

# コンクリート構造物の置かれる環境条件に関する基礎調査

研究予算：運営交付金、一般

研究期間：平 16～平 18

担当チーム：構造物マネジメント技術チーム

研究担当者：渡辺博志、古賀裕久

## 【要旨】

コンクリート構造物の劣化に関しては多くの検討が行われている。しかし、既往の研究は、塩害・凍害など耐久性上厳しい環境下の劣化に関するものが多く、一般的な環境下におけるコンクリートの品質の経時変化について調査した事例は、多くはない。そこで、全国に暴露した供試体を用いた試験と暴露箇所の環境の調査を行った。暴露二年目までの結果として、暴露条件・地点によってコンクリート強度の経時変化や中性化速度に違いがあることなどが明らかになった。また、今後、試験を継続していく上で活用できる暴露環境情報を収集した。この他、過去の試験結果を整理して、屋外にあるコンクリートの含水状態の変化を明らかにした。  
キーワード：コンクリート、耐久性、圧縮強度、曲げ強度、中性化、含水率、周辺環境

## 1. 研究の目的

我が国の国土は、南北に長く海水面からの高低差も激しい地形であり、季節による年間の気象条件が大きく変動するため、全国各地でその環境条件が大きく異なる。また、一部の地域では噴出する温泉水や温泉ガス、酸性雨などの影響を受ける場合もあり、コンクリート構造物がおかれる環境条件は極めて多岐にわたる。

一般に、コンクリート構造物の耐久性は、その周辺の環境条件によって大きく左右されることが知られている。一方で、コンクリートは、使用材料や配合、施工条件等によって様々な品質となることが知られている。このため、コンクリート構造物の耐久性を適切に評価するためには、影響を与える環境条件と影響を受けるコンクリートの品質の双方から検討する必要がある。

コンクリート構造物の耐久性に関する既往の研究は、比較的過酷な環境に供試体を暴露して試験を行ったものや、劣化を促進させるために実験室の中で著しく過酷な環境を作り出して、人工的な環境下で試験を行ったものが多い。このような条件を選ぶのは、著しく厳しい環境下で十分な耐久性を有することを確認することで、一般的な環境下における耐久性が確保できると考えられ、かつ、早期に結果が得られるためである。しかし、こうした検討結果だけでは、実際の環境下におけるコンクリート構造物の耐久性の違いを適切に評価できない可能性も高い。

環境条件の多様性を体系的に適切に評価するためには、一定の品質を有するコンクリート供試体を多様な

環境下に暴露し、各供試体の経時変化から環境を評価することと同時に、多様な品質のコンクリートを一定の環境条件下に暴露し、各供試体の変化過程からコンクリートの品質の違いが耐久性に与える影響を評価することが有効と考えられる。

しかし、このような検討を遂行するためには、我が国を包括するような広範囲にわたる研究実施ネットワークの構築が不可欠であり、また、これを長期にわたって維持していく必要がある。

土木研究所と 22 の機関では、以上のような現状を鑑み、コンクリート構造物の適切な耐久性評価をなし得るシステム検討の端緒として、使用材料、配合、形状等を全て統一した共通コンクリート試験体を多数作製し、2003 年から、各地の様々な環境にこれを暴露している。この暴露試験では、一般的な環境下における、コンクリートの長期的な品質の変化を把握するため、最長 50 年間にわたって暴露を継続する計画である。

本研究課題では、今後、長期間にわたって断続的に得られるデータを有効に活用するため、(1)暴露試験の結果を活用するために不可欠な暴露環境調査の実施、(2)暴露した供試体の一部を用いた試験の実施、(3)環境条件、暴露実験から得られた情報によるデータベース化を行うことを目標として検討を行った。

## 2. 暴露環境調査

### 2.1 気象情報モニタリングシステムの構築<sup>2)</sup>

コンクリートの長期にわたる暴露試験においては、その物性を変化させる直接的な要因は恒常的にコンク

リートに作用する気温、降雨などの気象条件である。通常、コンクリート暴露試験等を行った場合は、信頼性の高い気象情報として気象庁で一般に公開している AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) から、構造物の最寄りの気象情報を取得して利用することが多い。しかしながら、AMeDAS データの測定箇所と暴露箇所には物理的な距離があることが避けられず、AMeDAS データと暴露箇所の環境には違いが生じているおそれがある。

