

8章 ひび割れ幅が鋼材腐食に与える影響

8.1 鋼材腐食に関する検討の着眼点

コンクリート構造物には様々な原因によりひび割れが生じることがある。ひび割れは塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透を容易にして鋼材腐食を助長する可能性が高いと考えられており、コンクリート構造物の耐久性を低下させる主な要因とされてきた。このため、コンクリート構造物に生じるひび割れについては、計算上求まるひび割れ幅が、設計と施工の両面において、耐久性上有害とされない範囲とすることが求められている。

ところが、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響については、必ずしも統一的な見解が得られていない^{1)~3)}。既往研究には、ひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食を助長すると指摘するものがある一方で、両者には必ずしも明確な関係はみられないと指摘するものもある。このように見解が一致しない理由は、供試体の形状やひび割れ幅、かぶり、暴露期間など試験結果に影響を及ぼす可能性の高い実験パラメータがそれぞれの研究で異なっており、その違いによって実験結果が異なることが考えられる。

今後、コンクリート橋に求められる性能をより明確にし、照査方法を定めていくためには、部材に発生する曲げひび割れが耐久性にどの程度の影響を及ぼすか明確に把握しておく必要がある。

そこで、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に与える影響を検証することを目的として、曲げひび割れを導入した RC 供試体の暴露試験をつくば、新潟、沖縄の3ヶ所で開始した。実験パラメータにはひび割れ幅やかぶり、暴露期間など試験結果に影響を及ぼす可能性が高いものを採用し、定期的に供試体を回収・解体調査することにより、コンクリートひび割れ部の塩分浸透とひび割れが鋼材腐食に及ぼす影響について検討を行った。なお、本暴露試験は、暴露開始から10年目までの実験が行えるように計画して暴露を開始したが、ここでは、暴露試験の概要と試験開始から約12ヶ月後と約28ヶ月後の解体調査の結果について示す。

8.2 既存研究の調査

8.2.1 各設計基準におけるひび割れ幅の取り扱い

ここでは、国内外のコンクリート構造物の設計基準におけるひび割れ幅の規定内容を比較する。ひび割れ幅の許容値やひび割れ幅の算出方法は、設計基準によってそれぞれ異なる内容が記載されている。

(1) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編⁴⁾

RC 構造では、コンクリート表面のひび割れ幅が 0.2mm 程度以下となることを目安とした鋼材の応力度を許容応力度として示し、具体的な許容ひび割れ幅の規定は行っていない。PC 構造では、コンクリートに生じる引張応力を許容引張応力度以下とし、原則としてひび割れの発生を認めていない。

(2) 土木学会 コンクリート標準示方書⁵⁾

表 8.2.1 に示すように、3 種類の環境条件に応じて、かぶりの関数として鋼材の種類ごとにひび割れ幅の限界値を規定している。また、環境条件は、表 8.2.2 のように設定されている。

表 8.2.1 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値 (mm)

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005c	0.004c	0.0035c
PC 鋼材	0.004c	—	—

注 1) 腐食性環境及び特に厳しい腐食性環境の場合に、PC 鋼材に対して、ひび割れ幅の限界値を設定していないのは、プレストレストコンクリートではプレストレスにより曲げひび割れの発生を許さない制御が可能であること、PC 鋼材の腐食に対しては特に配慮を必要とすること等を考慮したためである。

注 2) PRC 構造において、腐食の検討対象となる最外縁鋼材が異形鉄筋である場合は、異形鉄筋に対するひび割れ幅の限界値を用いてよい。

表 8.2.2 鋼材の腐食に対する環境条件の区分

一般の環境	塩化物イオンが飛来しない通常の屋外の環境，土中の場合等
腐食性環境	1. 一般の環境に比較し，乾湿の繰返しが多い場合及び特に有害な物質を含む地下水位以下の土中の場合等鋼材の腐食に有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で海水中や特に厳しくない海洋環境にある場合等
特に厳しい腐食性環境	1. 鋼材の腐食に著しく有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で干満帯や飛沫帯にある場合及び激しい塩風を受ける場合等

注 1) 「特に厳しい腐食性環境」とは，海水につかたり乾燥したりする干満帯及び飛沫帯にある場合，あるいは海上大気中であつてときどき海水のしぶきがかかると考えられる場合等である。なお，塩化カルシウム等の凍結防止剤をたびたび使用する場合にある構造物も，この環境にあると考えるのがよい。

注 2) 「腐食性環境」とは，たとえば，常に海水中にある場合あるいは塩分を含んだ大気中にある場合等で，一般的な環境より厳しいが，「特に厳しい腐食性環境」までは厳しくない環境のことである。海岸から 0.1～1km の距離にある構造物は，この環境にあると考えてよい。ただし，海岸からの水平距離が近くても，標高が高い構造物などで塩化物イオンの飛来がない場合は「一般の環境」とみなしてよい。

(3) EN1992⁶⁾

表 8.2.3 に示すように、環境条件ごとに許容ひび割れ幅の推奨値を示している。ここで、環境条件は、コンクリートの規格である EN206⁷⁾における環境条件の区分に対応している。X0 は腐食の可能性が全くない環境、XC はコンクリートの中性化による腐食環境、XD は塩化物イオンによる腐食環境、XS は海水からの飛来塩分による腐食環境を想定している。

表 8.2.3 最大ひび割れ幅の推奨値 (mm)

環境条件	鉄筋コンクリート部材 アンボンド PC 部材 疑似永久荷重	PC 部材 高頻度荷重
X0, XC1	0.4	0.2
XC2, XC3, XC4	0.3	0.2
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		デコンプレッション

(4) ACI 318⁸⁾

ひび割れ幅が構造物により大きくなばらつきを有すること、ひび割れ幅と鋼材腐食の関係が必ずしも明確でないことなどから、実務上有害とならない範囲にひび割れ幅を制限するための鋼材間隔の算定式を示している。ただし、1999年より以前のACI 318⁹⁾では、許容ひび割れ幅を屋内で0.33mm、屋外で0.41mmと規定しており、ひび割れ幅をこれらの値以下とするように鋼材を配置することが求められていた。

(5) AASHTO LRFD¹⁰⁾

ACI 318と同様の理由から、許容ひび割れ幅の規定は行わず、鋼材間隔によりひび割れ幅を求める算定式を明記している。また、ここでは、橋梁管理者が構造物の供用される環境に応じて独自にひび割れ幅の制限値を設定できるようになっている。ただし、1998年版のAASHTO LRFD¹¹⁾では、厳しい腐食環境でなければ、許容ひび割れ幅は0.4mmとしてよいとしている。

ひび割れ幅の許容値は、設計基準により様々な方法で明記されており、大きく異なる内容となっている。しかしながら、許容ひび割れ幅の取り扱いが設計基準間で異なる一方で、各設計基準で規定されている許容ひび割れ幅の目安は、概ね0.2~0.4mmの範囲に収まっている。道路橋示方書では0.2mm、コンクリート標準示方書ではかぶりによって異なるが0.175~0.350(かぶり50~70mmで想定)、EN1992では0.2~0.4mm、ACI 318とAASHTO LRFDではひび割れ幅と鋼材腐食の関係は不明確とながらも、過去の規定では0.4mm程度以下としていた。すなわち、あまりにも幅の広いひび割れは、耐久性上有害であると考えられていたようである。

一方、対象とする構造物や求める性能(荷重条件、耐久性についての要求水準など)が異なるため単純な比較はできないものの、構造形式ごとにひび割れの取り扱いを比較すると、PC構造では、道路橋示方書はひび割れの発生を許容していないが、土木学会コンクリート標準示方書とEN1992は厳しい腐食環境でなければひび割れの発生を許容している。

8.2.2 既往研究での検討結果

これまでも、ひび割れ部の塩分浸透や中性化、鋼材腐食など、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に与える影響については、数多くの研究が行われてきた。ここでは、暴露試験や室内試験、実構造物での調査事例など代表的な文献を調査し、次の3点からひび割れの影響を整理することとした。

- ①ひび割れが、外部からの塩化物イオンの浸透に及ぼす影響
- ②ひび割れが、コンクリートの中性化に及ぼす影響
- ③ひび割れが、コンクリート中の鋼材の腐食速度に及ぼす影響

(1) ひび割れが外部からの塩化物イオンの浸透に及ぼす影響

(a) ひび割れ面からの塩化物イオンの浸透

ひび割れを有する構造物では、構造物表面に加え、ひび割れ面からも塩分が侵入するおそれがある。この問題に関し、我が国では、塚原らの研究グループと町田らの研究グループが数多くの報告を行っている。この結果、ひび割れ面から侵入する塩分の量は、コンクリート表面から侵入する塩分に比べると少ないこと、コンクリート表面からの距離に応じて異なることが明らかにされている。そこで、ひび割れ面から(ひび割れ面に垂直な方向へ)の塩分侵入量を予想する場合には、ひび割れ内の塩化物イオン濃度が浸漬している溶液の塩化物イオン濃度よりも小さいと仮定し、Fickの拡散方程式における表面塩化物イオン濃度を低減して予測する手法が提案されている。

例えば、塚原ら¹²⁾の検討では、コンクリートの水セメント比が55%で、供試体表面の表面塩化物イオン濃度が 4.0kg/m^3 程度になるような条件の場合、 0.2mm のひび割れ内での表面塩化物イオン濃度は、表面から 20mm の位置で約 2.5kg/m^3 、表面から 40mm の位置では約 0.7kg/m^3 、表面から 60mm の位置では約 0.6kg/m^3 と推定している。

同様に、Machidaら¹³⁾の検討でも、深さ 40mm 程度のひび割れ内では、その表面の塩化物イオン濃度は、コンクリート表面の塩化物イオン濃度の4割程度になるもの考えられる(町田らが提案する評価方法にはさまざまなパラメータが含まれるので、条件によって結果が変わりうる。ここでは、標準的なコンクリートを仮定して試算した)。

これらの検討結果から、かぶり大きい場合には、ひび割れ面から侵入する塩分の影響を無視できる場合もあると考えられる。ただし、極端に幅の大きなひび割れに関しては、検討結果が少ないので、その適用範囲を明確にする必要がある(例えば、塚原らの検討では、幅が $0.075\sim 0.2\text{mm}$ の範囲であれば、ひび割れ幅による影響はないものと考えられる)。

(b) 実構造物での調査事例

ひび割れ部からの塩分の侵入に着目して実構造物の調査を行った事例は少なく、実験室で得られた知見が実構造物にもあてはまるかどうかは、現状では明確ではない。

田中ら^{14)、15)}は、海岸線に位置する実構造物のひび割れ部からコアを採取し、EPMA分析

で、ひび割れ部周辺の塩化物イオンの分布を調査している。この分析結果によると、ひび割れ部からの塩分の浸透は明確ではなかった。また、ひび割れ近傍では、中性化のため塩化物イオン濃度が周囲より小さい場合もあった。これらのコアでひび割れ部からの塩化物イオンの浸透が明確でなかった理由としては、例えば、部材が海中に没することはなく、塩水の供給状況が実験室での促進試験状況とは異なっていること、表面付近のコンクリートが中性化している点で実験室での促進試験状況とは異なっていることなどが考えられる。

(c) ひび割れが外部からの塩化物イオンの浸透に与える影響のまとめ

上記の調査結果をまとめると以下のようになる。

- ①ひび割れ面からの塩化物イオンの浸透は、コンクリート表面からの距離の影響を受ける。かぶり大きい場合には、ひび割れからの塩化物イオンの浸透が鋼材腐食に影響を及ぼさないことも考えられる。
- ②実構造物では、厳しい塩害環境にあっても、ひび割れ部からの塩化物イオンの浸透が明確に認められない場合もあった。

(2) ひび割れがコンクリートの中性化に及ぼす影響

(a) ひび割れ部からの中性化(促進試験)

コンクリートを促進中性化環境(相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%程度の環境)に置くと、かなり小さい幅のひび割れであっても、ひび割れ部から二酸化炭素が容易に侵入し、中性化が進行することが確認されている。例えば、稲熊ら¹⁶⁾は、幅 0.03mm~0.6mm の曲げひび割れを有するコンクリート供試体を促進中性化環境で中性化させる実験を行い、ひび割れの幅が 0.03mm と小さい場合でも、ひび割れ箇所はひび割れのない場合の 2 倍以上の速さで中性化すること、ひび割れ幅が大きい箇所ほど中性化の速度が速くなることを明らかにしている。また、橋本ら¹⁷⁾は、幅 0.05mm のひび割れを入れたモルタル供試体を中性化促進環境で保管し、この結果、26 週間保管した供試体では、ひび割れ面から 1~9mm 程度の中性化領域が認められた(このときコンクリート表面からの中性化深さは約 12mm)ことを報告している。

ただし、中性化の進行にはコンクリートの含水率などの影響も大きく、環境条件によってはひび割れ部からの中性化が認められないことも十分に考えられる(このような場合には、ひび割れ部以外の中性化の進行も緩やかである)。例えば、橋本ら¹⁷⁾は、一般的な中性化促進環境での保管に、一日 2 時間の散水を追加した条件に置いた供試体では、ひび割れ部の中性化はほとんど見られなかったことを報告している。これは、ひび割れが水で満たされたためと考えられる。

(b) ひび割れ部からの中性化(実構造物での調査事例及び暴露試験)

先述した田中ら^{14)、15)}の調査では、ひび割れに沿って塩素や硫黄の濃度が明確に減少し

ている場合があり、これらの調査箇所では、ひび割れ近傍のコンクリートが中性化していたものと考えられる。

植木ら¹⁸⁾は、比較的交通量が多く二酸化硫黄が供給される道路構造物周辺にひび割れ幅0.1~0.3mm/mの曲げひび割れを導入したコンクリート供試体を設置したが、約20年の暴露を経ても中性化していなかったことを報告している。この原因としては、ひび割れ内に堆積物が充填され、これが二酸化炭素の供給を妨げた可能性があることを挙げている。

また、鳥取ら¹⁹⁾は、ひび割れを有した状態で約40年間暴露されたコンクリート供試体の中性化深さを測定しているが、ひび割れ部周辺もそれ以外の部分でも、1mm程度以下しか中性化していなかったことを報告している。

このように屋外に暴露されたコンクリートの場合は、周辺環境が中性化に与える影響が大きく、ひび割れの有無による中性化の進行速度への影響は明確ではない。

(c) ひび割れがコンクリートの中性化に及ぼす影響のまとめ

上記の調査結果をまとめると以下ようになる。

- ①促進中性化環境などコンクリートの中性化が進行しやすい条件下にある場合には、ひび割れ部に容易に二酸化炭素が浸透し、ひび割れ部からの中性化が進行する可能性が高い。この場合、ひび割れ幅0.6mm程度までの範囲では、ひび割れの幅が大きいほど中性化の進行速度が速い。
- ②実構造物では、中性化が進行しにくい環境にある場合も多く、このような場合は、ひび割れの有無の影響も明確には認められない。

(3) ひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食速度に及ぼす影響

鉄の腐食反応には、水と酸素が必要であり、腐食速度はこれらの供給状況に大きく左右される。ひび割れが腐食速度に与えるのは、理論的には、水及び酸素の供給状況へ影響があるためと考えることができる。

ただし、鋼材近傍への水及び酸素の供給に関しては、コンクリートの品質や含水状態、かぶりの大きさなどの影響もあり、ひび割れの影響のみを単独で評価することは難しい。このため、既往研究では、ひび割れが鋼材腐食に与える影響について、塩分の侵入や中性化の進行に与える影響と同時に評価した実験がほとんどである。

