

FRPによる道路橋更新床版の高耐久化に関する研究

中日本高速道路(株) 正会員 博士(工学) ○酒井 秀昭

Abstract : Japanese expressway companies decided to renew the reinforced concrete slab of the steel bridge with deterioration advanced to the precast prestressed concrete slab which is durable and can shorten the construction period. The renewed slab was requested 100 years for design service life of shown in the specifications for highway bridges. The purpose of this study is to investigate the applicability of fiber reinforced polymers as a substitute for reinforcing bars and prestressing steel in order to ensure the durability of the slab to be used in coastal areas and anti-freezing agent spraying areas against chloride attack. This study was conducted by estimating the influence of chloride attack on the renewal slab and comparing the life cycle cost when adopting fiber reinforced polymers to the slab.

Key words : Renewal slab, Prestressed concrete slab, Fiber reinforced polymers, Chloride attack

1. まえがき

都市間高速道路会社においては、劣化が進行した鋼橋の鉄筋コンクリート（以下、RCという）床版を耐久性が高く工事期間の短縮が可能なプレキャストのプレストレストコンクリート（以下、PCという）床版に更新する床版更新事業を実施中であり^{1), 2)}、とくに塩害による影響が大きい箇所においては、塩化物イオンによる鋼材腐食の抑制が可能なエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用や、コンクリートの塩化物イオン濃度に対する拡散係数の低下が可能な高炉スラグ微粉末などの混和材が使用されている。しかしながら、既設鋼橋のRC床版の全塩化物イオン濃度分布の調査結果からは、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が10kg/m³を超える箇所もあり²⁾、エポキシ樹脂塗装鉄筋や高炉スラグ微粉末の使用のみでは、設計供用期間中の鋼材の腐食を防止することが困難なケースも想定される。また、床版にひび割れが発生する場合は、塩化物イオンがひび割れから侵入し鋼材位置での塩化物イオン濃度が上昇することも想定される。

「更新用プレキャストPC床版技術指針」³⁾（以下、「更新床版技術指針」という。）においては、コンクリートの配合や材料および鋼材の防錆による対策を行った場合でも鋼材腐食に対する照査結果から鋼材腐食が生じる場合は、繊維強化ポリマー（“Fiber Reinforced Polymers” 以下、「FRP」という。）の補強材（鉄筋の代替）や緊張材（PC鋼材の代替）を用いることとしている。しかしながら、FRPのPC橋への適用は、一般の鋼材に比べて高価であることなどから、その事例がきわめて少なくなっており、床版更新事業へFRPを適用するためには、その適用範囲や経済性などを明らかにする必要がある。

本論文においては、床版更新事業で採用されているプレキャストPC床版を対象に、鉄筋やPC鋼材とFRPの適用範囲や経済性について検討を行った。

2. プレキャストPC床版の塩害の影響について

2. 1 検討方法

プレキャストPC床版の塩害の影響については、「プレキャストPC床版による道路橋更新設計施工要領」⁴⁾（以下、「更新床版設計施工要領」という。）を参考に以下に示す方法により検討を行った。

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査は、式(1)に示すように、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0以下であることを確かめることにより行う。 γ_i は、1.0とする。

$$\gamma_i = \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 C_{lim} (kg/m³) は、早強ポルトランドセメントを用いる場合は式(2)で、高炉スラグ微粉末を結合材の50%使用する場合は高炉セメントB種相当として式(3)を、同様にフライアッシュを結合材の15%使用する場合はフライアッシュセメントB種相当として式(3)を用いて算定する。

$$C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6 \quad (2)$$

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad (3)$$

鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d は、普通鉄筋を用いる場合は式(4)で、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる場合は式(5)で算定する。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (4)$$

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c_d}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right\} + C_i \quad (5)$$

ここに、 C_0 ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)。

t ：塩化物イオン濃度に対する耐用年数 (年)。

γ_{cl} ： C_d のばらつきを考慮した安全係数で1.3とする。

D_d ：塩化物イオンの侵入に対する設計拡散係数 (cm²/年) でひび割れが発生しない場合は式(6)で算定する。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k \quad (6)$$