そこで、定期的に気象情報を収集することで、コンクリートの基本物性の変化との関連性の検討に寄与し得る気象情報モニタリングシステムを独自に構築し、土木研究所、港湾空港技術研究所、東北大学、新潟大学の暴露箇所に順次設置した(図-1)。暴露情報モニタリングシステムでは、気温、湿度、降水量、供試体温度(供試体中に埋込んだ熱電対の温度)を定期的に測定することができる。今後、これらの気象情報モニタリングシステムを、他の暴露箇所に順次移設するなどして、各暴露箇所における環境特性をより詳細に把握する予定である。



図-1 暴露情報モニタリングシステム

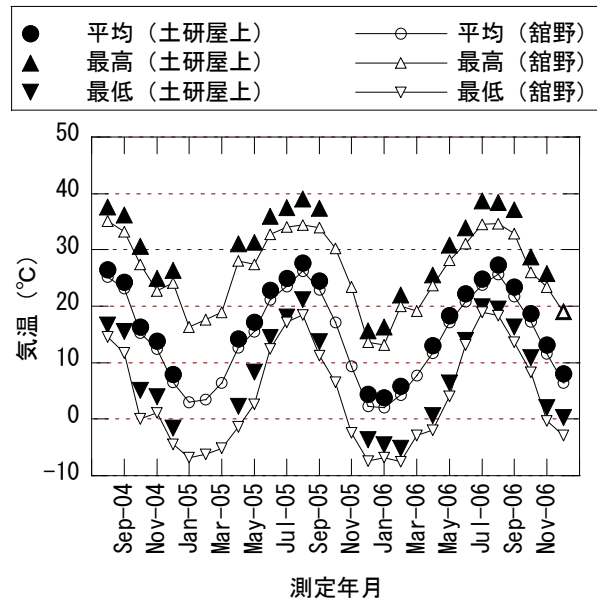
## 2.2 暴露環境調査結果

気象情報モニタリングシステムの測定結果の一例として、土木研究所屋上での測定結果と最寄りの地点(館野)の AMeDAS データを比較した。

図-2 に気温の測定結果を比較して示す。土木研究所屋上の暴露地点における気温は、つくば市館野の気温と比較すると、暴露期間を通じ平均で 1~2°C 高い傾向があった。最高・最低気温に着目すると、最高気温は、夏期に違いが大きく 4~5°C 高かった。最低気温は春秋に違いが大きく 5~6°C 高かった。これらの気温の違いは、暴露場所が建築物の屋上で、コンクリート床の上にあることの影響と考えられる。

