

## 既設PC建造物の複合劣化予測および構造性能評価

八千代エンジニアリング(株) 正会員 工修 ○伊藤 均  
法政大学 博士(工学) 溝淵 利明

キーワード：複合劣化, 構造性能評価, 確率評価,

### 1. 研究目的

近年, 過去に建設された多くのインフラ建造物の一部において, 劣化による性能低下に起因する利便性の低下や事故の発生などが問題となっており, その結果, 安全・安心な社会構築のため, インフラ建造物の健全性維持が求められている。維持管理を行うにあたり, 現状の性能低下の程度を把握することは第一に重要な事項である。しかし, 実建造物の状態はさまざまであることから, 現状の評価の精度および, 将来予測に関しても実建造物を正確に評価できていないことが考えられる。したがって, 本研究では設計実務における性能低下程度の把握と構造性能の将来予測における問題点に関して検討を行う。検討の対象としてはプレストレストコンクリート建造物(以下, PC建造物)の構造性能とし, とくに, 橋梁における耐荷性能に着目する。

構造性能把握では, 点検, 調査による劣化状態把握結果をもとに, 現状の構造性能把握・構造性能低下予測を行うことが一般的である。しかし, 調査項目や数量は費用と関連することから, 橋梁規模や重要度などにより劣化状態把握の程度には差を生じているのが現状と思われ, 今後, 対象橋梁数が増加するに従い, その差は顕著となると考えられる。十分な調査, かつ精緻な解析を行った場合は精度の高い構造性能把握, 構造性能低下予測が可能と考えられる。しかし, 多くの橋梁(とくに小規模橋梁)において同レベルの調査・解析はコスト・時間の面より実施困難であると思われることから, 限定された情報により構造性能を把握することとなるが, この場合, 劣化の進行・材料・構造寸法・設計における推定・空間的なバラツキなど, 多数の不確定要素により算出結果は推定を含む結果となる。しかし, 現状では確定的に構造性能の算出などを行っているケースがほとんどであると思われる。

本研究では, 設計実務における構造性能算出に着目し, 不確実性による影響の把握およびその対策検討を行うが, 不確実性を与える要素は多数存在することから, 今回は劣化進行および材料・構造寸法の影響に着目し, 検討を行った。

### 2. 複合劣化

#### 2.1 複合劣化

PC構造における構造性能の時間経過に伴う変化は, 主に鋼材腐食の進行に影響を受け, 具体的には腐食などにより鋼材の断面積減少や付着性能の変化などにより構造物性能に変化を生じる。劣化の要因はさまざまであるが, 今回は鋼材腐食への影響の大きい塩害に着目する。ただし, 実建造物においては, 複数の劣化が同時に生じる場合(複合劣化)があり, 劣化が相互に関連することが既往の研究において報告されている<sup>2)</sup>。したがって, 単一の場合と異なる劣化進行を考える必要があるため, 本研究では中性化と塩害の複合劣化を取り扱うものとした。塩害劣化の場合において, 鋼材腐食と塩化物イオン量は関連性を有することが既往の研究において報告されており<sup>2)</sup>, 鋼材腐食量は塩化物イオン浸透状況より算定することとするが, 塩化物イオンの浸透は塩害単独と複合劣化で異なることが既往の研究で報告されていることから<sup>1)</sup>, 本研究ではまず複合劣化(塩害・中性化)での塩化物イオン浸透について評価を行った。結果を次節で示す。

表-1 対象構造物・中性化深さ

記号	構造	採取場所*1	試験項目	中性化深さ
A	PCT桁	海岸部(約10m)	中性化深さ	8.0mm
B-1	PCT桁 コンクリート 塗装施工済	海岸部(約50m)		3.4mm
B-2			4.6mm	
B-3			3.4mm	
B-4			2.2mm	
B-5			3.9mm	
			塩化物イオン量 (EPMA)*2	

\*1 ( ): 海岸線からの距離

\*2 表面からの各距離における塩化物イオン量を1~0.1mmピッチで計測,骨材の影響は除去し,モルタル部における塩化物イオン量として算出した

表-2 塩化物イオン量ピーク位置、傾向変化

記号	中性化深さ(a)	ピーク深さ(b)	(a)~(b)	傾向が変化する深さ(c)	(b)~(c)
A	8.0mm	11.0mm	3.0mm	20.0mm	9.0mm
B-1	3.4mm	13.3mm	9.9mm	---	---
B-2	4.6mm	13.0mm	8.4mm	---	---
B-3	3.4mm	9.8mm	6.4mm	---	---
B-4	2.2mm	14.0mm	11.8mm	22.0mm	8.0mm
B-5	3.9mm	13.6mm	9.7mm	27.0mm	13.4mm
平均	---	---	---	---	10.1mm

