

論文 内在塩分を有する旧那覇市民会館の損傷調査および塩分を含むコンクリートの水分吸湿・浸透挙動に関する実験

石綿 凜^{*1}・崎原 康平^{*2}・中田 清史^{*3}・清原 千鶴^{*4}

要旨：沖縄県の内在塩分を有する RC 造建築物において、方位別および雨掛かりの有無を考慮した合計 5 か所を調査した。その結果、塩化物による鉄筋腐食が生じないとされている含水率 3.5%以下で、重度の鉄筋腐食が進行していた。湿度環境や濡れセンサーの結果から、かぶりコンクリートの乾湿繰返しが腐食の要因であると結論づけた。また、塩分含有の異なるコンクリートを用いて、等湿環境下での水分吸着および滞留水の浸透性状に関する実験を行った。実験の結果、塩分を含むコンクリートでは、浸透面付近で水分浸透が促進されることが確認された。また、塩分含有による等湿環境下での吸湿挙動には違いが見られなかった。

キーワード：内在塩分、塩化物イオン、鉄筋腐食、含水率、濡れ性評価、相対湿度、雨掛かり

1. はじめに

旧那覇市民会館（写真-1）は、沖縄の本土復帰前である 1970 年に、県内初の本格的舞台を備えた公会堂として竣工した。1972 年 5 月の沖縄の本土復帰式典の際には、返還式典の会場（写真-2）として使用され¹⁾、復帰前後の沖縄において、風土や地域のアイデンティティを象徴する建築物として、沖縄市民に親しまれてきた。

沖縄県では、1960 年代後半から 1970 年代にかけて、経済成長や本土復帰を背景に、建設需要が急激に増大した。このような状況下において、同県では、地理的条件からコンクリート骨材の多くを海砂に依存せざるを得なかったため、十分な除塩処理が施されていない海砂が細骨材として利用された。その結果、この時期に建設された多くの建築物で塩害の被害を受けた事例が報告されている²⁾。1970 年に竣工した当該建築物においても、築 20 年時点での調査にて、海砂の利用によるコンクリート剥落やひび割れが確認されている。2016 年に実施した耐震診断³⁾の結果、震度 6 強以上の大地震時に倒壊の恐れがあることが判明し、同年 10 月に休館、2024 年 11 月に解体開始となった。

これらの背景から、当該建築物の劣化要因の推定を目的とし、旧那覇市民会館を対象に方位別および雨掛かりの有無を考慮した合計 5 か所で調査を行った。また、塩分を含むコンクリートの等湿環境下における吸湿および水分浸透挙動に関する実験を行った。

2. 調査概要

2.1 対象建築物

表-1 に建築物概要を示す。建物は、2 階階高全体が大きな庇によって覆われ、深い軒が「雨端空間」を形成している。建物中央部には、地上から 2 階へ続く階段とプロムナードが設けられている。また、軒下 1 階の外部やラウンジには、「ヒンブン」と呼ばれる石積み壁体が入り込んでいる。

2.2 調査箇所

図-1 に、乾式および湿式コアの採取箇所、挿入式電気抵抗含水率計による含水率測定箇所、湿度および濡れセンサーの設置箇所を示す。調査は、方位別および雨掛かりの有無を考慮した北面、南面、西面、屋内の柱部分および 2 階プロムナード庇で実施した。



写真-1 建築物外観



写真-2 返還式典の様子¹⁾

表-1 建築物概要

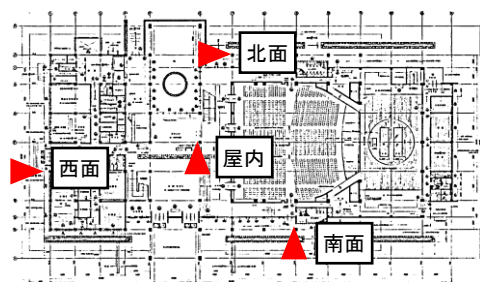
所在地	沖縄県那覇市 寄宮 1 丁目 2 番 1 号
竣工年	1970 年
構造	RC 造地下 1 階～地上 3 階
延床面積	約 7324 m ²
設計者	金城信吉
調査期間	2024.1.15～3.30

