

FEMによる床版防水層の応力性状に関する検討

Finite element analysis on stress characteristics of waterproofing for bridge slabs

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○正員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正員 澤松俊寿 (Toshikazu Sawamatsu)
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正員 岡田慎哉 (Shinya Okada)

1. はじめに

道路橋 RC 床版では、水の影響により疲労損傷の進行が加速することが知られ¹⁾、防水層の重要性が強く認識されている。また、積雪寒冷地においては、押抜きせん断耐荷力低下を招く床版上面の凍害劣化を抑制する有効な対策となる。一方で、北海道内における現地調査によると、防水層が設置されている橋梁の多くで十分な防水効果が発揮されていないことが報告されている²⁾。

こうした状況から、近年では、舗装、防水層、床版の三位一体構造で防水性能の向上を図るべきとの考えが提唱され、著者らは、積雪寒冷地に適用可能な高耐久床版防水システムの確立を目的として各種の検討を行っている。これまでに、屋外施工試験により防水層の付着性能に及ぼす施工条件の影響について検討しており³⁾、今後は、要素試験による耐久性評価を行う必要がある。しかしながら、防水層の疲労耐久性評価では、車両走行時に防水層に発生する応力の計測が困難であるために、疲労試験から得られる SN 曲線が防水材料個別の相対的な耐久性評価に用いられるに留まっており、寿命評価には繋がっていない。

そこで本研究では、輪荷重作用時の防水層の応力性状の把握および応力性状への影響要因の検討を目的として 3次元 FEM 解析を実施した。

2. 解析方法

2.1 解析概要

RC 床版、防水層、舗装の 3 層からなる床版構造に対し 3次元 FEM 解析を実施した。解析パラメータとして、舗装厚、舗装温度（弾性係数）および床版コンクリートの損傷に着目し、輪荷重作用時の防水層の応力性状に及ぼす影響を確認する。

なお、本解析は、FEM 解析の汎用コードである MSC.Marc (ver.2010) を使用した線形弾性解析である。

2.2 解析モデル

図-1 には、本検討で行った数値解析のモデルを示す。解析対象とする床版の形状や支持条件および配筋は、RC 床版の輪荷重走行試験⁴⁾を参考に表-1 のように決定した。床版、防水層、舗装については 6 節点および 8 節点ソリッド要素でモデル化し、弾性支持部については支持部材 (H 鋼) と断面二次モーメントが等価となる梁要素で簡便にモデル化した。床版と防水層ならびに防水層と舗装との境界部には付着を考慮したジョイント要素を配置し、付着部分に生じるせん断応力を確認できるようにした。

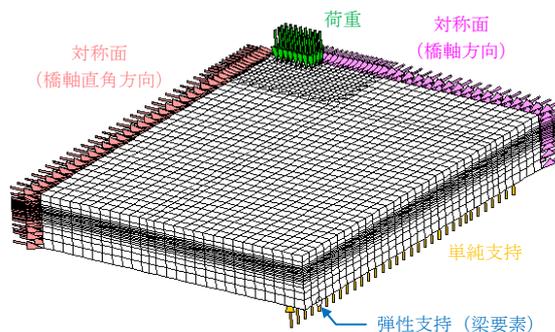


図-1 解析モデル

表-1 解析モデルの概要

項目	仕様		
形状	橋軸方向	3,300mm	
	橋軸直角方向	2,650mm	
	RC 床版厚	160mm	
	防水層厚	3mm	
	As 舗装厚	40, 80, 120mm	
支持条件	単純支持間隔 (橋軸直角方向支間)	2,350mm	
	弾性支持間隔 (橋軸方向支間)	3,125mm	
配筋	主鉄筋	上側	φ16@260mm
		下側	φ16@130mm
	配力鉄筋	上側	φ13@230mm
		下側	φ13@230mm

