

設置から5年を経過した道路橋床版防水層の付着性状に関する実験的検討

Adhesive characteristics of slab waterproofing layer after five years of service

北海道大学大学院工学院	○学生員	嶋田琢磨 (Takuma SHIMADA)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	松本高志 (Takashi MATSUMOTO)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	林川俊郎 (Toshiro HAYASHIKAWA)
(独) 土木研究所 寒地土木研究所	正 員	岡田慎哉 (Shinya OKADA)
(独) 土木研究所 寒地土木研究所	正 員	澤松俊寿 (Toshikazu SAWAMATSU)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	何 興文 (Xingwen HE)

1. はじめに

近年土木構造物の長寿命化が重要視されている。すでに劣化・損傷しているものに対しては進行を遅らせること、していないものに対してはそれらの発生を防止する必要がある。

RC 床版の劣化・損傷に着目すると、疲労損傷によるひび割れの発生や、ひび割れからの遊離石灰、錆汁の析出などが挙げられるが、これらは床版内部に水が浸入することによって、劣化・損傷の進行が著しく進むことが既往の研究で明らかになっている¹⁾。また積雪寒冷地においては路面凍結防止剤として主に塩化物が散布されるが、RC 床版内に塩化物イオンが浸入すると、塩害による内部鉄筋の腐食が発生する原因になる。

これらのことから、舗装上面からの水や塩分の浸入を防ぐ床版防水層の設置が、床版の長寿命化に対して効果的であると考えられる。しかし比較的新しく床版防水層が設置された橋梁において、防水性能や付着性能が低いものが多く確認されている²⁾³⁾。そのため供用中での防水に対する健全性の確認や劣化損傷メカニズムに関する知見が必要になっている。本研究では設置から5年を経過した床版防水層について、床版全面を対象とした引張接着試験、および隣接する輪荷重走行帯と非走行帯を対象としたせん断疲労試験を実施し、床版防水層の付着性状について検討した。

2. 調査対象橋梁

調査対象橋梁は3径間単純非合成桁の斜橋であり昭和40年に供用が開始されている。橋梁設置環境および橋梁構造を表-1に示す。昭和39年の鋼道路橋設計方書に基づいて設計されているが、本設計基準で設計された床版は配力鉄筋量が主鉄筋の約25%と現行基準の4分の1程度しか配置されていないために、疲労耐久性が低いとされている¹⁾。そのため昭和62年には床版の劣化損傷が進行していたことを受け、G3桁-G4桁間およびG4桁-G5桁間に縦桁(ST)が増設され、合わせて床版の配力鉄筋不足を解消するために、床版下面に配力鉄筋方向へ短冊状の鋼板接着補強が実施されている。平成元年には既設床版と一体構造として歩道が拡幅されている。さらに平成19年には床版上面の劣化損傷部の部分的な補修と合わせて、車道幅員全面に床版防水層が設置されている。施工記録によると地覆および車歩道境界部の幅

50[cm]がウレタン樹脂系防水、それ以外の部分がアスファルト加熱型塗膜系防水となっており、本試験を実施するまで5年間供用されている。床版防水層の構成は、ウレタン樹脂系防水について、プライマー、ウレタン樹脂防水材、舗装用接着剤であり、アスファルト加熱型塗膜系防水について、プライマー、アスファルト加熱型防水材、珪砂である。床版防水層の構成を図-1に示す。

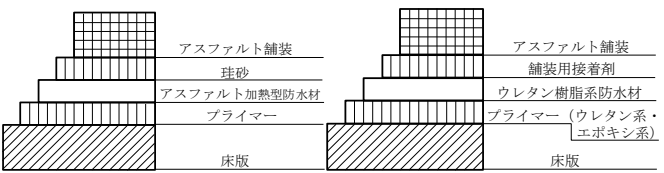
3. 引張接着試験

3.1 引張接着試験方法の概要

床版全面の付着強度の分布を調査するために、測線を設定し引張接着試験⁴⁾を実施した。測線は橋軸方向に6測線、橋軸直角方向に9測線である。図-2に測線および引張接着試験用コア採取位置、表-2に測線の概要を示す。採取コアの直径は100[mm]とし、測線は荷重の影響と水の影響の大小が観察できるように、系統的に設定し

