

報告

橋面コンクリート舗装を既設橋へ適用した場合の 床版耐荷力・疲労耐久性向上効果の試算

東洋平*, 安井亨**, 橋本雅行***, 三田村浩****, 岸良竜*****

* パシフィックコンサルタンツ(株) 東北交通基盤事業部 (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区1-1-9)

** (株)エイト日本技術開発 橋梁事業部 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-5-15)

*** (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大渕3154)

**** 博(工), 株式会社サンブリッジ (〒001-0025 札幌市北区北25条西4-1-26)

***** 博(工), 太平洋セメント(株) 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

橋面コンクリート舗装は、鋼橋におけるRC床版の長寿命化を目指す補修・補強工法であり、2020年土木学会よりガイドラインが発刊された。本稿は、過去の道路橋示方書に準拠し復元したRC床版に橋面コンクリート舗装を適用した場合、圧縮強度や施工厚の違いが耐荷力・疲労耐久性に及ぼす影響を定量的に把握し、現行示方書の要求性能に対する補強効果の傾向を把握する事を目的に、試算検討したものである。

キーワード：橋面コンクリート舗装、床版耐荷力、押抜きせん断耐力

1. まえがき

わが国における橋梁の橋面舗装は、施工性や平坦性の確保からアスファルト舗装が標準的に採用されており、床版の損傷を加速させる水の浸入に対して数々の防水対策が取られてきている。しかし、床版への水の浸入は依然として完全には防ぎきれず、床版上面の砂利化は建設年次に関係無く発生している。また、舗装の打換え施工時に床版上面を切削する問題も発生している。一方で、米国では1970年頃より、物質浸透抵抗性の高いLMC(ラテックス改質コンクリート)などのコンクリート舗装を施工する工法が開発され、新設橋を含めて床版損傷を直接目視できる橋面コンクリート舗装が標準となっている。

上記の背景に加え、日本においても長期耐久性を有している橋面コンクリート舗装があること、および近年の材料技術の発展から、土木学会鋼構造委員会・道路橋床版の複合劣化に関する小委員会(委員長：大田孝二)では既設橋床版の長寿命化を目的に橋面コンクリート舗装を実橋試験施工し、2016年に「道路橋床版の橋面コンクリート舗装」¹⁾を成果としてとりまとめた。続く道路橋床版の点検診断の高度化と長寿命化技術に関する小委員会(委員長：橋吉宏)では、公募材料で共通試験を実施し、富山市で実橋試験施工を行って2020年に「道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装ガイドライン2020」²⁾(以下、ガイドライン)として出版した。

本報告は、ガイドラインに示される4つの要求性能、

すなわち、(1)床版の耐荷性・疲労耐久性の向上、(2)物質浸透抵抗性の向上、(3)走行性能、(4)床版との一体性、のうち(1)に着目し、実験的にその効果を確認している事例³⁾⁴⁾⁵⁾はあるものの、実橋梁で想定される条件での耐荷性・疲労耐久性の向上効果を整理するために、道路橋床版の設計の合理化と長寿命化技術に関する調査研究小委員会(委員長：東山浩士)において、代表的な現場条件をパラメータとして試算を行った結果を報告するものである。

2. 検討対象床版の設定

橋面コンクリート舗装は、原則、既設鋼道路橋における鉄筋コンクリート床版(以下RC床版と称す)を対象としており、本検討においては一般的な鋼鉄骨橋のRC床版を想定した。

鋼橋におけるRC床版設計は、表-1に示すとおり過去に多くの変遷を辿って現在に至っている。昭和15年鋼道路橋設計示方書案では、床版の最小全厚の規定、配力方向の断面力算出方法や配力鉄筋量の規定が無く、昭和31年鋼道路橋示方書案において、床版最小有効厚11cm、主鉄筋方向の曲げモーメント式や配力鉄筋量(主鉄筋の25%以上)などが定められた。床版厚は、昭和43年の暫定基準においてほぼ現在の式が示され、床版配力鉄筋方向の曲げモーメント式は昭和46年の建設省通達で示され、それらは昭和48年の鋼道路橋示方書で改定された。