γ_c ：コンクリートの材料係数で、床版上面なので1.3とする。

D_k ：コンクリートの塩化物イオン濃度に対する拡散係数の特性値 (cm²/年) で、早強ポルトランドセメントを用いる場合は普通ポルトランドセメントの式(7)を準用⁴⁾し、高炉スラグ微粉末を結合材の50%使用する場合は高炉セメントB種として式(8)を、同様にフライアッシュを結合材の15%使用する場合はフライアッシュセメントB種として式(9)を用いて算定する。

$$\log_{10} D_k = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (7)$$

$$\log_{10} D_k = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (8)$$

$$\log_{10} D_k = 3.0(W/C) - 1.9 \quad (9)$$

D_{epd} ：エポキシ樹脂塗装内への塩化物イオンの侵入を拡散現象と見なした場合の塩化物イオンの侵入に対する見掛けの拡散係数の設計用値 (cm²/年) で、 2.0×10^{-6} cm²/年とする。

c_d ：かぶりの設計値 (mm)。

c_{ep} ：エポキシ樹脂塗装の厚さの最小値あるいは保証値 (mm) で180 μ mとする。

C_i ：初期塩化物イオン濃度 (kg/m³) で、0.3kg/m³とする。

検討にあたっては、プレキャストPC床版のかぶりの設計値を35mmとし、水セメント比 (水結合材比) は、コンクリートの設計基準強度が一般に50MPaであり、水セメント比は一般に0.35~0.40程度であるので、0.4とする。セメント種別としては、早強セメントを結合材として用いるケース (ケースN)、早強セメントの50%を高炉スラグ微粉末に置換して結合材として用いるケース (ケースB)、早強セメントの15%をフライアッシュに置換して結合材として用いるケース (ケースF) の3種類とした。

2. 2 ひび割れを考慮しない場合の塩化物イオンの鋼材腐食に対する照査

凍結防止剤を多く散布する地域や海岸部に近接し飛来塩分量が多い地域の更新床版においても、設計供用期間中(100年)に塩害に起因して鋼材が腐食しない性能を有する必要がある。この性能を評価するため、ひび割れが発生しないことを前提として、防錆処理をしていない普通鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した場合について、鋼材腐食が生じないコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 の限界値を式(4)および(5)を用いて算定した結果を表-1に示す。

中央自動車道、北陸自動車道、名神高速道路の凍結防止剤散布地域の平成27年度から平成28年度に実施した212橋1209個の全塩化物イオン量調査結果によれば、床版コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 は、平均値1.11kg/m³、標準偏差1.26kg/m³となっている⁵⁾。NEXCO中日本においては、このデータを標準偏差の3倍までのばらつきを考慮して算定すると4.88kg/m³となるので、全塩化物イオン量の調査が未実施な場合は、コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 を5kg/m³として塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査を実施することとしている⁵⁾。したがって、NEXCO中日本が管理する橋梁床版においては、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用すれば、早強セメントのみを使用した場合においても、凍結防止剤に起因する塩害が生じる可能性はきわめて低い。

しかし、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が10kg/m³を超える箇所もある²⁾ことから、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用に加えて高炉スラグ微粉末などの混和材を併用することが望ましい。

表-1 塩化物イオン濃度 C_0 の限界値 (ひび割れ無)

ケース	使用結合材	C_0 の限界値 (kg/m ³)	
		普通鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋
N	早強セメント	1.64	6.00
B	早強セメント+高炉スラグ	3.14	14.8
F	早強セメント+フライアッシュ	2.16	8.16