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻（学生会員）

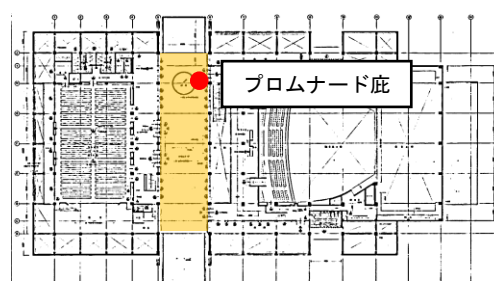
*2 琉球大学 工学部工学科建築学コース 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 建築研究所材料研究グループ 研究員 博士（工学）（正会員）

*4 東京理科大学 研究推進機構総合研究院 プロジェクト研究員 博士（工学）（正会員）



a) 1 階平面図



b) 2 階平面図

図-1 調査箇所

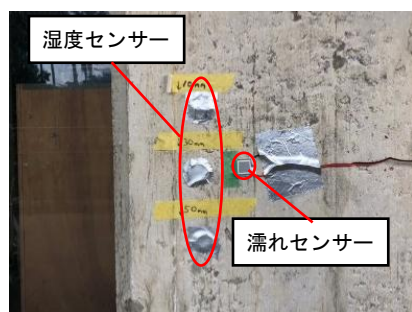


写真-3 湿度および濡れセンサー



a) 底上部の滞留水の様子



b) 底下部のコンクリート剥落の様子

写真-4 2階プロムナード庇箇所

写真-3 に、湿度および濡れセンサーの設置箇所の様子を示す。写真-4 に、2階プロムナード庇における上部の滞留水および下部のコンクリート剥落の様子を示す。

表-2 に、各調査箇所の調査項目および雨掛かりの有無を示す。湿度センサーおよび濡れセンサーによる測定は、プロムナード庇を除く 4 箇所で実施したが、装置の不具合によりデータが採取できた箇所は、湿度センサーが西面および屋内、濡れセンサーが北面および西面であった。

表-3 に、本調査項目および調査方法について示す。各調査箇所で採取したコアは、湿式および乾式穿孔でそれぞれ一本ずつ採取した。また、コア採取後の孔で中性化深さの測定を実施した。塩化物イオン量は、湿式コアを屋外に面したコンクリート表面から 10mm ずつカットし、電位差滴定法により測定した。含水率の測定には、微破壊で迅速に計測可能な挿入式電気抵抗含水率計と、精度の高い乾式コアによる質量法の 2 手法を併用した。質量含水率は、乾式コアをコンクリート表面から 10mm ずつカットし、質量法により測定した。挿入式電気抵抗含水率計による含水率測定は、ドリルでコンクリートに 2 箇所孔をあけ、深さ 10mm ごとに 2 点間の電気抵抗から含水率を測定した。相対湿度はコア採取付近のコンクリート表面から 30mm、50mm の箇所に温湿度センサーを埋設した。濡れ性評価は、コンクリート表面に設置した濡れセンサーの電流値を基に行った。鉄筋腐食の評価は、表-4 に示す鉄筋腐食の評価区分をもとに目視で判定した。

表-2 各箇所の調査項目および雨掛かりの有無

調査箇所	北面	南面	西面	屋内	プロムナード
雨掛かりの有無	有	有	有	無	有
コア採取	○	○	○	○	○
中性化深さ	○	○	○	×※	×
含水率測定	○	○	○	○	×
湿度センサー	×※	○	○	○	×
濡れセンサー	○	×※	○	×	×

※装置の不具合等によりデータが採取できなかった箇所

表-3 調査項目および調査方法

調査項目	調査方法
塩化物イオン	湿式コアを屋外に面したコンクリート表面から 10mm ずつカットし、電位差滴定法により測定
中性化深さ	コア採取後の孔にフェノールフタレイン溶液を噴霧して測定
質量含水率	乾式コアをコンクリート表面から 10mm ずつカットし、質量法を用いて測定
含水率	ドリルでコンクリートに 2 箇所孔をあけ、深さ 10mm ごとに 2 点間の電気抵抗から測定
相対湿度	温湿度センサーをコンクリート表層から指定の深さの場所に埋め込み測定
濡れ性評価	コンクリート表面に設置した濡れセンサーの電流値を基に評価
鉄筋腐食グレード	目視試験 (表-4)

表-4 鉄筋腐食の評価区分⁴⁾

グレード	腐食状況
1	施工時の状態を保ち、以降の腐食が認められない
2	部分的に腐食が認められる、軽微な腐食
3	表面の大部分が腐食している。部分的に断面欠損が生じる
4	鉄筋の全周にわたり、断面欠損がある
5	鉄筋の断面が当初の 2/3~1/2 程度欠損している