(a) ひび割れを有するコンクリート中鋼材の腐食速度(室内試験)

大野ら²⁰⁾は、かぶりや水セメント比、ひび割れ幅が異なる供試体を腐食促進試験環境(65°Cの3.2%NaCl水溶液に24時間浸漬及び24時間乾燥の繰返し)に置き、腐食を促進させた実験の結果、水セメント比が60%の供試体ではかぶりの大小の影響が、水セメント比が40%の供試体ではひび割れの有無や大小の影響が大きかったことを報告している。

宮里ら²¹⁾は、コンクリート供試体中に設置する鋼材を分割することで、ひび割れ部とそ

の周辺部の腐食速度の違いやマクロセル電流による腐食速度を測定しているが、この結果、コンクリートの中性化により鋼材を腐食させた供試体でひび割れがある場合には、マクロセルによる腐食が卓越することを明らかにしている。一方、塩化物イオンにより鋼材を腐食させた供試体では、必ずしもひび割れの位置で腐食速度が卓越するわけではないことを示している。ただし、水セメント比が40%の場合は、塩化物イオンによる腐食の場合でもマクロセル電流が卓越している。この理由として、低水セメント比の密実なコンクリートではひび割れ部とこれ以外で水や酸素の供給量が大きく変わり得るが、水セメント比が大きいコンクリートでは、ひび割れ部とこれ以外での差が生じにくいいためとしている。

(b) ひび割れを有するコンクリート中の鋼材の腐食速度(実構造物での調査事例及び暴露試験)

先述した鳥取ら¹⁹⁾、²²⁾の暴露試験では、新潟県塩沢町で1954年に暴露を開始されたひび割れを有する供試体の42年後の解体調査を実施している。新潟県塩沢町は内陸部の積雪地帯に位置し、飛来塩分による塩化物イオンの供給はほとんど無いものと考えられる。この試験は、暴露開始から6、11、20年の時点でも解体調査を実施しており²³⁾、一般環境下におけるひび割れと鋼材腐食の関係を経年的に検討している。一連の調査結果によると、①暴露開始後11年までの腐食量は僅かであること、②著しい腐食は暴露開始後11～20年の間で始まり、腐食の開始時期はひび割れ幅の影響を受けること、③暴露開始後20年の時点では、ひび割れ位置と鋼材の腐食位置が一致し、ひび割れ幅が大きいほど鋼材の腐食程度も著しいこと、④暴露開始後約40年の時点では、鋼材全体で腐食が生じており、ひび割れ幅と鋼材の腐食程度に明確な関係はないことなどが報告されている。ただし、暴露開始後20年以降では、ひび割れ幅が変動していることから、この結果のみからひび割れ幅と鋼材腐食の関係を検討することが困難な可能性もある(ひび割れ幅は暴露開始後20年で0.05～0.5mm、42年で0.05～2.1mm)。

神山²⁴⁾は、東京都内の厳しい腐食環境にはない地域にひび割れを導入した供試体を6～8年間暴露し、ひび割れが鋼材腐食に与える影響について検討している。鋼材の腐食範囲は、ひび割れによる鋼材の露出長が長くなるほど広くなり、かぶりの大きい場合には相対的に鋼材の露出長も短くなるため、鋼材腐食を抑制するためには十分なかぶりを確保することが必要としている。ここでは、かぶり25mmの供試体では腐食が生じていたが、かぶり50～75mmの供試体では腐食が生じていなかったとのことである。これらの供試体の表面の残留ひび割れ幅は、0.01～0.06mmであった。

関・丸山ら²⁵⁾は、干満部と海水中を模擬した水槽内にひび割れを生じさせたRCはり供試体を浸漬し、鋼材の腐食傾向を検討している。試験期間は5、7、9年間の3期間であり、試験期間が長くなるほど腐食範囲が増加することを報告している。この試験結果をもとに、鋼材の引張強度の低下が軽微かつ顕著な腐食の生じないひび割れ幅の制限値として、干満部で0.15mm、海中部で0.20mmを提案している。

西山ら²⁶⁾は、曲げひび割れを導入した RC はり供試体を東京都内に 2 年間暴露し、コンクリート表面のひび割れ幅が同一であってもかぶり大きい供試体では腐食が生じていないことを報告している。また、2 年程度では暴露試験の実施期間としては十分ではなく、耐力の低下もほとんど生じなかったことを報告している。

秋元ら²⁷⁾は、曲げひび割れを導入した RC はり供試体を東京都内の飛来塩分の無い地点に 12 年間暴露した結果を報告している。この結果によると、ひび割れ幅が 0.1mm と微小であっても 10 年の暴露後には腐食が生じていたこと、コンクリート表面のひび割れ幅が同一であればかぶり大きいものほど腐食の発生時期が遅くなるとしている。鋼材の強度の低下はみられなかったとのことである。

片脇ら²⁸⁾は、東京湾上の暴露台でひび割れ幅を保持した供試体の 3 年間の暴露試験を実施している。この結果、ひび割れ幅が大きいほど鋼材は腐食しやすく、ひび割れ幅が 0.1mm 程度以下であれば軽微な腐食に留まることを報告している。

谷内田ら²⁹⁾は、厳しい腐食環境下にはない鉄筋コンクリート鉄道橋 75 橋のひび割れ、鋼材、中性化の状況を調査している。鋼材の腐食は、建設から 40 年以下の場合にはかぶりの他にひび割れ幅との関連が大きい、建設から 40~60 年の場合にはひび割れ幅が小さくても中性化により鋼材腐食が進行していたことを報告している

国外では、Tremper³⁰⁾が、海岸線で 10 年間の暴露試験を行っている。供試体はひび割れ面が上向きになるように設置し、ひび割れ幅は 0.13~1.3mm であった。この結果によると、全ての鋼材においてひび割れ部で軽微な腐食が生じたが、ひび割れ幅が腐食に及ぼす影響は認められず、コンクリートの水セメント比の影響も明確ではなかったとのことである。また、暴露 2、3 年の腐食状態も確認したが、10 年後の腐食状態とほぼ同じ状態であり、数年の暴露で 10 年後の暴露試験の結果と同等の結果が得られたとしている。

Beeby^{31)、32)}は、上記の Tremper³⁰⁾以外にも複数の研究者による暴露試験の結果を引用し、ひび割れ幅は腐食の開始時期に影響するが、長期的な腐食や腐食速度には影響しないと結論づけている。また、鋼材腐食を考える上で重要なのは鋼材位置のひび割れ幅であるが、既往文献の多くは部材表面のひび割れと腐食の関係を検討しており、ひび割れ幅と腐食についての議論を複雑にしているとも指摘している。

(4) 文献調査結果のまとめ

既存研究を調査することにより、塩分浸透や中性化、鋼材腐食などひび割れがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響についてこれまでに得られた知見を整理した。表 8.2.4 に、この結果をまとめる。

表 8.2.4 既存文献の調査結果のまとめ

項目	実験室(促進環境)での検討		実環境での検討	備考
	ひび割れの有無	ひび割れ幅 ^{※1}	ひび割れの有無及びひび割れ幅	
塩化物イオン	影響大	影響小	不明確	ひび割れ部近傍への塩化物イオンの浸透には、かぶりの影響が大きい
中性化	影響大	影響大	影響が認められる	
腐食速度	影響が認められる ^{※2}	不明確	不明確	鋼材の腐食速度にはコンクリートの水セメント比や含水状態、かぶりの大小などの影響が大きく、相対的にひび割れの影響が明確にみられにくい

※1 ひび割れ幅が 0.1~0.4mm 程度の範囲での検討結果に基づく。

※2 特に水セメント比 40% などの比較的高強度なコンクリートの場合に影響が認められる。

ひび割れの有無やひび割れ幅の影響は、中性化の進行に関しては比較的明瞭に認められた。また、試験室での実験では、ひび割れ部から塩化物イオンが容易に浸透し得ることが認められた。一方、実構造物や屋外に暴露された供試体の調査結果では、ひび割れの有無やひび割れ幅が、塩化物イオンの浸透や鋼材腐食速度の大小に与える影響は必ずしも明確ではなかった。この理由としては、ひび割れ以外の要因(コンクリートの品質や含水状態など)の方が、コンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響が大きいことが考えられる。なお、ひび割れ幅が小さい場合には、ひび割れの内部が析出物などで閉塞することも考えられるため、ひび割れの影響が認められなくなることも考えられる。

8.3 ひび割れ供試体の屋外暴露試験

8.3.1 暴露試験の概要

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らかにするため、これまでも様々な試験が行われてきた。代表的な暴露試験の結果によれば、短期的な試験ではひび割れが鋼材腐食を助長するとの結果を得ているが、長期的な試験ではひび割れと鋼材腐食の関係は必ずしも明確ではないとしており、ひび割れ幅が鋼材腐食に及ぼす影響については統一的な見解は得られていない。

過去の試験で異なる見解が得られた原因は、供試体形状やコンクリート配合、暴露期間、暴露環境など試験結果に影響を及ぼす可能性の高い試験条件がそれぞれ異なっていたためと考えられる。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、ひび割れ幅やかぶりなど試験結果に多大な影響を及ぼすと考えられる実験パラメータを網羅した供試体を用い、比較的長期的な暴露試験を多様な環境条件下で一斉に実施することが不可欠である。

こうした問題意識のもと、ひび割れ部からの塩分浸透と鋼材腐食に影響を及ぼすと考えられる実験パラメータ（ひび割れ幅、かぶり、水セメント比など）を網羅した供試体を製作し、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所において暴露試験を開始した。

8.3.2 検討方法

(1) 供試体の形状

図 8.3.1 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 ×1、000mm 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。ひび割れは、材齢 28 日以降に所定のひび割れ幅となるよう二点载荷で供試体中央付近に導入した。また、ひび割れ幅の長期的な変動の有無を確認するためのコンタクトゲージ測定用チップをひび割れの左右に設置した。

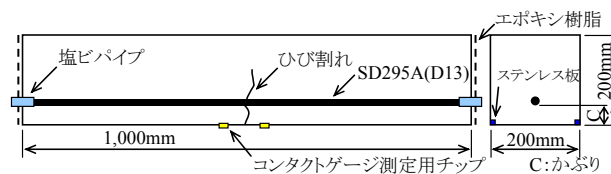


図 8.3.1 供試体の形状

表 8.3.1 実験パラメータ

暴露環境	ひび割れ幅	かぶり (mm)	暴露期間 (year)	水セメント比 (%)
つくば ^{※1}	なし	20 ^{※3}	1	
新潟 ^{※2}	0.2mm以下	30	2.5	35 ^{※4}
	0.3mm前後	50	5	55
沖縄	0.5mm以上	70	10	

※1:初期塩化物イオン濃度0.3kg/m³とした供試体も暴露

※2:ひび割れ面を上向きにして設置した供試体も暴露
(W/C55%, かぶり30, 70mmのひび割れを導入した供試体のみ)

※3:暴露期間1, 2.5年のみ

※4:つくばはかぶり30mm, 新潟は50mm, 沖縄は70mmのみ

(2) 実験パラメータ

表 8.3.1 に、本暴露試験の実験パラメータを示す。

暴露環境は、つくば、新潟、沖縄の 3ヶ所とした。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比較的厳しい塩害環境下にある。

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。二点载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。ひび割れ導入後、供試体下面の中央、中央から両側 50mm の 3 点のひび割れ幅をクラックスケールで測定し、目標とするひび割れ幅の条件を満たしていることを確認した。3 点の実測値の平均は「0.2mm 以下」で 0.05~0.2mm、「0.3mm 前後」で 0.25~0.45mm、「0.5mm 以上」で 0.5~0.77mm の範囲にあり、複数のひび割れが発生した場合には最も幅の大きいひび割れで供試体を分類した。試験中のひび割れ幅の変動を抑制するため、「0.3mm 前後」と「0.5mm 以上」の供試体には、ひび割れ導入後に約 10mm×約 10mm の厚さ 0.1mm もしくは 0.3mm のステンレス片を端部に挿入し、エポキシ樹脂で覆って固定した。かぶりは 20、30、50、70mm の 4 種類とした。

暴露期間は、試験結果の経時的な変化を把握できるよう1、2.5、5、10年の4期間を予定した。本報告書では、暴露期間1年(暴露開始から約12ヶ月後)と暴露期間2.5年(暴露開始から約28ヶ月後)の解体調査結果を報告する。

コンクリートの水セメント比は55%を基本とし、比較のため一部で35%の供試体も製作した。本暴露試験の供試体に使用したコンクリートの配合を表8.3.2に示す。なお、コンクリート中にあらかじめ内在する塩化物イオンがひび割れを有する供試体中の鋼材の腐食に及ぼす影響を検討するため、つくばで暴露する供試体の一部では、コンクリート練り混ぜ時に塩化物イオン濃度 0.3kg/m^3 となるよう塩化ナトリウムを混入したのも製作した。

表 8.3.2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位重量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	混和剤
35	40.0	155	443	684	1065	4.43
55	44.8	160	294	820	1044	3.12

普通ポルトランドセメント

最大骨材寸法20mm, スランプ8cm, 空気量4.5%

(3) 供試体の暴露状況

写真8.3.1に、供試体の暴露状況を示す。供試体は架台の上に120mm間隔で、ひび割れ面を下向きにして設置した。橋梁上部工など実際のコンクリート構造物で生じることの多い部材下面の曲げひび割れを模擬したためである。ただし、ひび割れ面の向きが試験結果に与える影響を把握するため、新潟ではひび割れ面を上向きにして設置した供試体も暴露した。架台の高さは、つくばと新潟で約1m、沖縄で約0.5mとした。



(a) つくば



(b) 新潟



(c) 沖縄

写真 8.3.1 供試体の暴露状況 (試験開始時)

つくばの暴露地点は、茨城県つくば市の土木研究所の構内とした。新潟の暴露地点は新潟県上越市の国道 8 号に隣接する海岸線沿いの暴露場とし、沖縄の暴露場は沖縄県大宜見村の国道 58 号に隣接する海岸線沿いの暴露場とした。新潟と沖縄の暴露場はいずれも海岸線沿いに位置しているが、新潟の暴露場は主に海水の飛沫により飛来塩分が供給される環境であり、沖縄の暴露場は天候によっては海水が供試体に直接降りかかる環境であった。

図 8.3.2 に、各暴露場の最寄りの気象観測所における試験期間中の気温、湿度の毎月の平均値と月間降水量を示す³³⁾。つくばと新潟の気温は概ね同程度で推移しているが、沖縄の気温はこれらよりも高い。また、湿度は、夏季に高く冬季で低く、いずれも同程度で推移していた。月間降水量は、新潟は冬季で多くなっているが、これは降雪のためと思われる。沖縄は 2007 年の夏季に多く、これは台風によるものと思われる。