本報告では、昭和53年の建設省通達・昭和55年道路

表-1 鋼道路橋 RC 床版設計基準の変遷

		Case-1	Case-2			Case-3			(Case-4)		(Case-5)	
		S15.6 鋼道路橋設 計示方書	S31.5 鋼道路橋設 計示方書	S39.6 鋼道路橋設 計示方書	S42.9建設 省通達	S43.5暫定 基準	S46.3建設 省通達	S48.4建設 省通達	S53.4建設 省	S55.2道路 橋示方書 / H2.2道路 橋示方書	H5.3通達、H6, H8, H14, H24, H29道路 橋示方書	
設 計 荷 重	1等橋	T13 (P=5.2)	T-20 (P=8)			(TT-43)			T-20 (P=8(9.6))		LB(P=10)	
	2等橋	T9 (P=3.6)	T-14 (P=5.6)			T-14 (P=5.6)			LA(P=10)			
	転圧機	17t (P=6t) 14t (P=5t)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
床版最小全厚	規定なし	有効厚11cm以上 (解説: 被り2.5cm鉄筋径13mmとすれば 最低床版厚14cmとなる)			t=3L+11>16cm 以上			$t_0=3L+11>16\text{cm 以上}$ $t=k_1 \cdot k_2 \cdot t_0$ k_1 :交通量係数, k_2 :付加曲げモーメント係数				
活荷重 曲げ モーメント	主筋方 向	単純梁計算(T荷 重は舗装厚の 分布幅考慮を 考慮した有効 幅を規定) $i=20/(50+L)$	$2 < L \leq 4$ $M=0.4 \times P \times (L-1) \times (1+i)/(L+0.4)$ $i=20/(50+L)$			$M=0.8 \times (0.12L+0.07) \times P$ 衝撃を含む						
	配力筋 方向	規定無し	規定無し			$M=0.8 \times (0.10L+0.04) \times P$ 衝撃を含む						
配力鉄筋量	規定無し	主鉄筋断面の25%以上	主鉄筋断面の70%以上			曲げモーメント式より算出						

橋示方書以降は、ほぼ現在に近い設計・配筋がなされたと判断し、それ以前の設計仕様を以下の3つのケースにわけて考えることとした。

Case-1：昭和15年鋼道路橋設計示方書

Case-2：昭和31年、昭和39年鋼道路橋示方書

Case-3：昭和48年道路橋示方書

3. 床版の復元と橋面コンクリート舗装の設定

上記3ケースにおいて、床版支間は2.5mと3.0mを考え、表-2に示す当時の設計条件で復元設計を行い床板の配筋を決定した。なお、床版は車両進行方向に直交する連続版の中間床版を想定し、輪荷重は地方道の2等橋に相当する荷重を載荷した。結果、床版厚は最小140mmから最大180mm、主鉄筋はいずれも径16mmの125～150mmピッチとなった。配力鉄筋はいずれも径13mmながら、125mmピッチで配置されるCase-3に対し、配力筋を主鉄筋の25%しか配置していないCase-1, Case-2は、300～350mmピッチと極端に少なくなった。

橋面コンクリート舗装厚は、当時の標準的なアスファルト舗装を置き換えると考え、表-3に示す1層30mm、50mmと2層60mm、80mmの4種類を設定した。橋面コンクリート舗装の設計基準強度は、ガイドラインに従い床版コンクリートと同等以上として24N/mm²と、ガイドラインの共通試験で使用したコンクリートの中でも代表的な60N/mm²を想定した。なお、ガイドラインには130N/mm²という更に効果の高い高強度のUHPFRCも実施されているが、本検討では割愛した。

上記より、全体検討ケース数として、復元床版3ケース×2支間=6ケースの床版設計と、復元床版3(ケース)×2(支間)×4(舗装厚)×2(強度)=48ケースの橋面コンクリート舗装による耐荷力・疲労耐久性を試算した。

表-2 復元床版の設計条件と計算結果

既設コントラクト床版復元設計条件			Case-1 (S15道示準拠)		Case-2 (S31,S39道示準拠)		Case-3 (S48道示準拠)		
	床版支間	mm	2,500	3,000	2,500	3,000	2,500	3,000	
	床版厚	cm	規定無し	11cm以上	t=3L+11>16cm 以上		t=3L+11>16cm 以上		
	輪荷重	ton	T9 (P=3.6)	T-14 (P=5.6)	T-14 (P=5.6)		T-14 (P=5.6)		
	活荷重 曲げ モーメント	主筋方 向	単純梁計算(T荷 重は舗装厚の 分布幅考慮を 考慮した有効 幅を規定) $i=20/(50+L)$	$2 < L \leq 4$ $M=0.4 \times P \times (L-1) \times (1+i)/(L+0.4)$ $i=20/(50+L) \leq 0.3$	$M=0.8 \times (0.12L+0.07) \times P$ 衝撃を含む	$M=0.8 \times (0.10L+0.04) \times P$ 衝撃を含む		$M=0.8 \times (0.12L+0.07) \times P$ 衝撃を含む	
		配力筋 方向	規定無し	規定無し	規定無し	$M=0.8 \times (0.10L+0.04) \times P$ 衝撃を含む		$M=0.8 \times (0.10L+0.04) \times P$ 衝撃を含む	
		配力鉄 筋量	規定無し	規定無し	主鉄筋断面の25% 以上	曲げモーメント式より 算出		$\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=80\text{kg/cm}^2$	
		コンクリート強度 許容曲げ圧縮 応力度	kg/cm ²	$\sigma_{ck}=180\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=60\text{kg/cm}^2$	$\sigma_{ck}=210\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=70\text{kg/cm}^2$	$\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=80\text{kg/cm}^2$		$\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=80\text{kg/cm}^2$	
		鉄筋許容 引張応力度	kg/cm ²	丸鋼想定 $\sigma_s=1200\text{kg/cm}^2$	丸鋼 $\sigma_s=1400\text{kg/cm}^2$	$\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=80\text{kg/cm}^2$		$\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3=80\text{kg/cm}^2$	
		床版厚	mm	140	150	160	170	160	180
	かぶり (路筋中心まで)	mm	30	30	35	35	40	40	
	純かぶり*	mm	20	20	25	25	30	30	
	主鉄筋	mm	φ16 ctc 125	φ16 ctc 150	φ16 ctc 150	φ16 ctc 125	D16 ctc 125	D16 ctc 125	
	主鉄筋 (異形棒鋼)	mm							
	配力鉄筋 (丸鋼)	mm	φ13 ctc 300	φ13 ctc 350	φ13 ctc 350	φ13 ctc 300	D13 ctc 125	D13 ctc 125	
	配力鉄筋 (異形棒鋼)	mm							
	ヤング係数比			15	15	15	15	15	
	コンクリート発生応力度	kg/cm ²	57	55	62	60	66	62	
	鉄筋発生応力度	kg/cm ²	1,046	1,184	1,343	1,245	1,246	1,295	