荷重は輪荷重を想定し、床版中央へ 100kN の鉛直荷重として考慮することとした。なお、輪荷重はダブルタイヤとし、一輪当たりの寸法は 200×200mm、全体で 80,000mm² の範囲に作用するものとし、接地範囲にはすべて等分布荷重として作用するものとした。

2.3 材料特性値

解析に使用した材料特性値を表-2 に示す。床版については、その曲げ剛性が等価となるような一様体としてモデル化することとした。また、その剛性は橋軸方向および橋軸直角方向で異なることから、モデルは直交異方性材料として実物の剛性を忠実に再現している。弾性係数は通常のコンクリートを全断面有効とした場合と、疲労損傷により剛性が低下した状態として、引張側を無視した場合を想定することとし、それぞれの場合について弾性係数を設定した。

舗装はアスファルト舗装 (以下、As 舗装) とし、As 混合物の材料特性の温度依存性を考慮して、-20°C、23°C、50°C における弾性係数を使用した。ここで、

-20℃ および 50℃ は、冬期間および夏期間を想定した温度である。なお、弾性係数は次式⁵⁾により決定した。

$$E_{As} = \frac{1}{\left[\frac{1}{8500} + \left\{ 9.373 \times 10^{-19} \times (1.118^{T_k}) \right\} \right]} \quad (1)$$

ここで、 E_{As} は As 混合物の弾性係数 (N/mm²)、 T_k は As 混合物の温度 (K) である。

防水層には北海道での適用実績の多いアスファルト加熱型塗膜系を想定した。60℃ までは防水層単体の弾性係数が温度の影響を受けない⁶⁾ことから、材料特性は一定とした。

防水層の境界部については、本検討においては付着切れの影響について検討するものではないためこれを考慮せず、鉛直ばね剛性および水平ばね剛性ともに $k_v = k_h = 10^6 \text{ N/mm}^3$ とした。また、付着性能の温度依存性は考慮していない。

3. 解析結果および考察

3.1 防水層界面の応力性状

図-2 に、防水層の付着せん断応力分布および鉛直応力分布を示す。着目断面は床版中央の主鉄筋断面である。なお、舗装厚や床版コンクリートの取扱方法による応力分布形状の著しい差異は確認されなかったことから、解析結果の例として、舗装厚 80mm、床版コンクリートを全断面有効としたときの応力分布を示している。

図より、鉛直応力についてみると、舗装の剛性が著しく低い 50℃ では、荷重の面圧 1.25N/mm² と同程度の圧縮力が作用している。また、温度が低下し舗装の弾性係数が増加するにつれて圧縮力は小さくなり、荷重の拘束

効果によるせん断抵抗は薄れていくものと推察される。

付着せん断応力についてみると、防水層の上下面ともに荷重端部 (床版中央から 250mm) の近傍でせん断応力が最大となる傾向が見られる。特徴的な挙動として、50℃ の場合に、荷重位置で舗装が局所的に変形することにより荷重端部でせん断応力が卓越し、両側で符号が反転している。図-2 では、輪荷重がランダムに走行し付着面に交番せん断応力が作用した場合、舗装と防水層の界面および床版と防水層の界面にはそれぞれ最大で 0.17N/mm²、0.22N/mm² の応力振幅が作用することになり、他の温度の場合と比較して大きな応力振幅が発生している。また、23℃ の場合においても若干ではあるが、付着せん断応力が反転していることが確認できる。温度が 23℃、-20℃ の場合については、局所的なせん断応力の発生が緩和され、荷重端部から単純支持辺の間でほぼ一様に応力が分布する傾向が伺える。