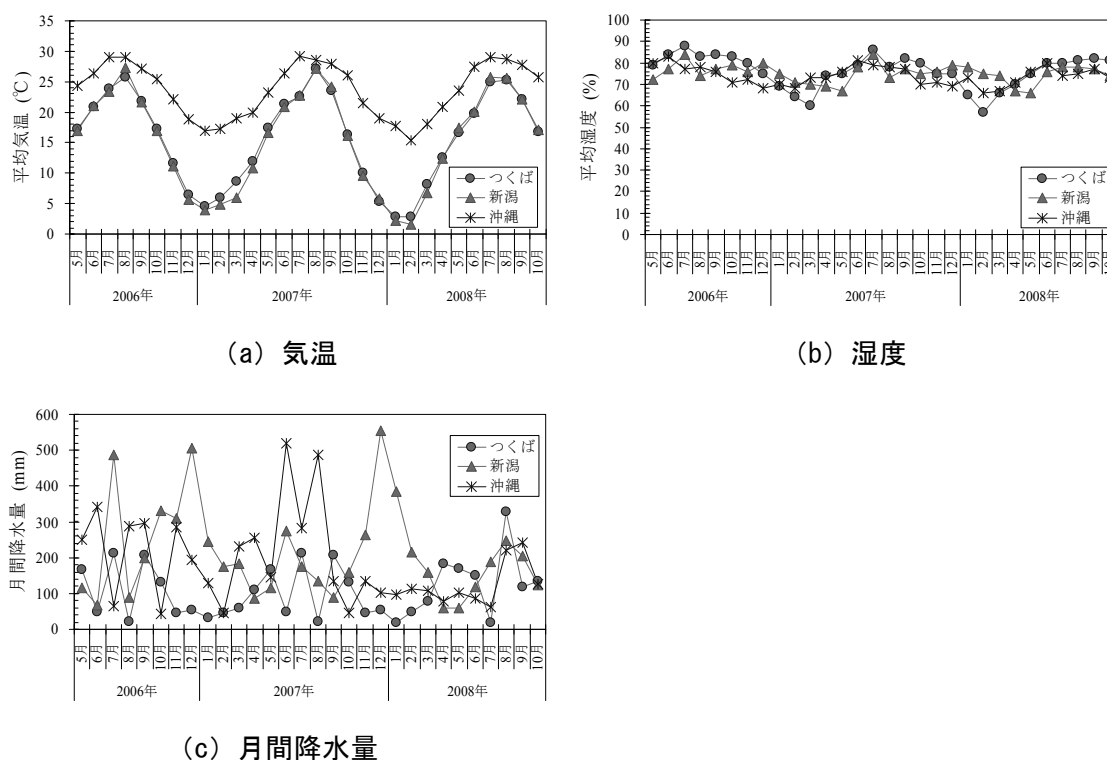


図 8.3.2 各暴露場

(4) 測定及び解体調査の方法

(a) 暴露試験開始時の測定

土木研究所の実験棟内でひび割れを導入した後、速やかに供試体を各暴露場に移設した。移設前後にコンタクトゲージの測定を行い、移設作業によるひび割れ幅の変動はほとんど無く、所定のひび割れ幅の範囲内にあることを確認した。

移設直後、各暴露場で自然電位を測定した。測定は、供試体表面に約 30 分間散水した後、銅/硫酸銅電極を用いて行った。測定点は、図 8.3.3 の鋼材直上のひび割れ部もしくは供試体中央と、この両側 50、100、200、300mm の計 9 点とした。測定値の温度補正は行わなかった。

(b) 回収時の測定

暴露開始から約 12 ヶ月後と約 28 ヶ月後に、暴露期間 1、2.5 年を予定していた供試体を回収した。回収時にも各暴露場でコンタクトゲージの測定を行い、暴露試験中を通じてひび割れ幅の変動がほとんど無かったことを確認した。また、暴露試験開始時と同様の方法で、各暴露場において自然電位を測定した。測定に使用した照合電極は、暴露試験開始時の測定で用いたものと同じ電極である。

(c) 解体調査

回収後、供試体を解体し、鋼材を取り出して腐食状態を目視観察・記録し、この結果から腐食面積率を求めた。また、ひび割れ部の塩化物イオン濃度とその分布状況を把握するため、塩化物イオン濃度の測定と EPMA 法による面分析を行った。このため、図 8.3.3 に示すように、コンクリート表面のひび割れがコア表面の中央となるように $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 75\text{mm}$ のコアを鋼材の直近で採取した。

塩化物イオン濃度の測定は、新潟と沖縄に暴露した水セメント比 55%の全ての供試体から $\phi 50\text{mm}$ のコアを採取して厚さ 10mm でスライスし、JIS A 1154 に準拠して電位差滴定法により行った。

面分析には、新潟と沖縄の水セメント比 55%のかぶり 70mm の供試体から採取した $\phi 75\text{mm}$ のコアを用いた。 $\phi 75\text{mm}$ のコアは約 100mm の深さまで採取し、ひび割れ部が中央となるように厚さ 10mm の版状で試料を切り出した。面分析は $62\text{mm} \times 85\text{mm}$ の範囲を対象とし、JSCE G574-2005 に準拠して行った。対象元素は、塩素に加えて、炭素、硫黄、ナトリウムの 4 種類とした。

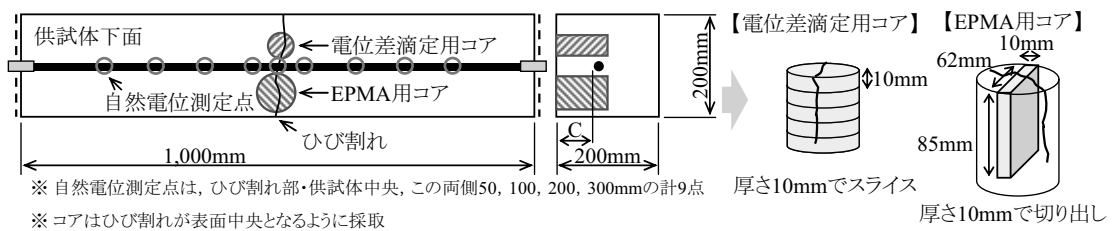


図 8.3.3 自然電位測定点とコア採取位置，試料製作方法

8.3.3 測定及び解体調査の結果

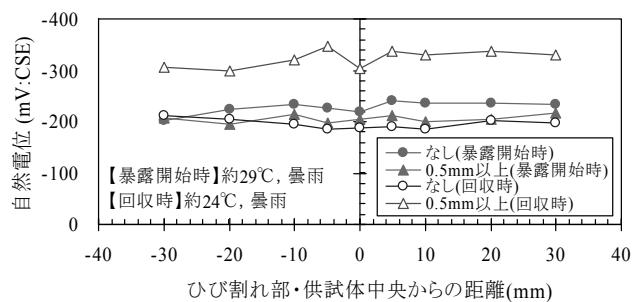
本節では、試験開始から約12ヶ月後と約28ヶ月後の測定及び解体調査の結果をまとめる。

(1) ひび割れ幅の変動

移設前後及び暴露試験前後において、コンタクトゲージの測定を行った。この結果によると、移設や暴露試験によるひび割れ幅の変動はほとんどなく、全ての供試体が所定のひび割れ幅の範囲内にあることを確認した。

(2) 自然電位

図8.3.4に、自然電位の測定結果の一例を示す。ここでは、暴露試験前後の供試体全体における自然電位の分布を比較するため、一例として、沖縄のかぶり50mmの「ひび割れなし」と「0.5mm以上」の供試体の暴露開始時と約12ヶ月後の結果を示す。暴露開始時の自然電位は、ひび割れの有無に関わらず-200mV程度であったが、回収時の自然電位は、「0.5mm以上」の供試体で-320mV程度の卑な値になった。これは、約12ヶ月間の暴露試験により、この供試体の鋼材が腐食しやすい環境に置かれたことを反映したためと考えられる。また、自然電位の分布に着目すると、「0.5mm以上」の供試体では、ひび割れ周辺のみではなく部材全体で自然電位が卑になっていた。後に示す鋼材の腐食状態の目視観察結果では、腐食はひび割れ部周辺のごく一部のみで生じていた。腐食の生じていない部材端部の鋼材でも自然電位が卑になった原因は、ひび割れ周辺の狭い範囲の鋼材が腐食しやすい環境に置かれたことによりマクロセル回路が形成され、分極の影響を受けて腐食しやすい環境にはない部材端部でも卑な自然電位が測定されたためと考えられる。この傾向は、ひび割れを導入した他の供試体の測定結果においてもみられた。



※沖縄, かぶり50mm

図8.3.4 試験開始時, 約12ヶ月後の自然電位分布の例

また、図8.3.5に暴露期間1年の供試体の暴露開始時と回収時、図8.3.6に暴露期間2.5年の供試体の暴露試験開始時と回収時の自然電位を示す。ここでは、ひび割れ部もしくは供試体中央と、この両側50mmの計3点の自然電位を平均した。これによると、暴露開始時の自然電位は、暴露期間1年の沖縄のかぶり20mmの「0.5mm以上」の供試体で若干卑とな

ったが、いずれの暴露期間の供試体においても-200mV 前後の同程度の値となった。しかし、回収時の自然電位は供試体ごとに異なり、若干のばらつきはあるものの、暴露期間にかかわらず、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で卑になる傾向にあった。これは、暴露期間中に塩化物イオンが侵入するなどして、鋼材の置かれた腐食環境の変化に差が生じたためと考えられる。

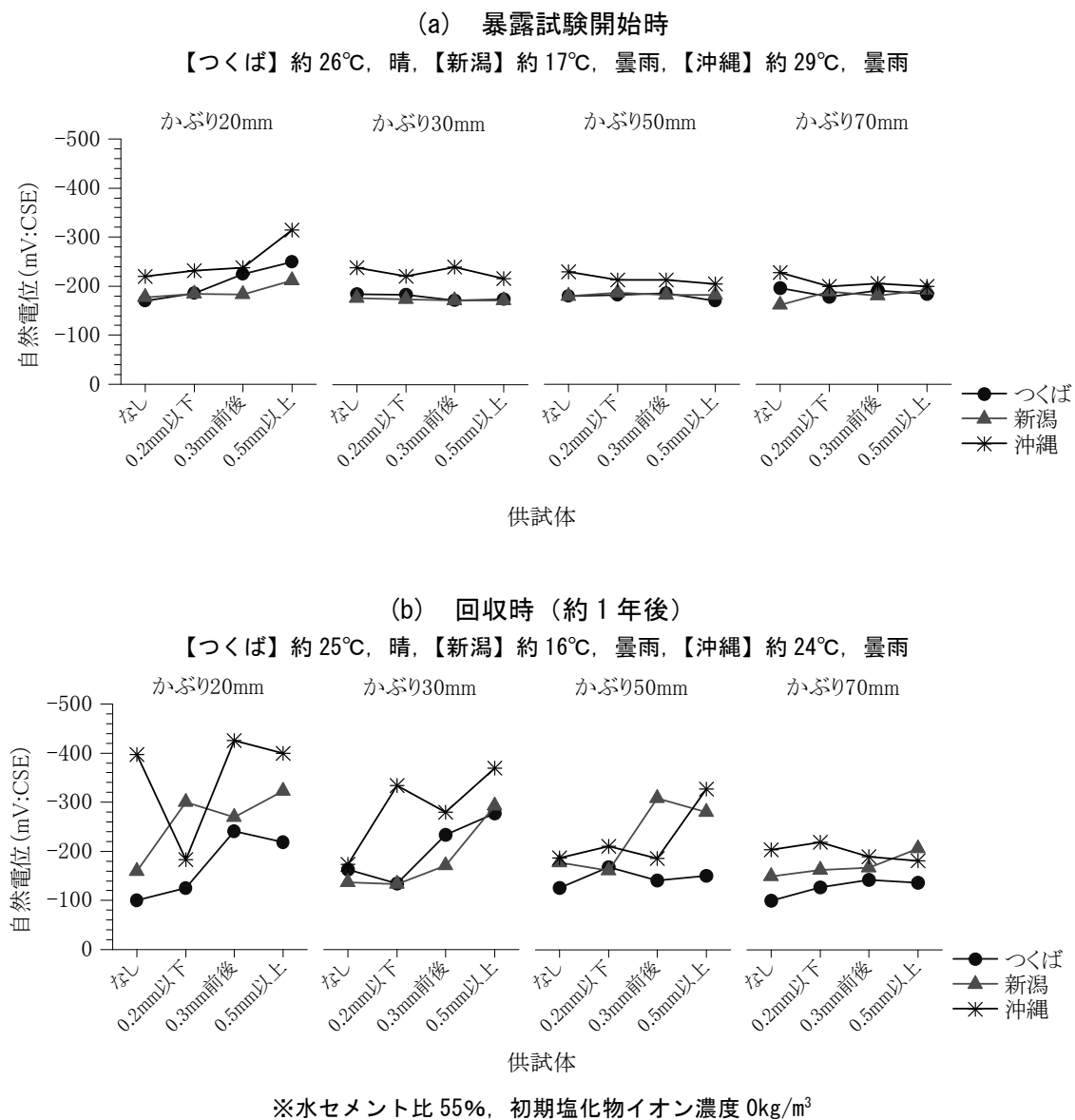
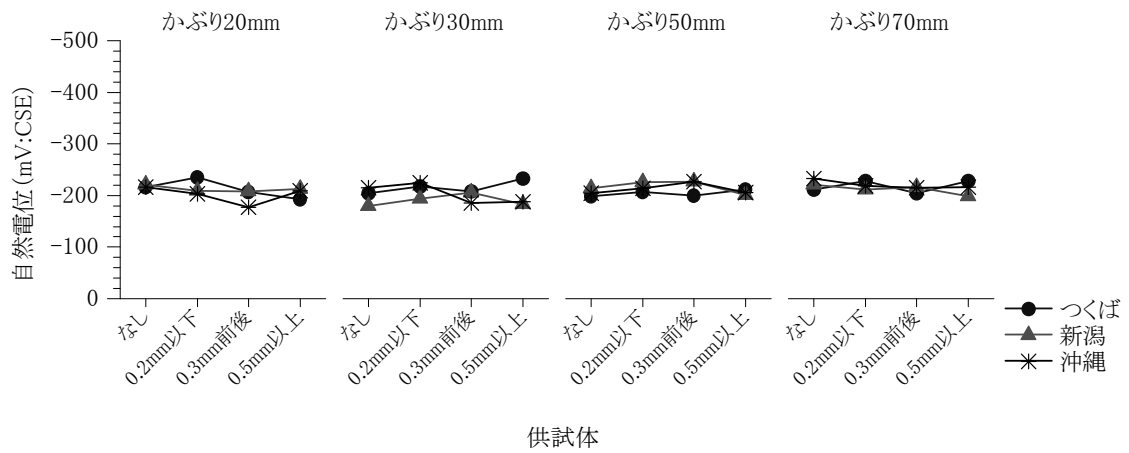


図 8.3.5 自然電位 (暴露期間 1 年)

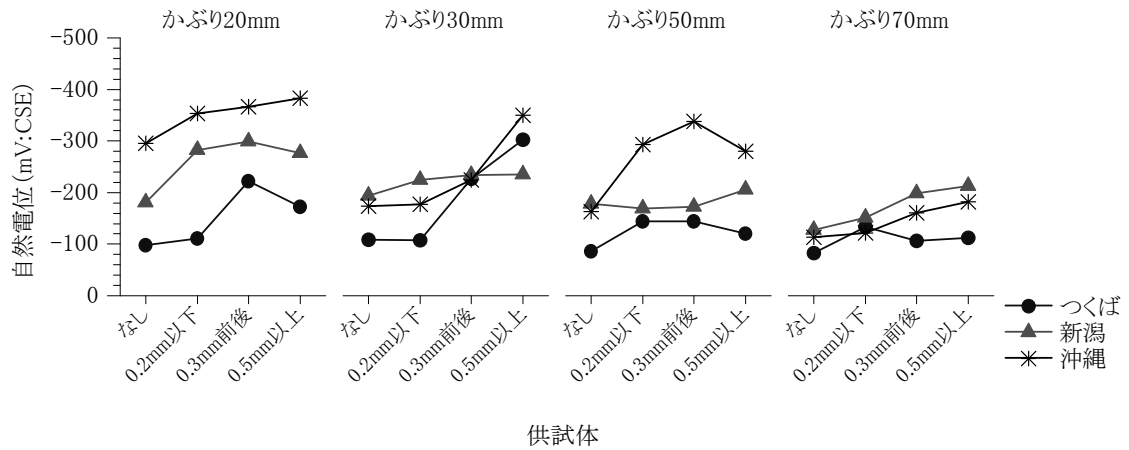
(a) 暴露試験開始時

【つくば】約 26°C, 晴, 【新潟】約 17°C, 曇雨, 【沖縄】約 29°C, 曇雨



(b) 回収時 (約 2.5 年後)

