

コンクリート構造物の信頼性の向上

－ひび割れの影響－

渡辺博志*

1. はじめに

コンクリート構造物は、耐久性に富み社会資本の根幹を形成するものである。これまで、コンクリート構造物の耐久性や耐震性の向上に向けて様々な検討がなされてきた。

例えば、耐久性に関して言えば、塩害やアルカリ骨材反応といった早期劣化の抑制対策が整備され、新設構造物については、このような劣化が早期に発生することは希になっている。また、耐震性能についていえば、変形性能を考慮した設計手法が構築され、より耐震性の高いコンクリート構造物を建造する技術も進歩してきた。コンクリート工学に携わる専門技術者の目から見れば、コンクリート構造物の各種性能が日進月歩であることを実感できる。

しかし、一般の利用者にとってコンクリート構造物は安心できる存在であろうか。上記の通り専門家からすれば技術的な進歩は間違いなく有ったものの、専門知識を持たず情報も限られた利用者から全幅の信頼を寄せられているかという点、怪しい面もあるのが実情と思われる。

とりわけ信頼感を揺るがせる不具合の代表格として、ひび割れが挙げられよう。ひび割れはコンクリートにつきものである一方で、ひび割れの解釈や対策要否の判断は必ずしも容易ではなく、専門家泣かせの問題でもある¹⁾。

ひび割れの影響を明確にし、一般の利用者に適切な情報を提供することは、コンクリート構造物に対する信頼性を確実なものにする上で重要である。ここでは、ひび割れの影響について考察したい。

2. ひび割れの影響

鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れにより、不安を感じる理由は概ね次の点にあると思われる。

- (1) ひび割れが構造物の破壊強度に甚大な悪影響を与えるのではないかと
- (2) ひび割れが、アルカリ骨材反応や塩害の進行、

あるいは不同沈下などの想定外の荷重の作用、といった当初予定しない不具合の発生を物語っているのではないかと

- (3) ひび割れによりコンクリート構造物の耐久性が低下し寿命が短くなるのではないかと

このすべてについて、ここで考察することは難しい。(1)や(2)については、参考文献^{2),3)}等を参照頂くこととして、ここでは(3)のひび割れと耐久性の関係について、土木研究所で実施中の暴露試験結果⁴⁾を元に考察したい。

3. 鉄筋コンクリート構造物のひび割れと耐久性

3.1 設計基準でのひび割れのとらえ方

ひび割れ部分を通して水分や酸素がコンクリート構造物内部に浸透し、構造物の耐久性低下につながることは、容易に推察できることである。ひび割れを全く根絶できればよいが、これには多大なコストがかかるし、ひび割れが発生していても、特に問題なく使用できている構造物も決して少なくない。

設計基準においても、ひび割れの発生そのものを禁じている訳ではない。鉄筋コンクリート構造物の設計基準類ではコンクリートの負担する引張応力は無視しており、ひび割れの発生は考慮されている。

ただし、無条件にひび割れを許容しているわけではない。国内の設計基準では、使用時の荷重に対して引張鉄筋に作用する引張応力度を制限することにより、ひび割れ幅が過大になることを防止している。ひび割れ幅の制御のよりどころとして、鉄筋腐食が進展することを防止し耐久性を確保することを謳っている。

鉄筋腐食防止の観点からひび割れ幅を制御することは当然とも思えるが、諸外国の設計基準に目を転じると、ひび割れ幅の制限に対する見解は実は一致していない。欧州規格のように許容ひび割れ幅を明確に示すものもある一方で、例えば米国コンクリート工学協会の設計基準であるACI318:2008⁵⁾では、ひび割れ幅と鉄筋腐食の相関性は認められないとして、ひび割れ幅の限界値に関する規定を削除している。一方、コンクリート構造物の設計方法を定めたISO規格⁶⁾では、コンクリート構造物の使用性の観

Reliability of concrete structures durability, brief discussion on the effect of cracking for reinforcement corrosion

点から、たわみやひび割れの制御を行うべきとしているが、耐久性に関する照査の節には、ひび割れ幅制御の要否について一切触れていない。

3.2 ひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体の長期暴露試験と問題点

ひび割れの影響を見極めるためには、長期暴露試験によりひび割れ周辺に発生している現象を把握することが必要となる。実際、耐久性の観点から許容できるひび割れ幅の目安を得ようとした実験的検討は、これまでも実施されてきた。

