

論文の内容の要旨

氏名：飯土井 剛

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：塩害環境におけるPC道路橋の性能・品質確保の重要性と水に着目した合理的維持管理法の提案

我が国のインフラは、その多くが高度経済成長期以降に整備されており、今後、建設後50年以上が経過する道路橋の割合は加速度的に高くなる見込みである。我が国の厳しい財政状況や人口減少、少子高齢化の進展といった社会構造の変化を見据えると、インフラ施設には、ライフサイクルを通じて施設の性能を適切かつ合理的に確保することが求められる。

本研究の対象である東北地方日本海沿岸は、道路構造物にとって極めて厳しい塩害環境に曝される地域である。この地域で1965年頃に整備されたPC道路橋は竣工後わずか25年程度で著しい塩害劣化により架替えに至った。このようなことから1997年以降のPC道路橋の架替えにあたっては、設計・施工において十分な塩害対策が導入されたが、設計思想を担保する施工が実現せず、要求性能を満足しない上部構造もみられた。この上部構造は一般のPC仕様のコンクリートに比べコンクリートの品質が低く、水の存在が構造物の耐久性に大きく影響することがわかっている。一方で、現在の塩害の影響を受ける道路橋に対する各種の点検要領では、近接目視による点検が基本となっており、損傷が顕在化して初めて対策が検討される、いわゆる事後維持管理にならざるを得ない状況となっており、合理的な維持管理法が確立されていない。

このようなことから、本研究ではこれまでの塩害橋の維持管理において重視されてきた塩化物イオンの浸透に加え、水の作用に着目した診断と健全度の評価に基づいた維持管理法を提案し、これらを通じて設計・施工・維持管理にわたって性能と品質を確保するための方法論を構築することを目的とした。

本研究の新規性はその方法論にあり、有用性は構築した方法論が類似の塩害環境下のPC道路橋に広く応用できる点にある。

本論文を要約すると以下のとおりである。

第1章は「序論」であり、研究の背景と目的を示した。我が国における道路橋の老朽化と、財政状況や少子高齢化による社会構造の変化から、および、塩害の影響を受けるコンクリート構造物の設計・施工、塩害橋の維持管理の現状から、設計・施工・維持管理にわたる性能・品質確保の重要性を示し、本研究の目的を明らかにした。

第2章の「既往の研究及び事例」では、塩害環境において早期劣化に至った道路橋の事例を紹介し、当時の設計思想から、設計・施工における塩害対策の重要性を示すとともに、水の影響に対する評価と維持管理の方法を課題として示した。

早期劣化に至った道路橋は、当時の思想として、設計・施工において塩害に対する配慮がなされていなかったことが早期劣化に至った要因となっていることが示唆された。

また、研究の対象とした道路橋は水の存在が耐久性に大きく影響するが、これまでの塩害に対する維持管理では、飛来塩分の浸透によるコンクリート部材内部の塩化物イオン量が重視されており、コンクリートの含水状態に着目した評価はなされていない。さらに、これまでは作用としての水への対策は、コンクリートに浸透する水を防ぐ対策が基本とされており、高い含水状態におかれるコンクリート部材内部の水の排出に着目した対策法は示されていない。

このようなことから本研究では、コンクリートの含水状態に着目した評価、および水の排出に着目した対策と維持管理法の構築を課題とした。

第3章の「厳しい塩害環境において架替え後15年が経過したPC道路橋の詳細調査」では、架替え後15年が経過した不本意な施工によって性能の低下が疑われる道路橋（K橋）について、水の影響に着目した詳細調査の結果と健全度評価、およびこれに基づき必要となる補修対策を示した。

K橋は、外気温が30℃の夏場に施工されたことによりコンクリートにこわばりを生じ良好な充填作業ができなかったとされることで、コンクリートに豆板や内部空隙、コールドジョイントを生じたほか、コンクリートの表層の品質に大きなばらつきが生じている。また、箱桁内部を密閉したことや、竣工直後に表面被覆材を施工したことで、コンクリートが高い含水状態におかれ、骨材を核とするコンクリートの剥離が無数に生じた。さらに、一部でエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食が生じていた。これは施工時の損傷による影響が大きいと推定しているが、コンクリートの高い含水状態が腐食を促進した要因と考えられた。

骨材の無数の剥離やエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食は、水の存在が劣化の進行に影響することから、水の浸透に対するコンクリートの品質を透気試験（Torrent法）により評価し、コンクリートの含水状態を電気抵抗式モルタル水分計により調査した。

また、コールドジョイントや豆板・空洞の存在は上部構造の耐荷性に影響すると考えられたことから、衝撃振動試験と強制加振試験により上部構造の剛性を評価した。

これらの調査・試験の結果から、耐久性を確保するため水の作用に着目した対策が必要とされ、箱桁内部の骨材の膨張を抑制するため橋面の防水工に加えて除湿機による箱桁内部の除湿を行う事とした。また、水の排出を妨げずにエポキシ樹脂塗装鉄筋に対する塩分の浸透を抑制するため、下床版下面に含浸材（5種類）を施工することとした。