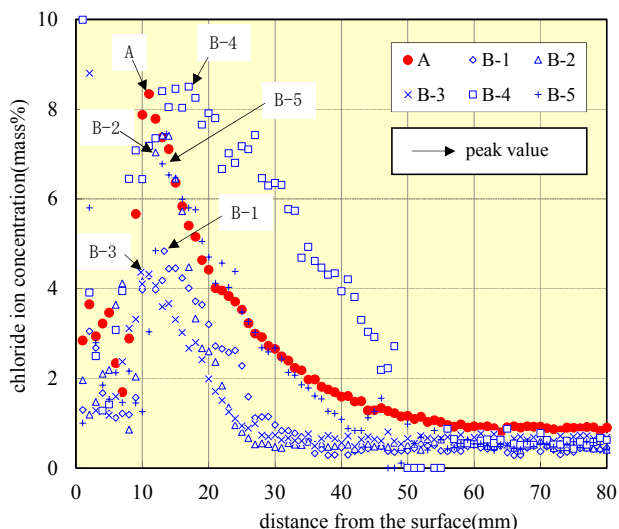


図-1 塩化物イオン量計測結果

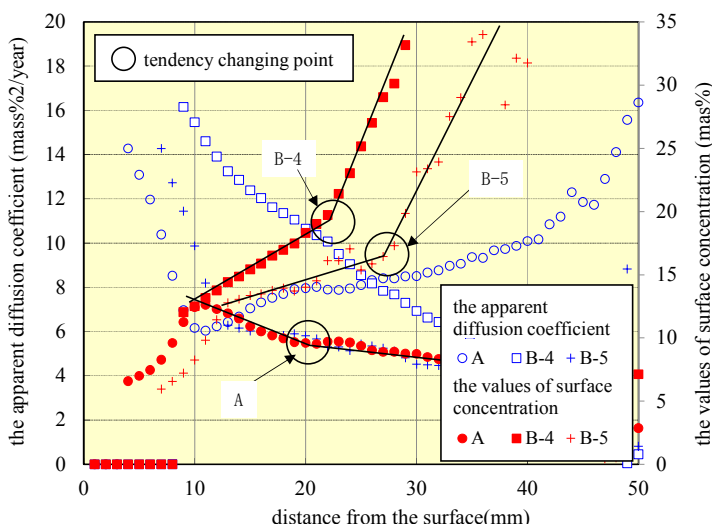


図-2 見かけの拡散係数と表面塩化物イオン量

## 2.2 実構造物調査

日本国内の海岸部に位置するPC構造物より採取した供試体について、中性化進行状況および塩化物イオン量の計測を行った。構造物の位置、中性化の進行状況を表-1に、塩化物イオン測定結果を図-1に示す。いずれの構造物も飛来塩分の影響を受ける場所に位置しており、構造物表面からの塩化物イオン浸透、拡散および、中性化の進行に伴う塩化物イオンの濃縮が確認された。

## 2.3 複合劣化の評価

いずれの結果においても、表面部よりも内部の塩化物イオン量が高い値(図-1:矢印箇所)となっていることから、複合劣化時の塩化物イオン浸透に関して、次節で実施する構造物性能評価の条件設定のため塩化物イオン拡散状況について考察を行った。

構造物表面付近は、中性化の影響により中性化の影響を受けていない箇所と異なる拡散状況を示すと考え、計測により取得したデータのうち、構造物表面より一定の距離における計測データを除外し、Fickの第2方程式による塩化物イオンの拡散式に基づく塩化物イオンの拡散状況を分析した。図-2に結果の一部を示す。図-2においては、横軸に示す表面からの距離の範囲内に含まれる計測結果を考慮せずに見かけの拡散係数、表面塩化物イオン量を算出している。

構造物Aでは概ね中性化深さ付近、構造物Bでは中性化深さより6~12mm程度深い位置で塩化物イオン量が最大となっており、構造物Aは中性化の影響、構造物Bは中性化およびコンクリート塗装により塩分の供給が遮断された状態で拡散した影響と考える。また、図-2により、構造物Aでは表面からの距離20mm付近、構造物B-4では22mm付近、構造物B-5では27mm付近と、塩化物イオンの最大値位置から約10mmの位置で表面塩化物イオン量の傾向が変化している。