【つくば】約 25°C, 晴, 【新潟】約 32°C, 曇雨, 【沖縄】約 24°C, 曇雨



※水セメント比 55%, 初期塩化物イオン濃度 0kg/m³

図 8.3.6 自然電位 (暴露期間 2.5 年)

(3) 鋼材の腐食状態

回収後の供試体を解体し、取り出した鋼材の腐食状態を目視観察した。いずれの暴露期間においても、腐食の生じていた供試体ではひび割れと腐食の発生位置は一致し、ひび割れを導入していない供試体で腐食は生じていなかった。写真 8.3.2、8.3.3 に、つくばのかぶり 20mm の供試体の鋼材の腐食状態を示す。つくばの暴露場は内陸部にあるため塩害環境下にはなかったが、ひび割れを導入した供試体では鋼材に腐食が生じていた。



(a) 0.2mm 以下

(b) 0.3mm 前後

(c) 0.5mm 以上

※つくばのかぶり 20mm, 初期塩化物イオン濃度 0kg/m^3 の供試体

写真 8.3.2 鉄筋の腐食状態(暴露期間 1 年)



(a) 0.2mm 以下

(b) 0.3mm 前後

(c) 0.5mm 以上

※つくばのかぶり 20mm, 初期塩化物イオン濃度 0kg/m^3 の供試体

写真 8.3.3 鉄筋の腐食状態(暴露期間 2.5 年)

腐食区間長は導入したひび割れ幅が大きいものほど長く、腐食範囲の大小はひび割れ幅の大小と概ね一致していたと考えられる。これは、ひび割れ幅の大きい供試体ほどコンクリートと鋼材の付着が切れた区間が長くなったことや塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透が容易であったことなどが原因と考えられる。ただし、暴露期間の違う鋼材の腐食状態を比較しても、暴露期間が長くなることで鋼材の腐食区間が大幅に増加したような傾向は見受けられない。約 28 ヶ月程度の暴露期間では、腐食の発生範囲はひび割れ部近傍のみに限定されると考えられる。

除錆後の鋼材表面を目視観察すると、暴露期間 1 年の供試体では断面欠損を伴うような腐食は生じていなかった。このため、暴露期間 1 年の供試体で生じた腐食は、鋼材表面のごく軽微なものであったと考えられる。ところが、暴露期間 2.5 年の供試体では、特に新潟と沖縄のかぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体において、孔食によると思われる軽

微な断面欠損を伴う腐食が生じていたものもあった。写真 8.3.4 に、沖縄のかぶり 20mm のひび割れ幅 0.5mm 以上の供試体における除錆前後の鋼材の写真を示す。軽微ではあるが、孔食によると思われる断面欠損を伴う腐食が生じていたことを確認できる。

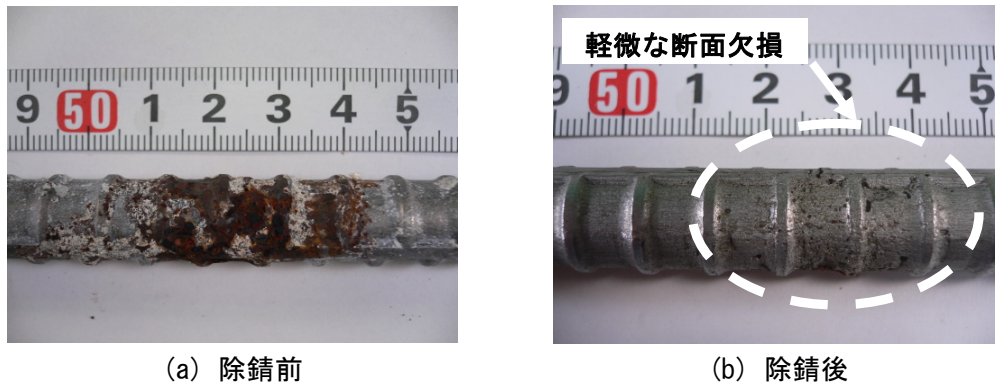


写真 8.3.4 除錆前後の鉄筋の腐食状態(暴露期間 2.5 年)

※沖縄のかぶり 20mm, ひび割れ幅「0.5mm 以上」の供試体

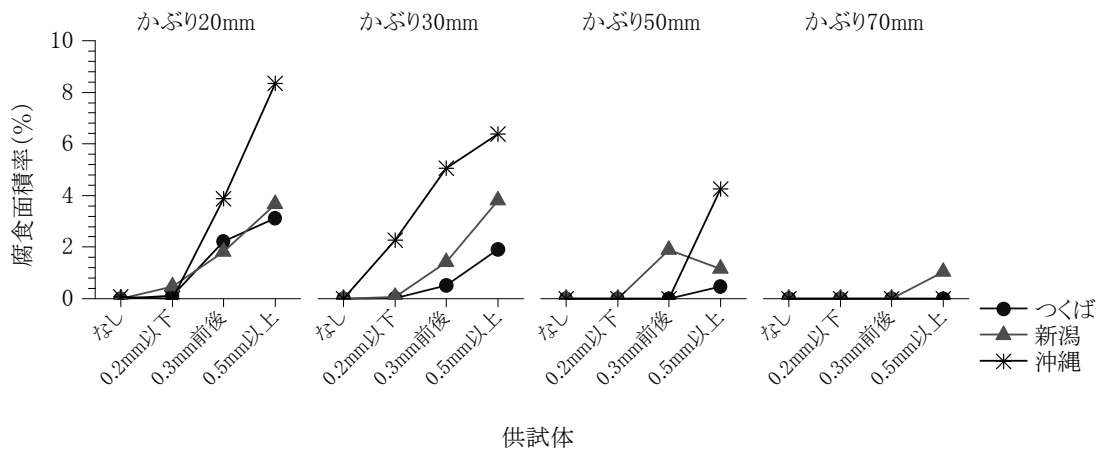
次に、簡易に各供試体の腐食の程度を比較するため、ひび割れ部から 200mm の鋼材の表面積に占める腐食部分の割合を腐食面積率として算定した。腐食部分の面積は、目視観察時に作成した鋼材の腐食状態のスケッチ図から積算して求めた。また、この対象区間以外で腐食は生じておらず、複数のひび割れが生じている供試体では最も幅の大きいひび割れ近傍の腐食のみを考慮した。

図 8.3.7 に、各暴露期間後に解体した供試体の鋼材の腐食面積率を示す。いずれの暴露期間においても、かぶりが小さくひび割れ幅が大きい供試体で腐食面積が大きくなる傾向にあった。この傾向は、図 8.3.5 と図 8.3.6 に示した自然電位の傾向とも概ね一致するものである。暴露地点やひび割れ幅に加えて、かぶりの大小によっても、腐食の程度は大きく異なることが窺える。また、新潟と沖縄の供試体の腐食面積は、これらの暴露場が塩害環境下にあったため、塩害環境下にはないつくばの供試体よりも大きくなる傾向にあった。

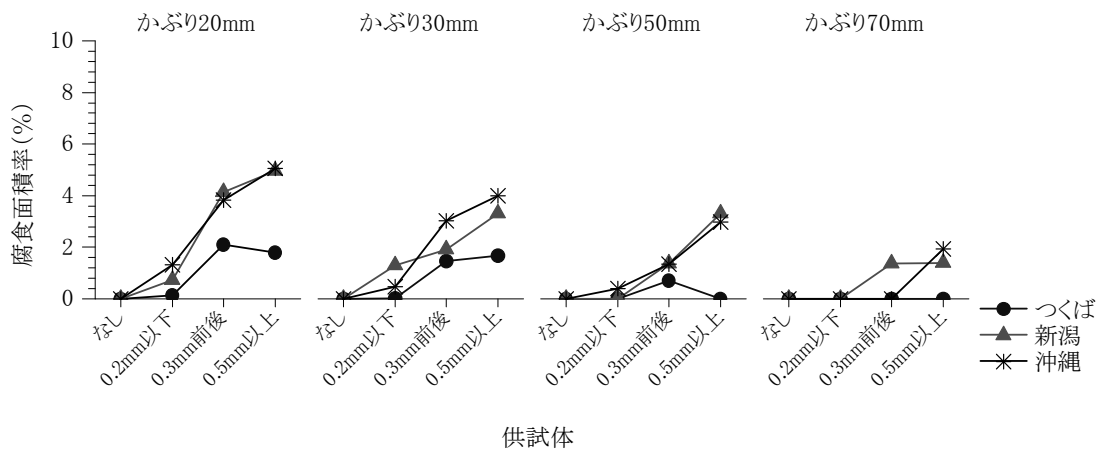
ただし、内陸部に位置し塩害環境下にはないと考えられるつくばの供試体においても、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体では腐食が生じていた。つくばの供試体で生じた腐食は、塩化物イオンとは無関係であり、ひび割れ部のコンクリート中性化や、水や酸素との接触によって生じたものである可能性が高いと推察される。

また、どちらの暴露期間の供試体においても腐食面積率は同程度であり、前回から今回にかけて腐食範囲の大幅な増加はみられなかった。しかしながら、先に述べたように、暴露期間 2.5 年の供試体の一部では断面欠損を伴う腐食が生じており、暴露期間が長くなることで鋼材の深さ方向の腐食は進行していたと考えられる。従って、約 28 ヶ月程度の暴露試験では、鋼材の腐食面積の明確な増加は確認できなかったが、腐食の程度は明らかに進展していたと考えられる。なお、JCI-SC1 に準拠して鋼材の質量減少率も測定したが、今回の暴露試験で用いた鋼材の長さが 1m と長く、断面欠損の程度も微量であったため、明確な差を見出すことはできなかった。

(a) 暴露期間 1 年



(b) 暴露期間 2.5 年



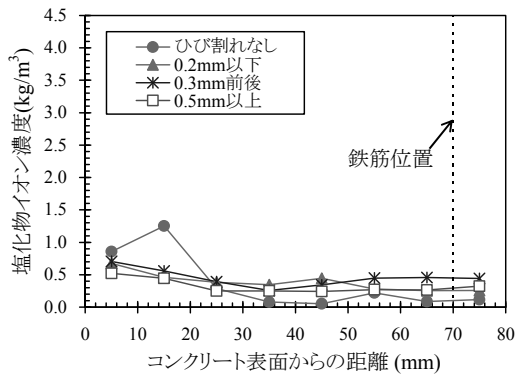
※水セメント比 55%, 初期塩化物イオン濃度 0kg/m³

図 8.3.7 鋼材の腐食面積率

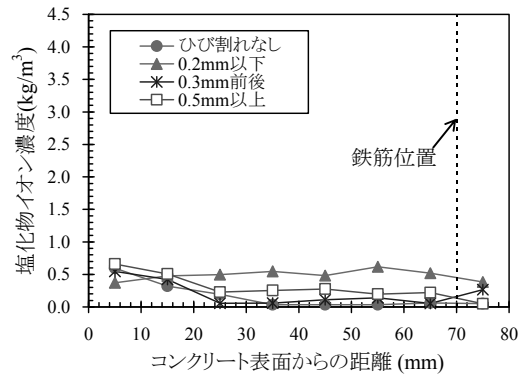
(4) 塩化物イオンの浸透

図 8.3.8 に新潟、図 8.3.9 に沖縄のかぶり 70mm の供試体の塩化物イオン濃度の測定結果を示す。新潟では供試体表面から 10mm までの深さの塩化物イオン濃度が内部よりもわずかに大きくなったただけであったが、沖縄では表面から 10~20mm の深さの塩化物イオン濃度が最も大きく、明らかに塩化物イオンの浸透が認められる。0~10mm ではなく 10~20mm の塩化物イオン濃度が最大となった原因は、コンクリート表面付近の中性化によるものと思われる。また、新潟と沖縄を比較すると、沖縄の方が塩化物イオンの供給量が多く、厳しい塩害環境にあったと考えられる。

次に、図 8.3.10 に、鋼材位置の塩化物イオン濃度を示す。コアを 10mm ごとにスライスして塩化物イオン濃度を測定したため、ここでは鋼材表面から 10mm 深い位置までの塩化物イオン濃度を「鋼材位置の塩化物イオン濃度」と定義した(例えば、かぶり 70mm の供試体では、コンクリート表面から 70~80mm における $\phi 50\text{mm}$ のコアの塩化物イオン濃度)。図 8.3.8、8.3.9 の結果と同様に、鋼材位置の塩化物イオン濃度は、沖縄の方が新潟よりも大きく、沖縄の方が厳しい塩害環境下にあったものと思われる。また、新潟の鋼材位置の塩化物イオン濃度は、どちらの暴露期間のどの供試体においても 0.5kg/m^3 程度以下と小さく、塩化物イオン濃度の供給量が必ずしも多くなかったのではないかと推察される。



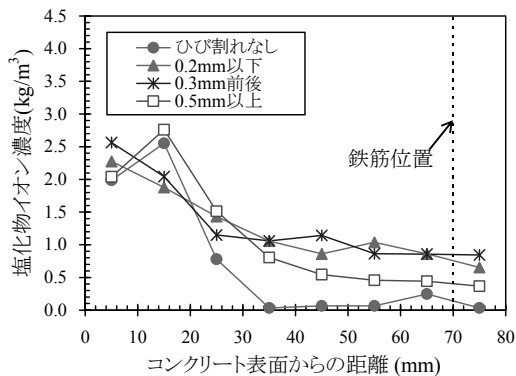
(a) 暴露期間 1 年



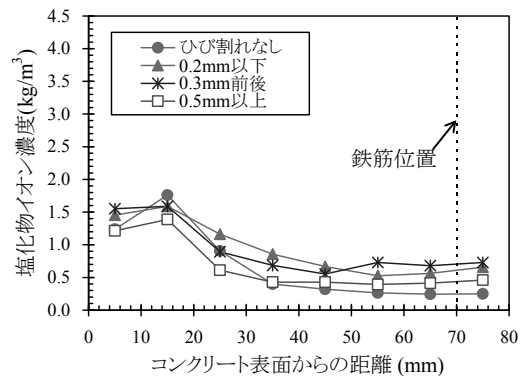
(b) 暴露期間 2.5 年

※水セメント比 55%

図 8.3.8 塩化物イオン濃度の分布(新潟, かぶり 70mm)