3. 調査結果および考察

3.1 塩化物イオン量および中性化深さ

塩化物イオン量および中性化深さの測定結果を図-2に示す。図中の点線は、プロムナード底を除く各調査箇所の中性化深さを示す。また、屋内の中性化深さは正確に測定できなかったため、耐震診断³⁾の結果を参照した。

当該建築物は、海岸から約2.5km離れた場所に位置しているため、海からの飛来塩分の影響は受けにくいと考えられる。コンクリート内部の塩化物イオン量が1~3kg/m³程度であることから、未除塩の海砂が使用されていたと考えられる。北面、南面は、西面、屋内およびプロムナードに比べてコンクリート内部(60mm以深)の塩化物イオン量が高い。なお、北面、南面、西面および屋内はコンクリート表面の塩化物イオン量が低く、内部で高まりが見られる。これは中性化による塩化物イオンの濃縮によるものと考えられる。

3.2 コンクリート内部含水率

図-3に、乾式コア法による質量含水率および挿入式電気抵抗含水率計(HI-800シリーズ)による含水率測定結果を示す。なお、質量含水率はコアの欠落により部分的な測定となった。図中の一点鎖線は、それぞれ対応する部位の鉄筋位置を示している。

挿入式電気抵抗含水率計による含水率測定結果は、乾式コア法による質量含水率と概ね一致しており、挿入式電気抵抗含水率計による測定結果は妥当であると言える。いずれの測定面も表面からの深さ10~50mmにおいて約1~2%と含水率が低く、乾燥傾向であった。一方、表面からの深さ50mm以深においては、約1~4%の範囲で上昇傾向を示した。特に、南面および北面の上昇傾向が顕著であり、南面は表面からの深さ100mmの含水率は4.2%に達した。同様に屋外に面する西面は、屋内と同程度の低い含水率であった。

3.3 鉄筋腐食状況

表-5に、北面、南面、西面および屋内におけるコンクリートかぶり厚さ、鉄筋腐食グレード、鉄筋位置の塩化物イオン量および含水率測定結果を示す。鉄筋位置の塩化物イオン量と含水率の測定結果については、隣接する2点間のデータを線形補間した。

屋内および西面は、それぞれ腐食グレード1、2~3であり、鉄筋腐食は軽度であった。一方、南面および北面は、それぞれ腐食グレード4、5であり、鉄筋腐食は重度であった。

既往研究⁵⁾で示されている内在塩分を有するコンクリートの鉄筋位置近傍における塩化物イオン量と含水率に関する鉄筋腐食評価図に、表-5の調査結果をプロットしたものを図-4に示す。図には、既往の構造物の調査や実環境下で暴露試験を実施した結果から、重度の腐食を

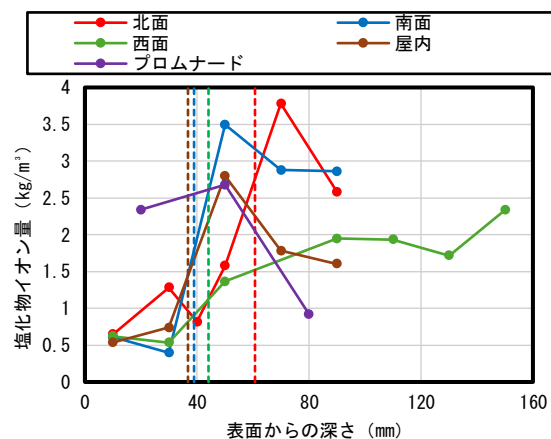


図-2 塩化物イオン量

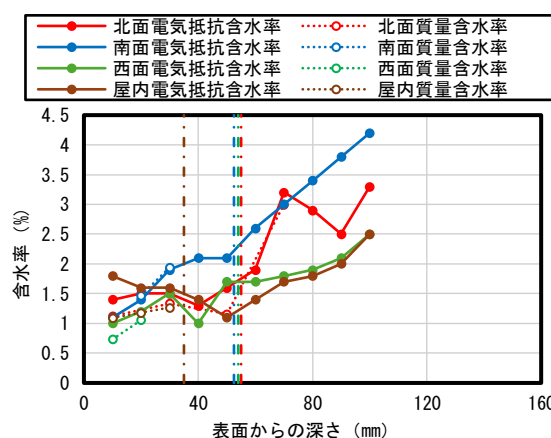


図-3 含水率測定結果

表-5 鉄筋位置の調査結果および鉄筋腐食グレード

調査箇所	かぶり厚さ (mm)	中性化深さ (mm)	塩化物イオン量 (kg/m ³)	含水率 (%)	鉄筋腐食グレード
北面	55.0	60.7	2.13	1.75	5
南面	52.5	39.0	3.43	2.23	4
西面	54.0	44.1	1.42	1.70	2~3
屋内	35.0	36.8	1.23	1.50	1