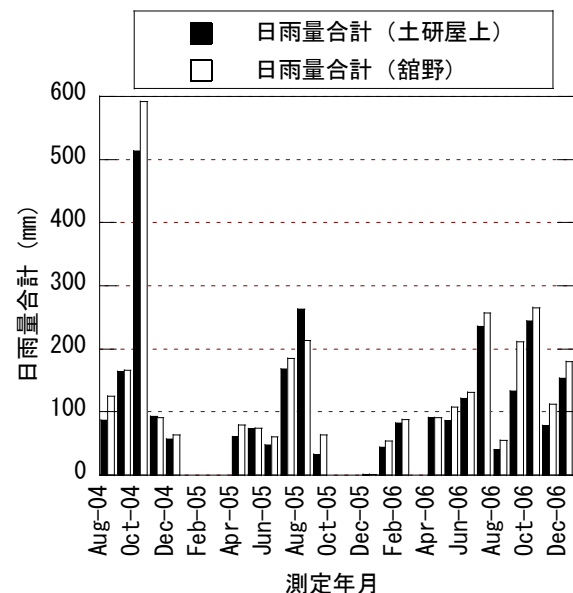
図-3 に降水量の測定結果を比較して示す。土木研

究所屋上の暴露地点における測定結果とつくば市館野の測定結果は、月によって大きな違いがある場合もあった。これは、両地点の降雨量の傾向を表すものと考えられる。



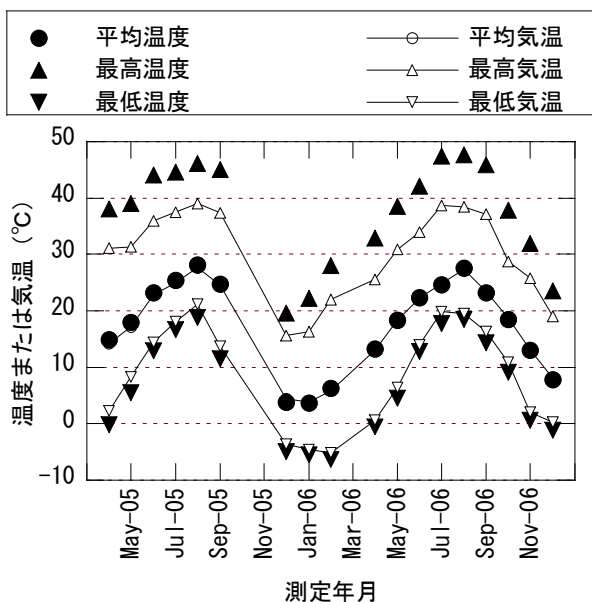
※2005年1~3月、10~11月、2006年3月の土研屋上測定には欠測があったので表示しなかった。

図-2 気温の測定結果(土研、館野)



※2005年1~3月、10~11月、2006年3月の土研屋上測定には欠測があったので、土研・館野の双方とも表示しなかった。

図-3 降水量の測定結果(土研、館野)



※2005年1～3月、10～11月、2006年3月には欠測があったので表示しなかった。

図-4 供試体温度・気温の測定結果（土研屋上）

図-4 に暴露した供試体（100×100×200mm、水セメント比 50%、供試体中央部で測定）の温度変化と、気象情報モニタリングシステムの気温の測定結果を比較して示す。供試体の温度と気温は、その平均値ではほぼ合致しているが、供試体温度の最高値は、最高気温を大きく上回っていた。また、供試体温度の最低値も、最低気温をわずかに下回っていた。

### 2.3 暴露環境調査のまとめ

暴露試験を行っている地点に気象情報モニタリングシステムを設置し、暴露環境のモニタリングを行った。その結果、土木研究所の暴露箇所（屋上）の気象条件と最寄りの AMeDAS データ観測点の気象条件には特に降水量などについて違いが見られること、供試体の温度変化は気温よりも変動幅が大きく、特にその最高温度に違いが見られることなどが明らかになった。

## 3. 供試体の解体調査

### 3.1 調査の概要

土木研究所と 22 の機関（大学、協会、民間企業など）は、コンクリート構造物が置かれる環境がコンクリートの長期的な品質の変化に与える影響を検討するため、分担して全国で供試体の暴露試験を実施している（図-5）。供試体は、コンクリートに及ぼす環境の影響をより明確に把握するため、同一の材料と配合からなる共通供試体を作製し、これを各地区で暴露した。



#### 【暴露場所・条件】

土木研究所（封かん、屋上、水中、土中）  
 港湾空港技術研究所（封かん、屋上、飛沫、干満、海中）  
 北海道大学、八戸工業大学、東北大学、新潟大学、  
 金沢大学、金沢港空整備事務所、群馬大学、  
 東京大学生産技術研究所千葉実験所、東京都立大学、  
 中部大学、岐阜大学、京都大学、大阪工業大学、岡山大学、  
 広島大学、徳島大学、九州大学、鹿児島大学、琉球大学、  
 太平洋セメント（封かん）、セメント協会  
 ※特に断りのない限り、供試体は建築物の屋上等、遮蔽物のない屋外空气中に暴露した。

図-5 供試体の暴露場所（丸印の位置）

表-1 暴露供試体の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				空気量調整剤 (% vs Cwt)
		W	C	S	G	
40	44.7	165	413	764	971	0.004
50	46.8		330	831		0.002
60	48.2		275	878		0.0015

