

UFC および CF を用いた公共構造物の部材の安全性と再生化技術に関する研究グループ

RC 床版の劣化度診断技術

木田 哲量 (日大生産工・教授) 阿部 忠 (日大生産工・教授)
小川 洋二 (太平洋コンサルタント) 水口 和彦 (日大生産工・助教)

1 まえがき

高度経済成長期に建設され高経年化したコンクリート (RC) 構造物の老朽化が問題視されており、これら RC 構造物の劣化診断手法および補修・補強指針の確立が急務とされている。RC 構造物の一つである道路橋 RC 床版の劣化は、大型車両の繰り返し走行による疲労劣化が主要因であるとされているが、最近の報告では、融雪剤や飛来塩分による塩害、寒冷地での凍害、さらにはアルカリシリカ反応など、いくつかの因子が複合し、劣化を促進させているとの報告がなされており^{1,2,3)}、劣化メカニズムの解明は困難なものになっている。したがって、劣化 RC 構造物に対して適切な診断を行うことは、その後の対応を図る上で非常に重要である。特に、診断後の延命を図るために補修・補強を施す際には、劣化メカニズムに応じた対策をすることが肝要であることから、より詳細な調査手法の開発が切望されている。

本報告は、RC 床版の一般的な劣化度診断技術を前段で取りまとめ、後段では新たな調査手法として、小径コア採取による劣化診断の妥当性および塩分濃度測定における EPMA 測定の有効性を考察したものである。この劣化診断と EPMA 測定の試験は、架設後 40 年以上が経年し

ている千葉県銚子大橋の道路橋 RC 床版より採取したコンクリートコアであり、これに各種の劣化診断を行い、その有用性を検証して、RC 床版部材における劣化診断手法確立の一助とするものである。

2 一般的な RC 床版の調査手法

2.1 調査一般

RC 床版の疲労による変状としては、床版下面の格子状ひび割れの発生が特徴的であり、これを調査するためには、目視による外観観察が主体である。さらに、詳細に調査する場合の調査手法の一例を表-1 に示す。

2.2 日常点検/定期点検

日常点検では、床版の状態変化を日常的に把握し、劣化の進行状況を早期に発見する必要がある。従って、床版下面から、ひび割れや漏水、遊離石灰の発生状況を観察することが中心となる。一方、構造物としての性能低下やその兆候の把握に加え、走行安全性の確認やコンクリート片の剥落などの使用性と第三者影響度の評価を行うことも重要である。

さらに定期点検は、日常点検と同様の調査手法による点検が主であるが、ひび割れ密度・幅の計測、ひび割れの開閉やずれなどの挙動の確認程度などは、より床版に接近して行われる。

表-1 床版の調査手法⁴⁾

調査項目	現象・発生状況	調査方法
外観の変状	ひび割れ状態(方向性、密度、幅、角欠けの有無) 漏水、遊離石灰、コンクリートの色合い	目視、簡単な計測、写真撮影
	不良音	打音
路面の状態	亀裂、陥没の有無	目視、写真撮影
ひび割れの挙動	深さ、開閉量、段差量	コンタクトゲージなど
設計断面諸量	コンクリート強度	テストハンマ、コア試験
	配筋 床版厚	電磁波計測、超音波法等 超音波法等
耐荷性能	たわみ量	載荷試験
交通特性	交通量、大型車混入率、車線分担率、車種区分、軸重	交通量調査、荷重計測

表-2 床版の詳細調査項¹⁾

調査項目		調査方法
変位に関するもの	たわみ	載荷試験
	ひび割れの挙動	載荷試験
	ひび割れ深さ	超音波伝播速度計測、コア採取
材料に関するもの	コンクリート強度	テストハンマ、コア強度試験
	コンクリートの品質	採取コアによる室内試験
	コンクリート断面	コア採取など
	配筋の状態	電磁波調査、超音波法、はつり調査
交通特性に関するもの	荷重実態	交通量調査、車両重量の計測など