次に、鉛直応力と付着せん断応力の関係についてみると、50℃ の場合にはせん断応力が作用する範囲の大部分が圧縮状態であるのに対し、23℃ および -20℃ では圧

表-2 材料特性値

RC 床版	全断面有効	$E_1=22,400\text{N/mm}^2, E_2=24,200\text{N/mm}^2, E_3=22,000\text{N/mm}^2$
	引張側無視	$E_1=2,700\text{N/mm}^2, E_2=7,090\text{N/mm}^2, E_3=22,000\text{N/mm}^2$
防水層		$E=10\text{ N/mm}^2, \nu=0.45$
As 舗装	-20℃	$E=8,380\text{N/mm}^2, \nu=0.35$
	23℃	$E=3,070\text{ N/mm}^2, \nu=0.35$
	50℃	$E=230\text{ N/mm}^2, \nu=0.35$

※1: 橋軸方向、2: 橋軸直角方向、3: 鉛直方向

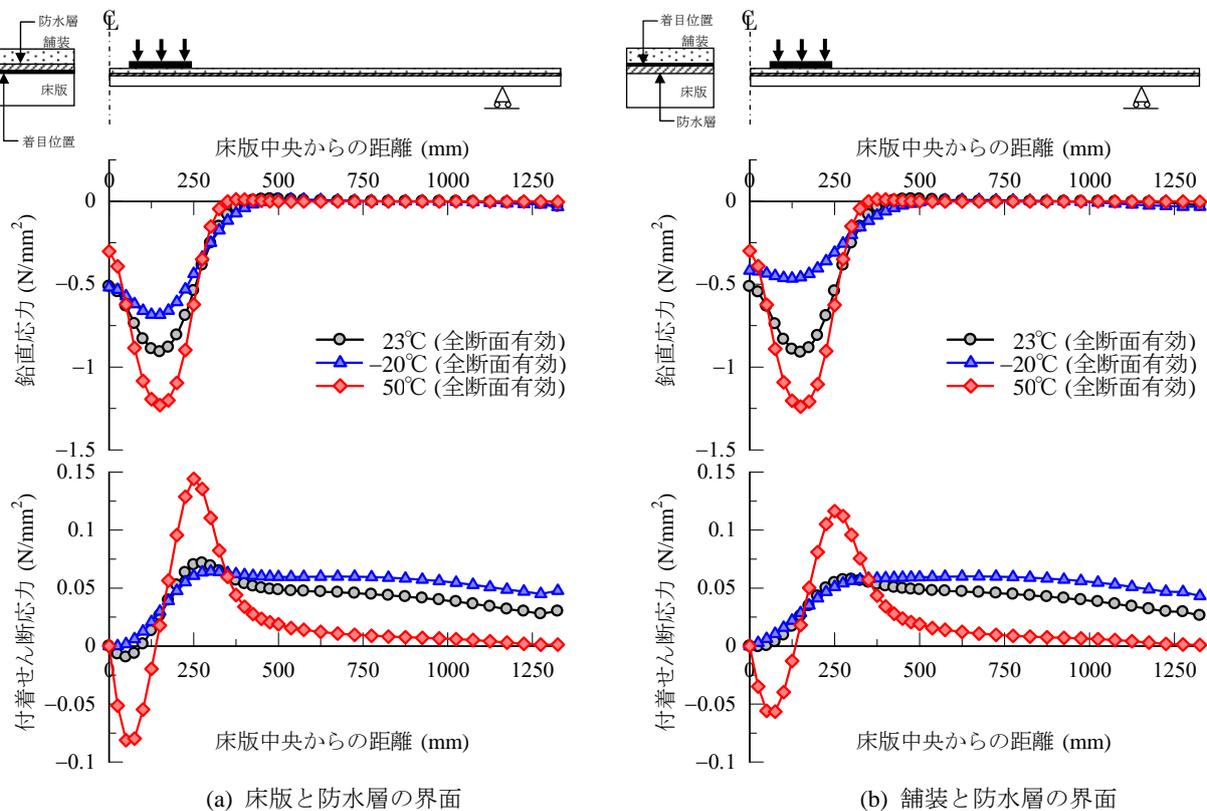


図-2 防水層の界面応力分布 (舗装厚 80mm)