※上記表のほか、AE 減水剤（ポゾリス No.70）をセメント 100kg あたり 250ml 加えた。

※空気量調整剤は、マイクロエア 303A を用いた。

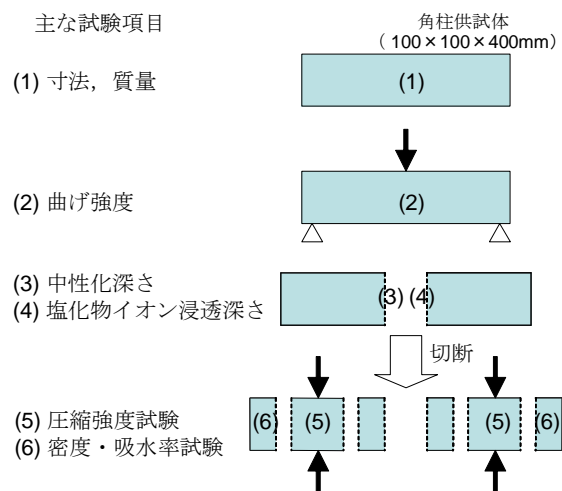


図-6 暴露供試体を用いた試験・測定

供試体の寸法は、100×100×400mmの角柱で、配合は、表-1に示す三種類である。他にも、アルカリシリカ反応性を生じるおそれがある骨材を用いた供試体などを同時に暴露している。本研究の期間には、暴露から一年後（2004年10月）、二年後（2005年10月）に、各種条件ごとに1体の供試体を回収し解体調査を行った。供試体は、曲げ強度試験、中性化深さの測定、塩化物イオン侵入深さの測定、圧縮強度試験、密度・吸水率試験の順に各種試験に用いた（図-6）。本章では解体調査結果の一部を紹介する。

### 3.2 解体調査の結果

#### (1) 曲げ強度

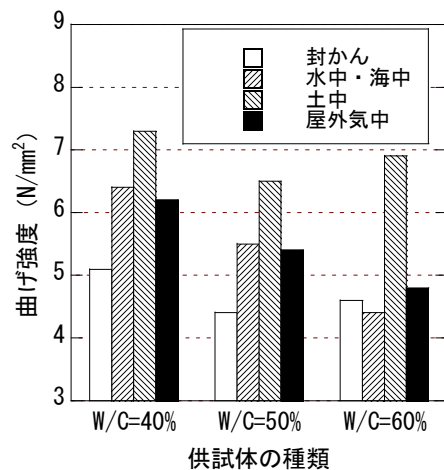
図-7に曲げ強度試験（水セメント比40%、60%の場合）の結果を示す。

暴露条件ごとの試験結果を比較すると、封かんした3供試体では、他のものと比較して、曲げ強度が小さかった（図-8）。一方、土中に設置した供試体は、曲げ強度が比較的大きかった。

コンクリート供試体を乾燥させると、乾燥収縮ひずみのために曲げ強度が低下することが知られている。封かんの供試体は、乾燥はさせていないものの、コンクリートの自己収縮の影響等で供試体表面に引張ひずみが生じ、曲げ強度が低下したものと考えられる。一方、土中に設置した供試体では、気中にした場合よりも乾燥の影響を受けにくかったので、比較的高い曲げ

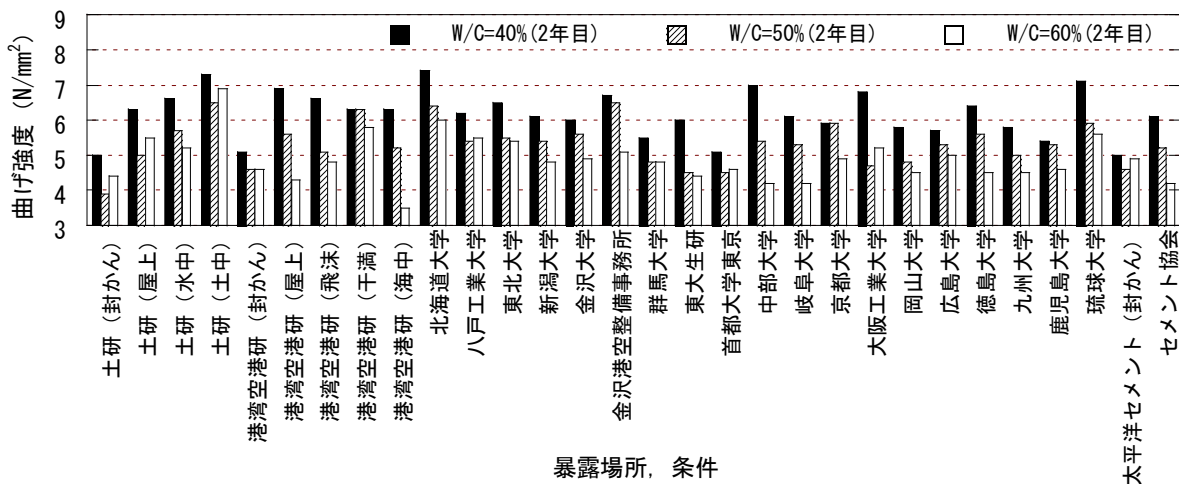
強度が得られた可能性がある。しかし、これだけでは、同様に乾燥しない条件にあった水中・海中の供試体との違いを説明できない。曲げ強度試験は、試験結果のばらつきが大きくなりやすいので、さらにデータを蓄積して検討する必要がある。

