耐久的な RC 構造物とするための 設計上の課題について

T. U. Mohammed*¹・大即信明*²・濱田秀則*³・渡邊弘子*⁴

概 要 耐久的な RC 構造物とするための設計上の課題のうち、特に、コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす要因について、室内および現地曝露試験結果より得られた知見について述べる。検討の結果、今後解決すべきと考えられる課題は以下のとおりである。①鉄筋とコンクリートの界面に生じる空隙をどのように除去するか。②鉄筋とコンクリートの界面に空隙が存在する場合、鉄筋腐食を引き起こさないための限界塩化物イオン量をどのように定義するか。③鉄筋腐食を抑制するためのコンクリートのひび割れ幅をどのように制限するか。④コンクリート中の微細ひび割れを抑制するため、コンクリートと鉄筋の付着が比較的重要でない構造物へ丸鋼を使用することができるか。

キーワード：耐久性、塩化物イオン量、鉄筋腐食、ひび割れ、鉄筋-コンクリート界面

1. はじめに (Introduction)

コンクリート構造物の耐久性を向上させることはコンクリート工学において非常に重要な課題であり、多くの研究者らによる研究が報告されている。しかし、これらの課題のうちいくつかの課題については、マクロな観点からの検討は行われているものの、ミクロな観点からの検討は不十分であるものも多い。

本稿では、コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす要因について、ミクロな観点に立脚して実施した室内試験および現地曝露試験結果について述べる。21 世紀に向かって耐久的なコンクリート構造物の建設へステップを進めるためには、これらの課題をはじめとして耐久性に関わる多くの課題に対する研究が必要と考えられる。

2. 背景 (Background)

コンクリートは、その経済性、構成材料の入手の手軽さ、造形の自由さ等から、今日広く用いられており、建設材料としてその評価は高い。コンクリートはあらゆる場所で我々の生活とともにあり、我々の周囲からコンクリートを分離することはできない。例えば我々は、コンクリートで造られた床の上で眠り、コンクリートで敷かれた道路の上を歩き、コンクリート道路の上を走るバスに乗り、コンクリートで造られたオフィスで働き、コンクリートでできた公園のベンチに座って美しい自然を眺めている。このように、我々は明らかにコンクリートの

恩恵を受けている。事実、コンクリートの構成材料の一つであるセメントの生産量は 1995 年には全世界で 14 億トンであった。この値に基づけば、世界の人口一人当たり 2 トンのコンクリートが毎年新しく打設されていることになり、今年、世界人口が 60 億人に達するとすると、おおまかに言って 120 億トンのコンクリートが新設される計算になる。

しかし、最近ではコンクリートの早期劣化により、所定の補修時期よりも早くに補修する必要が生じている構造物も多い。現段階において、設計時からコンクリート構造物の耐久性を大幅に改善する措置を講じなければ、我々の次世代はコンクリート構造物の管理において多くの困難に直面することになるであろう。

また、セメントの製造時には、地球温暖化現象を引き起こす要因の一つである二酸化炭素が大気中に大量に放出される。二酸化炭素は各種の生産活動に伴って排出されるが、1 トンのセメントを製造する過程では、約 1 トンの二酸化炭素が大気中に放出される¹⁾。したがって、地球大気への負荷を削減し、地球温暖化を抑制するためにも、耐久的なコンクリート構造物を建造するよう心がける必要がある。

コンクリート構造物の耐久性は多くの要因に依存しているが、本稿では、コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす以下の要因の重要性について述べる。

- (1) 鉄筋とコンクリートとの界面における空隙が鉄筋腐食に及ぼす影響について
- (2) 鉄筋とコンクリートとの界面に空隙や気泡が存在する場合の鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン量について
- (3) コンクリートのひび割れ幅が鉄筋腐食に及ぼす影響について
- (4) 鉄筋の種類（丸鋼および異形棒鋼）が、鉄筋腐

*¹ T. U. Mohammed／運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室 研究官

*² おおつき・のぶあき／東京工業大学大学院教授 理工学研究科国際開発工学専攻 工学部開発システム工学科（正会員）

*³ はまだ・ひでのり／運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室室長（正会員）

*⁴ わたなべ・ひろこ／運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室客員研究員（正会員）

食に及ぼす影響について

3. 鉄筋とコンクリート界面における空隙の及ぼす影響 (Interfacial Gaps at the Steel-Concrete Interface)