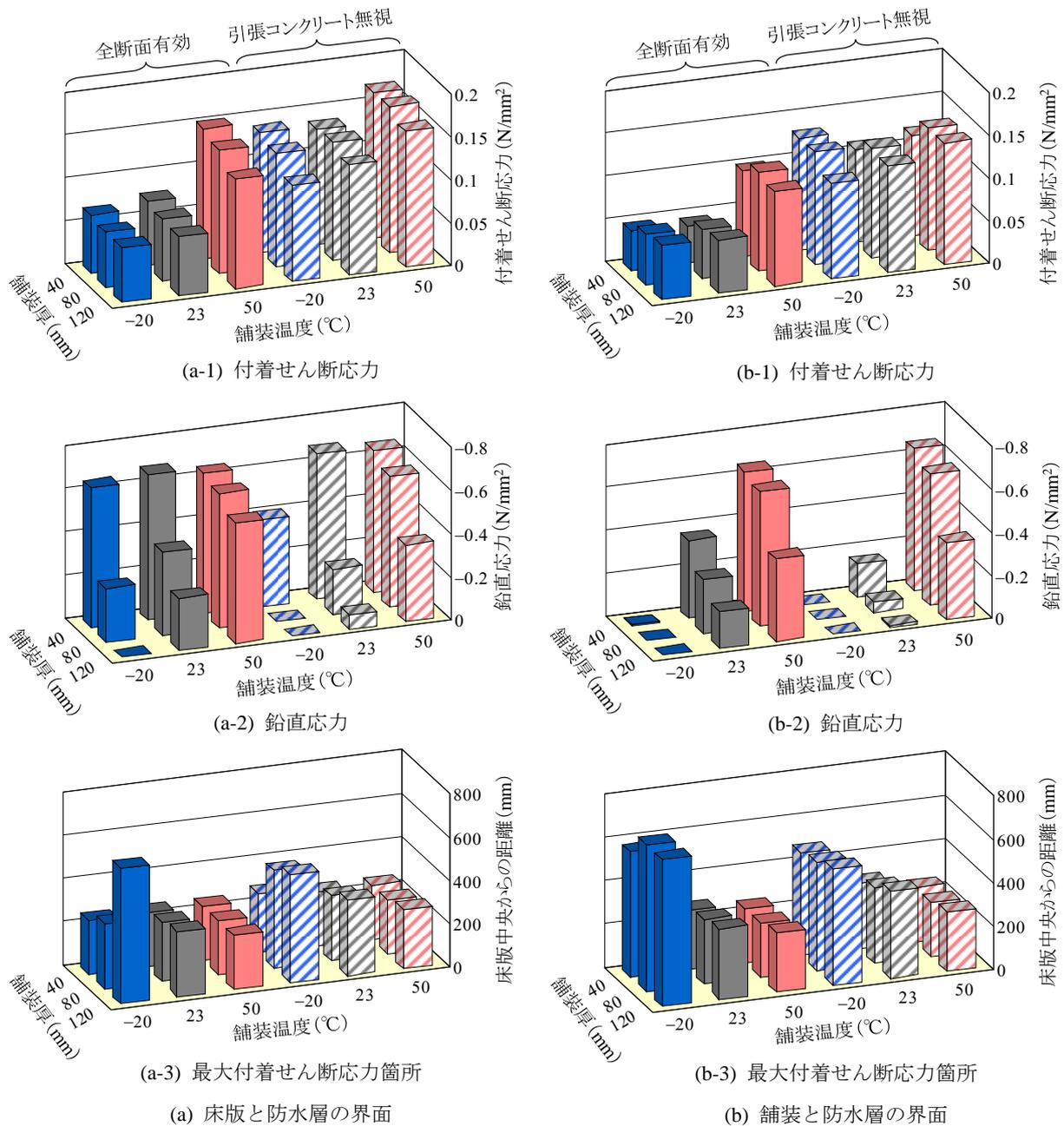


図-3 最大付着せん断応力の発生箇所と応力性状

縮力が作用しない範囲にも最大せん断応力と同程度のせん断応力が生じており、性能評価方法として、防水層の種類等によっては、拘束圧の影響を考慮する必要があると考えられる。