なお、気中に暴露した供試体については、暴露場所（地点）が曲げ強度に与える影響に関して、明確な傾向を見いだすことはできなかった。



※二年間暴露した供試体の試験結果を示した

図-8 曲げ強度試験結果（暴露条件ごとの平均値）



※特に条件が明記されていない物は、大気中（多くは建築物の屋上）に暴露したものである（図-6、7も同様）。

図-7 曲げ強度試験結果

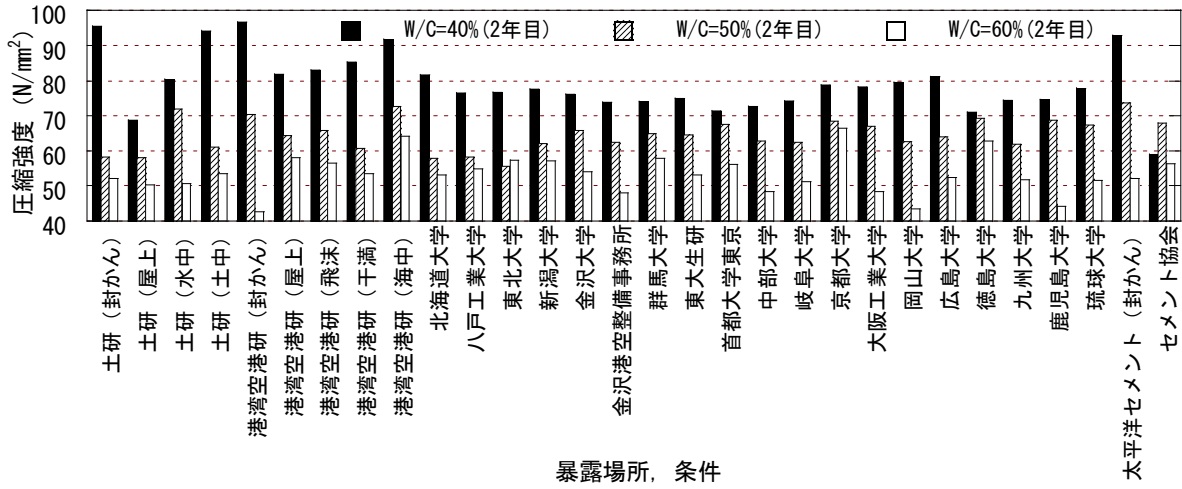


図-9 圧縮強度試験結果

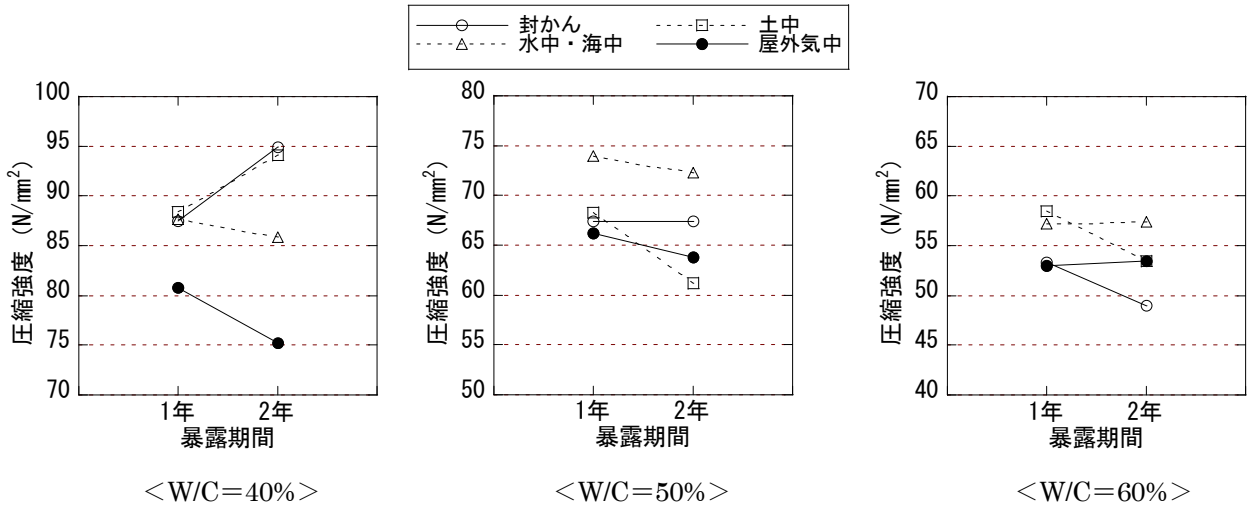


図-10 圧縮強度試験結果 (暴露条件ごとの平均値)

