

報告 撤去部材を用いた中性化と水の浸透による鋼材腐食の実態調査

加藤 祐哉^{*1}・櫻庭 浩樹^{*1}・古賀 裕久^{*2}

要旨：コンクリートの中性化が進行しても鋼材腐食に必要な水と酸素の供給が乏しいと、腐食が進行しにくいことから、中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食深さを用いた鉄筋腐食の照査方法が提案されている。しかし、中性化と水の浸透の観点から実構造物の鉄筋の腐食実態との適合性を検証した事例は少ない。そこで、中性化が進み、雨掛かりのある面とない面を有する撤去部材で水分浸透速度係数を求め、鉄筋腐食との関係を調査した。その結果、鉄筋に軽微な表面腐食があり、コアで測定した水分浸透深さはばらつきが大きいが、求めた鋼材腐食深さは限界値より小さく、軽微な表面腐食と整合していた。

キーワード：撤去部材、中性化、水分浸透深さ、水分浸透速度係数、鋼材腐食深さ

1. はじめに

中性化はコンクリート中の鋼材腐食の要因の1つであり、土木学会のコンクリート標準示方書[設計編]では、2012年制定版までは「中性化深さ」が設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないことが求められてきた。しかし、コンクリートの中性化が進んでいても鋼材腐食に必要な水と酸素の供給が乏しい場合には、鋼材腐食が見られなかった、または腐食速度が相当遅かった事例が報告されていたため、2017年制定版からは水の浸透を考慮し、設計耐用期間中の「中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食深さ」（以下、「鋼材腐食深さ」という）が限界値以下であることが求められるようになった^{2),3)}。なお、様々な理由で「鋼材腐食深さ」の算定が困難な場合を想定し、従来の「中性化深さ」を用いた照査も引き続き適用可能となっている^{2),3)}。

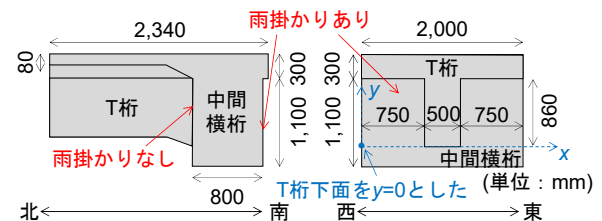
「鋼材腐食深さ」による照査方法は、水が鉄筋に繰り返し到達することで鋼材の腐食反応が少しずつ進むこと、コンクリートへの水分浸透が時間の平方根に比例して進行すること、などの仮定に基づいている^{2),4)}。しかし、実構造物の腐食実態との適合性を検証した事例^{5),6)}はあまり多くない。

今後、中性化が進行しやすい、あるいは、あらかじめ中性化させた低炭素型コンクリートが普及していくことが予想されるため、水分の供給状況と鋼材腐食の関係を検証しておくことは重要である。そこで、中性化が進行している可能性のある撤去部材を用いて、中性化や水の浸透状況と実際の鋼材の腐食状況との関係を把握するために調査を行った。

2. 調査対象及び調査方法

2.1 調査対象部材の概要

図-1に示す鉄筋コンクリート部材を用いて、一般的



(a) 側面図 (西面) (b) 断面図 (南面)

図-1 調査した部材

表-1 調査した部材 (中間横桁) の雨掛かりの履歴

年	雨掛かりの有無	
	南面	北面
1958年～2011年(53年間)	なし	なし
2012年～2024年(12年間)	あり	なし

な環境における鋼材腐食状況を中性化と水の浸透の観点で調査を行った。この部材は、東京都内に1958年に竣工した鉄筋コンクリートT桁橋(交差道路に架かる道路橋で川霧等の影響を受けない)の端部から3番目の桁の一部を切り取ったもので、2011年に撤去後、2012年から土木研究所(茨城県つくば市)に屋外保管されていたものである。保管場所は塩害や凍害が生じにくい場所と考えられ、外観から凍害やASRは生じていないと見られた。