表-1 橋梁設置環境および橋梁構造

交差物件	河川
大型車交通量	778台/日 (上下線合計)
設置環境	積雪寒冷地
最低気温	-22.5℃ (1976年からの最低気温の平均)
上部構造形式	単純非合成桁 (橋長: 22.5[m]×3連 幅員: 車道8.25[m]+歩道2.5[m])
架橋年次	昭和40年 (46年間供用)
適用基準	昭和39年鋼道路橋設計方書
設計床版厚さ	18[cm]
補修履歴	・昭和62年 (橋軸方向に短冊状の鋼板接着・縦桁増設) ・平成元年 (歩道部拡幅 (既設床版と一体)) ・平成19年 (床版上面コンクリートの部分補修・床版防水層設置 (5年間供用))



(a)アスファルト加熱型塗膜系 (b)ウレタン樹脂系
図-1 床版防水層の構成

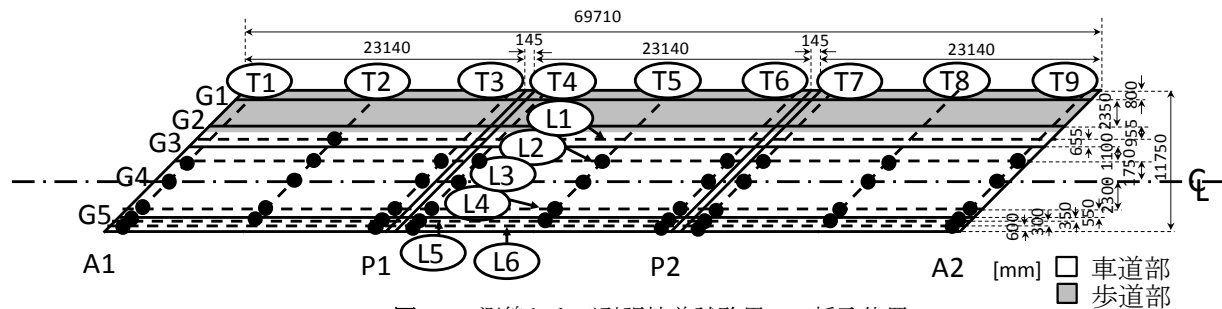


図-2 測線および引張接着試験用コア採取位置

表-2 測線の概要

方向	測線	位置	輪荷重 の影響	水の 影響
橋軸 方向	L1	歩道近傍	小	大
	L2	輪荷重の車輪間	小	—
	L3	センターライン	小	—
	L4	輪荷重走行帯	大	—
	L5	地覆近傍	小	大
	L6	排水マス近傍	小	大
橋軸 直角 方向	T1,T4,T7	伸縮装置近傍(A1側)	—	大
	T2,T5,T8	支間中央	—	小
	T3,T6,T9	伸縮装置近傍(A2側)	—	大

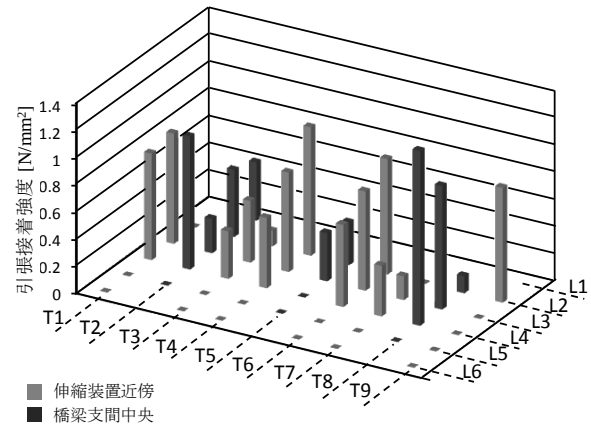


図-3 引張接着強度の分布

ている。試験は床版防水層付着強度の温度依存性を排除するために採取コアを持ち帰り、道路橋床版防水便覧⁴⁾に準拠し約23℃に温度調整した室内において、建研式接着力試験器を用いて実施した。また本試験においては床版防水層の引張接着付着強度に着目しているため、アスファルトの材料破壊の発生を防止することを目的として、採取コアはアスファルト舗装を10[mm]残して切断し試験に供した。