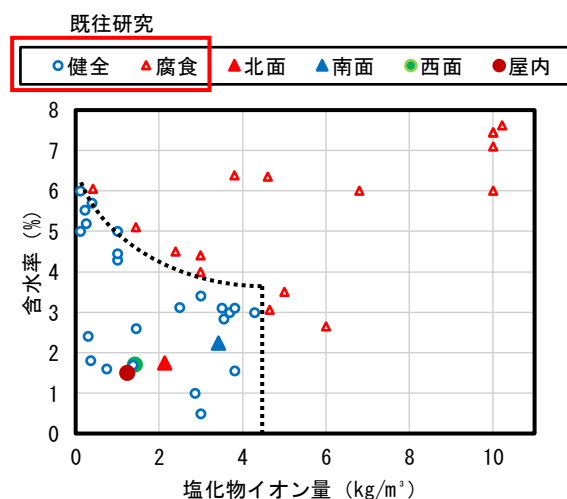


図-4 2軸腐食評価図⁵⁾

進行させないための閾値が点線で示されている。その結果、北面、南面、西面および屋内は、鉄筋腐食が進行しにくいとされている閾値の範囲内に収まった。しかしながら、北面および南面は、重度の鉄筋腐食が発生しており、既往の腐食評価図にもとづく評価と相反する結果となった。この要因に関する考察は、後節で考察する。

3.4 濡れセンサーによる濡れ性評価

図-5に、濡れセンサーで測定した電流値と、気象庁のデータ⁹⁾から引用した沖縄県那覇市の降水量を示す。濡れセンサーは、測定期間を1月15日から3月10日とし、北面および西面のコンクリート表層に設置した。なお、濡れセンサーで測定した電流値は、センサーが設置された表面の濡れの度合いを示し、電流量が高いほど水分量が多いことを示している。図より、北面および西面は、降雨時に電流値が大きくなる傾向が見られ、雨掛かりの影響を受けていることが確認できる。また、降雨時の北面の電流値は、西面と比較して大きい傾向がある。これは、沖縄県那覇市が測定期間中において北東方向からの風が卓越している⁹⁾地域であるため、北面が雨掛かりの影響を強く受けることを示している。このことより、図-3に示す含水率が西面に比べて北面が高くなったものと考えられる。

塩分を含有する実構造物から採取したコアを用いて中性化部分、中性化から非中性化領域への移行部分および非中性化部分の吸水・乾燥に伴う密度変化や透水量の試験を実施した既往研究⁷⁾によると、中性化部は非中性化部に比べて吸水速度は遅いが、乾燥速度が速くなることが示されており、中性化領域では、外部気象の影響を受け吸水と水分逸散が繰り返されやすい状態であることが推測されている。中性化が鉄筋位置まで到達している北面においては、雨掛かりの影響を強く受け、鉄筋位置において乾湿が繰り返される環境であったことが考えられ、鉄筋腐食の進行を助長する要因となると考えられる。

3.5 相対湿度

図-6に、温湿度センサーで測定した相対湿度と、気象庁のデータ⁷⁾から引用した沖縄県那覇市の降水量を示す。温湿度センサーは、測定期間を1月16日から3月29日とし、西面および屋内のコンクリート表面から深さ30mmの場所に埋設した。南面は、コンクリート表面から深さ30mmおよび50mmの場所に埋設した。

図より、西面は相対湿度60~80%、屋内では相対湿度70~80%を推移しており、どちらも相対湿度の変動が少なく安定している。一方、南面の表面からの深さ30mmは、西面や屋内と比較し、相対湿度80%を跨ぐように変動している。表面から同じ深さの位置で比較すると、西面に比べて、南面は降雨により乾湿を繰り返す環境下にある。