表-1に示すとおり、供用中(53年間)は雨水の影響を受けない位置であった。ただし、上部の路面には凍結防止剤が散布された可能性がある。撤去から今回の調査までの12年間は、図-1に示す中間横桁の南面は雨掛かりのある状態、北面は東西面を除き雨掛かりがないと考えられる状態であり、この中間横桁を調査対象とした。

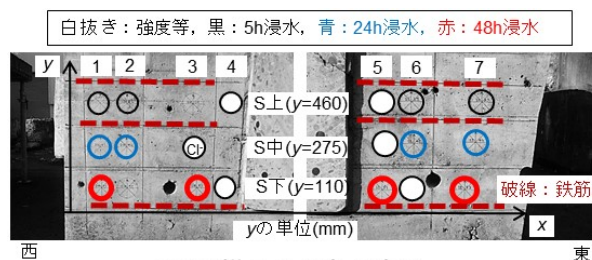
2.2 調査内容と方法

(1) コアと鉄筋の採取位置

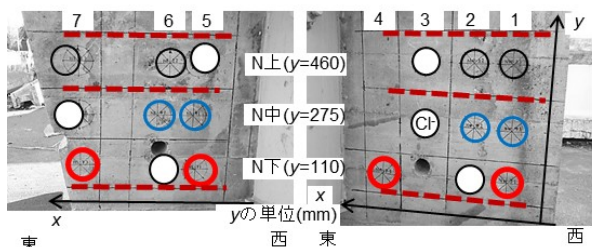
横桁のコンクリートの強度、静弾性係数、塩化物イオ

^{*1} (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

^{*2} (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 博士(工学) (正会員)



(a) 雨掛かりのある南面



(b) 雨掛かりのない北面

写真－1 コア採取位置



(a) 西面

(b) 東面

写真－2 採取鉄筋の位置

ン量（以下、Cl-量）、中性化深さ、水分浸透速度係数を確認するために、ひび割れや部材撤去に用いられた孔、鉄筋等をできるだけ避けて写真－1 に示す位置から直径 75mm×長さ約 150mm のコアを採取した。

コアは、雨掛かりのある南面（S）から 18 本、雨掛かりのない北面（N）から 18 本の計 36 本を採取した。コアの名称は上から上、中、下、西から写真－1 に示すように列ごとに 1～7 と名付けた（例：S 上 1）。また、T 桁下面を通る水平線を x 軸（y=0）、鉛直方向を y 軸とすると、上、中、下のコア中心の T 桁下面からの高さはそれぞれ y=460mm、275mm、110mm だった。

また、鉄筋の腐食状況を観察するために、写真－1 の破線および写真－2 に示す位置の直径 29mm の鉄筋（丸鋼）をできるだけ上下のコア採取位置の範囲に入るように長さ約 500mm にわたり採取した。写真－2 中の数値はかぶりを示している。なお、鉄筋端部は外部に露出しているため、外部側端部の 10mm を除外して採取した。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

調査部材のコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を確認するために、写真－1 の白抜きの丸で示す位置から採取した 12 本のコアを直径 75mm×長さ 150mm に

加工し、JIS A 1149 に準拠して試験した。

(3) Cl-量

路面に凍結防止剤が散布された可能性があるため、横桁に含まれる Cl-量を確認した。試料は(2)の試験後のコアの中から、雨掛かりのある S 中 3、雨掛かりのない N 中 3 の 2 本（写真－1 の白抜きの丸に Cl-と記載）を選定し、コア表面から深さ方向に 10mm ピッチで深さ 50mm まで切断し、それぞれを粉砕して作製した。試験は、JIS A 1154 の塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法に準拠して試験した。

(4) 中性化深さ

中性化深さの測定に用いる試料は、(2)の試験後のコアと、(5)で後述する水分浸透速度係数の試験に用いるコアを用いた。コア採取前における水平面（以下、水平面という）で前者は切断、後者は割裂を行った。切断または割裂面に、JIS A 1152 に準拠してフェノールフタレイン溶液を噴霧し、コア 1 本あたり 6 点で中性化深さを測定して平均値を求めた。