表-3 橋面コンクリート舗装厚と強度の設定

橋面コンクリート 舗装			Case-1 (S15道示準拠)	Case-2 (S31,S39道示準拠)	Case-3 (S48道示準拠)
	舗装厚	mm	30	30	30
			50	50	50
	設計基準強度 f'_{ck}	N/mm ²	24	24	24
			60	60	60

4. 試算方法と結果

4.1 試算における計算内容と仮定

(1) 試算項目と照査・確認内容

橋面コンクリート舗装を施工した床版の性状確認は、

表-4に示す8つの項目について比較検討を行った。1), 2)は、鉄筋とコンクリートに発生する応力度の低減効果の確認、3), 4)は、平成29年道路橋示方書における曲げモーメントを受ける部材の限界状態⁹⁾の確認、5)～8)は押抜きせん断力を受ける床版の限界状態⁷⁾、耐荷力・疲労耐力⁸⁾の確認である。

(2) 計算方法の仮定

復元設計のRC断面計算における鉄筋とコンクリートのヤング係数比はn=15としたが、床版と強度の異なる橋面コンクリート舗装が同一断面に存在する場合には、それぞれの弾性係数の比率でヤング係数比を算出し断面計算を行った。

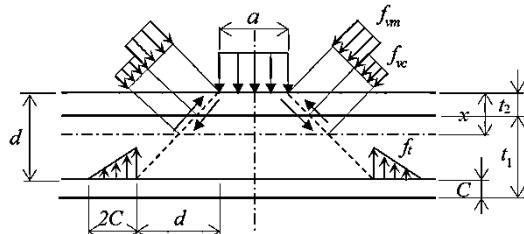
強度の異なるコンクリートを重ね合わせたRC断面の降伏曲げ・終局曲げ破壊性状は明確でないため、本試算における降伏曲げ・終局曲げモーメントの特性値は、既設床版と同じコンクリート強度を重ね合わせた断面として算出した。

床版と強度の異なる橋面コンクリート舗装を敷設した押抜きせん断耐力の算出は、従来の押抜きせん断耐荷力の算出式を拡張した論文⁹⁾を参考に、図-1に示すように、中立軸が橋面コンクリート舗装内にある場合には橋面コンクリートのせん断強度を、既設床版内にある場合には橋面コンクリート舗装と既設床版それぞれの部分のコンクリート強度を考慮して算出したせん断強度を足し合わせる下記式(1)により算出した。

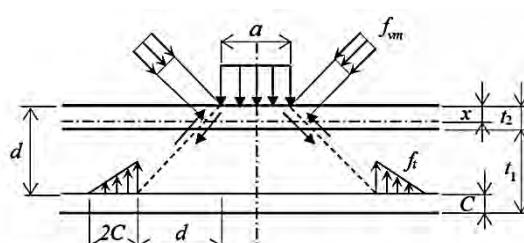
$$P_0 = f_{vc} \{2(a + 2x_m)x_d \cdot ((x_d - t_2)/x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot ((x_m - t_2)/x_m)\} \\ + f_{vm} \{2(a + 2x_m)x_d \cdot (t_2/x_d) + 2(b + 2x_d)x_m \cdot (t_2/x_m)\} \\ + f_t \{2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m\} \quad (1)$$

f_{vc} : 既設コンクリートが負担するせん断力(N/mm²)

f_{vm} : 橋面コンクリートが負担するせん断強度(N/mm²)