塩害・中性化の複合劣化進行の評価は、厳密には濃度拡散や水分移動の影響などを踏まえて行うこ

とが必要と考えるが、本論文では劣化予測の不確実性が設計実務における構造性能評価に及ぼす影響を評価することが主目的であるため、複合劣化評価は、ここでは簡易な手法とする。簡易な手法として、一定範囲の計測データを除外した計測データによる、Fickの第2方程式による塩化物イオンの拡散式に基づく塩化物イオンの拡散状況を分析した結果により塩化物イオンの浸透予測を行うこととする。

### 3. 構造性能評価

本節では複合劣化を生じたPC構造物における構造性能評価結果の例を示す。対象構造は塩害環境に位置する竣工後35年経過した支間長18.8mのPCT桁とする。主桁断面は竣工図書により図-3とし、塩化物イオン量の浸透状況は、鋼材腐食の影響が顕著に現れると考えられる、内部への塩化物イオン浸透量の多い構造物B-4とし、構造物B-4と同じくコンクリート塗装が施された構造を想定する。この想定構造における耐荷性能が鋼材腐食により低下することを考え、死荷重、活荷重に対する耐荷性能として破壊抵抗曲げモーメントにより構造性能評価を実施した。

#### 3.1 検討条件

構造性能評価における条件は、材料性能のバラツキのほか、構造寸法、鋼材配置に関しても、施工時の許容誤差より設定するバラツキを有するものとして設定した。表-3に検討条件を示す。また、塩害による塩化物イオンの拡散条件は表-4に示す全3ケースとした。設定における条件、仮定は次の通り。(a)：塩化物イオン量のピーク位置より表面側は中性化や表面における塩化物イオンの洗い流しなど拡散以外の要素が想定されることから、ピーク深さ14mmまでの範囲を除外して算出。(b)：表-2に示す平均値より、傾向が変化する深さとして(a)+10mmの範囲を除外して算出。(c)：(a)、(b)と異なる条件として(b)よりもt=65年時点で20%鋼材の断面減少量が生じる状態を仮定して値を設定。

#### 3.2 検討結果

上記の条件で構造寸法、材料性能、劣化進行を設定(概ねの傾向を把握するため200ケース設定)し、構造性能の算出を調査時点から2.5年間隔で行った(以降、Case0)。なお、構造性能算定における鋼材の断面減少量は、既往文献における、腐食ひび割れ発生以降の鋼材腐食速度の予測式より算出した<sup>3)</sup>。また、鋼材腐食を生じたPC部材の破壊抵抗曲げモーメントは、厳密には付着性能や材料性能の変化などについて考慮する必要があるが、それらによる影響は今後の検討事項とし、ここでは道路橋示方書・同解説(平成24年3月)Ⅲ-4.2.4節に基づき算出した。

構造性能の算出結果を図-4に示す。赤色は一般的な手法(表-3のバラツキを考慮しない、(a)の塩化物イオン拡散条件)と設定し算出した構造性能(以降、Case1)を、青色は構造性能の非超過確率が5%以下である構造性能(以降、Case2)を示し、構造性能の制限値を“Limit(1)”として示した。ここで、“Limit(1)”は終局曲げモーメントで、道路橋示方書・同解説(平成24年3月)Ⅲ-2.2節に基づき算出した。

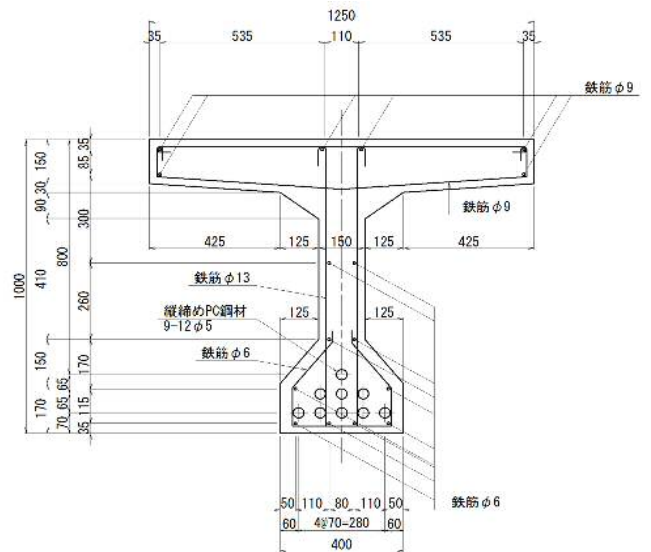


図-3 主桁断面

表-3 検討条件(1)

	平均	標準偏差
$\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	35	3
$\sigma_{pu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	1750	20
構造寸法(mm)	竣工図値	10
鋼材配置(mm)	竣工図値	5
鋼材断面積(mm <sup>2</sup> )	235.7	
$\sigma_{pe}$ (N/mm <sup>2</sup> )	833	10