3.2 応力性状への影響要因

図-3 に、各解析ケースにおける最大付着せん断応力とその発生箇所および同箇所における鉛直応力を示す。

図より、本検討の範囲における最大付着せん断応力は、おおよそ $0.04 \sim 0.17 \text{ N/mm}^2$ の範囲となっており、舗装温度が高い場合ほど、また床版剛性が低い場合ほど大きくなっていることが分かる。これは、それぞれの材料の剛性が低いほど、その荷重に対応した変形は大きくなり、変形量に応じて境界面に生じる応力も大きくなったためと推察される。一方、舗装厚に関しては、床版との界面および舗装との界面で、舗装厚の減少とともに付着せん

断応力がそれぞれ増加および減少するが、他の要因と比較してその影響は小さいものであった。本検討では舗装の流動や割れ等を考慮していないが、これらが舗装厚の影響を受けることを踏まえると、別途詳細な検討を要するものと考えられる。

鉛直応力への影響をみると、舗装の上下面ともに舗装厚および温度の減少により鉛直応力は低下する。注目すべき点として、舗装との界面では、舗装温度が -20°C の場合に最大付着せん断応力箇所に剥離方向の垂直応力が作用しており、舗装温度 23°C の場合と比較して、付着せん断応力は同程度であるが、引張力が作用する過酷な応力状態となっており、積雪寒冷地では、冬期間に防水層が損傷しやすい可能性が考えられる。

最大付着せん断応力の発生箇所についてみると、舗装厚の増加および舗装温度の低下とともに荷重位置から離

れていく傾向が見られる。これは、舗装温度が低いことにより舗装の剛性が高くなり、荷重分散効果がより強く生じたことによるものと推察される。また、最大応力の発生箇所が比較的近接している舗装温度 23℃ および 50℃ に対し、-20℃ のみ大きく離れており、積雪寒冷地では、長期間の温度変化と輪荷重走行により広範囲に渡った損傷が生じやすいことが示唆される。

3.3 破壊モードの検討

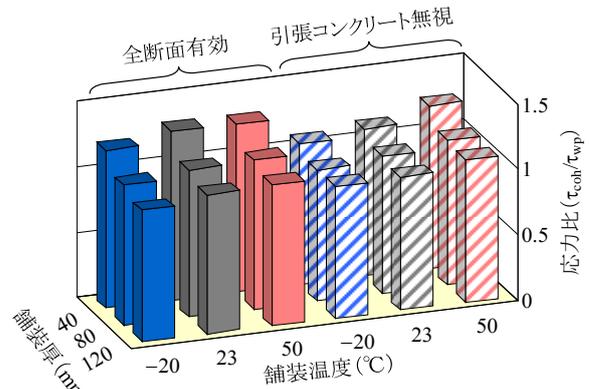
床版防水層の破壊は、舗装や防水層、床版コンクリートの材料破壊と異種材料間の付着破壊に分けることができる。本節では、防水層界面のせん断応力と防水層自体のせん断応力を比較することにより、破壊モード（付着破壊と凝集破壊）に関する定性的な傾向を確認した。