中立軸が橋面コンクリート外にある場合($t_2 < x$)



中立軸が橋面コンクリート内にある場合($t_2 > x$)

図-1 中立軸位置による押抜きせん断耐力模式図

表-4 計算内容と照査・確認内容

試算内容・項目		照査・確認内容
1)	発生応力度の低減効果	平成29年道路橋示方書による常時作用力下で、 <u>断面に発生する応力度</u> の低減を確認
2)	発生応力度	
3)	曲げモーメントを受ける床版	橋面コンクリート舗装を施工した床版が、既設床版と一体となって挙動した場合に、 <u>断面の降伏曲げモーメント特性値と床版に生じる曲げモーメントとの関係</u> を確認。前者が後者を上回れば安全性が確保されたと判断。
4)	耐荷性能	橋面コンクリートを舗装施工した床版が、既設床版と一体となって挙動した場合に、 <u>断面の破壊抵抗曲げモーメント特性値と床版に生じる曲げモーメントとの関係</u> を確認。前者が後者を上回れば安全性が確保されたと判断。
5)	限界状態1、限界状態3	既設床版と橋面コンクリート舗装が一体となっていると考えた場合に、床版厚が示方書に定める床版の最小全厚を満足するか確認
6)	床版の押抜きせん断耐力	橋梁床版の上面増厚工法に記載される押抜きせん断耐力照査式(さらに强度の異なるコンクリートを使用した場合の修整式)に従い、梁状化した床版としてのせん断耐力を確認
7)	せん断力を受ける床版 (補足) 限界状態3	II編11.4.2には下記記述があり算出は不要であるが、確認のため <u>II編5.7.2の押抜きせん断力制限値</u> を算出。 (II編11.2.4の規定を満足して設計された床版は、コンクリートのみで押抜きせん断力を負担するとした状態で、III編5.7.2並びに5.8.2の規定される押抜きせん断力に対する限界状態3を超えないことをなせる制限値に対して、十分な耐力の余裕度を有していることが確認されている。)
8)	梁状化した床版の押抜きせん断疲労耐力	梁状化した床版の押抜きせん断耐力式を用いて、輪荷重の繰り返しによる疲労寿命の変化を確認

この考えは、道示に示される押抜きせん断力の制限値の算出及び梁状化床版の押抜きせん断疲労耐力の算出にも適用した。

なお、橋面コンクリート舗装には繊維補強コンクリートが使われる場合もあるが、本試算においては繊維による補強効果は考慮していない。

4.2 試算結果概要

表-5にCase1～3の床版に対して、床版支間2.5mと3.0m、舗装厚30mm, 50mm, 60mm, 80mm、橋面コンクリート舗装強度24N/mm², 60N/mm²とした全48ケースを試算した結果の全体概要を示す。

1), 2)の鉄筋、コンクリートの発生応力度は元断面に対する低減率を、3), 4)の限界状態1, 3は設計曲げモーメントに対する断面保有耐力割合を、5)の床版厚は基準に対しての過不足を、6), 7)の押抜きせん断耐力は元断面に対する増加率を、8)の押抜きせん断疲労耐力は元断面に対する増加倍率をそれぞれ示しており、限界状態1, 3の赤色着色部は所要耐力が不足している部分を示している。

(1) 鉄筋発生応力度の変化

橋面コンクリート舗装を施すことにより、主鉄筋で約50%程度、配力鉄筋でおよそ30%～50%程度まで応力度の低減が確認された。図-2にCase-1、床版支間2.5mの場合の主鉄筋、配力鉄筋の応力発生状況を示す。全体として、主鉄筋についてはおおむね制限値程度まで発生応

力度を低減したが、配力鉄筋については設計当初の鉄筋量はCase-1, Case-2ともに大幅に不足しており、発生応

力は大幅に低減されるものの、制限値を満足することは困難であった。

表-5 試算結果全体概要

Case-1 (S15道示準拠)