表-4 検討条件(2)

	(a)	(b)	(c)
見掛けの拡散係数(mm <sup>2</sup> /年)	14.66	8.74	18.69
表面塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	14.22	27.85	9.55
初期塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	0.60	0.60	0.60

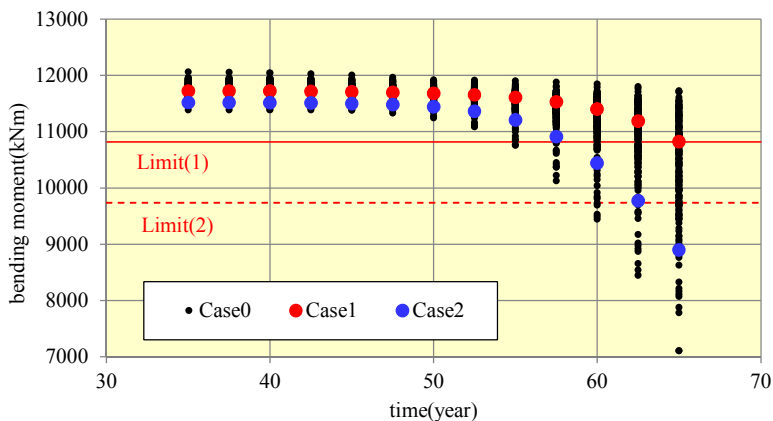


図-4 構造性能評価結果

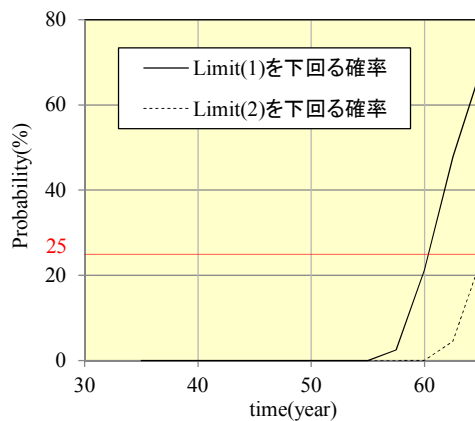


図-5 構造性能を満足しない確率

Case1ではt=65年においても構造性能の制限値を下回らないが、Case2ではt=57.5年以降制限値を下回る予測となる。この場合の維持管理対策としては、補修・補強のほか、荷重制限により構造性能制限値を下げる方法(A)、対象構造の重要性などを踏まえ、点検やモニタリングを適切に行ったうえで、構造性能の評価を見直す方法(B)が考えられる。(A)の例としては、荷重制限により活荷重を制限し、“Limit(1)”より小さい終局曲げモーメントとして構造性能の制限値を設定する方法が考えられる。この場合、例えば活荷重を85%に制限して構造性能の制限値を“Limit(2)”とすると、Case2ではt=62.5年以降制限値を下回る予測となる。また、(B)の例としては、構造性能の非超過確率を変更する手法が考えられ、“Limit(2)”に対しては、図-5のとおりt=65年時点まで性能を満足する構造性能の非超過確率は25%となる。今回試算した結果より、設計実務における一般的な手法として設定したCase1では十分な構造性能を有すると判断されるケースでも、実構造物が有する不確実性を考慮すると、構造性能を満足しない可能性があることが確認された。

#### 4. まとめ

本研究で行った試算の結果、複合劣化の影響や初期性能などの不確実性により、構造性能の予測結果は大きなバラツキを有することが確認された。不確定要素を多く保有する実構造物の劣化予測においては、通常考え得る事項のほか、実構造物の評価を行う際に特有な不確実性についても評価することで、より現実に近い構造性能を評価でき、効果的な維持管理実施につながると考える。

今後、今回示した構造性能評価における複合劣化の評価に関しては、濃度拡散や水分移動の影響などを考慮したモデルに、また、構造性能評価に関しては、構造性能算出値の確からしさの確認のほか、不確実性として、設計実務において想定されうる事項を加え、RC・PC構造の構造性能を評価する手法を提案する予定である。なお、今回の試算における構造性能のバラツキは初期性能のバラツキのほか、鋼材かぶりの差による塩化物イオン浸透の差が大きく影響していると考えられ、今後、構造性能のバラツキに対する各要素の及ぼす影響についても分析する予定である。

#### 参考文献

- 1) 委員会報告「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23 No. 1, 2001年, pp. 2-3.
- 2) 委員会報告「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会」, 日本コンクリート工学会, 1998年, pp. 11.
- 3) 国土技術政策総合研究所資料「道路橋の計画的管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)—」, 国土技術政策総合研究所, 2009年, pp. 28-29.