図-4 には、最大付着せん断応力発生箇所におけるせん断応力比（付着せん断応力 τ_{coh} と防水層のせん断応力 τ_{wp} の比： τ_{coh}/τ_{wp} ）を示している。図より、防水層の上下面で異なる傾向が見られ、舗装厚が小さくなる場合や舗装温度が増加する場合、床版と防水層の界面では τ_{coh}/τ_{wp} が増加する傾向であるのに対し、舗装と防水層の界面では τ_{coh}/τ_{wp} が低下する。したがって、せん断応力の比率に基づく防水層の破壊モードに関する傾向として、舗装厚が小さく、温度が高くなる、すなわち舗装の剛性が低下するにつれて、床版と防水層に着目すると付着破壊が、舗装と防水層に着目すると凝集破壊の割合が高くなることが推察され、3層構造としては、最も大きなせん断応力が作用する床版と防水層の接着性を確保することが重要であると考えられる。反対に、舗装厚の増加や温度の低下により舗装の剛性が増加する場合、床版と防水層に着目すると防水層の凝集破壊が、舗装と防水層に着目すると付着破壊との割合が高くなることが推察され、3層構造としては、舗装と防水層の接着性が重要となると考えられる。ただし、本検討はあくまでせん断応力のみに着目した比較であることから、今後、防水層の材料強度と付着面の強度の差異を考慮した上で破壊モードへの影響要因を検討し、防水性能向上に向けた方策を講ずる必要がある。

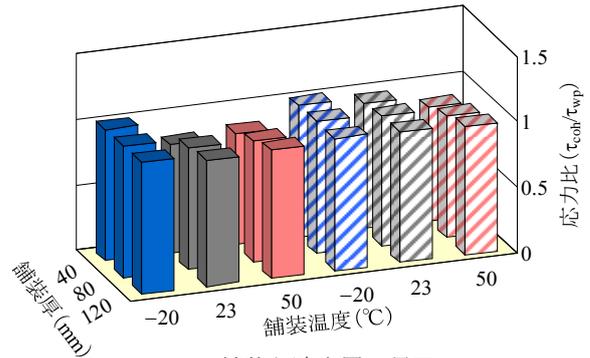
4. おわりに

本研究では、RC 床版、防水層、舗装からなる床版構造の 3次元 FEM 解析に基づき、輪荷重作用時の床版防水層の応力性状の把握および応力性状への影響要因の検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 舗装温度が 50℃ のとき、付着せん断応力が著しく増加するとともに、交番応力の作用により応力振幅が増大することが示唆される。これより、夏期間には、わだち掘れだけでなく防水層の損傷が生じている可能性があり、点検等の実施に際し留意が必要となる。
- 2) 舗装厚が増加あるいは舗装温度が減少する場合、付着せん断応力が低下する一方で、鉛直方向の圧縮力が低下し、最大せん断応力発生箇所が荷重位置から離れる傾向がある。これは、積雪寒冷地においては、冬期間に荷重の拘束効果低下により付着性能が低下し、また損傷箇所が広範化することを示唆している。
- 3) 防水層の破壊モードに関する検討より、舗装の剛性



(a) 床版と防水層の界面



(b) 舗装と防水層の界面

図-4 せん断応力比

が低下する場合には床版との付着破壊、剛性が増加する場合には舗装との付着破壊が生じやすい応力性状となることを確認した。

今後は、荷重作用位置や輪荷重制動時の水平力の影響等々を評価するほか、要素試験あるいは構造試験による耐久性評価との関連付けについて検討する。

参考文献

- 1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.627-632、1987。
- 2) 吉田英二、三田村浩、石川博之：積雪寒冷地における床版防水工の性能評価に関する検討、土木学会北海道支部年次論文報告集、Vol.65、2009。
- 3) 澤松俊寿、三田村浩、西弘明、松井繁之：積雪寒冷地における床版防水の性能低下要因に関する一考察、第7回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.219-224、2012。
- 4) 例えば、三田村浩、佐藤京、西弘明：積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について、寒地土木研究所月報、No.676、pp.10-18、2009。
- 5) 安倍隆二、丸山記美雄、熊谷政行：積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の理論的設計方法に用いる材料特性および環境条件に関する検討、寒地土木研究所月報、No.708、pp.2-12、2012。
- 6) 野村謙二、魚本健人：道路橋における鉄筋コンクリート床版の防水工に関する研究（その3）、生産研究、53巻5号、pp.317-320、2001。