試算内容	検討ケース	床版支間2.5m												支間3.0m											
		元断面	24N・t=30	24N・t=50	24N・t=60	24N・t=80	60N・t=30	60N・t=50	60N・t=60	60N・t=80	元断面	24N・t=30	24N・t=50	24N・t=60	24N・t=80	60N・t=30	60N・t=50	60N・t=60	60N・t=80						
1) 鉄筋応力度	低減率	主鉄筋方向	100%	72%	62%	57%	49%	70%	60%	55%	47%	100%	74%	64%	60%	52%	72%	62%	58%	49%					
		配力筋方向	100%	64%	50%	44%	33%	62%	47%	40%	29%	100%	66%	52%	46%	35%	65%	49%	42%	30%					
2) コンクリート応力度	低減率	主鉄筋方向	100%	90%	73%	66%	56%	105%	83%	76%	66%	100%	92%	76%	69%	60%	108%	88%	81%	72%					
		配力筋方向	100%	71%	56%	52%	43%	83%	68%	62%	50%	100%	75%	61%	56%	47%	87%	74%	68%	56%					
3) 限界状態1	Myd/Md	主鉄筋方向	65%	88%	111%	123%	147%	79%	98%	110%	138%	60%	78%	94%	99%	109%	69%	85%	94%	110%					
		配力筋方向	34%	44%	51%	54%	60%	45%	51%	54%	60%	27%	35%	40%	42%	46%	35%	40%	42%	46%					
4) 限界状態3	Myd/Md	主鉄筋方向	73%	97%	111%	118%	132%	96%	110%	117%	131%	58%	74%	84%	88%	98%	73%	83%	88%	97%					
		配力筋方向	31%	40%	46%	48%	54%	40%	45%	48%	54%	25%	31%	36%	38%	42%	31%	35%	38%	42%					
5) 床版厚(大型車500台以上, k=1.15の場合)	最小全厚	一	不足	不足	不足	不足	満足	不足	不足	不足	満足	不足	満足	不足	不足	不足	満足								
6) 押抜きせん断耐力	増加率	%	100%	113%	143%	165%	211%	144%	209%	245%	322%	100%	111%	143%	164%	209%	142%	175%	243%	319%					
7) 押抜きせん断力を受ける版の限界状態	増加率	%	100%	138%	165%	179%	208%	159%	202%	224%	270%	100%	135%	160%	173%	200%	155%	194%	214%	257%					
8) 梁状化した版の押抜きせん断疲労耐力	増加倍率	-	1	22	300	1,298	76,635	557	45,420	593,686	43,400,000	1	13	168	1,121	63,906	403	39,998	512,684	36,000,000					

Case-2 (S31,S39道示準拠)

試算内容	検討ケース	床版支間2.5m												支間3.0m											
		元断面	24N・t=30	24N・t=50	24N・t=60	24N・t=80	60N・t=30	60N・t=50	60N・t=60	60N・t=80	元断面	24N・t=30	24N・t=50	24N・t=60	24N・t=80	60N・t=30	60N・t=50	60N・t=60	60N・t=80						
1) 鉄筋応力度	低減率	主鉄筋方向	100%	74%	64%	60%	52%	72%	63%	58%	49%	100%	75%	66%	62%	55%	73%	65%	61%	53%					
		配力筋方向	100%	67%	53%	47%	35%	65%	51%	44%	32%	100%	66%	53%	48%	37%	65%	51%	45%	34%					
2) コンクリート応力度	低減率	主鉄筋方向	100%	95%	78%	72%	62%	108%	89%	82%	73%	100%	98%	83%	76%	67%	112%	92%	85%	76%					
		配力筋方向	100%	77%	65%	60%	50%	88%	75%	70%	57%	100%	81%	67%	63%	54%	93%	79%	74%	63%					
3) 限界状態1	Myd/Md	主鉄筋方向	79%	102%	115%	121%	132%	100%	116%	122%	134%	85%	109%	121%	127%	139%	100%	119%	129%	141%					
		配力筋方向	34%	43%	48%	50%	55%	43%	48%	51%	56%	36%	45%	50%	53%	58%	45%	51%	53%	58%					
4) 限界状態3	Myd/Md	主鉄筋方向	72%	91%	103%	108%	119%	90%	102%	108%	119%	77%	97%	108%	114%	125%	96%	108%	113%	124%					
		配力筋方向	30%	38%	43%	45%	50%	38%	43%	45%	50%	33%	40%	45%	48%	53%	40%	45%	47%	52%					
5) 床版厚(大型車500台以上, k=1.15の場合)	最小全厚	一	不足	不足	不足	満足	満足	不足	不足	満足	満足	満足	不足	不足	不足	満足	満足	不足	不足	満足					
6) 押抜きせん断耐力	増加率	%	100%	104%	130%	147%	185%	130%	184%	213%	276%	100%	103%	122%	139%	174%	127%	173%	201%	259%					
7) 押抜きせん断力を受ける版の限界状態	増加率	%	100%	132%	155%	167%	191%	150%	186%	204%	243%	100%	130%	151%	162%	185%	146%	180%	197%	233%					
8) 梁状化した版の押抜きせん断疲労耐力	増加倍率	-	1	6	47	253	12,451	128	7,726	91,780	5,841,403	1	5	38	98	3,894	88	3,254	29,615	1,826,681					

Case-3 (S48道示準拠)