ひび割れ幅が0.1mm～0.2mm程度を境としてそれよりひび割れ幅が広いと、鉄筋の腐食が進行するとの結論を示したものが多い。一方で、これまでの暴露試験を総括したうえで、ひび割れの存在は、鉄筋の腐食開始時期を早めるものの長期的な鉄筋の腐食に影響しないとするものもある⁷⁾。また、ひび割れ部の塩化物イオンの浸透について、塩水浸漬・乾燥の繰り返し試験を実施した結果、0.07mm～0.2mmの範囲ではひび割れ幅の影響が明確でないとする報告もある⁸⁾。このように、暴露試験に基づくひび割れの影響に関する見解が一致しない原因として、

(1) 供試体の暴露環境

飛来塩分量、気象条件、乾湿の状態、海水浸漬

(2) 供試体の製作条件

かぶりの大きさ、コンクリートの配合条件

(3) 暴露期間の設定条件

1～2年程度の短期、10年以上の長期

(4) 鉄筋腐食程度の比較に用いる評価指標

腐食面積の率、腐食減量、引張強度低下量といった項目が研究者によって様々であるためと思われる。

ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響を明確にするためには、ひび割れ幅だけでなくかぶりや暴露環境条件など試験結果に多大な影響与える実験パラメータを網羅し、比較的長期的な暴露試験を一斉に実施することが必要である。このような背景から、ひび割れを生じさせた供試体の暴露試験を行うこととした。

3.3 暴露試験の概要

図-1に、暴露した供試体の形状を示す。供試体は、長さ1mの異形鉄筋(SD295A、D13)を1本有する200×200×1000mmの角柱である。鋼材の両端部は、腐食を防ぐため塩ビパイプで覆い、供試体側面をエ

ポキシ樹脂で被覆した。ひび割れ幅は、図中に示すコンタクトゲージで測定した値を用いた。ひび割れ幅は、「なし」、「0.2mm以下」、「0.3mm前後」、「0.5mm以上」の4水準とした。二点載荷で厳密に所定の幅を有するひび割れを導入することが技術的に困難であったため、一定の範囲内でひび割れ幅を管理した。ひび割れ幅が「0.2mm以下」では0.05～0.2mm、「0.3mm前後」では0.25～0.45mm、「0.5mm以上」で0.5～0.77mmの範囲にある。かぶりは20、30、50、70mmの4種類とした。コンクリートの水セメント比は55%を基本とした。

暴露場所は、つくば、新潟、沖縄の3箇所とした。つくばは内陸部に位置するため塩害環境下にはないが、新潟と沖縄の暴露場は沿岸部の比較的厳しい塩害環境下にある。暴露試験場の様子については、本誌平成19年2月号の研究コラムに示している。

暴露期間は最長10年とし、暴露試験開始後1年、2.5年、5年、10年目に供試体を回収し解体調査を予定している。ここでは1年目、2.5年目に回収した供試体の調査結果について紹介する。

3.4 ひび割れ部を通した塩化物イオンの侵入

これまで、塩水をひび割れ部分に直接噴霧あるいは模擬海中への供試体浸せきなどにより、ひび割れ部分を通した塩分浸透について検討がなされてきた。本試験では、海風によって飛来塩分が供給される状況で、ひび割れを通した塩分浸透について検討した。



図-1 供試体概要

塩化物イオンの測定方法は、(1)ひび割れ部分を含むように採取したコンクリートコアを粉砕して電位差滴定^{*}を行うものと、(2)ひび割れ部分を含む試料について電子顕微鏡を用いて塩素の分布状況をEPMA^{*}で把握するものの2種類とした。図-2に塩化物イオン分析用試料の採取位置を示す。

^{*}土木用語解説：電位差滴定、EPMA

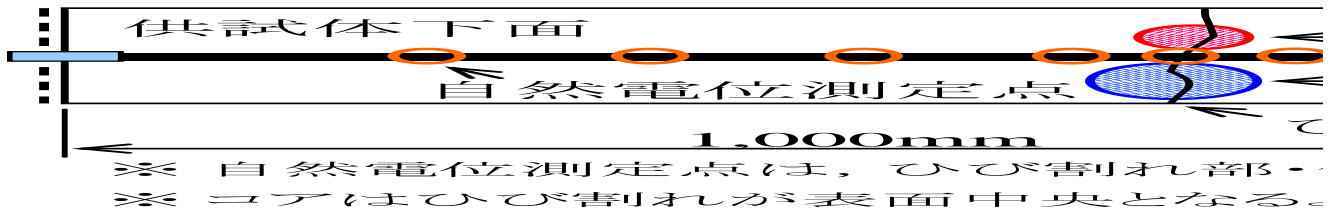


図-2 塩化物イオン測定用試料採取位置

図-3は暴露一年目における供試体表面から深さ方向の塩化物イオン量の測定結果の一例を示したものである。この結果によると、ひび割れのない供試体では表面から35mmよりも深い位置には塩化物イオンが浸透していない。しかし、ひび割れがある供試体では、表面より70mmの深さにも塩化物イオンが到達している。ただし、ひび割れ幅の影響は不明瞭であり、ひび割れ幅が0.2mm以下の方が、0.5mm以上のものよりもむしろ、70mm程度の深さでは塩化物イオン量がやや大きい結果となった。