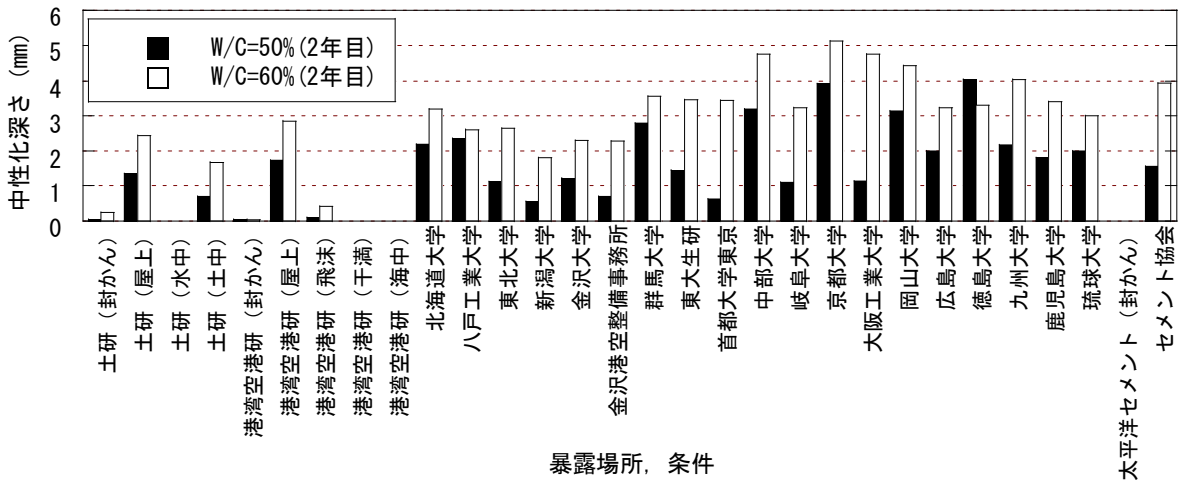


図-11 中性化深さ測定結果

## (2) 圧縮強度

図-9に圧縮強度試験（水セメント比40%、50%の場合）の結果を示す。水セメント比40%の供試体に着目して暴露条件ごとの試験結果を比較すると、封かんした3供試体では、気中に暴露した供試体に比べて、圧縮強度が大きかった。また、水中や海中、土中に暴露した供試体も圧縮強度が比較的大きかった。そこで、得られた試験結果を暴露条件ごとに整理して図-10に示す。

図-10から、水セメント比40%で封かんした供試体や土中に設置した供試体では、暴露期間1年～2年の間に強度の増進が認められた。一方、水セメント比40%で屋外に暴露した供試体や水セメント比50%、60%の供試体では、暴露期間が1年～2年の間、圧縮強度はほとんど変化していないか、若干の低下が認められるなど、その傾向に違いがあった。水セメント比40%の供試体は、他の配合よりセメント量が多いため、暴露条件が良好な場合には、長期にわたって水和反応が継続し、強度が増進した可能性があるが必ずしも明確ではない。

なお、気中に暴露した供試体については、暴露場所（地点）が圧縮強度に与える影響に関して、明確な傾向を見いだすことはできなかった。

## (3) 中性化深さ

図-11に中性化深さの測定結果（水セメント比50%、60%の場合）を示す。水セメント比50%の供試体の場合、一年目の測定（本報では省略）では、そのほとんどで中性化が認められなかったが、二年目の測定では、中性化が認められた供試体が多くなっていた。ただし、封かんした供試体や、水中・海中に暴露した供試体では、ほとんど中性化していなかった。水セメント比60%の場合も、水セメント比50%の場合と同様な傾向であった。

なお、屋外気中（22箇所）に暴露した供試体について見ると、中部大学や京都大学に暴露したものが、比較的中性化深さが大きく、これに比して新潟大学や金沢大学に暴露したものは、中性化深さが小さかった。コンクリートの中性化速度は、温度が大きいほど、湿度が適当な範囲（50～60%）にあるほど、速いことが知られており、各暴露場所の環境の違いが、中性化速度に反映された可能性がある。

現状では、各供試体の中性化深さは最大でも5mm程度であり、測定の誤差も少なくないと思われる。また、暴露を開始して2年間のデータであり、今後も特定の暴露場所（地点）で中性化速度が速い／遅い傾向