試算内容	検討ケース	床版支間2.5m												支間3.0m											
		元断面	24N・t=30	24N・t=50	24N・t=60	24N・t=80	60N・t=30	60N・t=50	60N・t=60	60N・t=80	元断面	24N・t=30	24N・t=50	24N・t=60	24N・t=80	60N・t=30	60N・t=50	60N・t=60	60N・t=80						
1) 鉄筋応力度	低減率	主鉄筋方向	100%	72%	62%	58%	51%	70%	60%	56%	48%	100%	75%	66%	63%	56%	73%	65%	61%	54%					
		配力筋方向	100%	70%	59%	54%	45%	68%	57%	52%	42%	100%	74%	64%	59%	50%	72%	62%	57%	47%					
2) コンクリート応力度	低減率	主鉄筋方向	100%	90%	74%	68%	58%	103%	83%	76%	66%	100%	95%	81%	75%	65%	111%	91%	85%	76%					
		配力筋方向	100%	81%	64%	59%	50%	92%	74%	68%	59%	100%	88%	72%	66%	58%	100%	83%	77%	68%					
3) 限界状態1	Myd/Md	主鉄筋方向	101%	130%	161%	174%	191%	118%	143%	159%	194%	109%	131%	154%	161%	176%	119%	141%	154%	178%					
		配力筋方向	104%	134%	152%	161%	179%	134%	154%	163%	180%	104%	130%	146%	154%	169%	132%	148%	155%	170%					
4) 限界状態3	Myd/Md	主鉄筋方向	100%	129%	146%	155%	172%	128%	145%	154%	170%	98%	123%	137%	144%	157%	122%	136%	143%	156%					
		配力筋方向	94%	119%	136%	144%	161%	118%	135%	144%	160%	95%	116%	130%	137%	151%	115%	130%	137%	151%					
5) 床版厚(大型車500台以上, k=1.15の場合)	最小全厚	一	不足	不足	不足	満足	満足	不足	不足	満足	満足	満足	不足	不足	不足	満足	満足	不足	不足	満足					
6) 押抜きせん断耐力	増加率	%	100%	101%	110%	124%	154%	119%	152%	176%	225%	100%	99%	107%	117%	144%	115%	142%	164%	209%					
7) 押抜きせん断力を受ける版の限界状態	増加率	%	100%	132%	154%	166%	190%	149%	184%	203%	241%	100%	128%	147%	157%	179%	143%	173%	189%	222%					
8) 梁状化した版の押抜きせん断疲労耐力	増加倍率	-	1	5	31	75	481	66	2,093	10,563	227,856	1	3	17	40	210	37	969	4,452	81,966					

(2) コンクリート発生応力度の変化

主鉄筋方向で最大 56%～76%，配力鉄筋方向で最大 43%～68%まで圧縮応力度が低減した。なお 60N/mm^2 コンクリート使用時は発生応力度が高く出るため、見かけ上応力度の低減が少ない。図-3にCase-1, 床版支間 2.5m の場合のコンクリートの応力発生状況を示す。主鉄筋方向では橋面コンクリート舗装厚の厚いケースはおむね制限値程度まで低減したが、配力鉄筋方向は 60N/mm^2 コンクリート使用の場合と Case-3以外は制限値を満足しなかった。

(3) 限界状態 1 の照査

断面の降伏曲げモーメントは大きく向上した。状況は限界状態 3 と同傾向であり以下(4)で述べる。

(4) 限界状態 3 の照査

橋面コンクリート舗装により終局曲げモーメントは大きく向上した。図-4にCase-1, 床版支間 2.5m の場合の限界状態 3 の照査状況を示す。主鉄筋方向はほぼ設計曲げモーメントを満足するが、配力鉄筋方向は終局曲げモーメントが設計曲げモーメントを大きく下回り、耐力は確保できなかった。限界状態 1 と 3 はほぼ同様の傾向であり、主鉄筋方向では、Case-3 は全ケース、Case-2 は大半が設計曲げモーメントを満足したが、Case-1 は大半が満足できなかった。配力鉄筋方向は、Case-3 以外は全ケース満足できなかった。

(5) 床版厚の照査

平成 29 年道示⁷⁾において、せん断力を受ける版の限界状態照査を省略できる床版厚として必要な橋面コンクリート舗装厚は、Case-1 で 80mm 以上、Case-2,3 で 50-60mm 以上（表-6）となる。ただし、これは新設橋梁に対する基準であり補強設計では一つの目安と考える。

(6) 押抜きせん断耐力

既設床板の耐力として重要な床版の押抜きせん断耐力⁸⁾は、 24N/mm^2 使用時で最大 144%～211%， 60N/mm^2 使用時で最大 209%～322%増加し、過去の示方書に準拠した Case-1 > Case-2 > Case-3 の順で効果が大きかった。図-5にCase-1, 床版支間 2.5m の場合の押抜きせん断耐力の変化を示す。計算にはコンクリート強度差を考慮したせん断耐力式⁹⁾を用いたが、 60N/mm^2 コンクリートが 24N/mm^2 より 18%～56%耐力が高くなった。せん断耐力における高強度コンクリート使用の優位性が確認され、更に高強度化した場合はより大きな効果が期待できる。なお、図中 $t=50\text{mm}$ 付近より既設コンクリートのせん断耐力負担が消失するが、これは中立軸が橋面コンクリート舗装内に入ることを意味する。