EPMAによる塩素の面分析結果を図-4に示す。ひび割れを含んで幅65mm×深さ80mmの面の分析結果であり、塩化物イオン浸透は上方からである。これによると、ひび割れ幅の大きいものはひび割れを通じたコンクリート内部への塩分浸透が明瞭ではない。ひび割れ幅が0.2mm以下と0.3mm前後の場合は、内部への浸透は明瞭であり、図-3の測定結果を裏付けるものであった。

なお、暴露2.5年目に回収した供試体についても同様の測定を行ったが、得られた結果は暴露1年目ほぼ同じであった。ひび割れ幅が小さいほうが内部まで塩分が浸透する理由として、表面張力による毛細管現象が寄与したことも予想される。

3.5 ひび割れ部の鉄筋の腐食状況

供試体を解体し鉄筋の腐食状況を確認したところ、鉄筋腐食箇所とひび割れ発生位置は一致しており、

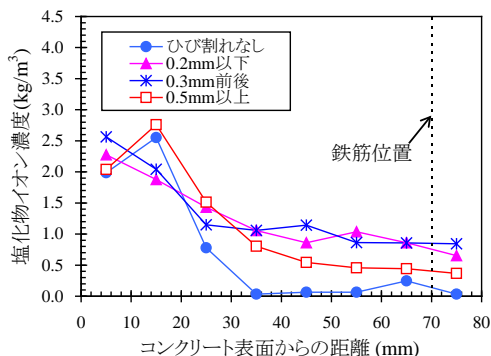


図-3 塩化物イオン濃度の測定結果

ひび割れを導入していない供試体では鉄筋腐食は認められなかった。ひび割れ幅の違いによる鉄筋の腐食状況の比較例を写真-1に示す。

鉄筋腐食の定量的な表現方法として、腐食による質量減少量、腐食部分の面積割合（以下、腐食面積率と記載）、腐食による径の減少量などが考えられる。今回の解体調査結果では、沖縄暴露供試体でかぶり20mmと小さい場合を除くと、断面欠損が顕著になるほどの腐食量になっていなかった。すなわち腐食による質量減少量が小さく、各条件による結果の比較が困難であると考えられた。このことから、ここでは質量減少量ではなく、腐食面積率を用いることとした。

図-5は供試体に導入したひび割れ幅と鉄筋の腐食面積率の関係を示したものである。これによると、暴露地点がつくばの場合には、飛来塩分の影響を受けないため、全般的に腐食面積率が小さいことが分かる。これに対して、暴露地点が沖縄の供試体では、腐食面積率は大きくなっている。また、かぶりの影響が大きく、かぶりを70mmと大きく設定した場合は、ひび割れ幅が大きくても腐食面積率は小さくなる。

3.4に述べたとおり、ひび割れ幅が大きいことは、必ずしもひび割れを通じた塩化物イオンの浸透量増加につながっていない。それにも関わらず、ひび割

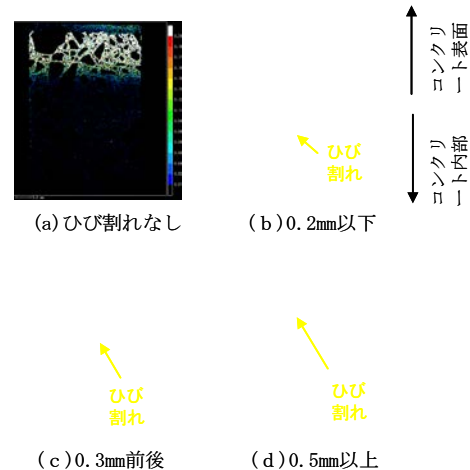


図-4 塩化物イオンの分布状況

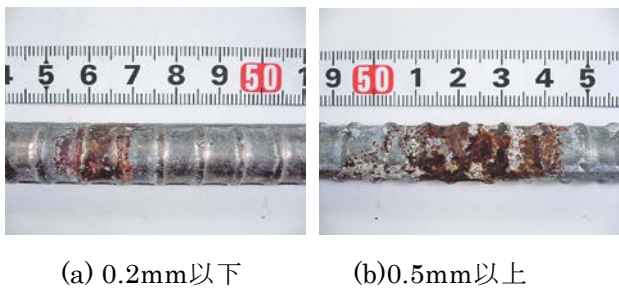


写真-1 ひび割れ部鉄筋の腐食状況の例
(沖縄暴露、かぶり20mm)