が継続するかどうかは明確ではない。したがって、暴露場所の違いによる中性化速度の違いについて検討するには、今後も定期的に調査を行い、さらに中性化が進行した時点でのデータを収集する必要があるものと考えられる。

## 3.3 解体調査結果のまとめ

一年間または二年間暴露した供試体を回収し、解体調査を行った。その結果、曲げ強度・圧縮強度については、暴露場所（地域）の違いによる大小は明確には認められなかったが、暴露条件（封かん、水中、土中、屋外気中など）の違いによって、強度が大きく／小さく測定された場合があった。

供試体の中性化深さ測定結果には、暴露場所（地点）によって、中性化深さが比較的大きな場所と小さな場所があった。

これらの結果は、暴露二年目までに得られたもので、これらの傾向が今後も継続して観察されるかどうかは明確ではない。そこで、各地の暴露条件がコンクリートの品質に与える影響についてさらに信頼性のあるデータを収集するため、今後も機会を見て調査を行う予定である。

## 4. 実験データのデータベース化

### 4.1 データベース化の必要性

コンクリート、あるいは鉄筋コンクリート部材の長期耐久性を評価するためには、実際にこれらが用いられる環境下で暴露試験を行う方法と、より厳しい環境下で劣化を促進させる促進試験を行う方法がある。ただし、促進試験では、その条件によっては実際の環境下と異なるメカニズムによる劣化が生じるおそれがあり、試験結果が必ずしも材料・部材の耐久性を適切に評価できているとは限らない。

一方、暴露試験は、一般に評価が得られるまでにかかる時間を要する。このため、研究期間中に何らかの理由で暴露場所が使用できなくなるなど、実施上の課題も大きい。こうした暴露試験の課題の一つとして、試験データ等の適切な申し送りがある。今回その結果の一部を報告した暴露試験では、暴露期間として50年を予定しており、1～2人の研究者がこれを完遂することは甚だ困難である。そこで、試験データ等の適切な記録が求められる。

そこで、本研究期間中に実施した暴露環境調査、供試体解体調査については、ハイパーテキスト（html）文書としてこれを整理し、記録した。html文書とした



のは、使用ソフトウェア等によらず閲覧できること、データの形式が単純で将来にわたっても閲覧可能であることが期待されること、といった点で適切と考えたためである。作成したデータベースの画面表示例を図-12に示す。



※上：調査地点選択画面（中央の地図上で選択）  
下：測定項目選択画面（左下のリストから選択）

図-12 調査結果データベースの画面

## 5. コンクリートの含水状態に関する検討<sup>3), 4)</sup>

### 5.1 検討の目的

現状で、「劣化メカニズム」とまでは考えられていないもののコンクリートの品質等に影響を与えうる作用として、コンクリートの乾湿の繰返しがある。また、コンクリートの乾湿は塩害による鋼材の腐食やアルカリ骨材反応の進行速度にも影響を与えることがわかっている。しかし、実際の環境で長期間にわたってコンクリートの含水状態の変化を調査した事例は少ない。そこで、過去に土木研究所で屋外に暴露したコンクリート供試体の測定結果を再整理し、土木研究所資料としてとりまとめた。

### 5.2 検討の方法

含水率の変動を測定した供試体は 300×300×500mm のブロック状のもので、一面を暴露し、それ以外の面は、打設時の型枠を設置したままとした。暴露面は上面または側面で、暴露場所は土木研究所構内である。暴露時の状況を図-13に示す。

コンクリートの含水率は、埋込み型セラミックセンサ<sup>5)</sup>で測定し、同一供試体に埋め込んだ3つのセンサの平均値を測定結果とした。セラミックセンサの測定値は、別途、加熱乾燥法（コンクリートを加熱して蒸発水量を測定する方法）による含水率測定を行った結果と比較し、概ね妥当な値が得られることを検証した。

### 5.3 検討結果

測定結果の一例を図-14に示す。図から水セメント比50%の供試体で、暴露面からの距離が1cmの位置では、降雨や乾燥の影響により含水率が大きく変動すること、暴露面からの距離が3~5cmの位置では、雨天や晴天が数日続くと含水率が変動するが、その程度は1cmの位置と比べると少ないこと、暴露面からの距離が10cm以上になると、含水状態の変化がきわめて緩やかであることが明らかになった。