2.3 詳細調査

日常点検や定期点検では精度の良い評価および判定が難しい場合や、劣化の進行が著しい部位の調査が必要となる場合は詳細調査が行われる。詳細調査の項目と方法を表-2に示す。

2.4 塩害床版の調査

日常点検ないし定期点検での床版下面観察において、錆汁が確認された場合は、鋼材腐食の可能性がある。鋼材の腐食は、コンクリートの中酸化や塩害によって生じ、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鋼材の断面減少などを伴うことにより、構造物の性能が低下する。塩害の原因となる塩化物イオンは、海水の飛来や凍結防止剤の浸透などにより供給される。塩害の可能性がある場合の調査手法を述べる。

2.4.1 塩化物イオン濃度測定

コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定に関しては、RC構造物から採取したコアあるいはドリル粉末を用いて測定されてきた。コアについては、深さ方向にスライスした後に粉砕して試料としたり、断面スライスする。粉砕試料を用いた土木学会基準 JSCE-G 573「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法」等⁵⁾により濃度分布の測定や、コア断面を用いた土木学会基準 JSCE-G574-2005「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析法(案)」⁵⁾によりイオン濃度の測定がなされる。ここで、各測定法の特徴を表-3に示す。同表より、各測定法を比較する。塩化物イオンの拡散係数を高精度で推定する場合には、EPMA法が有効であり、分解能も他の測定法に比して緻密で、骨材による影響範囲が広いなどの優れた特徴を有している。さらに、図-1はEPMAによる

表-3 塩化物イオン測定法の特徴

測定法	分解能	骨材の影響	推定精度
スライス法	5~10mm	小	低~高
ドリル法	0.5~1mm	大	中
EPMA法	50~100μm	無~小	高

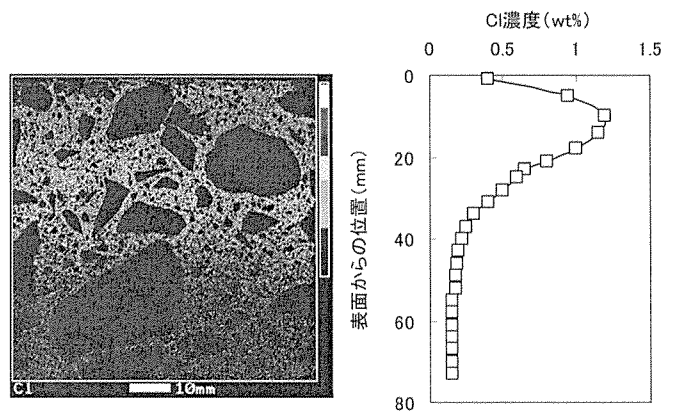


図-1 EPMAによる塩化物イオン濃度測定例

測定例であるが、コンクリート断面の塩化物イオン濃度の分布状況を連続的に測定することが可能であり、解析結果がビジュアル化されるために判別が容易なものとなっている。

2.4.2 鋼材の腐食調査

鋼材の腐食調査においては、かぶりコンクリートをはつり、腐食の有無、位置、面積、重量、孔食深さなどを測定する。定量的データを得られることから、構造物の性能低下を定量的に評価することができる。

2.4.3 塩害劣化予測

塩害による構造物の性能低下を予測するためには、塩害を原因とする劣化度合を定量的に予測する必要がある。そのためには、現状の塩化物イオンの濃度分布に加え、塩化物イオンの拡散の予測を行い、鋼材腐食の開始時期を判定する必要がある。

表-4 調査項目

測定項目	超音波伝播速度 (水平方向)	圧縮強度 静弾性係数 超音波伝播速度 (鉛直方向)	空隙径分布	EPMA
試料サイズ	50mm間隔	φ25×50mm	20mm間隔	全断面(約230mm)
コアNo.1	4点	—	11試料	Cl, Ca, C, Si, S 組成像
コアNo.2	4点	4試料	—	