(5) 水分浸透速度係数

コア採取位置によりコンクリート品質が変化しないことを前提に、ひび割れのない写真－1 の黒丸（上段）、青丸（中段）、赤丸（下段）で示す位置から採取した 24 本のコアを用いて JSCE G-582 に従って鋼材腐食深さの算出に必要な水分浸透速度係数を求めた。なお、採取コアの見掛けの密度は 2.23～2.32g/cm³ の範囲で著しく変わらず、施工等に起因する顕著な空隙等は認められないことから、採取位置による品質の違いは大きくないと想定した。また、JSCE G-582 は試験室で作製した円柱供試体を用いる方法で、型枠面の離型剤の影響除去のため、底面側を 25mm 切断・除去した面から水を浸透させる。今回は部材表面からの水の浸透による水分浸透速度係数を確認するために、部材の表面側であった面を除去せずそのまま用いた。

コアの乾燥は 20±2℃、60±5%RH で 91 日間行い、上、中、下から採取したコアをそれぞれ 5、24、48 時間、水に浸漬し、浸漬直後に水平面で割裂し、水分現像剤を噴霧してコア 1 本あたり 6 点で水分浸透深さを測定した。

(6) 鉄筋の腐食状況

採取した鉄筋の腐食状況は、表面側と内側に分けて目視観察を行うと共に、端部断面を除いた表面積に対する腐食面積の割合を腐食面積率として算出して確認した。

3. 調査結果

3.1 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度を図－2 に、静弾性係数を図－3 に示す。ここで、コア S 下 6 の端部には鉄筋（縦筋）が含まれていたため、赤で示した。圧縮強度は 32～46N/mm²、静弾性係

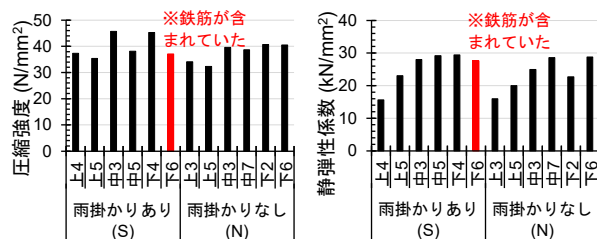


図-2 圧縮強度

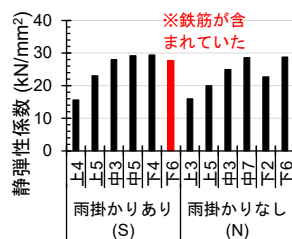


図-3 静弾性係数

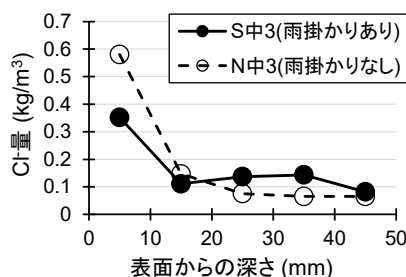


図-4 表面から10mm ごとのCl⁻量

数は16～29kN/mm²であり、著しく低い値はないことから、コンクリートの脆弱化等は生じていないと考えられる。圧縮強度は雨掛かりあり／なし等の位置による差は認められなかった。静弾性係数は雨掛かりあり／なし共に、上段のコアが比較的值が小さく、中・下段が比較的值が大きい傾向を示した。

3.2 Cl⁻量

2本のコアの、表面から10mm ごとのコンクリートに含まれるCl⁻量を図-4に示す。最もかぶりの小さい鉄筋はかぶりが25mm だが、その位置のCl⁻量は値の大きいコアで0.15kg/m³であった。Cl⁻による鋼材腐食はほぼ生じない状態と考えられる。

3.3 中性化深さ

雨掛かりのある南面の南西側と南東側、雨掛かりのない北面の北西側と北東側の各面は鉄筋のかぶりが異なるため、各面ごとに中性化深さと鉄筋の位置を図-5に示す。鉄筋は黒塗りの四角で位置を図示した。中性化深さは1つの面あたり上段、中段、下段から採取した各3本のコアの平均値を示し、各測定点の値の範囲も示した。なお、北東側のN上5のコアにはひび割れがあり、ひび割れ部近傍の測定点では中性化深さが87.0mmと突出していたため、この値を除外して平均値を求めた。ひび割れ部近傍の値は図中に点線で示した。