図-13 供試体の暴露状況

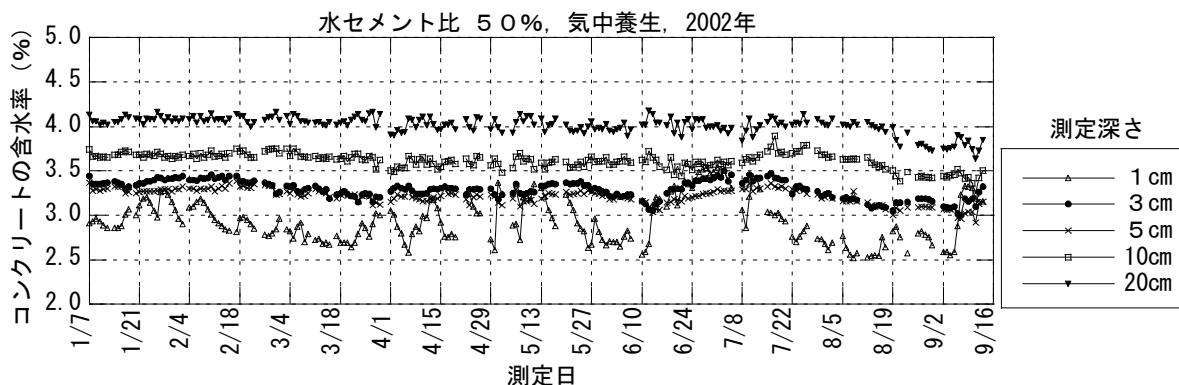


図-14 含水率測定結果の一例 (測定は1回/日、暴露面は上面)

本報では、その詳細は省略するが、この他に、水セメント比や暴露面の方向が含水率の変動範囲の大きさに影響すること、広く用いられている高周波容量式の含水率測定装置はコンクリートのごく表面の含水状態を測定していると見られること、などが明らかになった。これらの知見は、今後も継続して行う暴露試験の結果を検討する際に有用なものとして期待される。

## 6. まとめ

- 1) コンクリート供試体の長期暴露試験を行っている地点に気象情報モニタリングシステムを開発・設置し、AMeDAS データのみでは十分に情報が得られなかった暴露地点の降雨量や供試体の温度変化についてデータを収集した。
- 2) 約 2 年間暴露した供試体を用いた解体調査を実施し、その強度的性質に暴露条件（封かん、屋外気中などの別）の影響があること、その中性化深さに暴露地点による違いがあることなどを確認した。
- 3) 暴露試験に関する種々のデータ（計画、暴露地点の気象情報、供試体の解体調査結果など）をデータベースとして整理した。
- 4) コンクリートの含水率の変動を長期にわたって測定した結果を整理した。

今回の研究期間では、供試体の暴露期間が最大 2 年間程度であり、暴露した供試体の多くではコンクリートの品質の顕著な変化は認められなかった。しかし、今後、より長期のデータが得られた際に、比較考慮するために必要なデータを収集・整理することができた。一般的な環境下におけるコンクリートの品質変化については、これまでに十分には明らかになっておらず、今後も適切な時期に調査を行い、これを明らかにする予定である。

## 謝辞

今回調査した供試体は、東北大学久田真准教授（当時、土木研究所技術推進本部主任研究員）が計画し、港湾空港技術研究所、北海道大学、八戸工業大学、東北大学、新潟大学、金沢大学、国土交通省金沢港湾・空港整備事務所、群馬大学、東京大学、首都大学東京、中部大学、岐阜大学、京都大学、大阪工業大学、岡山大学、広島大学、徳島大学、九州大学、鹿児島大学、琉球大学、太平洋セメント（株）、（社）セメント協会の協力を得て、各地に設置したものです。関係各位には、供試体の管理、データ収集に協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 久田真：全国共通試験によるコンクリート材料の耐久性と環境の評価研究成果報告書、平成 15～16 年度科学研究費補助金、研究課題番号 15206053、2004.3
- 2) 久田真、渡辺博志、北山良：コンクリートの全国暴露試験について、自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム論文集、JCI-C65、pp.321-326、2005.6
- 3) 渡辺博志ほか：屋外にあるコンクリートの含水率変化、土木研究所資料第 3993 号、2006.1
- 4) 古賀裕久、渡辺博志：屋外に暴露したコンクリートの含水率モニタリング結果、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.641-646、2006.7
- 5) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案、日本建築学会構造系論文集、第 498 号、pp.13-20、1997.8