2. 2 ひび割れを考慮する場合の塩化物イオンの鋼材腐食に対する照査

床版更新事業においては、プレテンション工法により橋軸直角方向をPC構造として、橋軸方向をRC構造としている。これは、工期の短縮、橋軸方向へのPC鋼材の配置に伴う床版厚の増加による死荷重の増大の抑制、工事費の削減を図ることを目的としている。したがって、橋軸直角方向は、プレストレスによる圧縮力によりひび割れの発生を抑止することが可能であるが、橋軸方向はRC構造のため、コンクリートの収縮やセメントの水和に起因するひび割れや活荷重によるひび割れが発生する可能性がある。とくに、図-1に示す床版相互の橋軸方向の接合部は、接合部のコンクリートがプレキャストPC床版架設後に施工されるため、コンクリートの収縮や活荷重によりひび割れが発生する可能性がある。また、図-2に示す連続桁の中間支点近傍は、活荷重により負の曲げモーメントが作用し、鋼桁と床版とが合成桁と同様な挙動を示すため、床版全体に引張応力が作用してひび割れが発生する可能性がある。

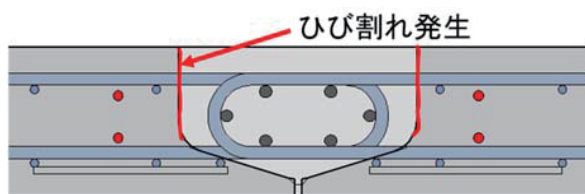


図-1 床版相互の橋軸方向接合部

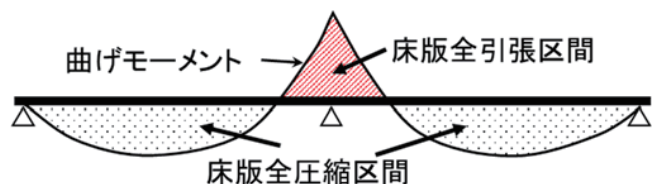


図-2 中間支点近傍の負の曲げモーメント区間

更新床版設計施工要領によれば、床版上面にひび割れが発生する場合は、式(4)および(5)に示したFickの第2法則に基づく拡散方程式の解による推定は現実的ではないとの意見がある。これを考慮して本研究では、橋軸方向にプレストレスを導入していない床版の床版相互の橋軸方向の接合部および主桁作用によりひび割れが発生する連続桁の中間支点近傍について、コンクリート表面から塩化物イオンがひび割れに沿って侵入し、コンクリート表面の塩化物イオン濃度と鉄筋表面（エポキシ樹脂塗装鉄筋においてはエポキシ樹脂表面）の塩化物イオン濃度とが同一となると仮定して、鋼材腐食が生じないコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 の限界値を求めることとした。 C_0 の限界値は、式(4)および(5)を用いて c_d を0として算定した。算定結果を表-2に示す。

表-2から分かるように、床版上面にひび割れが発生する場合は、本研究の仮定によれば、塩化物イオン濃度 C_0 の限界値が大幅に低下し、鋼材が腐食する可能性が増大するため、FRPやステンレス鋼材などの塩化物イオンに対して高い耐久性を有する材料を使用する必要がある。

表-2 塩化物イオン濃度 C_0 の限界値（ひび割れ有）

ケース	使用結合材	C_0 の限界値 (kg/m ³)	
		普通鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋
N	早強セメント	1.02	2.98
B	早強セメント+高炉スラグ	1.35	3.68
F	早強セメント+フライアッシュ	1.35	3.68

3. FRPの活用による更新床版の高耐久化

3.1 FRPについて

橋梁で鉄筋（補強材）の代替として使用実績がある主なFRPとしては、ガラス繊維強化ポリマー（GFRP）、アラミド繊維強化ポリマー（AFRP）、炭素繊維強化ポリマー（CFRP）などがあるが、PC鋼材（緊張材）の代替として可能なものとしてはAFRPおよびCFRPがある。本研究においては、CFRPは導電性があるため、鋼と混合して使用すると電気化学的腐食が発生するおそれが高いため、鋼と混合して使用することが可能な非導電性のAFRPを検討対象とした。