雨掛かりのある南面について、南西側は鉄筋かぶり50～60mm に対して中性化深さは4.0～21.8mm で推定中性化残り（以下、中性化残り）が30mm を超えており、鋼材腐食発生限界深さ（かぶり-10mm）まで中性化は進行していないと考えられる。南東側は鉄筋かぶり45～50mm に対して中性化深さは17.3～30.3mm で中性化残

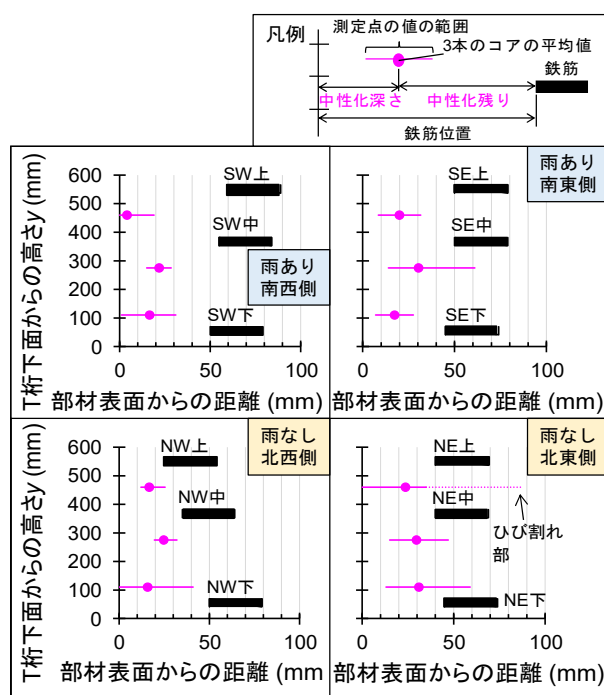


図-5 コアで測定した中性化深さと鉄筋位置

表-2 鉄筋の推定中性化残り

中性化残り(mm)	雨掛かりあり	雨掛かりなし
10		NW 上・中 NE 中
15～30※	SW 下 SE 上・中・下	NE 上・下
30 超	SW 上・中	NW 下

※今回は中性化残りが10～15mm のものはなかった。

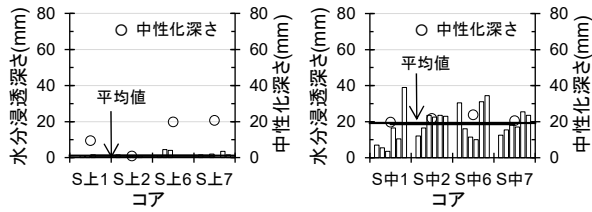
りが25～30mm 程度であり、鋼材腐食発生限界深さまで中性化は進行していない可能性が高いと考えられる。ただし、鉄筋 SE 中の下方のコアに、鉄筋かぶりを超える61.0mm まで中性化していた測定点があった。

雨掛かりのない北面について、北西側は鉄筋のかぶり25～50mm に対して中性化深さは15.8～24.7mm であり、中性化残りが10mm 程度の鉄筋 NW 上や NW 中は鋼材腐食発生限界深さまで中性化が進行している可能性が高いと考えられる。北東側は鉄筋かぶり40～45mm に対して中性化深さは23.7～31.0mm であり、中性化残りが10mm 程度の鉄筋 NE 中は鋼材腐食発生限界深さまで中性化が進行している可能性が高いと考えられる。

各鉄筋の中性化残りを雨掛かりあり／なしで整理すると表-2 のとおりとなる。雨掛かりのある南面では中性化残りが15mm 以上あり、30mm を超える鉄筋も2本あった。一方、雨掛かりのない北面では鉄筋 NW 上、NW 中、NE 中の3本が中性化残り10mm 程度と小さかった。