(a) 暴露期間 1 年

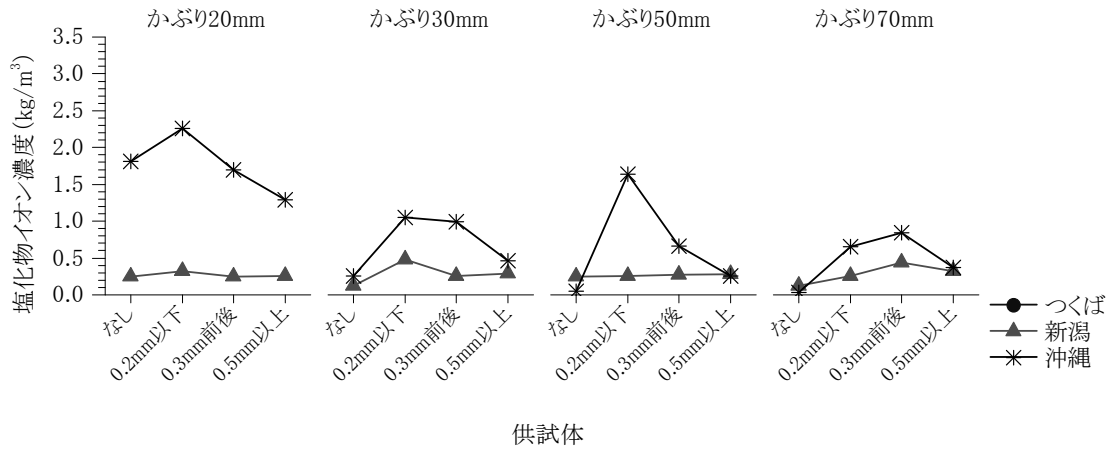


(b) 暴露期間 2.5 年

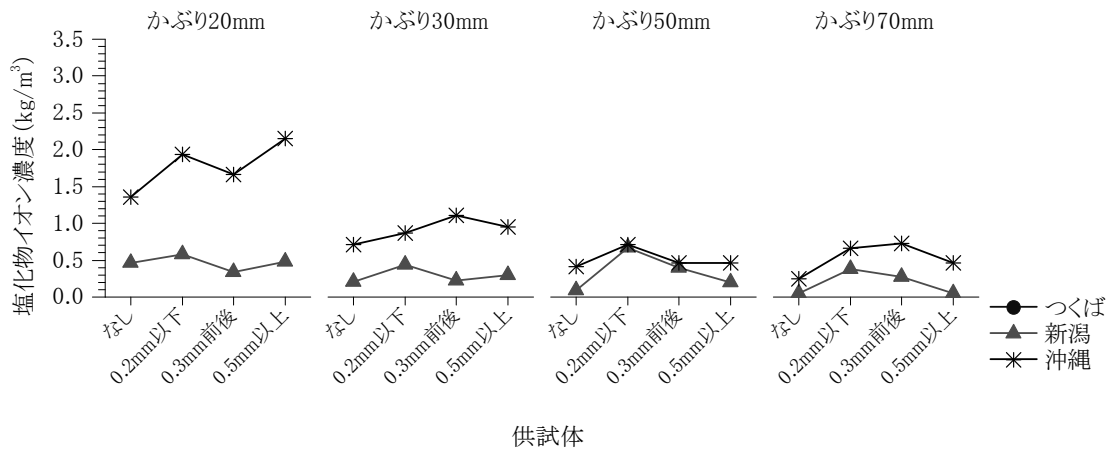
※水セメント比 55%

図 8.3.9 塩化物イオン濃度の分布(沖縄, かぶり 70mm)

(a) 暴露期間 1 年



(b) 暴露期間 2.5 年



※水セメント比 55%, 初期塩化物イオン濃度 0kg/m³

図 8.3.10 鋼材位置の塩化物イオン濃度

図 8.3.8～8.3.10 において暴露期間 1 年と 2.5 年の結果を比較すると、鋼材位置の塩化物イオン濃度は、新潟で同程度、沖縄においては若干低下する傾向にあり、試験開始約 12 ヶ月後から約 28 ヶ月後の期間における塩化物イオン濃度の増加を明確に確認するには至らなかった。すなわち、ひび割れ部への塩化物イオン濃度の浸透は、比較的短期間で容易に生じ、その後の増加量はそれほど大きくないと考えることができる。

また、沖縄のひび割れを導入した供試体に着目すると、暴露期間の違いにかかわらずかぶりが小さいほど鋼材位置の塩化物イオン濃度が大きくなる傾向は等しいが、ひび割れ幅と塩化物イオン濃度の大小の関係では傾向が異なった。すなわち、暴露期間 1 年の結果では、かぶりの小さい供試体 (50mm 以下) において、ひび割れ幅が小さいほど鋼材位置の塩化物イオン濃度が大きくなる傾向にあったが、暴露期間 2.5 年の結果ではひび割れ幅の大小にかかわらず鋼材位置の塩化物イオン濃度は概ね同程度であった。この原因は、供試体間の個体差の影響もあるが、ひび割れ面を下向きにして供試体を暴露しており、塩化物イオンは短期的にはひび割れ幅が小さい供試体で毛細管現象により水とともにひび割れ内部へ浸透したが、長期的にはひび割れ幅の大きい供試体でひび割れ開口部から直接浸透し、かぶりが小さい供試体ほどこの傾向が顕著に現れたためではないかと推察される。

(5) EPMA による面分析

図 8.3.11、8.3.12 に炭素、図 8.3.13、8.3.14 に塩素、図 8.3.15、8.3.16 に硫黄の EPMA による面分析の結果をそれぞれ暴露期間ごとに示す。

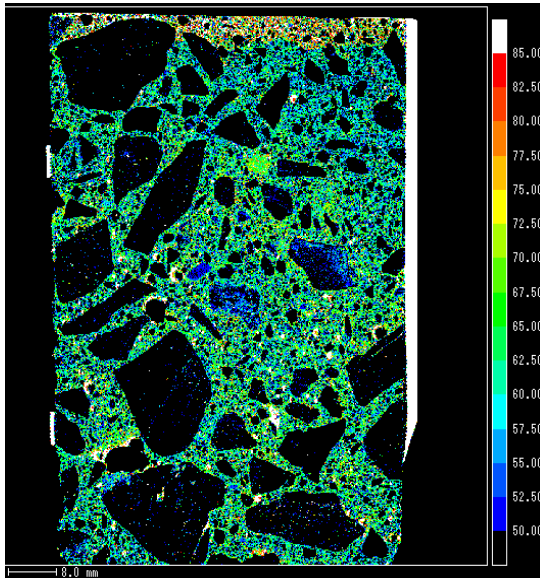
まず、塩素の分布に着目すると、いずれの供試体においてもコンクリート表面付近においては塩素の濃度が低い領域が存在した。コンクリートの中性化により塩化物イオンが移動・濃縮したためと考えられる。また、ひび割れの影響に着目すると、「ひび割れなし」では表面付近のみに塩化物イオンが浸透していたが、ひび割れを有する供試体ではこれよりも深い位置までひび割れに沿って塩化物イオンが浸透していた。ただし、塩化物イオンの浸透程度は必ずしもひび割れ幅の大小とは一致しておらず、コンクリート内部深くまで浸透した塩化物イオンは、ひび割れ幅の大きい供試体 (「0.5mm 以上」) よりもひび割れ幅の比較的小さい供試体 (「0.2mm 以下」、「0.3mm 前後」) で多くなる傾向にあった。沖縄よりも塩素の浸透程度は小さいが、新潟でも同様の傾向は確認された。このため、短期的には、曲げひび割れが発生しているコンクリート構造物においては、ひび割れ幅の大小にかかわらず比較的容易にひび割れに沿って塩化物イオンが浸透し、その浸透程度は必ずしもひび割れ幅の大小と一致しないと考えることができる。本暴露試験では、先に述べた塩化物イオンの測定と EPMA による面分析に異なる試料を用いたため、厳密には両者の結果は一致しない。しかしながら、塩化物イオンの浸透状況の傾向は概ね等しい結果が得られたようである。

次に、炭素と硫黄の分布に着目すると、いずれの供試体においてもコンクリート表面付近で炭素が高濃度となり、この高濃度領域で硫黄が低濃度となっていた。これらの領域は

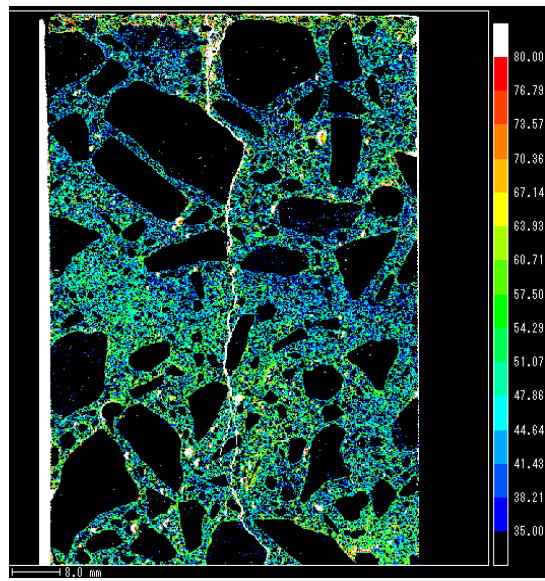
塩素の濃度が低くなっていた領域とも概ね一致する。硫黄は、塩素と同様に中性化により移動・濃縮することが知られており、ここでの結果はコンクリート表面付近においてコンクリートの中性化が進行していたことを示すものと考えられる。一方、ひび割れ部に着目すると、「0.5mm 以上」ではコンクリート表面から 5mm 程度の位置まで炭素の高濃度領域及び硫黄の低濃度領域が確認されたためこの部分では中性化が進行していたと考えられるが、これよりも深い位置や他の供試体ではひび割れに沿って中性化が進行していると考えられる部分を確認するには至らなかった。

既往研究^{14)、15)}では、供用開始から 30 年以上経過した実構造物から採取したコアにおいて、ひび割れ部の中性化によりひび割れに沿った塩化物イオンの浸透は必ずしも生じていなかったことが報告されている。一方、本暴露試験の結果では、暴露期間が約 28 ヶ月と比較的短いこともあり、ひび割れ部の中性化はほとんど生じておらず、ひび割れに沿った塩化物イオンの浸透が確認されたと考えられる。

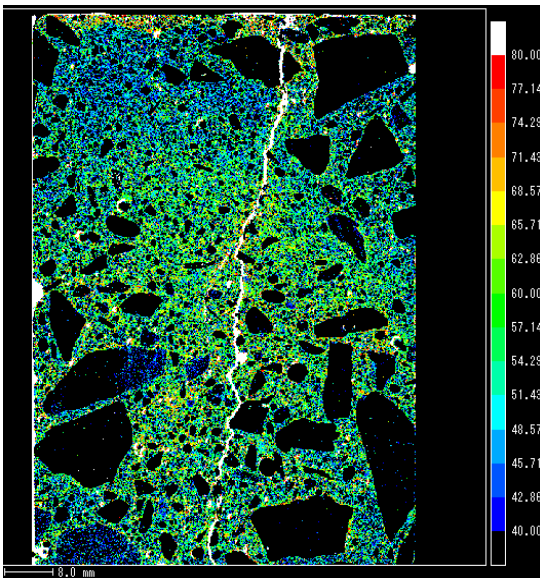
また、ナトリウムの分布についても面分析を行ったが、ここではコンクリート表面ならびにひび割れ部のどちらにおいても外部からの浸透を確認するには至らなかった。



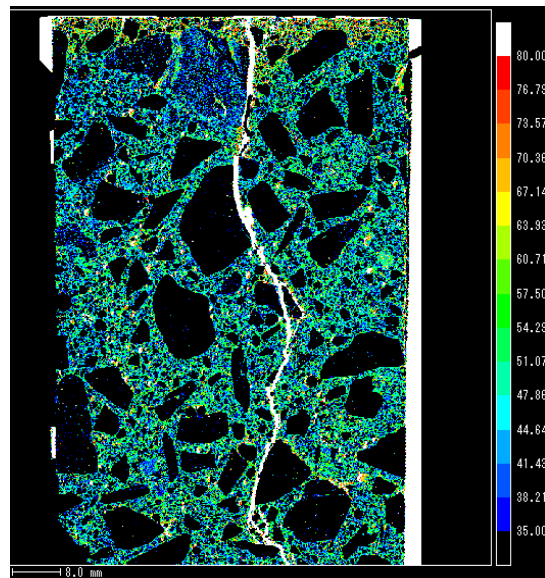
(a) ひび割れなし



(b) 0.2mm 以下



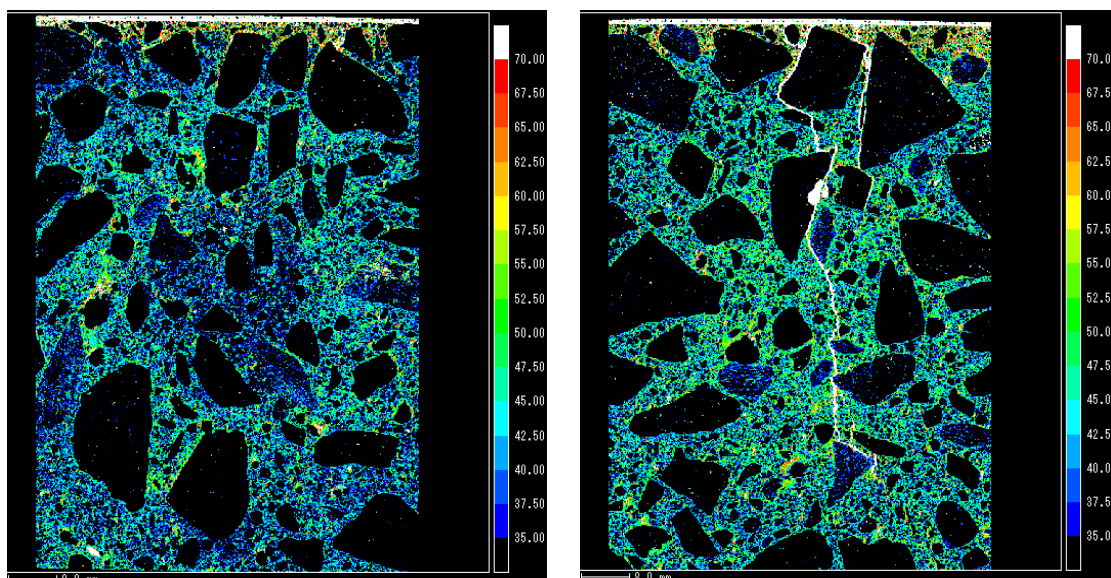
(c) 0.3mm 前後



(d) 0.5mm 以上

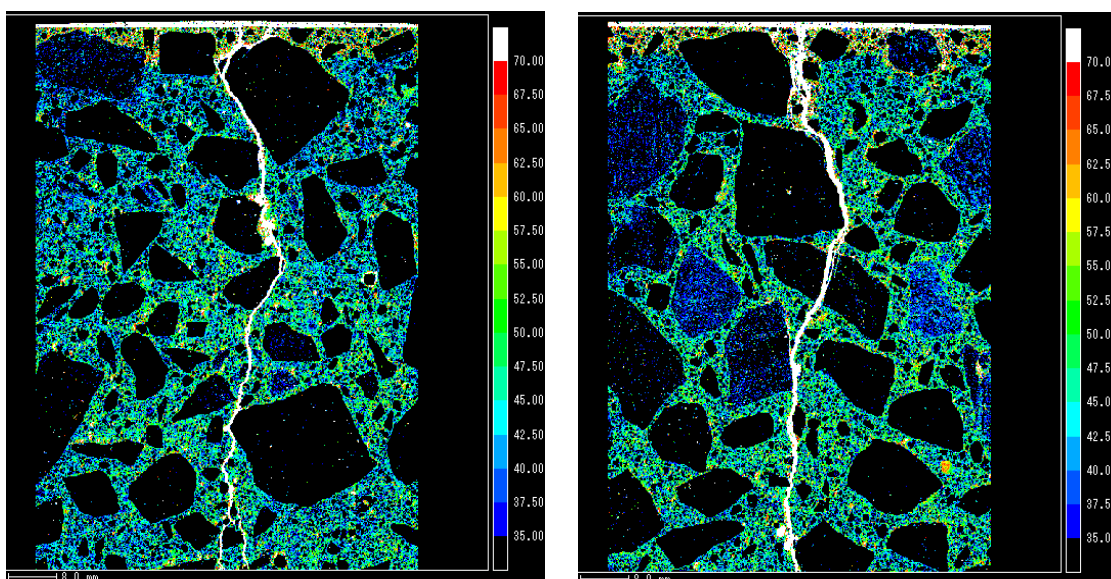
※ひび割れ内部では、試料の固定に用いた樹脂が白色となっている。
 ※上辺がコンクリート表面