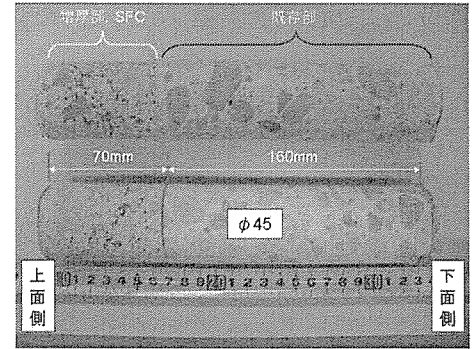


写真-1 コア外観

3 銚子大橋 RC 床版の劣化診断

本研究では、劣化診断の新たな調査手法として小径コアによる診断評価を行い、その有効性を検証した。架設後40年以上経年した千葉県銚子大橋のRC床版部材における劣化診断について、表層から深さ方向の劣化度分布を把握することを目的として種々の試験を行った。

3.1 試験方法

試験は、RC床版より採取したコア(φ45×230mm)を用いて行った。コアの外観を写真-1に示す。コア長は約230mm、上面側(走行面側)70mmは、鋼繊維コンクリートで増厚されていた。増厚部と既存コンクリート部との付着力は弱く、コア採取時の振動で容易に剥離するケースが多く見られた。この劣化要因としては、構造物の設置場所における環境条件から、①塩害、②中性化、および③繰返し輪荷重による疲労からの内部組織の変化、などが考えられる。本研究では、これらの影響を含めたRC床版の劣化状態を検証するために、①EPMAによる塩化物イオン濃度分布、②EPMAによる面分析、③超音波伝播速度、圧縮強度・静弾性係数、空隙径分布、より評価を行うこととする。ここで、表-4に試験項目を、図-2、図-3に試験の手順をそれぞれ示す。

(1)EPMAによる分析方法

塩化物イオンの分析には、電子プローブマイクロアナライザ(Electron Probe Micro Analyzer)を用いた。コア試験体を縦半分に切断し、樹脂により補強した後、切断面を研磨し観察面とした。観察面に導電性を持たせるために炭素を蒸着したものを測定用試料とし、カルシウム(Ca)、

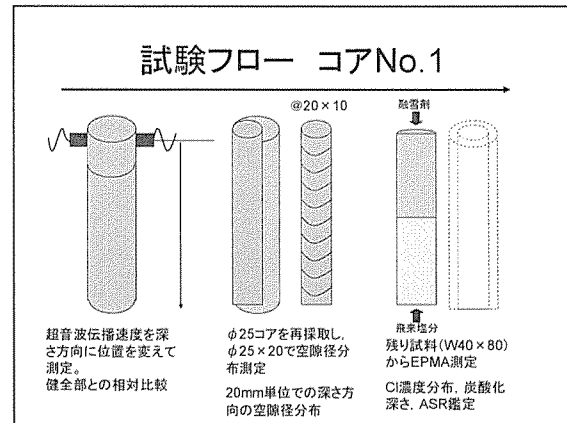


図-2 コア No. 1 の試験フロー

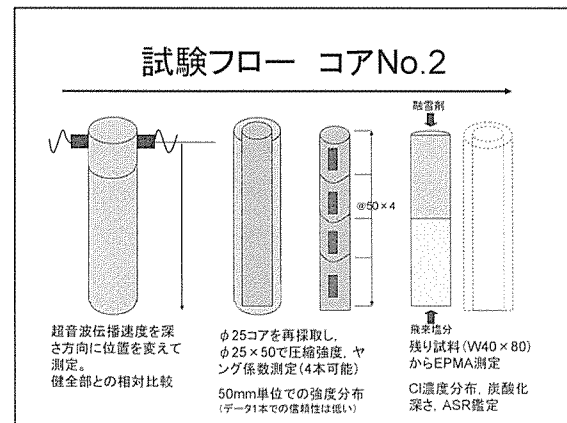


図-3 コア No. 2 の試験フロー

塩素(Cl)、炭素(C)、ケイ素(Si)、および硫黄(S)を、以下に示す測定条件でピクセルごとに定量した。

加速電圧：15kV、試料電流： 1×10^{-7} A、

測定時間：40msec/ピクセル、

分光結晶：PET (Ca, Cl, S), TAP (Si), LDESH (C)