一般に、コンクリート構造物や部材が建造される際には、鉄筋は型枠内の所要の位置に固定されコンクリートが打設される。この配置では、コンクリートは重力方向に変形できるが鉄筋はできない。そのため、鉄筋が固定されているという状況と、ブリーディング水が鉄筋の下側でとめられるという理由から、特にコンクリートの打設方向に対して水平に配置された鉄筋の下面付近では空隙や気泡が生じることとなる^{2), 3)}。

このような例を写真-1に示す。なお、写真-1は供試体 ($W/C=0.5$) の切断面である。水平鉄筋下側に空隙が生じていることが確認できる。

また、空隙が誘因したと考えられる鉄筋の腐食を写真-2³⁾、写真-3³⁾に示す。写真-2はコンクリートの打設方向に対して水平方向に配置した鉄筋腐食の例 ($W/C=$

0.5)、写真-3は垂直方向に配置した鉄筋腐食の例 ($W/C=0.5$ および 0.7) である。写真に示す丸鋼と異形棒鋼はそれぞれ別個の供試体から採取したものであり、これらの供試体は発錆を促すため、コンクリート練混ぜ時に 10 kg/m^3 の塩を混入して作製した。このため、塩化物イオン量はコンクリートに対して 0.43% と高くなっている。また、鉄筋を採取した時点での供試体の材齢は

写真-1 水平鉄筋下側に形成された空隙

写真-2 水平鉄筋の腐食状況

写真-3 垂直鉄筋の腐食状況

Several Issues in Designing Durable RC Structures

By T. U. Mohammed, N. Otsuki, H. Hamada and H. Watanabe

Concrete Journal, Vol. 38, No. 11, pp. 36~41, Nov. 2000

Synopsis From the observations during laboratory and field investigations on concrete specimens, the following issues are seemed to be considered to improve the durability of concrete structures : ①How to remove the gaps from the steel-concrete interfaces? ②Is it possible to defined the chloride threshold value with the presence of interfacial gaps at the steel-concrete interface? ③Is it possible to limit the rate of corrosion by limiting the crack width? and ④As the micro-cracking in concrete causes to accelerate the rate of deterioration, therefore, is it possible to recommend the use of plain bar for structures, where the bonding requirements are not so significant?

Keywords : durability, chloride threshold values, corrosion, crack widths, steel-concrete interface.

60 日である。

写真-2 によれば、丸鋼、異形棒鋼の違いに関わらず、水平に配置された鉄筋の上面（HTT）では腐食が比較的軽微であるのに対し、下面（HTB）では腐食がかなり進行していた。

一方、写真-3 に示すように、垂直に配置された鉄筋では、水平に配置された鉄筋の上面と同程度の軽微な腐食であることが認められた。ただし、供試体中の相対的な鉄筋位置の高さの違いの影響は明らかではなかった（写真-3 中、VT、VM、VBは、鉄筋がそれぞれ供試体上部、中間、下部に位置していることを示している）。

しかし、鋼材の種類の影響は認められるようであり、丸鋼よりも異形棒鋼で腐食が進んでいた。さらに、この傾向は水セメント比の大きい $W/C=0.7$ の場合に明らかとなっており、異形棒鋼の節の下に発生した孔食が顕著に認められた。この孔食は、節の下にブリーディング水が溜まること、これによりこの箇所空隙が形成されることがその一因と考えられる。

写真-4 には、水平鉄筋の下側に形成された空隙と発生した腐食生成物（錆）の例を示す。コンクリートの水セメント比は 0.5、供試体は 60°C 乾湿繰り返し環境下に曝露し、材齢は 30 日である。このように、鉄筋の下側に形成された空隙の周囲には、腐食生成物が発生しやすいことが認められる。

さらに、写真-5 に示すように、水セメント比が高い（ $W/C=0.7$ ）場合には相当量の腐食生成物が水平鉄筋下の空隙に蓄積され、さらに水平鉄筋下側のコンクリート部に押し込まれてゆくことが確認された。