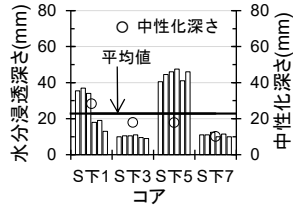
3.4 水分浸透速度係数

雨掛かりのある南面から採取したコアで測定した水分浸透深さを中性化深さと共に図-6に示す。水分浸透深さは、浸漬時間5hでは0～4.5mm、浸漬時間24hでは



(a) 浸漬時間5hの値

(b) 浸漬時間24hの値



(c) 浸漬時間48hの値

図-6 コアで測定した水分浸透深さと中性化深さ
(雨掛かりのある南面)

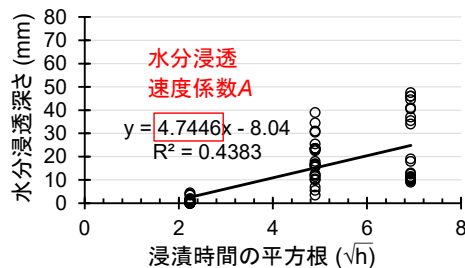
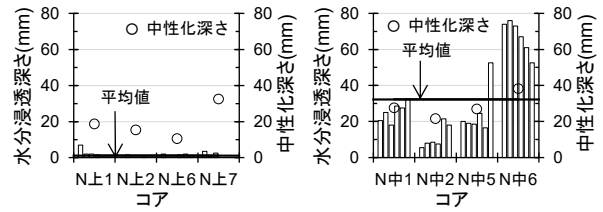
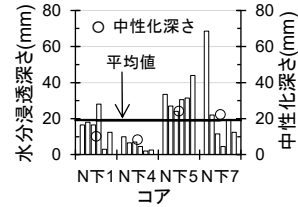


図-7 雨掛かりのある南面の水分浸透速度係数



(a) 浸漬時間5hの値

(b) 浸漬時間24hの値



(c) 浸漬時間48hの値

図-8 コアで測定した水分浸透深さと中性化深さ
(雨掛かりのない北面)

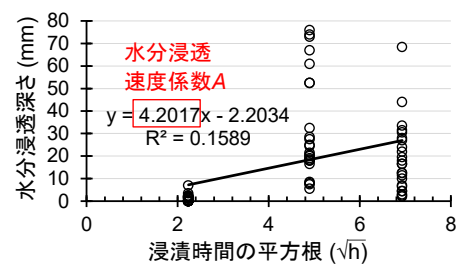


図-9 雨掛かりのない北面の水分浸透速度係数

3.5～39.0mm, 浸漬時間 48h では 9.0～47.5mm で, コア内の測定点の値のばらつきが小さいものと大きいものがあった。浸漬時間 48h では, コア内の測定点の値のばらつきが小さいものが多かったが, コアによる値のばらつきが大きかった。また, S 下 5 のコアを除き, 中性化深さが大きいほど水分浸透深さが大きい傾向があった。

これらの値を横軸が浸漬時間の平方根, 縦軸が水分浸透深さのグラフにプロットすると図-7 となった。また, 式(1)により水分浸透速度係数 A を求めると $4.7\text{mm}/\sqrt{\text{h}}$ となった。これは図-7 の近似直線の傾きに相当するが, R^2 の値は小さく, データのばらつきは大きかった。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \bar{\sqrt{t}}) (L_i - \bar{L})}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \bar{\sqrt{t}})^2} \quad (1)$$

ここに, A : 水分浸透速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{h}}$)

n : データ数

$\sqrt{t_i}$: i 番目のデータの浸漬時間の平方根 ($\sqrt{\text{h}}$)

$\bar{\sqrt{t}}$: 浸漬時間の平方根の平均値 ($\sqrt{\text{h}}$)

L_i : i 番目のデータの水分浸透深さ (mm)

$\bar{L}$: 水分浸透深さの平均値 (mm)