図 8.3.11 面分析による炭素の分布(沖縄, 暴露期間1年, かぶり70mm, W/C55%)



(a) ひび割れなし

(b) 0.2mm 以下



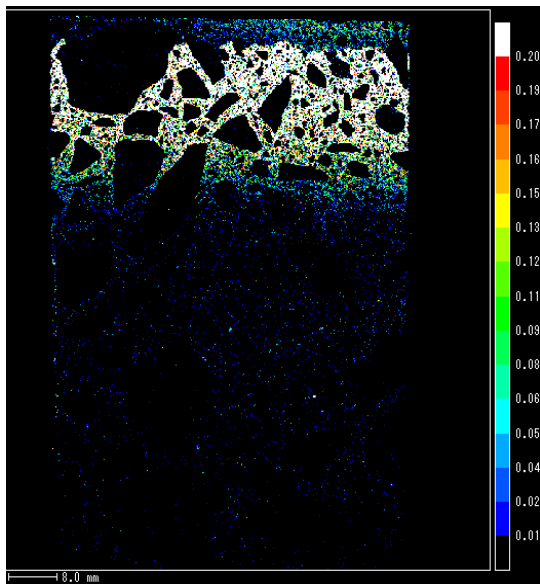
(c) 0.3mm 前後

(d) 0.5mm 以上

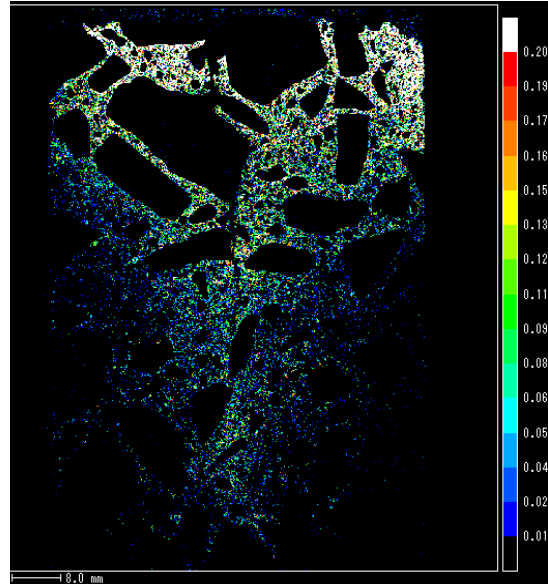
※ひび割れ内部では、試料の固定に用いた樹脂が白色となっている。

※上辺がコンクリート表面

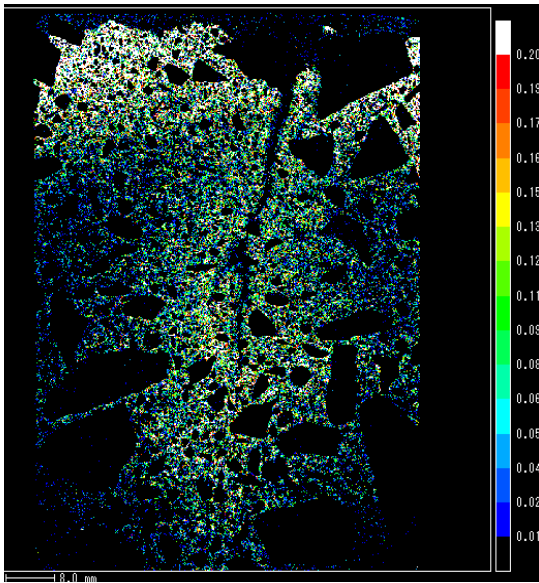
図 8.3.12 面分析による炭素の分布(沖縄, 暴露期間 2.5 年, かぶり 70mm, W/C55%)



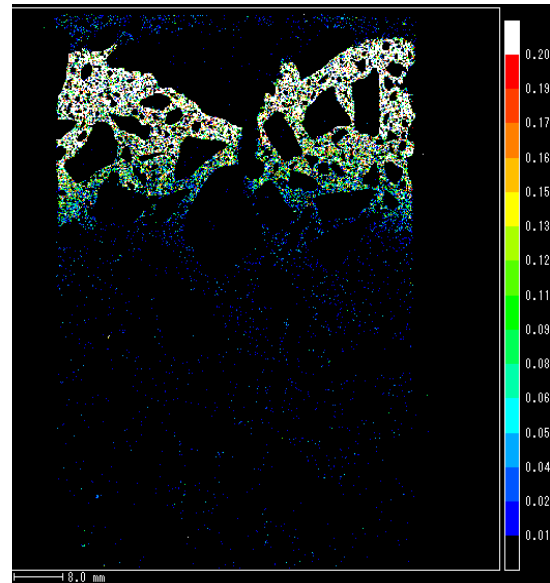
(a) ひび割れなし



(b) 0.2mm 以下



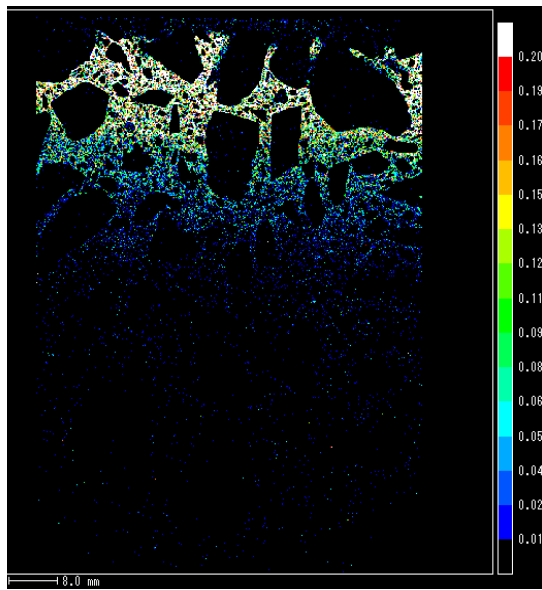
(c) 0.3mm 前後



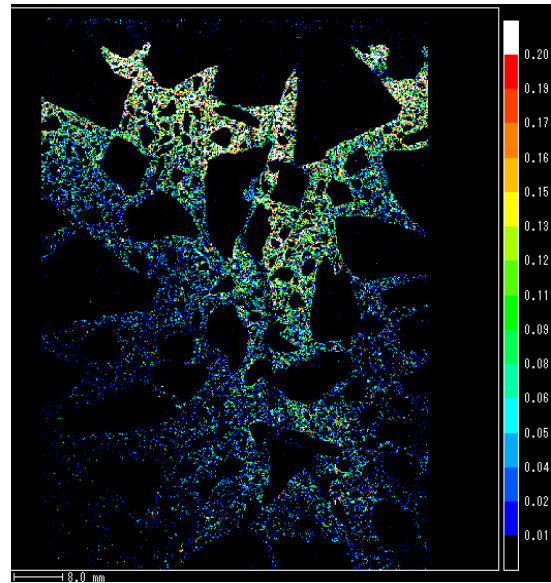
(d) 0.5mm 以上

※上辺がコンクリート表面

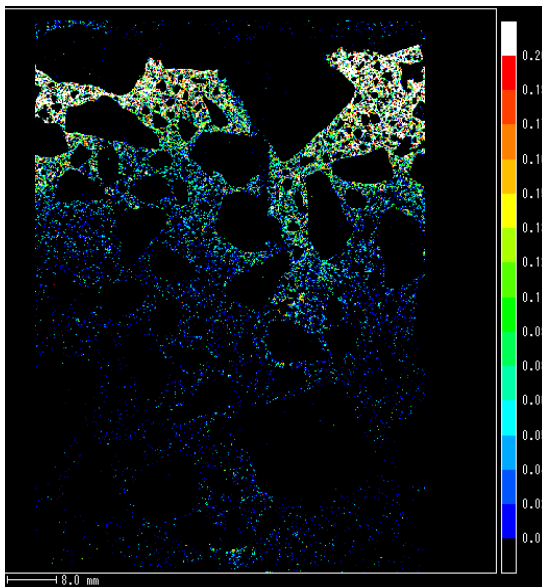
図 8.3.13 面分析による塩素の分布(沖縄, 暴露期間1年, かぶり70mm, W/C55%)



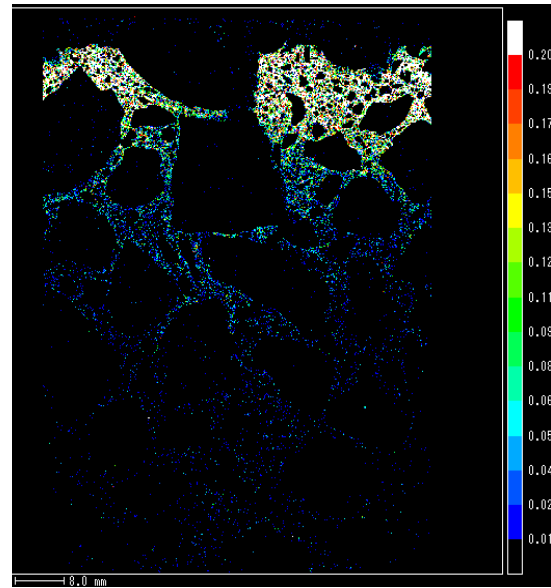
(a) ひび割れなし



(b) 0.2mm 以下



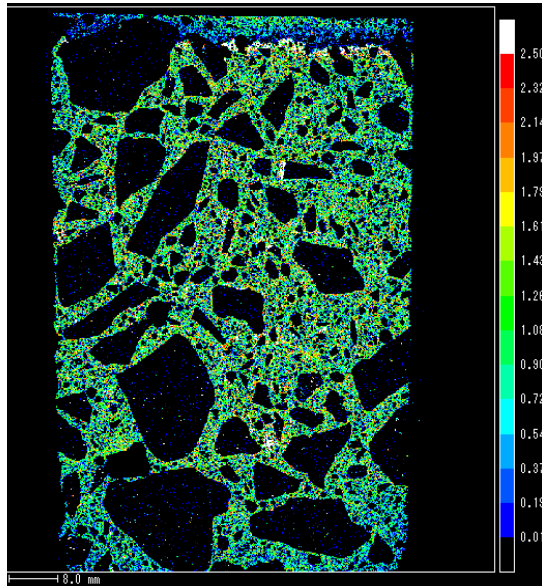
(c) 0.3mm 前後



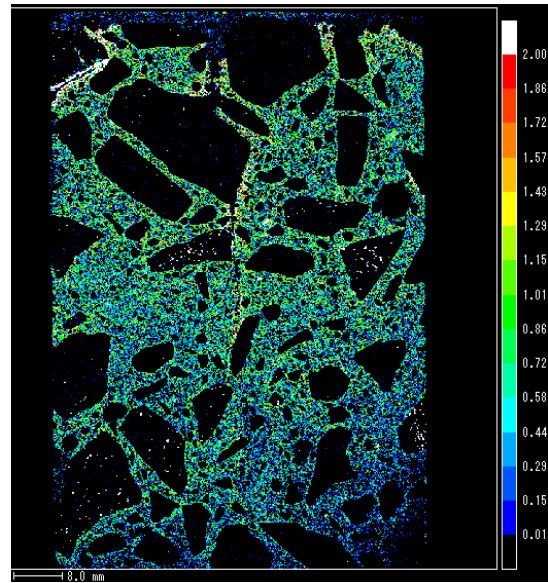
(d) 0.5mm 以上

※上辺がコンクリート表面

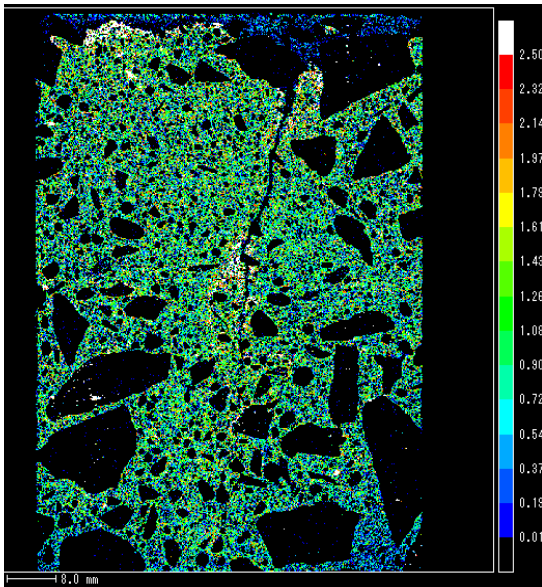
図 8.3.14 面分析による塩素の分布(沖縄, 暴露期間 2.5 年, かぶり 70mm, W/C55%)



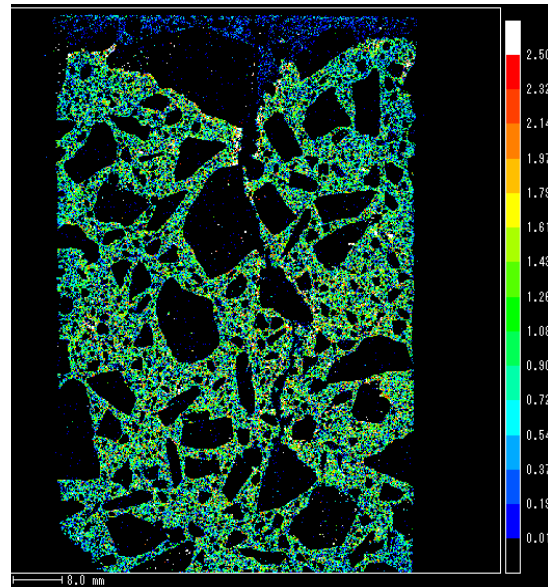
(a) ひび割れなし



(b) 0.2mm 以下



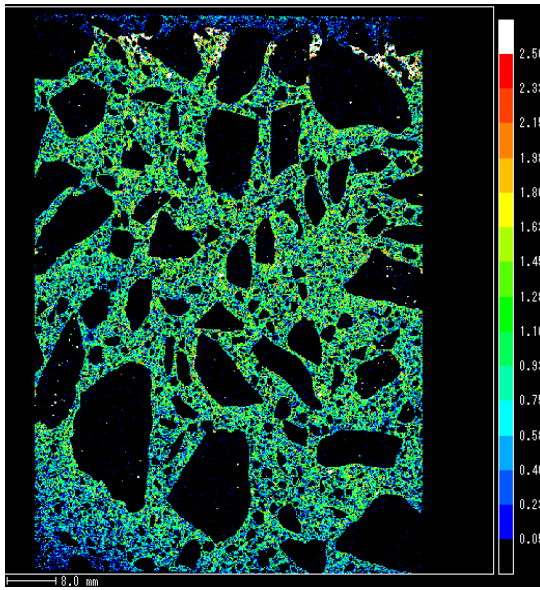
(c) 0.3mm 前後



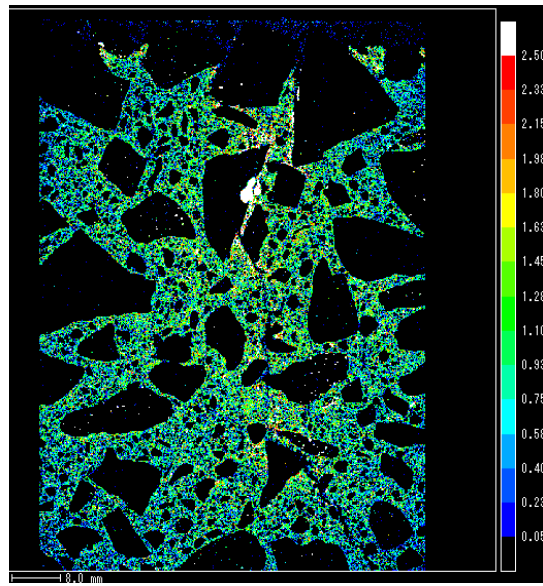
(d) 0.5mm 以上

※上辺がコンクリート表面

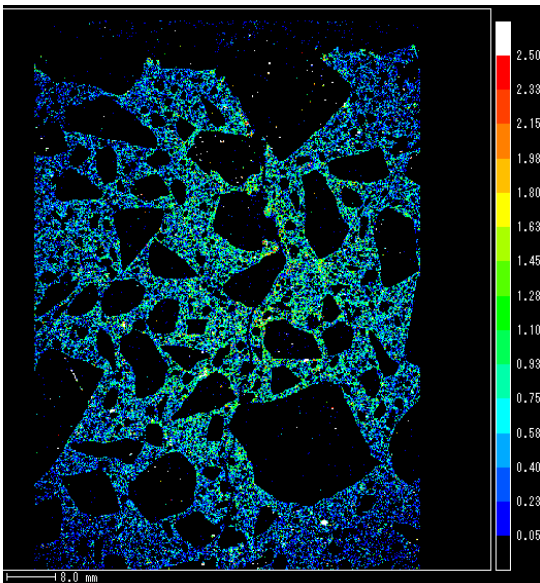
図 8.3.15 面分析による硫黄の分布(沖縄, 暴露期間1年, かぶり70mm, W/C55%)