(7) 押抜きせん断を受ける版の限界状態

24N/mm^2 の橋面舗装で最大 179%～208%， 60N/mm^2 の橋面コンクリート舗装で最大 222%～270%と、当初の押抜きせん断耐力より大幅に増加し、ここでも高強度コンクリート使用の優位性が確認された。

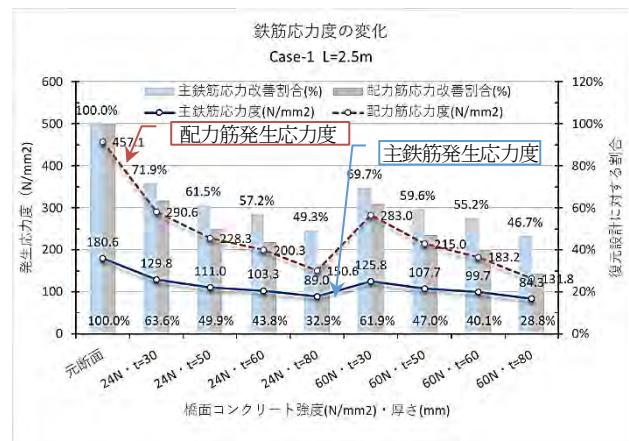


図-2 鉄筋発生応力度の変化

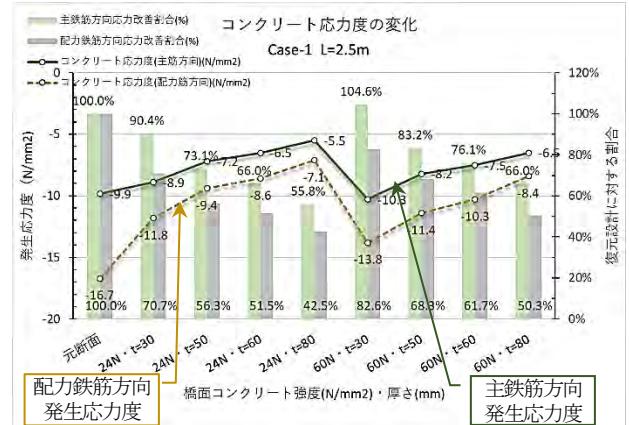


図-3 コンクリート発生応力度の変化

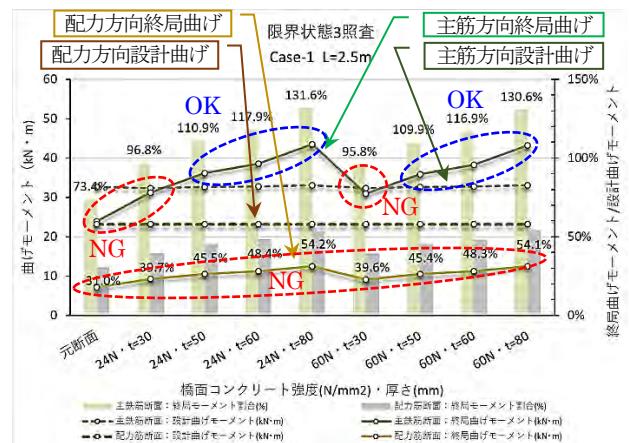


図-4 限界状態 3

表-6 床版厚照査

	床版支間	mm	Case-1 (S15道示準拠)		Case-2 (S31,S39道示準拠)		Case-3 (S48道示準拠)	
			2,500	3,000	2,500	3,000	2,500	3,000
床版厚	復元床版厚	mm	140	150	160	170	160	180
d_0 (連続版として)	k_f	mm	185	200	185	200	185	200
大型車<500台の場合	k_f	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
500台≤大型車<1,000台の場合	k_f	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	
d (大型車<500台)	mm	203.5	220.0	203.5	220.0	203.5	220.0	
d (500台≤大型車<1,000台)	mm	212.8	230.0	212.8	230.0	212.8	230.0	
		30	30	30	30	30	30	
	橋面コンクリート舗装厚	mm	50	50	50	50	50	50
	60	60	60	60	60	60	60	
	80	80	80	80	80	80	80	
橋面コンクリート舗装厚を床版厚とみなした場合の合計床版厚	30	170	180	190	200	190	200	
	50	190	200	210	220	210	230	
	60	200	210	220	230	220	240	
	80	220	230	240	250	240	260	

*必要床版厚：(道示 II 11.5) $\text{k}_1 \cdot \text{大型車交通量}$
 $d_0 = 30L + 110$ $d = k_1 \cdot k_2 \cdot d_0$