標準試料：Ca, Si: Wollastonite (CaO=48.0mass%,

SiO₂=50.9mass%),

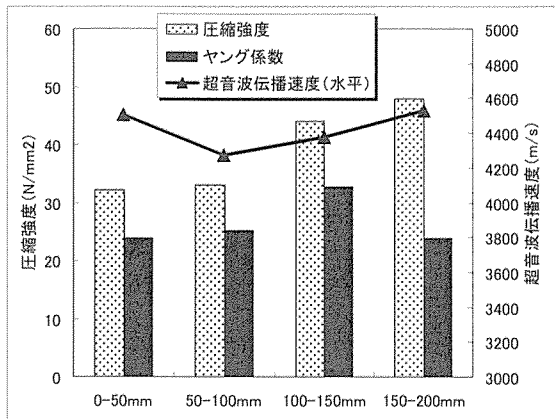


図-4 コア No. 2 の結果

S : Anhydrite (SO₃=58.8mass%),
 Cl : Halite (Cl=60.7mass%),
 C : Calcite (CO₂=44.0mass%),
 ステージスキャン法

プローブ径 : 50μm

ピクセルサイズ : 100μm×100μm

3.2 試験結果

(1) 超音波伝播速度と圧縮強度

図-4 にコア No.2 の表層から深さ方向への超音波伝播速度と、小径 (φ25×50mm) コアの圧縮強度・静弾性係数の結果を合わせて示す。圧縮強度は、小径コア n=1 のデータであるが、表層~100mm では 32N/mm², 100~200mm では 44~48N/mm² であった。増厚部 (0~約 70mm) より既存部の方が残存圧縮強度は大きく、設計基準強度 (21-24N/mm² 程度) を十分保持する結果を示した。また、超音波伝播速度と圧縮強度との関係は、概ね比例関係の傾向が認められた。

(2) 細孔径分布

図-5 にコア No.1 の表層から深さ方向の細孔径分布を示す。同図より、特徴的なことは、0-60mm の増厚部は、80-220mm の既存部と比較して、0.003~0.008μm の空隙 (ゲル空隙) が少なく、0.1~30μm の空隙が多いことである。異なるコンクリートの細孔組織構造に顕著に差異が生じることを示している。60-80mm はちょうど両者の中間値を示していた。また、圧縮強度と相関が高いとされる 0.05~2μm の毛細管空隙量は、増厚では表層側ほど、既存部では下縁側ほど占有率高くなっている。これは、増厚部は経年劣化が低いことと、繰り返し輪荷重によ