本章で得られた知見を要約すれば、以下のようになる。

- 1) K橋では架替えにあたり十分な塩害対策が採られたが性能の低下が疑われる異常が確認されている。これらは不本意な施工が影響したものであり、設計で求めた性能を担保するためには、設計思想を実現するための施工が極めて重要である。
- 2) K橋の上部構造のコンクリートは、一般のPC仕様のコンクリートに比べ品質に劣り、高い含水状態におかれていることが確認された。本橋のように水の存在が性能の低下に大きく影響する構造物については、従来の塩化物イオンの浸透のみならず、コンクリートの含水状態に着目した評価が重要である。
- 3) K橋の上部構造のように水の存在が性能の低下に大きく影響する構造物では、水の浸入を防ぐ防水対策に加えて、含水状態の高いコンクリート部材の水分の排出に着目した対策が重要である。

第4章の「前回調査から7年が経過したPC道路橋の再詳細調査」では、K橋の補修対策の効果を検証するため、対策実施から7年が経過した時点での詳細調査の結果、および今後の性能を確保するための水の影響に着目した維持管理法の具体を示した。

詳細調査では、温湿度測定結果による箱桁内部の湿度の推移を把握するとともに、コンクリート内部の含水率を測定し、橋面防水工による水の浸入防止と除湿機による箱桁内部の除湿による水分の排出の効果を検証した。

また、下床版に施工した5種類の含浸材施工箇所については、塩化物イオンの浸透状況に加えコンクリートの含水状態を調査し、現時点での含浸材の効果を検証した。

さらに、前回調査と同様の衝撃振動試験、及び強制加振試験により、劣化の進行による剛性低下の有無を評価した。この結果から、今後の性能を確保するための水の影響に着目した維持管理法の具体を示した。

本章で得られた知見を要約すれば、以下のようになる。

- 1) K橋のように箱桁内部が湿潤状態の上部構造は、除湿機により除湿することで、コンクリート部材内部の極めて高い含水状態を一般的な構造物のレベルにまで低下できる。その際、箱桁内部の温湿度環境の継続的な監視は、コンクリート部材の含水状態の変化や水分浸透の有無を判断するための一指標となる。
- 2) K橋のように極めて厳しい塩害環境下におかれる構造物でも、箱桁外面の下床版に施工した含浸材はいずれのタイプでも竣工後6年が経過した時点では塩分の浸透が抑制されていることを確認できた。また、コンクリート部材内部の含水率も低下していることから、水分の排出を妨げていないことも確認できた。K橋のようにコンクリート部材内部の含水率が高く、水の存在が劣化の進行に大きく影響する構造物に対しては、含浸材は効果的な対策であるが、今後の塩化物イオンの浸透量と含水状態の推移を把握することが重要である。

3) K 橋のように、不本意な施工によって性能の低下が疑われる構造物では、適切な診断と対策を講じることで長期にわたって性能を維持することが重要である。そのためには早期に構造物の状態を把握し、合理的な維持管理法を構築することが重要である。

第 5 章の「厳しい塩害環境における同種の PC 道路橋に対する詳細調査」では、同地域において施工に問題がなかった同種の PC 道路橋で実施した詳細調査結果を示し、K 橋の対策工の効果を改めて検証するとともに、これら施工に問題がなかった PC 道路橋の今後の合理的な維持管理法を示した。

施工に問題のなかった同一環境におかれる同種の PC 道路橋のコンクリートの含水状態を調査し、これと比較することで、K 橋で採られた補修対策の効果と評価の妥当性を検証した。

また、十分な塩害対策が採られた同種の PC 道路橋の上部構造は表面保護塗装が施されていないため飛来塩分の影響を受ける。したがって、現状のコンクリートの品質と塩化物イオンの浸透量を調査し、将来予測をふまえた維持管理法を構築した。

本章で得られた知見を要約すれば、以下のようになる。

- 1) 対策実施後の K 橋の含水状態は、施工に問題のなかった同種の PC 道路橋と同程度にまで低下しており、K 橋で実施した防水と排水対策は現時点では一定の効果が得られていることが確認できた。K 橋は、現在の含水状態を維持することで、水の作用による耐久性の低下を回避することができる。
- 2) 同種の PC 道路橋のように施工によって品質が大きく低下していない構造物は、適切な診断と対策を行うことで長期にわたる性能が確保できる。これを実現するためには、塩化物イオンの浸透のみならずコンクリートの含水状態に着目した診断を行うことが重要である。
- 3) 同種の PC 道路橋に対する詳細調査の結果、耐久性に影響する恐れのあるコンクリートの品質のばらつきがみられた。コンクリートの品質は施工の影響に大きく左右されることから、供用後早期に構造物の詳細調査を実施し、設計思想を担保するコンクリートの性能・品質が確保されているかを把握することが重要である。これにより低コストにして合理的な維持管理が実現できる。

第 6 章の「結論」では、塩害環境における PC 道路橋の設計・施工・維持管理にわたる性能と品質を確保するための方法論を示し、今後の課題と展望として凍結防止剤散布下のコンクリート構造物で実施すべき水に着目した維持管理法を提案した。