: 必要床版厚不足(k=1.10の場合)
: 必要床版厚不足(k=1.15の場合)

(8) 梁状化した床版の押抜きせん断疲労耐力

橋面コンクリート舗装により疲労繰り返し回数は指数的に上昇し、 24N/mm^2 コンクリートで最大210倍～7,600倍、 60N/mm^2 コンクリートで最大81,000倍から4,300万倍となった。押抜きせん断耐力同様、高強度コンクリートの優位性が確認された。図-6はCase-1、床版支間2.5mの梁状化した押抜きせん断疲労耐力の増加程度を示す。

5. まとめ

今回の試算では、橋面コンクリート舗装を施工することにより、すべてのケースで床版に発生する応力度の大幅な減少、曲げ耐力の増加、押抜きせん断耐力・押抜きせん断疲労耐力の大幅な増加を確認した。

補強を行う場合の基準となる現行の平成29年道路橋示方書の各種規定を完全に満たすことは困難であったが、実際の床版の耐荷力を表す押抜きせん断耐力や押抜きせん断疲労耐力は大幅に上昇し、特に高強度コンクリートを使うメリットが大きいことを確認した。

ただし、昭和39年までの床版(Case-1,2)は、配力鉄筋が非常に少なく、橋面コンクリート舗装で応力低減・耐力向上はあるものの曲げ耐荷力は大幅に不足しているため、これらの床版の補強に当たっては実際の損傷状況等を確認し、別途対策も合わせて検討する必要がある。

6. あとがき

高速道路などでは損傷した床版を高強度のプレキャスト床版に取り替える工事が大規模で行われているが、今後、設計寿命を超える地方の多くの橋の床版を高価なプレキャスト床版で取替える工事は困難であり、比較的安価で長寿命化できる工法が必要となる。橋面コンクリート舗装はそのような場合の1つの選択肢になるものと考え普及を目指しており、本報告が採用の一助になれば幸いである。ただし、橋面コンクリート舗装は広い面積に薄くコンクリートを施工し、既設床版との確実な付着と仕上げ面のすべり抵抗・平坦性などの路面性能を確保する必要があるため、施工には十分な注意が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の橋面コンクリート舗装、鋼構造委員会道路橋床版の複合劣化に関する調査研究小委員会、2016年11月
- 2) 土木学会：道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装ガイドライン2020、鋼構造シリーズ36、丸善出版、2020年10月
- 3) 阿部忠、伊藤清志、児玉孝喜、小林哲夫、深川克彦：接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究、土木学会構造工学論文集、Vol.66A、pp.650-651、2020.3.



図-5 床版の押抜きせん断耐力

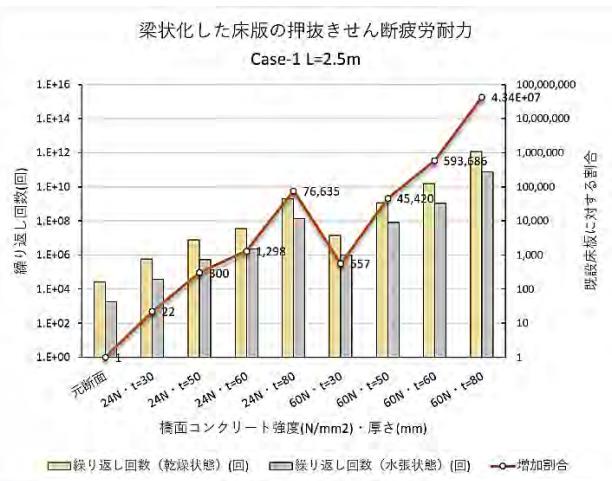


図-6 梁状化した床版の押抜きせん断疲労耐力

- 4) 兵頭彦次、市川裕規、七尾舞、梶尾聰、長塩靖祐、杉山彰徳：ラテックス改質速硬コンクリートを用いた道路橋床版の長寿命化の取組み、セメント・コンクリート、No.867、pp.8-14、2019.5.
- 5) 橋本雅行、植野芳彦、渡邊宗幸、安井亨、梶尾聰、橘吉宏：富山市における既設橋梁への橋面コンクリート舗装の適用に関する取組み、橋梁と基礎、Vol.56、pp.25-30、2022.2.
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説、III コンクリート橋・コンクリート部材編、平成29年11月
- 7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II 鋼橋・鋼部材編、平成29年11月
- 8) 土木学会：コンクリートライブラー150 セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針、工法別編 上面増厚工法、2018.6.
- 9) 三田村浩、今野久志、松本高志、松井繁之：UHPFRCで補修したRC床版の押抜きせん断耐荷力の評価法、コンクリート工学年次論文集、Vol.45、No.2、pp.793-798、2023

(2024年7月12日受付)