同様の現象は、自然環境下に比較的長期間曝露したコンクリートはりから採取した鉄筋においても観察された⁴⁾。写真-6 は、海洋環境下の干満帯に 23 年間曝露したはり供試体（ $W/C=0.7$ 、コンクリートに対する塩化

物イオン量は 0.1%）から採取した鉄筋の例である。顕微鏡観察の結果、水平鉄筋下面にはかなり進行した腐食が認められた。また、写真-7 はスターラップの腐食状況である。（a）は屋外実験場で週に一度塩水が噴霧される環境下に 16 ヶ月曝露した供試体（ $W/C=0.5$ 、コンクリートに対する塩化物イオン量は 0.07%、ひび割れなし）から採取したものであり、（b）は海洋環境下の干満帯に 23 年間曝露した供試体（ $W/C=0.7$ 、コンクリートに対する塩化物イオン量は 0.10%、ひび割れあり）から採取したものである。これによれば、水セメント比や環境条件、曝露材齢の違いにかかわらず、両者とも垂直方向の鉄筋はほとんど腐食していないのに対し、水平方向下面では大部分が腐食していることが認められた。

さらに、写真-8 には、自然大気中（海岸部）に 23 年間曝露したはり（ $W/C=0.7$ 、コンクリートに対する塩化物イオン量は 0.008%）から採取した水平鉄筋の例を示す。写真-8 において、上部の鉄筋 2 本ははり供試体下部に配置した引張側主鉄筋であり、腐食はひび割れに起因するものと考えられる。これに対し、下部の鉄筋 2

写真-4 水平鉄筋下の気泡と錆（ $W/C=0.5$ ）

写真-5 水平鉄筋下の空隙に蓄積された錆（ $W/C=0.7$ ）

写真-6 水平鉄筋下の錆

(a) $W/C=0.5$, 塩水噴霧 16 ヶ月後

(b) $W/C=0.7$, 干満帯曝露 23 年
写真-7 スターラップの腐食状況

写真-8 水平鉄筋の上部と下部の腐食状況

本は供試体上部に配置した組立鉄筋であるにもかかわらず水平方向下面で錆の層が観察されており、この腐食は鉄筋下に生じた空隙に起因するものと考えられる。このように、塩化物イオン量が非常に小さい値であっても、空隙によって腐食が引き起こされることが明らかとなった。

4. 限界塩化物イオン量の定義 (Chloride Threshold Values)

限界塩化物イオン量は鉄筋の腐食開始を予測するための値である。我が国では研究者らによって多数の報告が

あるものの、一般に、コンクリート中の鉄筋の発錆面積が顕著な上昇を見せるのは塩化物イオン量が 2.5 kg/m^3 (コンクリートに対して 0.1%) 以上の場合であり、 $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ (コンクリートに対して $0.05 \sim 0.1\%$) の範囲にそのしきい値があると言われている⁵⁾。

しかしながら、限界値に達しないようなわずかな量の塩化物イオンでも、鉄筋とコンクリートとの界面に空隙や気泡が存在する場合には鉄筋の不動態皮膜が破壊される場合があり得ると考えられる。先に写真-8 に示した供試体の鉄筋位置における塩化物イオン量は、コンクリートに対して 0.008% と非常に小さい値であったにもかかわらず、空隙に起因すると思われる腐食が観察された。このため、鉄筋とコンクリートの界面に空隙が存在する場合には、鉄筋腐食に対する塩化物イオンの限界値を限定することはできず、もし限定したとしてもその値はいまいなものとなると考えられる。

5. ひび割れ幅の及ぼす影響 (Crack Width)

コンクリートのひび割れ幅と鉄筋の腐食程度に注目した研究はいくつか報告されているが、ひび割れ幅と鉄筋腐食の関連性の有無については研究者らの意見が分かっている^{6),7)}。写真-9 に、丸鋼および異形棒鋼を用いて作

(a) 丸 鋼

(b) 異形棒鋼

写真-9 異なるひび割れ幅における鉄筋腐食状況

製したコンクリートはりの、ひび割れ位置における鉄筋腐食状況を示す⁸⁾。供試体 ($W/C=0.5$, コンクリートに対する塩化物イオン量は $0.10\sim0.15\%$) は、初期に曲げひび割れを導入し、屋外実験場で週に一度塩水が噴霧される環境下に 16 ヶ月曝露した。導入したひび割れ幅は通常のコンクリート構造物において観察される 0.1 mm から 0.35 mm の範囲である (図中の数値はひび割れ幅を示す)。