南面の深さ50mmでは、測定期間中、常に相対湿度90%

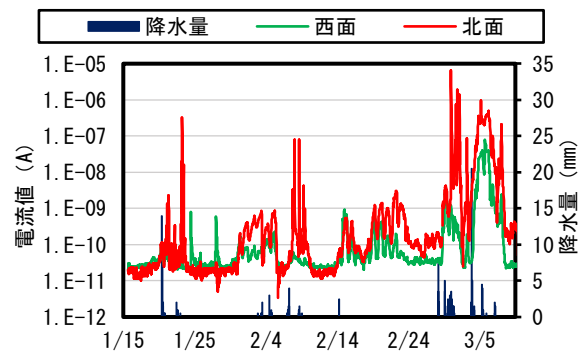


図-5 濡れセンサーによる電流値および降水量

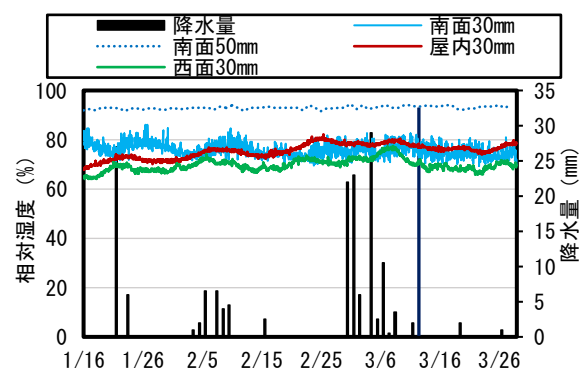


図-6 コンクリート内部相対湿度および降水量

表-6 調査計画表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
70.0	45.0	175	250	813	1023	1.250

以上を安定して推移しており、測定期間中の南面鉄筋位置においては高湿度であった。

以上の検討結果より、屋内と西面に比べて、北面および南面については、調査時の鉄筋位置の含水率は低い値であったが、雨掛かりの影響が強く、乾湿を受けやすい面であったと想定されるため、鉄筋腐食が進行したと考えられるが、図-4に示す二軸腐食評価について今後も検討する必要がある。そこで、次章では内在塩分を含有することで水分挙動がどのように変化するのか検討することとした。

4. 内在塩分を含有したコンクリートの水分挙動に関する室内実験

4.1 実験概要

内在塩分を含有したコンクリートの水分挙動について検討するため、2つの実験を実施した。実験1では、基礎的な実験として等温等湿下において質量含水率の測定を行った。実験2では、写真-4に示すプロムナード底を