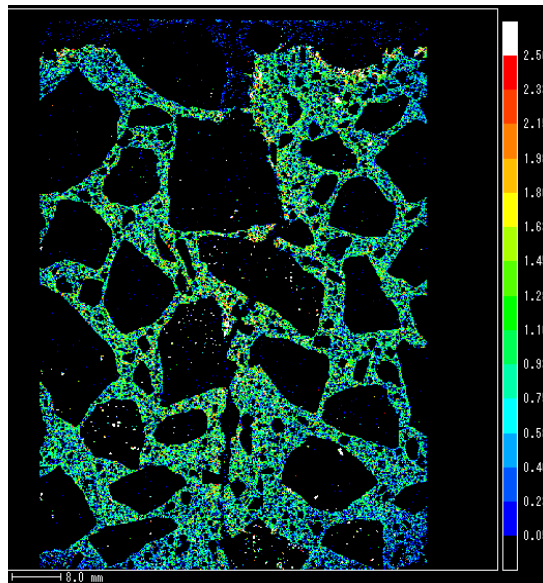
(a) ひび割れなし



(b) 0.2mm 以下



(c) 0.3mm 前後



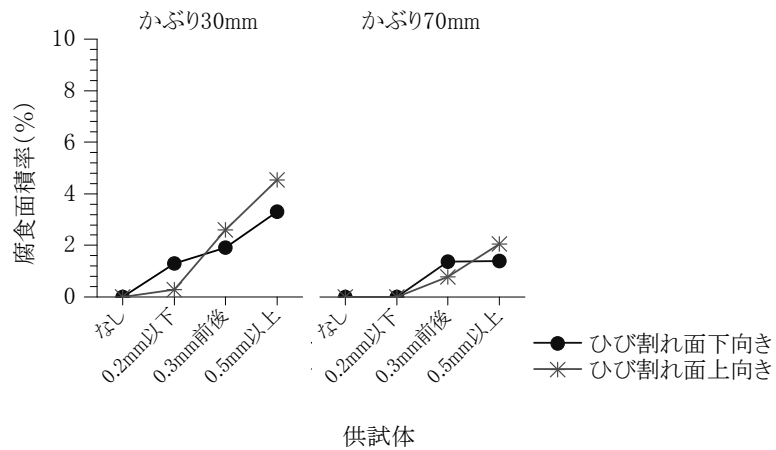
(d) 0.5mm 以上

※上辺がコンクリート表面

図 8.3.16 面分析による硫黄の分布(沖縄, 暴露期間 2.5 年, かぶり 70mm, W/C55%)

(6) ひび割れ面の向きの影響

図 8.3.17 に、新潟に暴露したひび割れ面の向きの異なる供試体の鋼材の腐食面積率を比較して示す。暴露期間は 2.5 年である。ひび割れ面の向きにかかわらず、腐食面積率は同程度であった。また、塩化物イオン量にも顕著な差は見られなかった。このため、新潟に暴露した供試体においては、ひび割れ面の向きが試験結果に与えた影響は小さいと考えられる。

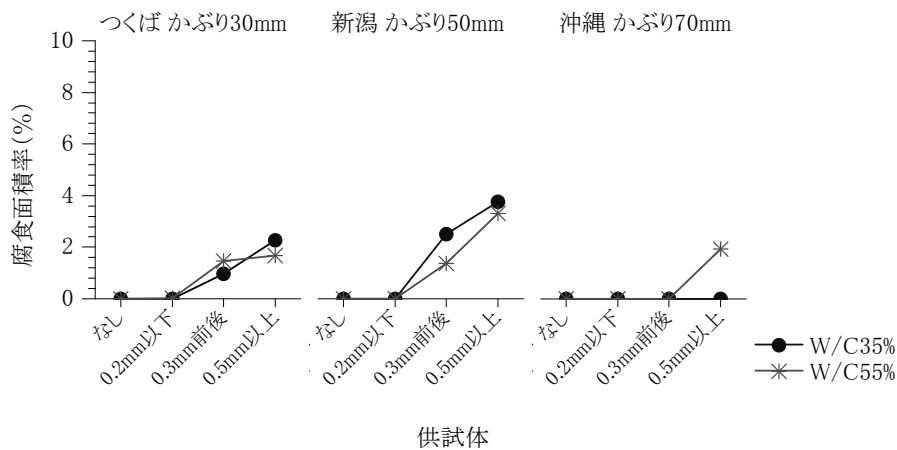


※暴露地点新潟，暴露期間 2.5 年，水セメント比 55%

図 8.3.17 鋼材の腐食面積率（ひび割れ面の向きの影響）

(7) 水セメント比の影響

図 8.3.18 に、水セメント比の異なる供試体の鋼材の腐食面積率を示す。暴露期間は 2.5 年である。ここでは、暴露地点ごとに異なるかぶりの供試体で水セメント比 35%の供試体を暴露したが、腐食面積率は暴露地点やかぶりが等しければ水セメント比にかかわらず同程度であった。今回の暴露試験では、塩化物イオンなど腐食因子の浸透がひび割れ部から限定されており、この結果、水セメント比の違いによる影響が明確には認められなかったものと考えられる。

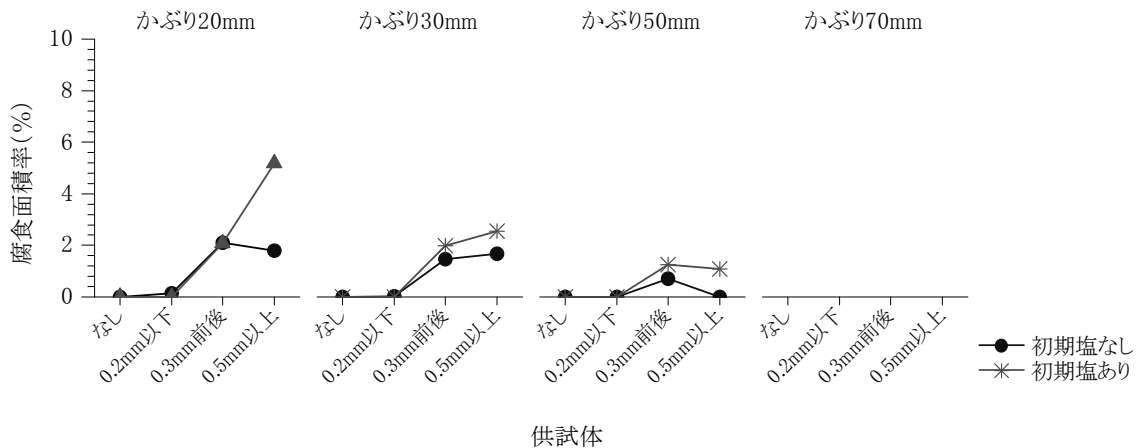


※暴露期間 2.5 年，初期塩化物イオン濃度 $0\text{kg}/\text{m}^3$

図 8.3.18 鋼材の腐食面積率（水セメント比の影響）

(8) 初期塩化物イオンの影響

図 8.3.19 に、つくばに暴露した塩化物イオンを混入した供試体の鋼材の腐食面積率を示す。暴露期間は 2.5 年である。この結果によると、ひび割れ幅が大きい供試体では初期塩を混入した供試体で腐食面積率が大きくなる傾向にあった。今回混入した初期塩化物イオン濃度は 0.3kg/m^3 であり、コンクリート中の塩化物イオン濃度としては極めて小さかったが、塩化物イオンを混入していない供試体と比較すると、ひび割れを有する供試体では腐食面積が若干大きくなるようである。



※暴露地点つくば, 暴露期間 2.5 年, 水セメント比 55%

※かぶり 70mm の供試体では腐食は見られなかった

図 8.3.19 鋼材の腐食面積率(初期塩化物イオンの影響)

(9) 屋内に保管した供試体

今回の暴露試験では、つくば、新潟、沖縄の屋外に暴露した供試体と同時に製作し、土木研究所内の実験棟内に保管した供試体もあった。これらの供試体は、実験棟内の気温や湿度の変化の影響は受けるが、塩化物イオンや水は一切供給されない環境下にあった。暴露期間 2.5 年の供試体の解体調査時にこれらの供試体の解体調査も実施したが、鋼材腐食は生じていなかった。塩化物イオンや水が供給されない環境のもとでは、ひび割れを導入した供試体中で鋼材腐食が生じる可能性は低いと考えられる。これらの供試体の一覧を表 8.3.3 に示す。

表 8.3.3 屋内に安置した供試体の一覧

ひび割れ幅	かぶり (mm)	水セメント比 (%)	初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
0.2mm以下	30	55	0
0.3mm前後	70		
0.2mm以下	30	35	
0.2mm以下	70		
0.3mm前後			

(10) 円柱供試体の塩化物イオン浸透

本暴露試験で使用した供試体の製作時に、供試体に用いたものと同じコンクリートを用いて複数の円柱供試体(φ100×200mm)を製作し、これを異なる環境条件に置くことにより、塩化物イオンの浸透状況の違いを確認することとした。なお、いずれの円柱供試体もφ100mmの円形の型枠面を暴露面として、これが上向きになるように設置し、側面をエポキシ樹脂で塗装した。

コンクリートの配合は、暴露試験に用いた供試体と同一であり(表 8.3.2 参照)、水セメント比は 35%と 55%の 2 種類である。環境条件は、土木研究所の実験棟内で塩化ナトリウム水溶液に浸漬したものと新潟と沖縄の暴露場内に暴露したもの 2 種類とした。実験棟内では、温度約 20℃、湿度約 60%に管理された室内において、JSCE-G 572-2007 に準拠して濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬し、試験開始から 1 年後(約 12 ヶ月後)と 2.5 年後(約 28 ヶ月後)にコンクリート中の塩化物イオン濃度の測定を行った。写真 8.3.5 に、新潟と沖縄における円柱供試体の暴露状況を示す。どちらもひび割れを導入した供試体に隣接する場所に、転倒を防ぐためにプラスチック製のケースに入れて設置した。また、これらも試験開始から約 12 ヶ月後と約 28 ヶ月後に回収し、コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定を行った。なお、塩化物イオン濃度の測定は、円柱供試体をコンクリート表面からの距離が 0～10、10～20、20～30、30～40、40～50、60～70、80～90、100～110mm の区間となるようにスライスし、JIS A 1154 に準拠して電位差滴定法により行った。



(a) 新潟



(b) 沖縄

写真 8.3.5 円柱供試体の暴露状況

図 8.3.20 に、円柱供試体の塩化物イオン濃度の測定結果を示す。

まず、浸漬した円柱供試体に着目すると、コンクリート表面から 10～50mm の範囲においては、水セメント比 35%の供試体に比べて 55%の供試体で、塩化物イオン濃度が大きくなっているが、試験期間を長くしても大幅な増加は確認できなかった。浸漬試験では、コンクリートの水セメント比の違いが試験結果に及ぼす影響が大と考えられることができる。

一方、新潟と沖縄に暴露した円柱供試体においては、コンクリート表面から 10mm までの塩化物イオン濃度は、暴露期間 2.5 年の水セメント比 55%のもので大きくなっているが、これ以外の点で明確な傾向を確認することはできない。また、供試体間の固体差の影響も

あると考えられるが、コンクリート表面から 10~30mm の範囲では、僅かではあるが水セメント比 35%の供試体の方が 55%の供試体よりも塩化物イオン濃度が大きくなることもあった。新潟と沖縄には、引き続き、複数の円柱供試体を暴露しているため、今後も試験を継続し、検討を行っていく必要がある。

図 8.3.8 及び 8.3.10 では、新潟の供試体では塩化物イオンの浸透量が小さくなる結果が得られたが、円柱供試体ではコンクリート表面にはある程度の塩化物イオンが浸透している。この違いは、暴露供試体はひび割れ面を下向きにして設置していたのに対し、円柱供試体は暴露面を上向きにして設置していたため、試験面の向きの影響によるものと考えられる。また、図 8.3.20 で新潟と沖縄の結果を比較すると、ここでも沖縄の方がコンクリート中の塩化物イオン濃度が大きくなっているため、沖縄の方が新潟よりも厳しい塩害環境下にあったものと考えられる。

