

## 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24年 5月 9日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560491

研究課題名（和文） 地中に構築されるコンクリート構造物の長期耐久性予測に関する研究

研究課題名（英文） Estimation of Long-term Durability for Underground Concrete Structures

研究代表者

関 博（SEKI HIROSHI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40120919

研究成果の概要（和文）：地下空間の環境（当初は酸素拡散環境（酸化性環境）から酸素欠乏状態（還元性環境）に移行）にあるコンクリート構造体において構造体中鉄筋の腐食挙動に関して、電気化学的実験を実施した。この結果、次の様な結論が得られた。

- (1) 酸化性環境（約 20℃）およびその後の還元性環境（約 50℃）における腐食速度は、各々 0.0014～0.0095 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) および 0.015～0.055 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) となり、電気化学的手法で得られた既往の報告と同等あるいはそれ以下であった。
- (2) 腐食速度を求めるための種々の分極法の精度に関しては、適切な測定時間と電位掃引速度を設定する必要がある。
- (3) 本研究ではあらたに、還元性環境での腐食速度を評価するために不動態維持電流法による測定を提案しており、この測定方法が有効であることを提示した。

研究成果の概要（英文）：Corrosion phenomenon of underground concrete structures are examined. Surrounding conditions of structures are in the initial stage exposed to air condition(oxidation environment) and are in the long final stage surrounded with no air condition(deoxidized environment). Research work aims at the corrosion of reinforcing bar embedded in the concrete members. Following results are obtained from the electro-chemical experimental work.

- (1) Corrosion rate of bars in the oxidation environment(app.20 °C of water) is 0.0014～0.0095( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), and those in the deoxidized environment is 0.015～0.055( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), respectively.
- (2) Though the polarization method of bar is effective technique so as to obtain corrosion rate, it is necessary to set the adequate measuring time and the adequate sweep speed of electric potential.
- (3) The method of passivation electric current is the most suitable one so as to evaluate corrosion rate of bars under deoxidized environment

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度	0	0	0
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：長期耐久性、還元性腐食、鉄筋腐食、不動態

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 社会基盤施設として交通・運輸施設（大深度道路など）、遊水施設（地下貯留池など）など地下空間を有効利用することが求められており、最近では放射性廃棄物の処分施設などが計画されている。これらの施設の構造物としては鉄筋コンクリートが主体と考えられる。
- (2) この種地下構造物を構築すると、建設後の維持管理は不可能に近く、しかし所要の性能保持のためには長期の耐久性が求められる。コンクリート構造物の長期耐久性に関しては、長期におけるコンクリートの溶脱減少など素材の数値解析などはあるが、RC部材ではコンクリート中の鉄筋の腐食が構造体の性能保持に大きく影響する。
- (3) 通常の大気環境にあるRC部材で供用年数が極めて長くない限りはコンクリート内の鉄筋表面は不動態化されているとして、塩化物の浸透や中性化などを除いては、鉄筋は防食されており耐久性に関して大きな危惧は生じないとされている。
- (4) 一方、地下空間に構築された密封環境にある構造体（たとえば、交通・運輸施設や遊水施設の地盤側、放射性廃棄物の処分施設）のコンクリートの耐久性に関して、特に内部鉄筋の腐食に関する研究は極めて少ない。しかも、一般に長年月の供用性が求められ鉄筋腐食は構造体の耐久性を左右する重要な項目である。

### 2. 研究の目的

- (1) 社会基盤施設として地下空間を有効利用することが求められており、構造物としては鉄筋コンクリートが主体と考えられる。
- (2) この種地下構造物を構築すると、所要の性能保持のためには長期の耐久性が求められる。地下空間に構築される構造体は当初は酸素拡散環境（酸化性環境）にあるが、一定期間後は酸素欠乏状態（還元性環境）に移行する。このような環境に構築されるコンクリート構造物の耐久性に関して、特に内部鉄筋の腐食に関する研究は極めて少ない。しかも、一般に長年月の供用性が求められ鉄筋腐食は構造体の耐久性を左右する重要な項目である。
- (3) 大気中環境と異なる環境条件では腐食メカニズムの構築および供用寿命の予測方式が必要であり、新たな検討が求められる。地

下環境での寿命予測のためには、酸化環境から還元環境に至る過程における鉄筋腐食に関しては情報が乏しく、腐食機構と腐食速度を得る必要がある。

### 3. 研究の方法

研究は実験的アプローチを主体とした。

- ① コンクリート鉄筋の腐食量を検討するために、a) 電気化学的に腐食を測定する方法、b) 気中に発生する気体（たとえば、水素ガス）や溶液中に溶解するイオン（塩類）を測定する方法、b) 腐食生成物の分析や重量を測定する方法、などの方法がある。今回は腐食量が微量と予想されたために、a) や b) の方法が考えられる。最終的には研究施設・設備・研究資料が充実しており、鉄筋腐食などでの研究実績が豊富な b) の方法を採用することとした。