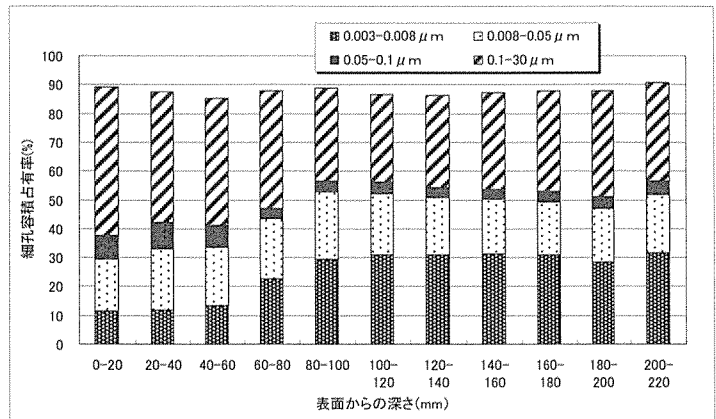


図-5 細孔径分布測定結果

る既存部の強度の低下が著しかったことと思われる。

(3) 塩分含有状況

図-6 にコア No.1, 図-7 にコア No.2 の EPMA による面分析結果を示す。

図-6 より、コア No.1 においては、Cl はコア 上面側表面から深さ 30mm 付近および増厚コンクリートと既存コンクリートとの界面付近に相当する深さ 70mm から 220mm 付近 (最下端から 10mm 付近) まで浸入が認められる。上面側表面部の Cl 濃度が最も高い。下面側表面部 10mm 程度の領域には Cl は見られない。また、上面側表面から深さ 1~2mm の領域では、Cl 濃度および SO₃ 濃度がともに低く、炭酸化領域と思われる。炭酸化領域では、ペースト部の CaO 濃度および SiO₂ 濃度もやや低くなっている。また、SO₃ は炭酸化領域と非炭酸化領域の境界付近で濃縮が見られる。下面側表面から深さ 10mm の領域では、Cl 濃度および SO₃ 濃度がともに低く、炭酸化領域と思われる。炭酸化領域では、ペースト部の CaO 濃度および SiO₂ 濃度もやや低くなっており、SO₃ は炭酸化領域と非炭酸化領域の境界付近で濃縮が見られる。

図-7 より、コア No.2 においては、Cl はほぼコンクリート全面への浸入が認められる。上面側表面から 20mm 付近に特に濃度が高い領域があった。データのばらつきが大きいのが、No.1 と同様に増厚コンクリートと既存コンクリートとの界面付近から Cl 濃度が高くなり、下面側に向かって緩やかに濃度が増加している。下面側表面から 15mm の深さには Cl がほとんど見られ