3.2 AFRPを更新床版へ適用した場合の工費比較

AFRPは、鉄筋およびPC鋼材に比べて高価であるため、床版更新事業への適用にあたっては、以下に示す3案が考えられる。

- 1). 接合部の鉄筋およびループ鉄筋をAFRPで代替
- 2). すべての鉄筋をAFRPで代替
- 3). すべての鉄筋およびPC鋼材をAFRPで代替

既往の施工事例から、AFRPを床版更新事業へ適用する場合のコストの例は表-3に示すとおりとなる。全体工事費は施工箇所等の条件により大きく変化するが、工費比較にあたっては、既往の発注工事の費用を参考に、全体の工事費を床版更新事業の対象となる床版面積で除して、床版1m²あたりの費用で比較した。

表-3に示したとおり、床版の費用は大きく増加するが、全体工事費では最大でも2割程度の増加となる。したがって、設計供用期間中に、塩化物イオンに起因して鋼材が腐食する場合で、供用中にさらなる床版の更新が必要となる場合は、FRPの適用について検討する必要性があるものと思われる。

表-3 AFRPを適用した場合の工費比較

適用方法	工事費 (千円/m ²)	比率
すべて鋼材	520	1.00
接合部鉄筋をAFRPで代替	550	1.06
すべての鉄筋をAFRPで代替	610	1.17
全鉄筋・PC鋼材をAFRPで代替	640	1.23

3. 3 AFRPを更新床版へ適用した場合のライフサイクルコストの比較

AFRPを床版更新事業へ適用した場合の初期費用(現時点での工費)は、表-3に示したとおり大幅に増加するためその採用は困難である。しかし、設計供用期間を100年とした場合のライフサイクルコストでは、鋼材の腐食に起因して供用中に床版の再更新が必要となる場合に、AFRPを適用した場合のほうが安価となる可能性がある。このため、本研究においては、下記の条件でライフサイクルコストの比較を行った。ライフサイクルコストの比較を表-4に示す。ライフサイクルコストの比較にあたっては、すべて鋼材を用いて現時点で更新する費用を1としてその比率で表した。

- 1). 再更新が必要な場合は、再更新時の費用を金利や建設費の上昇を考慮して、現時点での価格に換算して比較する。
- 2). 供用中の維持管理費(点検などの費用)については、すべてのケースで同一と仮定し、費用比較から除外する。
- 3). 現時点での価格に換算する際の金利および建設費の上昇率については、過去の推移を考慮して、おのおの4%および2%に仮定した。
- 4). 再更新が設計供用期間中に1回必要な場合は、当初の更新から50年後に、2回必要な場合は、当初の更新から33年後および66年後に再更新を実施すると仮定した。
- 5). 鋼材の一部またはすべてをFRPで代替した場合は、設計供用期間中に再更新が不要であると仮定した。

表-4から分かるように、厳しい腐食性環境下で塩化物イオンに起因して設計供用期間中に鋼材が腐食して床版の再更新が必要となる場合は、AFRPを適用して設計供用期間中に再更新が必要とならない場合に比較してライフサイクルコストが増加する。したがって、塩化物イオンに起因して設計供用期間中に鋼材が腐食して床版の再更新が必要となる場合は、FRPなどの塩化物イオンに対して高耐久性を有する補強材や緊張材の適用を検討する必要があるものと推察される。

表-4 ライフサイクルコストの比較

適用方法	更新費	再更新	
		1回	2回
すべて鋼材	1.00	1.37	1.79
接合部鉄筋をAFRPで代替	1.06	—	—
すべての鉄筋をAFRPで代替	1.17	—	—
全鉄筋・PC鋼材をAFRPで代替	1.23	—	—

4. 鉄筋(補強材)の使用区分

4. 1 ひび割れを考慮しない場合の鉄筋(補強材)の使用区分

塩化物イオンの鋼材腐食に対する照査結果(表-1)をもとに、床版にひび割れが発生しない場合の鉄筋(補強材)の使用区分についてとりまとめると図-3のとおりとなる。ただし、図-3は、プレキャストPC床版のかぶりの設計値を35mmとし、水セメント比(水結合材比)を0.4として算定した。