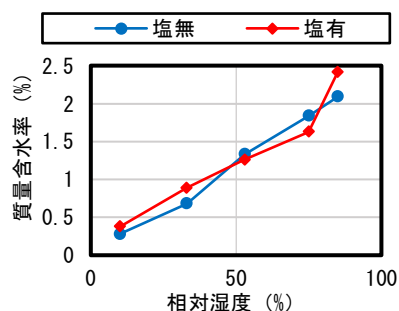


図-7 相対湿度と質量含水率の関係

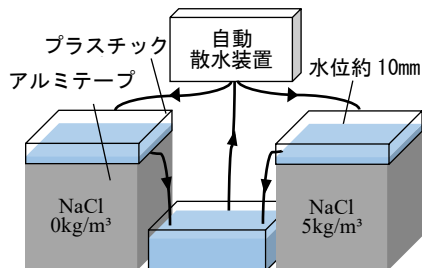


図-8 試験装置概要

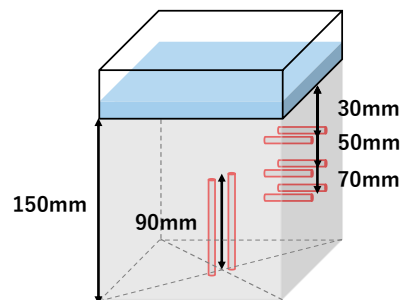


図-9 測定箇所

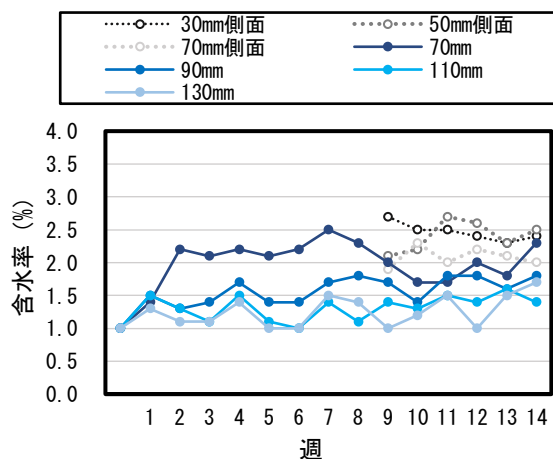


図-10 塩分を含まない試験体の含水率測定結果

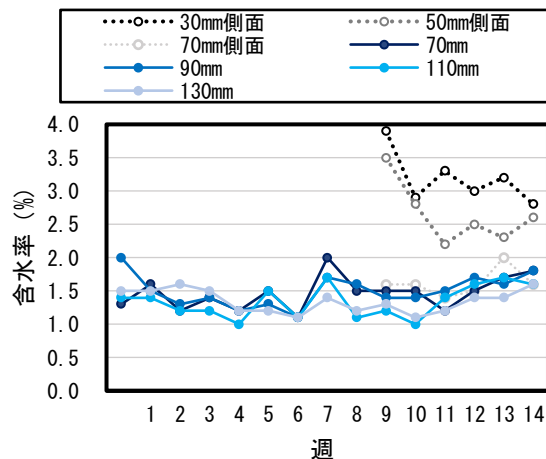


図-11 塩分を含む試験体の含水率測定結果

模擬することとした。写真-4は、最上階プロムナード底裏側のコンクリート剥落の様子を示している。この箇所では、底上部に滞留した水がコンクリート内部まで浸透し、コンクリートの含水率が高い状態で維持されることで鉄筋腐食が進行したと考えられる。コンクリート剥落による同様の現象は、当該建築物の大底の雨樋部分や既往の構造物調査⁹⁾でも確認されているが、滞留水がコンクリートの深層部の含水状態に与える影響については定量的な検討が行われていない。そこで、実験2として、上部の滞留水による影響がコンクリート深部の含水率に及ぼす影響について検討を行った。

使用したコンクリートの調合を表-6に示す。内在塩分として、 5kg/m^3 添加したものと、塩分を含まないもの2種類を作製した。

4.2 実験1

(1) 実験方法

供試体は3日封かん養生後、25日間気中養生を行った円柱供試体をハンマーで、5~10mm程度に砕いたものを試料として使用した。試料は全て 105°C の乾燥炉で絶乾させた後、各湿度環境下で24時間ごとの質量変化が0.1%以下になるまで吸湿させた。質量含水率は、絶乾後と吸湿後の試験片の質量から算出した。また、各試料の骨材材量の違いを考慮し、3つの試料の平均値を用いた。等温透

湿環境下としては、温度 20°C 、相対湿度10%、33%、53%、75%、85%に調整したデシケーターを用いて実施した。

(2) 実験結果および考察

図-7に質量含水率測定結果を示す。測定結果より、塩分含有によらず等温等湿環境下では、質量含水率に差は生じないことが判明した。一方、3.5節で述べたように、本調査における雨掛かりによる影響を受ける南面調査箇所では、相対湿度の変動が大きくなる傾向が確認された。また、既往研究¹⁰⁾によると、塩分を含むコンクリートは、乾燥時の質量減少が抑制され、表面では乾燥が促進するとされている。したがって、塩分の有無によって、等温等湿環境下では吸湿性能に大きな影響は与ええないが、温度や湿度の変動が大きい実環境では、影響を受ける可能性が示唆された。乾湿繰返しにおける含水率の変化については今後の課題としたい。

4.3 実験2

(1) 実験方法

試験体寸法は $150\times 150\times 150\text{mm}$ とし、14日封かん養生後、 105°C 乾燥炉で21日間乾燥させた。図-8に実験装置の概要、図-9に測定箇所を示す。市販の自動散水装置を使用し、一定時間ごとに散水を行い、試験体上部に水を滞留させた。水位が約10mmで一定になるように、プラスチック板に排水箇所を設けた。排水は試験体下部の

容器に流れ、自動散水装置でくみ上げ、再度散水に使用した。試験体上部の滞留水が側面から浸透しないよう、エポキシ樹脂を用いて試験体上面の側部にプラスチック板を接着した。また、水分の浸透面以外の面をアルミテープで防湿加工した。含水率は、ドリルで試験体底面から浸透面に向けて長さ 90mm の孔を 2 箇所開け、挿入式電気抵抗含水率計を用いて 20mm ごとに、2 点間の電気抵抗から測定した。測定時間以外では、測定孔にゴム栓を差し込んだ。測定は、1 週間ごとに、計 14 週にわたって行い、実験開始 9 週目からは、浸透面からの深さ 30mm、50mm および 70mm における側面からの長さ 30mm の含水率を測定した。