これより、ひび割れ幅が小さい場合でも、鉄筋は比較的大きな腐食を示していることがわかる。また、孔食の深さや孔径はひび割れ幅とは相関性がないようである⁹⁾。

さらに、先に示した写真-8 より明らかなように、気中環境ではひび割れ位置における腐食は比較的軽微であり、腐食程度とひび割れ幅との間に相関性は認められないようであった。もちろん、腐食の初期段階では腐食程度とひび割れ幅との間に何らかの関係があると思われるが、構造物の設計供用期間を考慮すれば、初期段階における両者の関係は無視し得る程度のものと考えられる。

ひび割れ幅と腐食程度との間に相関性が認められない原因としては、以下の理由が考えられる。すなわち、我々が観察しているのはコンクリート表面におけるひび割れ幅であり、鉄筋位置における実際のひび割れ幅ではないこと、鉄筋とコンクリート表面の付着が切れている領域が不明であること、および、ひび割れ幅が小さいほど毛細管現象によって塩水が浸透しやすい上に、雨水によって洗い流される塩化物イオン量は小さいため、塩化物イオン量は相対的に大きくなると考えられること、等である。

6. 鉄筋種類の及ぼす影響

(Plane Bar and Deformed Bar)

鉄筋種類 (丸鋼および異形棒鋼) が腐食程度に及ぼす影響を比較するための調査も行った⁷⁾。曝露実験場 (東京工業大学) の一部を写真-10 に示す。この写真は、塩水の噴霧後、しばらくしてから撮影したものである。ひび割れ数の少ないはり (写真手前) は丸鋼で作製した供

写真-10 曝露実験場 (東京工業大学)

試体であり、ひび割れ数の多いはり (写真奥) は異形棒鋼で作製した供試体である。この写真から、供試体に塩水が浸透していること、および異形棒鋼を用いて作製したはりには丸鋼を用いて作製したはりに比べて塩水が比較的広い範囲に浸透していることがわかる。これは、異形棒鋼を用いた供試体の方が、ひび割れが分散するためである。

コンクリートの内部ひび割れによる塩水の浸透ははりの外観からは観察できないが、コンクリートに浸透した塩水は、異形棒鋼で作製したはりよりも丸鋼で作製したはりにより早く乾燥していくのが観察された。

また、異形棒鋼で作製したはりの方が丸鋼で作製したはりよりも、ひび割れがある場合には、酸素透過性および塩化物濃度は高く、分極抵抗およびコンクリート抵抗 (鉄筋腐食を電気回路で表現したときにコンクリートが持つ腐食反応に抵抗する大きさで、比抵抗ともいう。) は低いことが確認された^{8),9)}。この結果と観察結果とを併せて考えると、異形棒鋼は丸鋼に比べてより腐食しやすい傾向にあると言える。先に示した写真-9 から、丸鋼 (a) より異形棒鋼 (b) で腐食が比較的大きいことがわかる。

写真-9 と同じ供試体のひび割れ幅 0.1 mm の位置から採取した、丸鋼と異形棒鋼との腐食を写真-11 に示す。写真より明らかなように、異形棒鋼の方が丸鋼よりも孔食の径および深さが大きくなっており、また、より大きい孔食は、概ね異形棒鋼の節の近くで発生している。さらに、表面ひび割れ同様、コンクリートの内部ひび割れは、丸鋼を使用したはりに比べて異形棒鋼を使用したはりでより多く発生していることも確認された¹⁰⁾。

異形棒鋼は丸鋼に比べて付着強度が高く、ひび割れを細かく分散することができるため、一般的に使用されている。しかしながら、本実験結果からは、通常観察される $0.1\sim0.35\text{ mm}$ の範囲にあるひび割れでは、ひび割れ幅と鉄筋の腐食程度との間には相関性は認められず、異形棒鋼を使用したひび割れ数の多い供試体において、鉄筋腐食が進んでいることが確認された。異形棒鋼では