図-3から分かるように、ひび割れを考慮しない場合においても、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が多い橋梁については、エポキシ樹脂塗装鉄筋やFRPなどの補強材を使用する必要がある。

ケース	使用結合材	表面塩化物イオン濃度 C_0 kg/m ³									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	早強セメント	鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋			FRPなど					
B	早強セメント+高炉スラグ	鉄筋		エポキシ樹脂塗装鉄筋							
F	早強セメント+フライアッシュ	鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋					FRPなど			

図-3 ひび割れを考慮しない場合の補強材の使用区分

4. 2 ひび割れを考慮する場合の鉄筋（補強材）の使用区分

塩化物イオンの鋼材腐食に対する照査結果（表－2）をもとに，図－1に示した床版相互の橋軸方向の接合部や図－2に示した連続桁の中間支点近傍などのように，床版にひび割れが発生する可能性がある場合の鉄筋（補強材）の使用区分についてとりまとめると図－4のとおりとなる。

図－4から分かるように，床版にひび割れが発生する場合は，コンクリート表面の塩化物イオン濃度が比較的少ない箇所においても，塩化物イオンによる鋼材腐食のおそれがあるので，エポキシ樹脂塗装鉄筋やFRPなどの補強材を使用する必要がある。

ケース	使用結合材	表面塩化物イオン濃度 C_0 kg/m ³									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	早強セメント	鉄筋	エポキシ	FRPなど							
B	早強セメント+高炉スラグ	鉄筋	エポキシ	FRPなど							
F	早強セメント+フライアッシュ	鉄筋	エポキシ	FRPなど							

図－4 ひび割れを考慮する場合の補強材の使用区分

5. まとめ

本研究は，床版更新事業で実施されているプレキャストPC床版を対象に，鋼材とFRPの適用範囲や経済性について検討を行ったものである。本研究の検討結果は，以下のとおりである。

- 1). ひび割れが発生する可能性が高い床版については，塩化物イオンの侵入によりエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用したとしても，表－2に示したとおり鋼材が腐食する可能性がある。
- 2). 表－4に示したとおり鉄筋やPC鋼材の代替としてAFRPを用いた場合の工費の試算結果によれば，設計供用期間中に床版の鋼材が腐食するような厳しい腐食性環境下においては，FRPを積極的に使用することによりライフサイクルコストの削減を図ることができる。
- 3). FRPの床版への適用にあたっては，図－3および図－4に示したように，補強材の使用区分を明らかにすることにより，耐久性の向上やライフサイクルコストの削減が可能となる。

6. あとがき

FRPを床版に適用した場合は，塩化物イオンによる鋼材の腐食が生じないため高い耐久性を付与することが可能となる。床版更新事業で更新された床版が塩害により再更新が必要となるような環境下においては，FRPを用いた場合には鋼材を用いた場合よりライフサイクルコストの低減が可能となる。したがって，今後は，耐久性確保のためにFRPの適用範囲の拡大が必要となる。

参考文献

- 1) 広瀬，萩原，本間，長田，芦塚：高速道路における更新事業の取組み，第45回PC技術講習会，プレストレストコンクリート工学会，pp. 45～66，2017. 6
- 2) 池田，酒井，寺田，渋谷：PC橋の維持管理の規準に関するPC工学会の取組み，第45回PC技術講習会，プレストレストコンクリート工学会，pp. 95～116，2017. 6
- 3) プレストレストコンクリート工学会：更新用プレキャストPC床版技術指針，2016. 3
- 4) プレストレストコンクリート工学会：プレキャストPC床版による道路橋更新設計施工要領，2018. 3
- 5) 若林 大：更新床版の凍結防止剤による塩害に対する照査方法，プレストレストコンクリート，Vol160，No. 1，pp. 51～55，2018. 1