(2) 実験結果および考察

図-10 および図-11 に、各試験体の浸透面からの深さ 20mm ごとの含水率測定結果を示す。塩分の含有によらず、実験開始から 14 週にわたって、浸透面からの深さ 100mm 以降の含水率に大きな変化は見られなかった。また、底面の孔に近い箇所では、測定値が初期値を下回っている。既往の文献⁹⁾によると、同一孔での繰り返し測定では、乾燥により含水率が低下することが示されているため、乾燥の影響と考えられる。

測定開始から 9 週目における浸透面からの深さ 30mm、50mm の含水率は、塩分を含まない試験体で 2.5~3%、塩分を含む試験体で 3~4%と差が生じた。また、測定開始から 12 週目における含水率は、塩分を含まない試験体で 2~3%、塩分を含む試験体で 2~4%となり、測定孔からの乾燥による含水率の低下が確認された。さらに、実験開始から 9 週目における浸透面からの深さ 70mm の含水率は、塩分の有無によらず、底面の孔からの測定結果と側面の孔からの測定結果が概ね一致した。このことから、浸透面からの深さ 70mm までの範囲では、測定方向によらずに含水率を評価できる可能性が示唆された。

以上より、塩分を含むコンクリートは、塩分を含まないものと比較し、水分浸透が促進され、内部の含水状態が高くなることが示された。また、浸透面から深い位置については、今後継続的な測定を行い、含水率の変動を観察していきたい。

5. まとめ

- (1) 旧那覇市民会館の柱部分では、塩化物による鉄筋腐食が生じないとされている含水率 3.5%を下回った場合でも、重度の鉄筋腐食が進行していた。温湿度センサー、濡れセンサーの結果や卓越風向から、乾湿の繰返しや鉄筋位置の湿潤傾向が影響し、重度の鉄筋腐食が進行したと考えられる。
- (2) 等温等湿環境下での水分吸着試験の結果、塩分の含有によらず吸湿性能に大きな差は見られなかった。した

がって、等温等湿環境下では吸湿性能に大きな影響は与えないが、温度や湿度の変動が大きい実環境では、吸湿および乾燥挙動に影響を与える可能性がある。

- (3) 当該建築物で見られた底上部の滞留水による底下部コンクリートの剥落現象を検討するため、プロムナード底を模擬する室内実験を行った。14 週にわたる滞留水によるコンクリート内部の水分浸透実験の結果から、塩分を含むコンクリートは、塩分を含まないコンクリートと比較して、表層部の含水状態が高くなることが分かった。深層部への水分浸透については、今後含水率の継続的な測定を行い、さらなる検討を進めていきたい。

謝辞

本研究は、日本建築学会・鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計研究小委員会（委員長：兼松学(東京理科大学)）の活動の一環として行われたものである。ここに記して感謝の意を表する。また、本調査では、那覇市、アトリエネロ根路銘安史氏、シーカ・ジャパン株式会社原田様、その他関係者の皆様のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 沖縄タイムス+プラス：
<https://www.okinawatimes.co.jp/articles/-/66264>
(2024.12.10 閲覧)
- 2) 笠井芳夫：塩化物による鉄筋コンクリートの劣化、コンクリート工学, Vol.25, No.11, pp.28-31, 1987.11
- 3) 那覇市市民文化局文化振興課：平成 28 年度那覇市民会館耐震診断業務委託現地調査報告集, 2016.9
- 4) 公益財団法人日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 2022
- 5) 石綿凜ほか：内在塩分を有するちとせ商店街ビルの損傷調査、コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, 2024
- 6) 気象庁：<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
(2024.12.10 閲覧)
- 7) 青山實伸ほか：中性化領域における塩分移動メカニズムに関する考察、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.817-823, 2013
- 8) 左藤真市ほか：鉄筋の腐食環境としてのコンクリート内の湿度挙動とぬれ特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.733-788, 2020
- 9) 多賀紀晃ほか：電気抵抗式含水率による既存 RC 構造物のコンクリート内部の含水率調査、日本建築学会関東支部研究報告集, pp.1-4, 2023