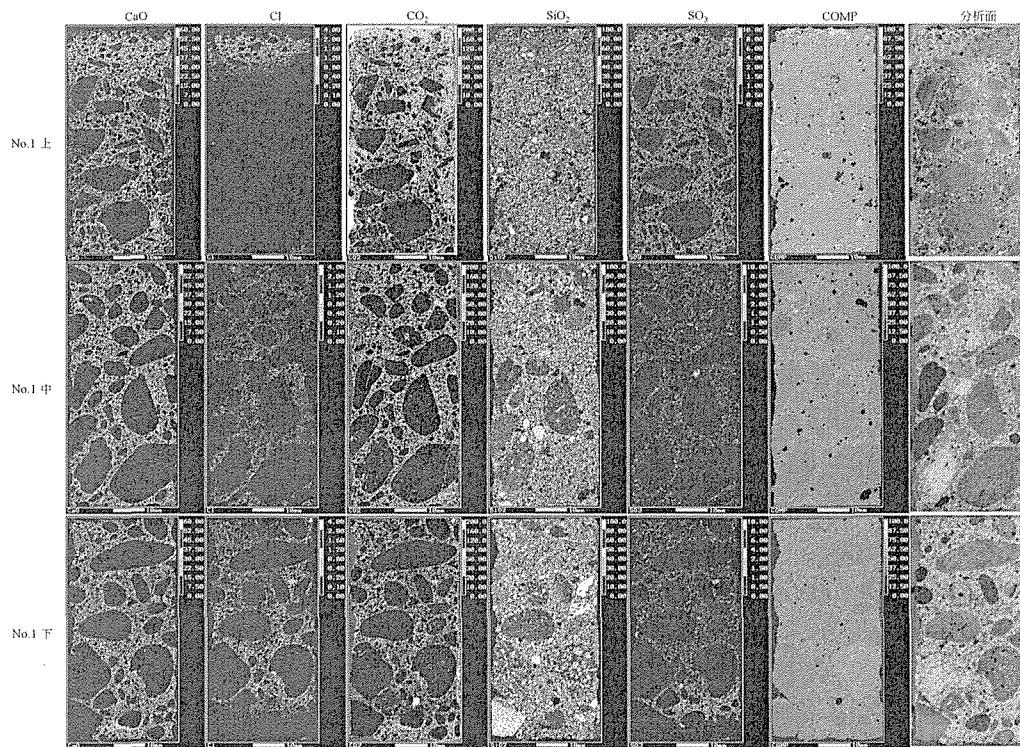


図-6 EPMAによる面分析結果（コア No. 1）

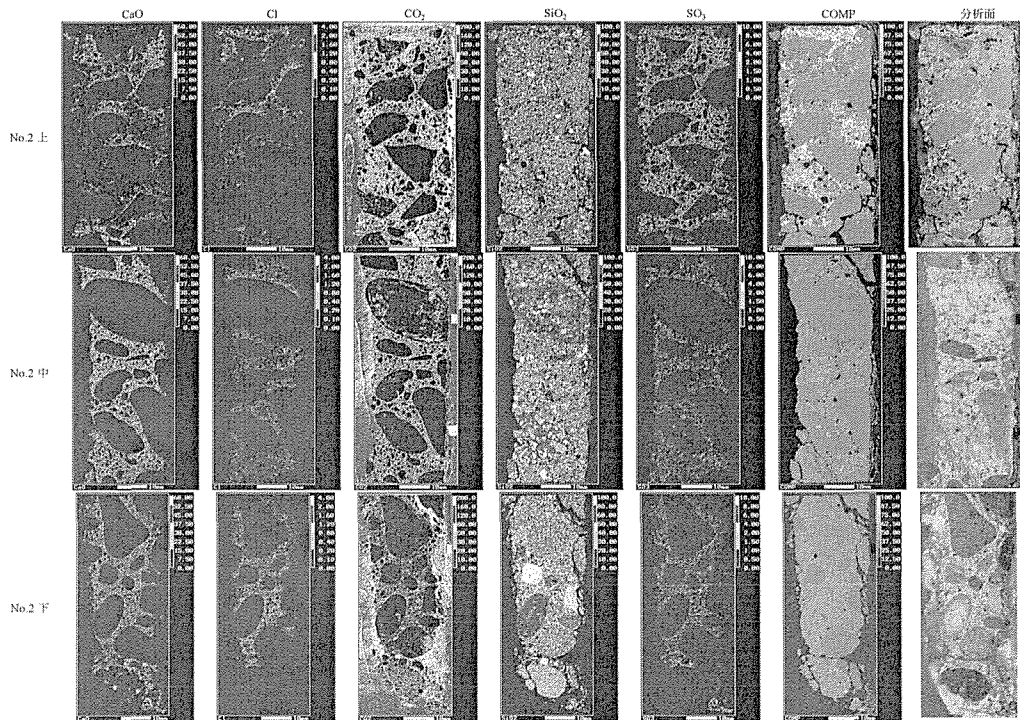


図-7 EPMAによる面分析結果（コア No. 2）

ない領域がある。また、上面側表面から深さ 3~5 mm の領域では、Cl 濃度および SO_3 濃度がともに低く、炭酸化領域と思われる。炭酸化領域では、ペースト部の CaO 濃度および SiO_2 濃度もやや低くなっている。また、 SO_3 は炭酸化領域と非炭酸化領域の境界付近で濃縮が見られる。

下面側表面から 5~15mm の領域では、Cl 濃度は低く、ペースト部の CaO 濃度および SiO_2 濃度もやや低くなっている。 SO_3 は明瞭ではないものの濃縮が見られており、炭酸化領域と思われる。

(4) コンクリート中の塩化物イオン量の推定

EPMA により得た骨材込み（コンクリート）の深さ方向の平均塩化物イオン濃度（mass%）を用いて、コンクリート単位容積あたりの塩化物イオン濃度（ kg/m^3 ）を式(1)より算出し、その算出結果を図-8, 9 に示す。なお、コンクリートの乾燥単位容積質量は $2200\text{kg}/\text{m}^3$ とした⁶⁾。また、図中の赤線（深さ 0 の軸と平行な太線）は、塩化物イオン濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を示すものであり、一般的にコンクリート中の鉄筋が腐食を開始する限界濃度⁷⁾とされている。

$$\begin{aligned} \text{塩化物イオン濃度}(\text{kg}/\text{m}^3) = & \\ & \text{濃度分析値}(\text{mass}\%)/100 \\ & \times \text{乾燥単位容積質量}(\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1) \end{aligned}$$