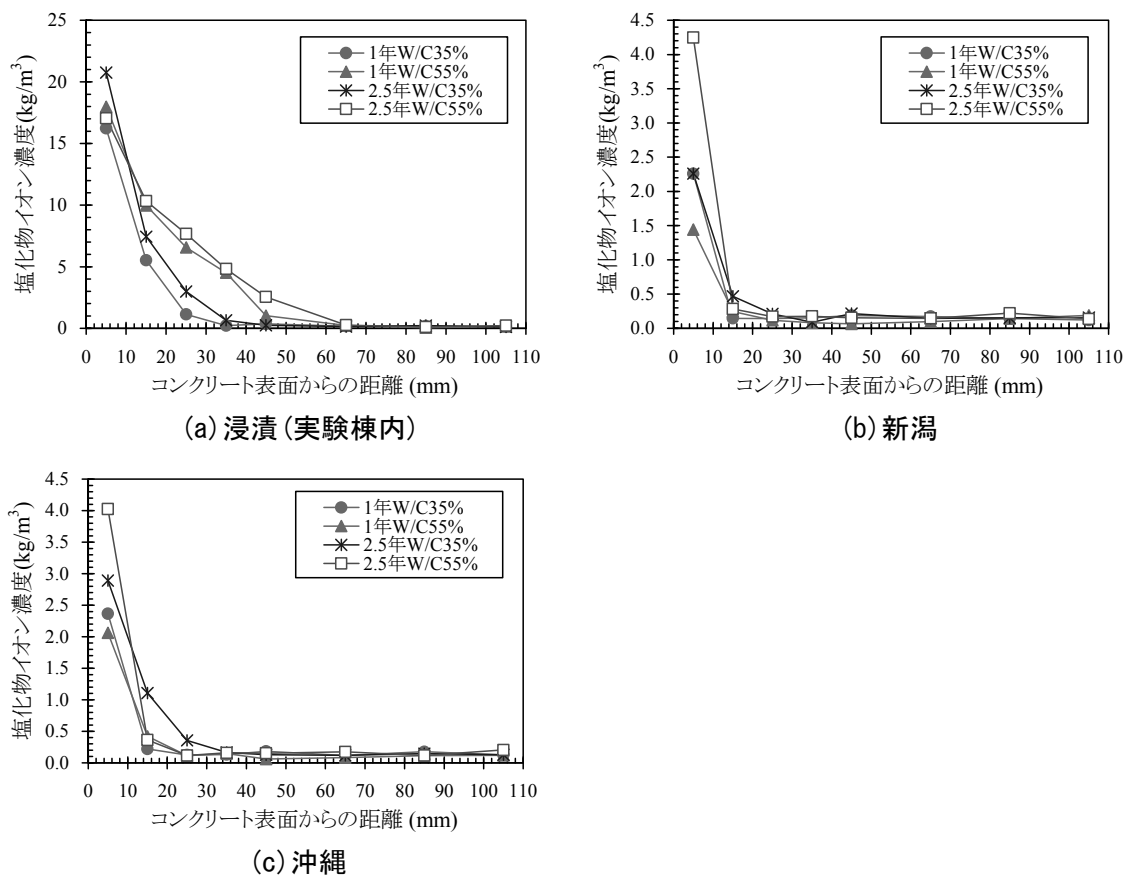


図 8.3.20 円柱供試体の塩化物イオン濃度

8.3.4 暴露試験結果のまとめ

本暴露試験のこれまでの結果を、塩化物イオンの浸透、中性化、鋼材の腐食速度の3つの観点から整理すると表8.3.4のようになる。

まず、塩化物イオンの浸透については、ひび割れを有する供試体ではひび割れに沿った塩化物イオンの浸透が確認されたが、ひび割れ幅の大小とひび割れ部や鋼材位置の塩化物イオンの大小の間に明確な関係はなかった。また、厳しい塩害環境下にあると思われる沖縄では、塩化物イオンの浸透程度が新潟よりも大幅に大きくなった。このため、塩化物イオンの浸透に関しては、ひび割れの有無と暴露環境は「影響大」であるが、ひび割れ幅の影響は「不明確」と考えられる。

中性化については、ひび割れの有無や暴露環境にかかわらず、中性化深さはコンクリート表面付近に限られていたので、ひび割れの影響は顕著ではなかった。このため、「影響小」とした。

鋼材の腐食については、腐食位置がひび割れ位置と一致し、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で腐食面積が大きくなり、暴露期間2.5年の結果では微量ながら断面欠損を伴う腐食も生じていた。また、沖縄の供試体の腐食面積は、新潟やつくばよりも大きくなる傾向にあった。このため、鋼材の腐食速度に関しては、いずれも「影響大」とした。

ただし、表8.3.4は暴露期間2.5年までの結果をもとに整理したものであるため、今後も暴露試験ならびに解体調査を継続し、得られた成果を反映していくことが必要である。

表 8.3.4 暴露試験結果のまとめ(暴露期間2.5年)

項目	各項目に及ぼす影響の程度			
	ひび割れの有無	ひび割れ幅	暴露環境	かぶり
塩化物イオンの浸透	影響大	不明確	影響大	—※
中性化	影響小	影響小	影響小	—※
鋼材の腐食速度	影響大	影響大	影響大	影響大

※：かぶりの大小は塩化物イオンや中性化による鋼材の腐食リスクに影響を及ぼすが、塩化物イオンの浸透や中性化の速度とは無関係である。

8.4 鋼材腐食を防ぐための照査に関する提案

現行の道路橋示方書には、コンクリート中の鋼材の腐食を抑制しコンクリート部材の耐久性を確保するための規定として、最小かぶりに関する規定と鋼材の許容引張応力度に関する規定がある。

このうち、最小かぶりについては、コンクリートの品質や塩害の影響の度合いなどを考慮した上で、例えば、拡散によって鉄筋近傍まで移動する塩化物イオンの量が一定以下となるように数値が定められている。一方、鋼材の許容引張応力度に関する規定は、コンクリートのひび割れ幅を間接的に制限することを目的とした規定であるが、想定する環境条件や部材の条件が必ずしも明確ではなく、異形棒鋼と丸鋼の違いを除けば同じ許容応力度が用いられている。

今回の暴露試験結果から、ひび割れ幅が同程度の場合でも、コンクリートのかぶりが大きいと、腐食開始後の腐食の進展が抑制できることがわかった。図 8.4.1 に供試体表面のひび割れ幅とかぶり、腐食面積率の関係を整理した。暴露期間や暴露環境が異なる供試体があるが、かぶりが 20mm または 30mm の供試体では、ひび割れ幅が大きいものほど腐食面積率が大きくなる傾向があった。また、ひび割れ幅が 0.2mm 以下の場合、腐食面積率が概ね 2%以下に抑制されていた。これよりかぶりが大きい場合、同程度の腐食面積率となるひび割れ幅は、かぶりが 50mm の場合は 0.3mm 以下、かぶりが 70mm の場合は 0.4mm 以下であった。

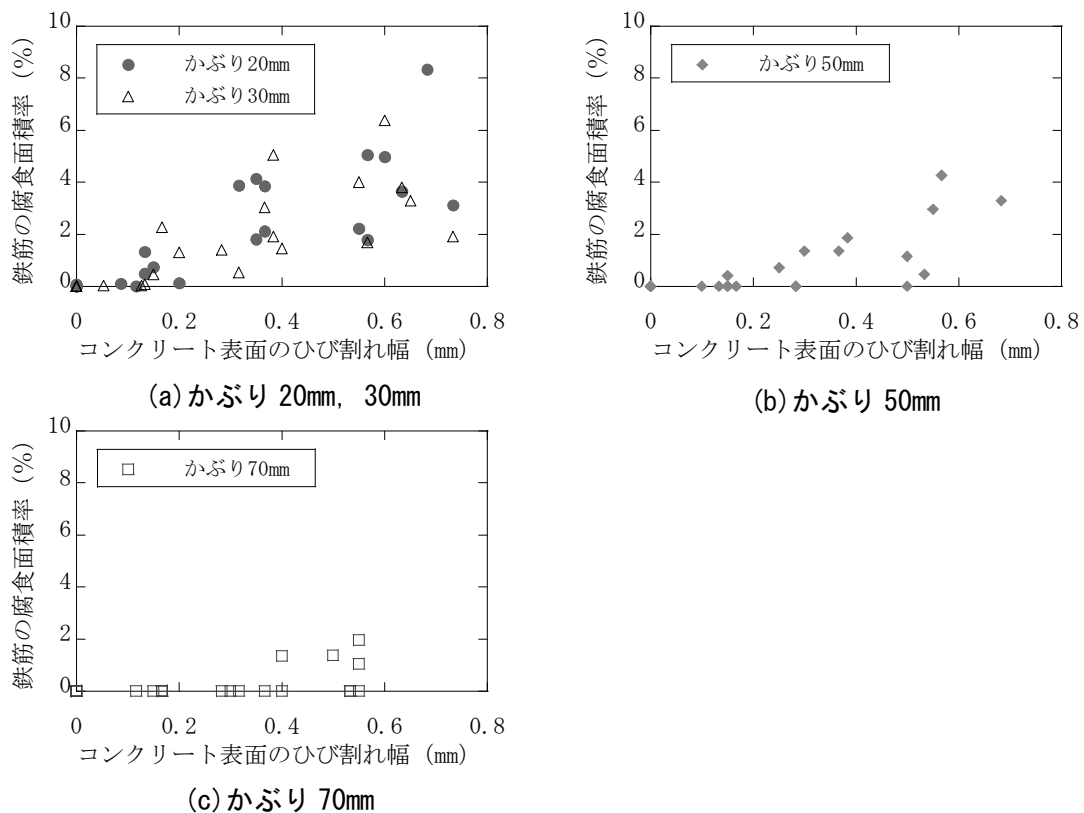


図 8.4.1 供試体表面のひび割れ幅、かぶりと鉄筋の腐食面積率の関係

そこで、かぶりが多い部材については、活荷重及び衝撃以外の主荷重を考慮する場合の鋼材の引張応力度の制限値を緩和できる可能性があると考えられる。前述の暴露試験の結果から、その概略値を提案すると表 8.4.1 の通りである。

表 8.4.1 腐食に対する耐久性を確保するための鋼材の引張応力度制限値（案）

荷重・部材の条件		鋼材の種類	
		丸鋼	異形棒鋼
活荷重及び 衝撃以外の 主荷重*1)	かぶり 50mm 未満	80N/mm ²	100N/mm ²
	かぶり 50mm 以上、 70mm 未満	120N/mm ²	150N/mm ²
	かぶり 70mm 以上	140N/mm ²	180N/mm ²
荷重の組合 せに衝突荷 重又は地震 の影響を考 慮しない場 合*2)	一般の部材	140N/mm ²	180N/mm ²
	床版及び支 間長 10m 以 下の床版橋	140N/mm ²	140N/mm ²

*1) 現行の許容応力度(表中でかぶり 50mm 未満の場合と同じ)が、コンクリート表面のひび割れ幅が 0.2mm 以下となるように設定されたものであることをふまえて、かぶりが多い場合の値を提案した。

*2) 発生する確率が低い荷重組合せについては、より大きな引張応力度を許容することも考えられる。

8.5 ひび割れ幅が鋼材腐食に与える影響に関する検討のまとめ

ひび割れが耐久性に与える影響について検討した結果、海からの飛来塩分の影響を受ける環境では、ひび割れ幅の大小にかかわらず比較的早期に塩化物イオンが侵入し腐食が生じるおそれがあることが確認された。一方、ひび割れ幅を間接的に制限することを目的として鋼材の引張応力度を制限すること及びかぶりコンクリート部の厚さを確保することは、腐食速度を抑制し顕著な腐食を防止する点で効果があるとみられることもわかった。

これらの結果から、鋼材の腐食を抑制する目的で設ける引張応力度の制限値について、コンクリートのかぶりに応じて異なる値を用いる案を提案した。

ただし、これまでの暴露試験結果では、腐食量を定量的に評価できるほどの腐食は生じていないので、今後も継続して調査を行い、ひび割れが腐食に与える影響を検証していくことが必要である。

【8章 参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 -2003-、2003
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説、pp. 223-233、2006
- 3) 今本啓一：ひび割れ幅の許容値、コンクリート工学、Vol. 43、No. 5、pp. 67-74、2005
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IIIコンクリート橋編、2002
- 5) (社)土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]、2007
- 6) British Standard Institution：Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings、BS EN1992-1-1:2004、2004
- 7) British Standard Institution：Concrete - Part 1: Specification、performance、production and conformity、BS EN 206-1:2000、2000
- 8) American Concrete Institute：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)、2005
- 9) American Concrete Institute：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)、1995
- 10) American Association of State Highway and Transportation Officials：AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units Third Edition 2004、2004
- 11) American Association of State Highway and Transportation Officials：AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units Second Edition 1998、1998
- 12) 塚原絵万、加藤佳孝、魚本健人：塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24、No. 1、pp. 573-578、2002
- 13) A. Machida and Pa Pa Win：Modeling of chloride distribution in cracked reinforced concrete、Proceedings of ConMat' 05 and Mindess Symposium、p. 249、2005
- 14) 田中良樹、河野広隆、渡辺博志：実構造物のコンクリートのひび割れ部における塩分浸透、土木学会論文集 E、Vol. 62、No. 1、pp. 38-51、2006
- 15) 田中良樹、河野広隆、渡辺博志：コンクリートひび割れ部における塩分浸透、土木研究所資料第 3950 号、2004
- 16) 稲熊弘、伊藤裕一、関雅樹、稲熊唯史：コンクリートのひび割れ箇所の中酸化進行度に関する一考察、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 60、No. 5、pp. 123-124、2005
- 17) 橋本真幸、大竹淳一郎、早野博幸、榎木隆：ひび割れが中酸化の進行及び鋼材腐食に及ぼす影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 60、No. 5、pp. 427-428、2005
- 18) 植木博、佐々木一哉、井野勝彦、山内博司：一定ひびわれ幅を有する鉄筋コンクリート暴露供試体中の鉄筋の腐食、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 49、No. 5、pp. 536-537、1994

- 19) 鳥取誠一、土田伸治、宮川豊章： ひび割れと鉄筋腐食に関する暴露試験に基づいたコンクリート構造物の劣化予測、コンクリート工学論文集、Vol. 10、No. 3、pp. 1-15、1999
- 20) 大野義照、鈴木計夫、田村博： コンクリートのかぶり厚さとひび割れの鉄筋腐食への影響、セメント・コンクリート論文集、No. 62、pp. 642-647、1992
- 21) 宮里心一、大即信明、木村勇人、水流徹： モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度、土木学会論文集、NO. 690、V-53、pp. 83-93、2001
- 22) 小寺満、土田伸治、宮川豊章、鳥取誠一： 鉄筋コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食に関する長期暴露試験－塩沢雪試験場における暴露実験－、コンクリート工学、Vol. 35、No. 2、pp. 9-17、1997
- 23) 西田勝美、杉木六郎、富山勝三： 鉄筋コンクリートのひびわれと鉄筋のさび－塩沢における 20 年放置実験の結果－、コンクリート工学、Vol. 14、No. 5、pp. 36-40、1976
- 24) 神山一： コンクリート中の鉄筋のさび、セメント・コンクリート、No. 308、Vol. 10、pp. 50-57、1972
- 25) 関博、丸山浩： 長期間海水浸漬した鉄筋コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食、港湾技術研究所報告、第 12 巻、第 3 号、pp. 203-225、1973
- 26) 西山啓伸、秋元泰輔、富沢修次： ひびわれによる鉄筋の腐蝕に関する実験(その 2)、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol. 13、No. 5、pp. 258-259、1975
- 27) 秋元泰輔、小坂寛巳、山内博司： ひびわれの生じている鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する研究、コンクリート工学、Vol. 27、No. 2、pp. 31-39、1989
- 28) 森芳徳、西島高秀、片脇清、小林茂敏、古賀康之： 海上に暴露した供試体中の鉄筋の腐食、日本コンクリート工学協会、コンクリート構造物のひび割れに関するシンポジウム発表報文集、Vol. 10、No. 3、pp. 1-16、1999
- 29) 谷内田昌熙、石橋忠良、佐藤勉： 鉄筋コンクリート橋梁のひびわれと鉄筋腐食に関する調査・研究、土木学会論文集、Vol. 378/V-6、1987
- 30) Bailey Tremper : The Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete、ACI Journal、Vol. 43、No. 10、pp. 1137-1144、1947
- 31) A. W. Beeby : Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete and its relation to Cracking、The Structural Engineer、Vol. 56A、No. 3、pp. 77-81、1978
- 32) A. W. Beeby : Cracking、 Cover and Corrosion of Reinforcement、Concrete International、Vol. 5、No. 2、pp. 35-40、1983
- 33) 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>