写真-11 丸鋼および異形棒鋼における孔食

鉄筋周囲に微細ひび割れが発生する可能性が高く、このひび割れが鉄筋腐食を引き起こすのではないかと考えられる。

7. 結論 (Concluding Remarks)

以上、筆者らが実施した室内試験および現地曝露試験結果に基づいて、コンクリート中の鉄筋の腐食に関する考察を述べた。この結果を基にした場合、コンクリート構造物の耐久性を改善するための課題として以下の項目が挙げられる。

(1) 鉄筋の発錆を促進すると考えられる、鉄筋とコンクリートの界面における空隙をどのように除去するか。

(2) 鉄筋とコンクリートの界面に空隙が存在する場合、鉄筋腐食を引き起こさないための限界塩化物イオン量をどのように定義するか。

(3) 鉄筋腐食を抑制するためのひび割れ幅をどのように制限するか。

(4) 劣化を促進させると考えられるコンクリート中の微細ひび割れ抑制のため、コンクリートと鉄筋の付着が比較的重要でない構造物に丸鋼を使用することができるか。

8. おわりに

近年、コンクリート構造物の劣化問題が改めて顕在化し、これまでに蓄積されてきた社会資本の老朽化が広く一般に認識されはじめている。本文中にも述べたように、コンクリートは今や我々の生活とは切り離せない重要な建設材料の一つである。今後は既存構造物を適切に維持管理していくと同時に、新規の建設にあたっては、より耐久性に優れた構造物を建造して行かねばならない。

本稿は、コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす要因のうち、特に、コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす種々の影響について私見を述べたものであるが、使用鋼材の選択等、今後、十分な耐久性を構造物に付与するための検討課題となれば幸いである。

参考文献

- 1) Malhotra, V. M., Making Concrete "Greener" with Fly Ash, Concrete International, pp. 61-66, May 1999.
- 2) Welch, G. B., and Patter, B. J. F., Bond Strength of Reinforced Effectuated by Concrete Sedimentation, Journal of American Concrete Institute, Vol. 62, No. 2, pp. 251-263, 1965.
- 3) Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hisada, M., Corrosion of Steel Bars with Respect to Orientation in Concrete, ACI Material Journal, Vol. 96, No. 2, pp. 154-159, March-April 1999.
- 4) Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hisada, M., and Hamada, H., Marine Durability of 23-Year-Old Reinforced Concrete Beams, Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, ACI SP 192-65, pp. 1071-1088, 2000.
- 5) 大即信明ほか：コンクリートの耐久性シリーズ 塩害 (I), 技報堂出版, pp. 31~34, 1986.
- 6) Okada, K., and Miyagawa, T., Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete, Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, Detroit, pp. 237-254, 1980.
- 7) Arya, C., Ofori-Darko, F. K., Influence of Crack Frequency on Reinforcement Corrosion in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 3, pp. 345-353, 1996.
- 8) Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hisada, M., and Shibata, T., Effect of Crack Width and Bar Types on Corrosion of Steel in Concrete, Accepted to publish in ASCE Material Journal.
- 9) Otsuki, N., Mohammed, T. U., Hisada, M., Nagataki, S., Corrosion of Plain and Deformed Steel Bars in Cracked Concrete, Fourth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Supplementary Papers, pp. 249-268, June 1998.
- 10) Goto, Y., Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, Journal of American Concrete Institute, Vol. 68, pp. 244-251, April 1971.

国際会議ニュース

鉄とコンクリートの接合に関する国際シンポジウム

'Connections between Steel and Concrete', Symposium

日 時：2001年9月9日～12日
場 所：Stuttgart (Germany)
主 催：RILEM, *fib*, University of Stuttgart, ACI, IABSE
内 容：The Technical Program will consist of several sessions featuring invited speakers and contributors selected from the response to the "Call for Papers". The official language of the Symposium and the Proceedings is English.
Papers may be submitted within a broad spectrum related to the following technical categories :

Papers based on experimental and/or numerical investigations are welcome.

論文申込：既に終了

連絡先：Symposium Secretariat

c/o IWB University of Stuttgart

Pfaffenwaldring 4

70550 Stuttgart

Germany

Email : contact@iwb.uni-stuttgart.de

Internet : <http://www.iwb.uni-stuttgart.de>