明らかとなった。

(1) RC 多主桁橋の塩害劣化の予測において、曲げひび割れを考慮に入れた劣化予測手法を示した。曲げひび割れの影響を受ける領域は、他の領域と比べ、劣化進行が早いことが示された。また、多主桁橋のなかで劣化進行の遅い主桁が、その影響をより大きく受けることがわかった。

(2) 主桁剛性劣化モデルは、既往の研究 7) で示された式を対象橋梁をモデル化した解析結果を参考に改良し、その式に曲げひび割れが塩害劣化に与える影響を考慮することで、主桁

断面剛性低下を表した。断面力解析の結果より、材料特性やひび割れの影響を受けて断面剛性が変動し、発生断面力のばらつきによる荷重再配分の影響を受け剛性の小さい桁にかかる荷重を剛性の大きな桁が負担することが確認できた。

(3)今回の対象構造物で安全性指標  $\beta$  による評価を行った結果、最大断面力が発生する桁が必ずしも危険な評価とならず、部材のみに着目した評価でなく、構造系の変化に留意した評価が必要と思われる結果が得られた。

(4)各主桁に設定した標準偏差の値により、安全性指標  $\beta$  の値は、大きく変化することが示された。今後は、各桁の変動係数の値を鉄筋の腐食にともない変化させ、より信頼性のある評価結果が得られるようにする必要がある。

### 塩害劣化 RC 橋の最適補強に関する研究

多主桁 RC 橋においては、塩害による劣化進行が部材毎に異なることが考えられ、構造安全性の不均一な状態が生じる。このような橋梁に対して、所要の要求を満たすように、合理的な補強対策を講じるためには、補強による構造安全性の変化に着目した補強の最適化検討が必要である。本研究では、塩害による劣化を生じた RC 橋の安全性を改善するため、外ケーブルによる補強を対象として、まず、最適補強の概念と目標を整理した上で多属性効用理論と遺伝的アルゴリズム GA を用いて最適化計算を行い、その特性について検討を行った。

以下に本研究で得られた知見についてまとめる。

(1)最適補強の考え方として、目標供用年数、いくつかの補強時期を予め設定した上で、各時期において補強量ができる限り少なくなるような最適補強量を求めることを目標とし、同時に主桁間の剛性バランスを改善することを考慮するものとした。その具体的手法として多属性効用理論を適用して同一尺度に基づく多目的最適化問題として定式化し、遺伝的アルゴリズム(GA)による演算法の適用を提案した。

(2)本手法を塩害劣化 RC 橋に適用した結果、補強時期が早いほど補強量が少なくなる結果となった。また、剛性バランスの改善を考慮しない場合についても最適化を行った結果、補強量はより小さくなった。しかし、安全性確保に対する余裕が小さくなり、主桁間の剛性のバランスも改善されにくい結果となった。この場合には、早い時期に劣化程度の大きな桁のみに補強し、剛性バランスの改善を図ることが望ましいと考えられる。

(担当：神戸大学・工学部・助教授，森川 英典)

以下に研究成果の詳細を示す。