- ② 実験の実施に当たっては、コンクリート供試体の作成（事前に鉄筋を埋設）  
→鉄筋腐食の促進試験の実施  
→酸化性環境での水中浸漬実験（20℃）  
→還元性環境での水中浸漬実験（50℃、溶存酸素濃度 0ppm の水溶液）  
→浸漬実験後の鉄筋の取り出しと鉄筋腐食状況の観察

の順序とした。実験に供した供試体は鉄筋を埋設した実験に供した供試体はコンクリート体（80×80×180mm）であり中央に鉄筋を配置した。

実験の遂行にあたっては、精度を向上させるなどのために事前に多くの予備実験を実施し実験方法を定めた。これらは、

- a) 鉄筋腐食の促進腐食の再現方法、b) 還元性環境（酸素欠乏環境）の実験室での再現方法、c) 電気化学的な腐食速度の測定方法、などである。c) に関しては自然電位、分極特性、分極抵抗、比抵抗などの測定項目を設定した。
- a) 鉄筋腐食の促進腐食の再現方法に関しては、乾湿繰返し養生、定電位アノード溶解の2種の方法を採用することとした。
- b) 還元性環境（酸素欠乏環境）の実験室での再現方法に関しては、溶液中にアルゴン吹き込み水溶液中の酸素を脱気することとした。
- c) 電気化学的な腐食速度の測定方法は腐食速度の極めて低い状態の値を得るために、精度の高いポテンショ・ガルバナスタッドを使用することとした。

### ③ 実験装置

今回試作して実験に供した装置を図-1に示す。

#### 4. 研究成果

本実験からほぼ次のような結論が得られた。

##### (1) 自然電位の変化について

鋼材の自然電位は還元性環境移行後は材齢 30~60 程度で $-900\sim-1000\text{mV}$  (vs. CSE) の非常に卑な値になる。これは浸漬試験において溶液中を極低酸素濃度にしたことで鋼材周囲の酸素が徐々に減少して、カソード反応および腐食反応が抑制されたためと考えられる。また、分極特性に関しては鋼材が不動態域にあると思われ、(3) で呼べるように腐食速度は安定して小さいことがわかった。

##### (2) 腐食形態について

###### (a) 酸化性環境

コンクリート供試体を製作後に数時間~1日という極めて短期間で表面に均一に酸化皮膜 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を生成することで不動態化を完了し、その後、数時間~数日間かけて、この不動態皮膜はより緻密な拡散障壁となり、腐食反応を大きく抑制するようになる。その結果、腐食速度は極めて小さくなる。すなわち、養生期間で不動態化がほぼ完了していたと考えられる。腐食促進試験後の腐食速度も非常に小さな値であったことから、酸化性環境下では緻密な不動態皮膜の生成反応が安定かつ継続的に生じていたと思われる。

###### (b) 還元性環境

遷移環境を経て、更なる溶存酸素の消費・減少に伴って還元性環境へ移行することで、自然電位は卑な電位に到達する。鉄筋露出部で不動態皮膜 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ を生成する緩やかな全面腐食となる。また、この時のカソード反応としては、酸素還元反応、水素発生反応が継続的に生じていた可能性が高く、3価鉄の還元反応が継続的に生じていた可能性は低いことが分かった。更に、温度が高くなることで還元性環境への移行速度が促進されることが分かったため、腐食速度は温度に大きく影響を受けることが推察された。

##### (3) 腐食速度について

実験結果のまとめを図-2に示す。

###### (a) 酸化性環境

シリーズ別の違い、測定法の違いによる腐食速度への影響に大きな差はなかった。

###### (b) 還元性環境

シリーズ別による腐食速度への影響、浸漬期間の経過に伴う腐食速度の減少は認められなかったが、測定法の違いによる腐食速度への影響は大きかった。すなわち、分極抵抗

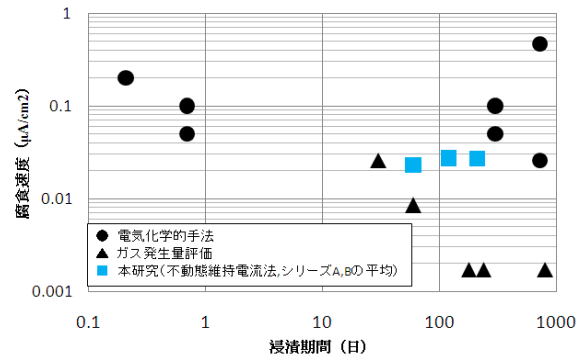


図-2 腐食速度の比較

への影響は大きかった。すなわち、分極抵抗法、Tafelの外挿法、不動態維持電流法を比較したが、不動態維持電流法で得られた値が、実際の腐食速度に近い値を評価できたと考える。