図-8, 9 より、コア No.1 では既存コンクリートの下面側およそ 60mm の領域で鉄筋腐食が開始している可能性が高い。また、コア No.2 では、既存コンクリートの下面側では $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超過する領域が少なく、鉄筋腐食の可能性は顕著に現れてはいないが、中央部で $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超える領域が所々に見られるため、局所的な鉄筋腐食が生じている可能性がある。

4. まとめ

本研究では、小径コアを用いた新調査法を実橋 RC 床版における床版厚さ方向、すなわち床版深さ方向の劣化状況を把握するために各種調査を実施した。その結果、次の事項が明らかになった。

- (1)深さ方向の圧縮強度の分布は、小径コアを用いることにより 5cm ごとに診断することが可能である。また、超音波伝播速度と圧縮強度との関係には相関が見られることから、さらに細かい圧縮強度分布を測定できる可能性が示唆された。
- (2)細孔径分布からは、毛細管空隙量が RC 床版下縁部で多く見られており、繰返し輪荷重の影響と示唆された。
- (3)塩化物イオン濃度分布においては、EPMA は連続的に測定することが可能であり、鋼材腐食限界値を超えている領域の判別が容易に推測できるとともに、中性化の進行状況の観察も可能である。

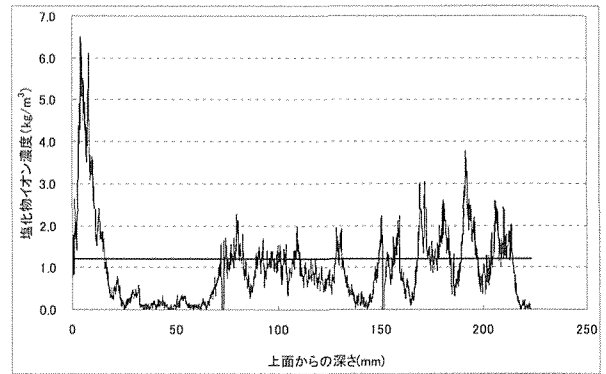


図-8 コンクリート単位容積あたりの塩化物イオン濃度（コア No. 1）

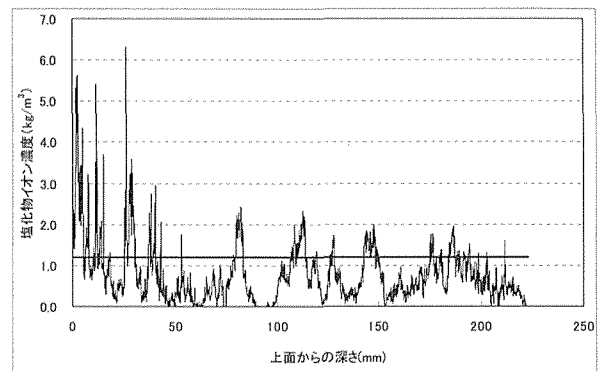


図-9 コンクリート単位容積あたりの塩化物イオン濃度（コア No. 2）

【参考文献】

- 1)新銀武：積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した床版寿命診断に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.347-354，2005
- 2)藤田弘昭，津村浩三，山本昇：青森県日本海沿岸の RC 橋梁において塩分浸透がひび割れと鉄筋腐食に及ぼす影響についての調査，構造工学論文集，Vol.53A，pp.666-673，2007
- 3)竹田俊明ほか：寒冷地における橋梁の劣化環境と RC 床版の劣化予測に関する研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.674-685，2007
- 4)土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2007
- 5)土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]，土木学会規準および関連規準，2007
- 6)橋梁塩害対策検討委員会：害橋梁維持管理マニュアル(案)，2008
- 7)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術，2009