雨掛かりのない北面から採取したコアで測定した水分浸透深さを中性化深さと共に図-8 に示す。水分浸透

深さは, 浸漬時間 5h では 0～7.0mm, 浸漬時間 24h では 5.5～76.0mm, 浸漬時間 48h では 2.0～68.5mm で, 南面と同様, ばらつきが大きく, 中性化深さが大きいほど水分浸透深さが大きい傾向があった。既往研究では, 中性化すると空隙量と透水係数が低下し, 中性化による緻密化が示唆されている⁹⁾が, 今回の試験の同一の浸漬時間において中性化深さと水分浸透深さを比較した結果, そのような傾向は明確ではなかった。コアの断面を観察しても粗骨材の量や偏りに明確な差はないことから, 中性化及び水分浸透深さが大きいコアの位置は, 当初から他の位置と比較すると緻密ではなかった可能性がある。

これらの値を横軸が浸漬時間の平方根, 縦軸が水分浸透深さのグラフにプロットすると図-9 となった。また, 式(1)により水分浸透速度係数 A を求めると $4.2\text{mm}/\sqrt{\text{h}}$ となり, 雨掛かりのある南面とあまり変わらなかった。図-9 の近似直線の傾きに相当するが, R^2 の値は図-7 よりも小さく, データのばらつきは北面の方が大きかった。

JSCE-G 582 は, 水の浸漬時間 5h, 24h, 48h それぞれに対して, 試験室で打込みによって作製した 3 本以上の円柱供試体を要する試験であるが, 今回は撤去部材から採取したコアを用いた。水分浸透速度係数に用いたコアは目視可能なひび割れ等の変状がなく, T 桁下面からの

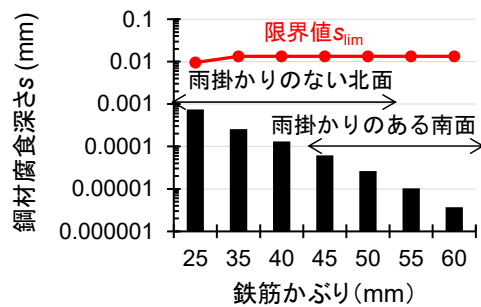


図-10 鋼材腐食深さ（12年間）および限界値と鉄筋かぶりの関係

高さ y が同一のコアで水の浸漬時間を統一させたが、ばらつきが大きかった。ほとんどのコアで中性化深さとの関係があったことから、試験室と異なり位置によりコンクリートの緻密さの差が生じやすく、それが影響したものと推測される。また、近似直線の切片（浸漬時間 0 における水分浸透深さに相当）がいずれも負の値となったことは、吸水の原理を考えると不自然であることなどから、本試験の実構造物への適用は必ずしも容易ではないと考えられる。

試験により得られた雨掛かりを受けた南面の水分浸透速度係数 ($4.7\text{mm}/\sqrt{h}$) を用いて、式(2)⁷⁾より雨掛かりを受けた 12 年間の鋼材腐食深さ s を求め、式(3)および式(4)⁷⁾より算定される鋼材腐食深さの限界値 s_{lim} と比較して図-10 に示す。ここで、コンクリートの材料係数 γ_c は 1.3 とした⁷⁾。なお、雨掛かりのない北面 ($t=0$) では $s=0$ になるが、参考として北面の鉄筋かぶりに対応した値も図示した。

$$s = 1.9 \times 10^{-4} \exp \left\{ \frac{-0.068c^2}{(\gamma_c A)^2} \right\} \quad (2)$$

ここに、 s : 鋼材腐食深さ (mm)

t : 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する年数 (=12 年)

c : 鉄筋かぶり (mm)

γ_c : コンクリートの材料係数 (=1.3)

A : 水分浸透速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{h}$)

$$s_{\text{lim}} = 3.81 \times 10^{-4} c \quad (c \leq 35\text{mm}) \quad (3)$$

$$s_{\text{lim}} = 1.33 \times 10^{-2} \quad (c > 35\text{mm}) \quad (4)$$

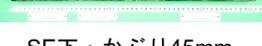
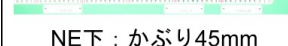
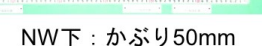
ここに、 s_{lim} : 鋼材腐食深さの限界値 (mm)