れ部における鉄筋腐食面積率はひび割れ幅の大きい方が大きい結果となっている。

ひび割れ幅が大きいと腐食面積率が大きくなる理由は、次のように考えられる。異形鉄筋まわりに形成されるひび割れを模式的に描いたもの⁹⁾を図-6に示す。図中の楕円囲みに示すようにコンクリートと鉄筋に微視的な隙間（付着喪失区間）が生じていると言われている。部材の曲げ荷重を増加させひび割れ幅を大きくすれば、この付着喪失区間が長くなり、腐食面積の増加につながったものと思われる。

4. まとめ

暴露試験結果をまとめると、ひび割れの幅が小さいと、むしろ塩化物イオンの浸透が顕著に認められる場合があることが分かった。一方、鉄筋腐食面積はひび割れ幅に応じて大きくなることが明らかとなった。かぶりを大きくすると、ひび割れの影響は緩和される。

暴露後2.5年までの期間では、腐食減量を議論できるほどの状態には至っていない。腐食面積はひび割れ幅に応じて変化しているが、強度低下を懸念するような状態にはない。ひび割れの影響は認められるが、深刻なダメージを与えるものとはなっていない。今後も暴露試験を継続し、ひび割れ部分での鉄筋腐食速度について考察を深め、そこで得られた知見に基づいて設計や維持管理に関わる基準の改訂につなげていく予定である。これにより、ひび割れの認められるコンクリート構造物の性能の確保、ひいては信頼性の向上に資するものとする。

なお、コンクリート構造物の品質確保や信頼性向上にあたって検討すべき課題はひび割れの問題にとどまらない。良好な天然骨材資源や豊富な熟練工の存在が前提で構築されてきた設計・施工・品質保証に関わる技術体系も、本質的な見直しをすべき時期にさしかかりつつあると思われる。また、既設構造

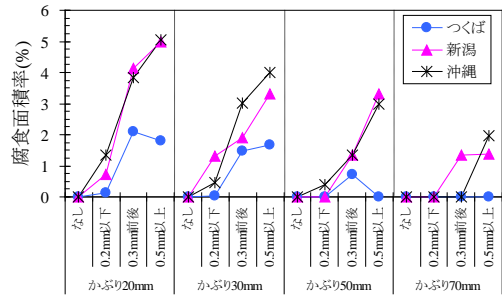


図-5 鉄筋腐食面積率（暴露2.5年）

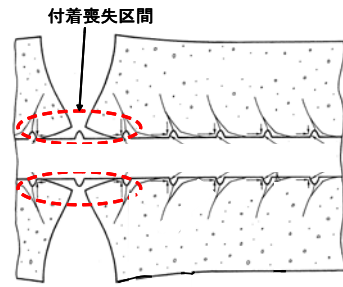


図-6 ひび割れ近傍の付着喪失区間

物の検査技術の高度化とともに、点検不能箇所を見込んだ耐荷性能の評価技術も信頼性向上に必要となる。

参考文献

- 1) 河野広隆：コンクリート技術者はひび割れとどう付き合うべきか、セメント・コンクリート、No.761、pp.12～17、2010.7.
- 2) 北陸地方整備局：塩害橋梁維持管理マニュアル(案)、平成20年4月.
- 3) 近畿地方整備局：アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案)、平成20年3月.
- 4) 土木研究所資料第4130号、コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験、平成21年1月.
- 5) American Concrete Institute： Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08)、2008
- 6) ISO 19338、 Performance and assessment requirement for design standards on structural concrete.
- 7) A. W. Beeby： Cracking, Cover and Corrosion of Reinforcement, Concrete International, Vol.5, No.2, pp.35-40、1983
- 8) 塚原絵万、魚本健人：ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、第11巻、第1号、pp.75～83、2000.
- 9) Y. Goto： Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, ACI Journal, Vol.68, No.4, pp.244-251, 1970

渡辺博志*



独立行政法人土木研究所つくば中央
研究所材料資源研究グループ基礎材
料チーム 上席研究員、博士（工
学）

Dr.Hiroshi WATANABE