###### (c) まとめ

酸化性環境および還元性環境の両環境において、不動態維持電流法で得られた値が、実際の腐食速度に近い値を評価できたと考える。また、この手法で評価した値は、酸化性環境では $0.0014\sim0.00954(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ 、還元性環境では $0.015\sim0.055(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ である。還元性環境へと移行することで腐食速度が約10倍程度大きくなった理由としては、温度変化による影響が大きかったことが推察された。

##### (4) 測定方法に関して

非常に小さな腐食反応を生じる系の分極特性を評価する場合、分極の測定時間とその速度(掃引速度)による影響が大きい。したがって、反応系に対して適切かつ最小限度の分極時間と掃引速度を用いることが重要であると考えられる。

#### 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1件)

- ①金子聡志、朝瀬康平、関博、石川光男：酸化性環境から還元性環境に至るコンクリート中鋼材の分極特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読あり、Vol. 33, No. 1, 2011, pp.

[学会発表] (計2件)

- ①朝瀬康平、金子聡志、関博、石川光男：酸化性環境から還元性環境への遷移期間におけるコンクリート中鋼材の腐食機構、第37回土木学会関東支部技術研究発表会、Vol. 37, 2011

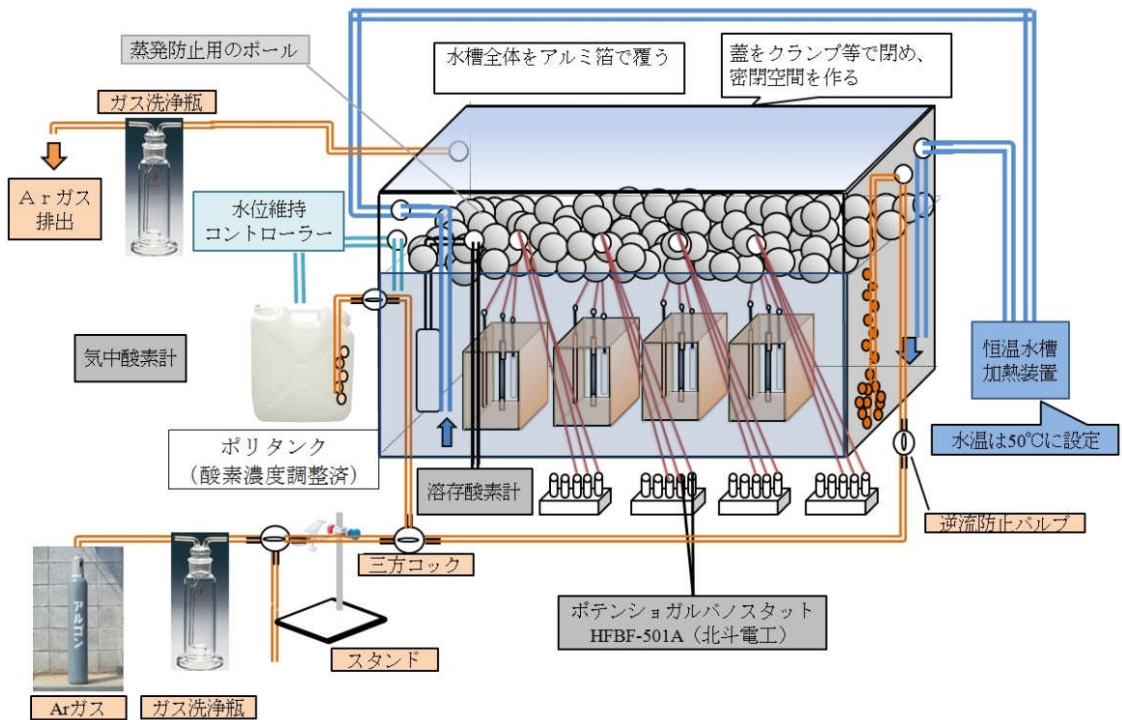


図-1 実験装置

②金子聡志、朝瀬康平、関 博、石川光男、杉橋  
 直行：酸化性環境から還元性環境に至るコンク  
 リート中鋼材の腐食機構に関する実験的検討、  
 土木学会第 61 回年次学術講演会，No. 5-031，  
 pp. 1067-1068，2010

〔図書〕（計 1 件）

町田篤彦，関 博，薄木征三，増田陳紀，姫野賢治，  
 渡辺邦夫：土木材料学，オーム社，214pp.，2011

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関 博 (HIROSHI SEKI)

早稲田大学創造理工学部 教授

研究者番号：40120919

### (2) 研究協力者

杉橋直行（清水建設株）：実験データの検討

山本 悟（日本防触工業株）：腐食のメカニ  
 ズム検討