12 年間の鋼材腐食深さ s は限界値 s_{lim} と比較して非常に小さく、鉄筋かぶりが小さいほど s と s_{lim} との差は縮小小さくなるが、今回調査した中間横桁の最もかぶりの小さい鉄筋 (かぶり 25mm の NW 上) でも限界値の 1/13 程度であり、式(2)からは水の浸透に伴う鋼材腐食深さは非常に小さいと評価される。

3.5 鉄筋の腐食状況

採取した鉄筋の外観写真 (中間横桁表面側) を表-3 に、

表-3 採取した鉄筋の部材表面側の外観

雨掛かりのある南面	
南西側(SW)	南東側(SE)
 (S上1) (S上2) (S上4) SW上 : かぶり60mm 表面側腐食面積率14.2%	 (S上5) (S上6) (S上7) SE上 : かぶり50mm 表面側腐食面積率 49.2%
 (S中1) (S中2) (S中3) SW中 : かぶり55mm 表面腐食面積率15.8%	 (S中5) (S中6) (S中7) SE中 : かぶり50mm 表面側腐食面積率 36.4%
 (S下1) (S下3) SW下 : かぶり50mm 表面側腐食面積率23.2%	 (S下5) (S下6) (S下7) SE下 : かぶり45mm 表面側腐食面積率23.2%
雨掛かりのない北面	
北東側(NE)	北西側(NW)
 (N上7) (N上6) (N上5) NE上 : かぶり40mm 表面側腐食面積率 33.6%	 (N上3) (N上2) (N上1) NW上 : かぶり25mm 表面側腐食面積率8.2%
 (N中7) (N中6) (N中5) NE中 : かぶり40mm 表面側腐食面積率 27.4%	 (N中3) (N中2) (N中1) NW中 : かぶり35mm 表面側腐食面積率18.8%
 (N下7) (N下6) (N下5) NE下 : かぶり45mm 表面側腐食面積率12.5%	 (N下3) (N下2) (N下1) NW下 : かぶり50mm 表面側腐食面積率7.6%

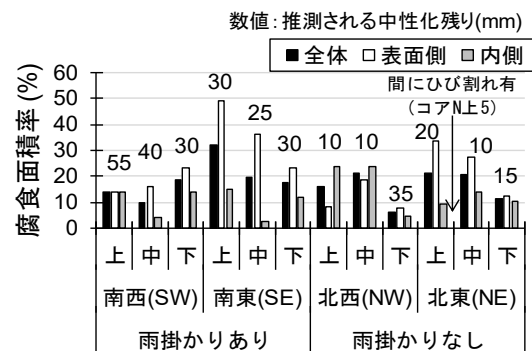


図-11 鉄筋の腐食面積率

鉄筋かぶりと表面側の腐食面積率、近傍のコア位置を付記して示す。また、鉄筋の腐食面積率を図-11 に示す。

図-11 より、全体の腐食面積率は 20% 程度のものが多かった。最も腐食面積率の大きい鉄筋は雨掛かりのある南面の SE 上、最も腐食面積率の小さい鉄筋は雨掛かりのない北面の NW 下であった。また、表面側の腐食面積率が大きく 25% を超えている鉄筋は、雨掛かりのある南面の SE 上、SE 中、雨掛かりのない北面の NE 上、NE 中で、東側が大きい傾向があった。前述の表面側の腐食面積率が 25% を超えている鉄筋は、内側の腐食面積率は表面側の 1/2 未満と小さく、表面側に腐食が集中していた。

鉄筋のかぶりおよび中性化残りを雨掛かりのあり／

表－4 鉄筋の条件と腐食状況

中性化残り (mm)	雨掛かりのある南面					雨掛かりのない北面				
	西側のかぶり (mm)			東側のかぶり (mm)		西側のかぶり (mm)			東側のかぶり (mm)	
	50	55	60	45	50	25	35	50	40	45
10						NW 上	NW 中		NE 中	
15 ～ 30*	SW 下			SE 下	SE 上 SE 中				NE 上	NE 下
30 超		SW 中	SW 上					NW 下		

赤字：表面鉄筋腐食率が20%以上の鉄筋
※今回は中性化残りが10～15mmのものはなかった。

なしで整理すると表－4となる。

雨掛かりがあり、水分供給のある南面では、南東側（鉄筋かぶり 45, 50mm）が比較的腐食面積率が大きく、図－11 および表－4 より中性化残りが15～30mm程度の鉄筋 SE 上, SE 中の腐食面積率が25%以上と特に大きかった。南西側（鉄筋かぶり 50, 55, 60mm）は他の面よりも鉄筋かぶりが比較的大きく、図－11 および表－4 より中性化残りも30mm以上と大きいことから、南東側より腐食面積率が小さかった。

雨掛かりのない北面では、北東側（鉄筋かぶり 40, 45mm）が比較的腐食面積率が大きく、図－11 および表－4 より、中性化残りが10mm程度の鉄筋 NE 中と、近傍にひび割れがあり中性化深さの大きな測定点のあった鉄筋 NE 中, NE 上の腐食面積率が25%以上と特に大きかった。雨掛かりのない北面でも腐食が確認されたため、雨掛かりがある東西面から、または風雨が強かった際に巻き込みによって若干の水の供給があった可能性が考えられる。北西側（鉄筋かぶり 25, 35, 50mm）は、鉄筋かぶりが小さく中性化残りも10mm程度のNW上, NW中はやや腐食面積率が高かった。図－8(b), (c)より北東側（5～7列）の水分浸透深さが大きいことから、北東側は水の浸透の影響が強かったと考えられる。

なお、クエン酸二アンモニウム溶液で鉄筋の付着性生物を除去したところ、全ての鉄筋に生じた腐食はいずれも鉄筋表面に生じた軽微なもので、断面欠損を伴う顕著な腐食ではなかった。図－10に示した計算上の鋼材腐食深さの値も非常に小さく、ごく軽微な腐食であったことと整合している。

4. まとめ

本研究では、中性化が進んだ鉄筋コンクリート構造物について、水の浸透の有無と鋼材腐食の関係を把握する

ため、撤去部材を用いて、12年間の雨水による水の浸透がある面とない面で鉄筋の腐食状況調査等を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) コアで測定した水分浸透深さは、位置による緻密さの差に起因すると考えられるばらつきが大きく、精度よい水分浸透速度係数の算出は比較的難しかった。
- (2) コアより算出した水の浸透に伴う鋼材腐食深さは限界値と比べて非常に小さかった。また、採取した鉄筋はいずれも腐食していたが、断面欠損には至らない軽微な表面腐食であった。
- (3) 雨掛かりがあり、水分供給のある面では、中性化残りが15～30mmの鉄筋は鋼材腐食発生限界深さまで中性化が進行していなくても、軽微な表面腐食が比較的大面積で確認された。中性化残りが30mm以上の鉄筋の腐食面積率は比較的小さかった。
- (4) 雨掛かりのない面では、中性化残りが10mmおよび近傍にひび割れのある、鋼材腐食発生限界深さまで中性化が進行している可能性が高い鉄筋で、かつ水分浸透深さの大きい箇所の腐食面積率は比較的大きかった。雨掛かりのある部材端部から、また風雨が強かった際などに若干の水分供給があり、水の浸透の影響を受けた可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.144-148, 2013.3
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書改訂資料，－設計編・施工編－，コンクリートライブラリー149, pp.53-66, 2018.3
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.148-156, 2018.3
- 4) 土木学会：コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する研究小委員会（362委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズNo.131, p.3, p.94, 2022.11
- 5) 轟俊太郎，石田哲也，上田洋，田所敏弥：水と中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食速度への影響要因分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.509-514, 2019.7
- 6) 後藤悠希，BOUADOU Nda Yacoub，吉田亮，岸利治：中性化した実構造物コンクリートの水分浸透性状と空隙構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46, No.1, pp.613-618, 2024.6
- 7) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.158-164, 2023.3