3.2 引張接着試験結果

図-3に引張接着強度の分布を、表-3に試験結果を示す。なお23℃時の規格値として0.6[N/mm²]が規定されている⁴⁾。ウレタン樹脂系防水が施されているL5およびL6測線は、すべてにおいて引張接着強度を消失していることが分かる。アスファルト加熱型塗膜系防水が施されているL1からL4測線については、水の影響が大きいと考えられる伸縮装置近傍のもの(T1、T3、T4、T6、T7、T9)と、水の影響が少ないと考えられる支間中央のもの(T2、T5、T8)では、両者ともに規格強度を満たすものと満たさないものがあり、コア採取位置が引張接着強度に明瞭な差異を与えるとは言えない結果となった。

引張接着強度が0のものについては、ほぼすべてでコアの削孔中に破断している。ウレタン樹脂系防水では各材料の界面で付着性が全く確保されておらず、湿潤状態であり泥が付着していたことから、地覆端部からの水の浸入が床版防水層の付着性能の消失に影響を与えたとも考えられる。アスファルト加熱型塗膜系防水ではT7-L2およびT1-L2が床版防水層の破壊なのに対し、T5-L4ではアスファルトの材料破壊、その他がコンクリートの材料破壊であり、コンクリートの砂利化も一部確認された。

表-3 引張接着試験

	L1	L2	L3	L4	L5	L6
T1	—	0	0.819	0.791	0	0
T2	0.433	0.497	0.255	0.988	0	—
T3	—	0.115	0.458	0.353	0	0
T4	—	0.954	0.738	0.522	0	0
T5	—	0.317	0.358	0	0	—
T6	—	0.857	0.737	0.609	0	0
T7	—	0	0.177	0.376	0	0
T8	—	0.127	0.917	1.299	0	—
T9	—	0.853	0	0	0	0

[N/mm²]

4. せん断疲労試験

4.1 せん断疲労試験方法の概要

前節よりアスファルト加熱型塗膜系防水について、コア採取位置が引張接着強度に系統的な差異を与えるとは言えない結果となった。これは施工状況や環境などに起因しているものと推測される。そこでここでは輪荷重の作用の有無に着目し、施工状況や環境による違いが大きいと考えられる、隣接する輪荷重走行帯と非走行帯を対象にして、せん断疲労試験を実施した。設定する応力レベルは3つである。対象はアスファルト加熱型塗膜系防水が設置されている第2径間の支間中央部であり、水の影響は少ないと考えられる。輪荷重走行帯および非走行帯は、わだち掘れの位置を確認することで決定した。また実橋防水層での試験結果との比較のため、対象床版防水層と同種のものについて、道路橋床版防水便覧⁴⁾に準拠し作製した供試体を使用し、同様に試験を実施した。なおこれを室内供試体と称することとする。供試体寸法

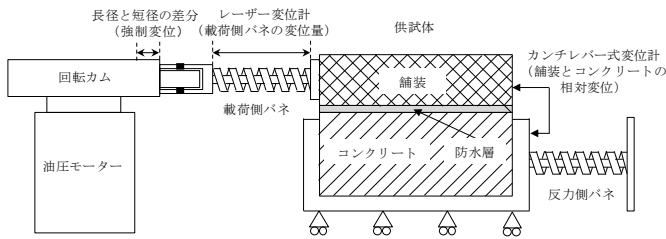


図-4 せん断疲労試験機の载荷機構

表-4 せん断疲労試験

r	輪荷重走行帯			非走行帯			室内供試体		
	S	N	P(N)	S	N	P(N)	S	N	P(N)
1	0.056	6200	0.841	0.058	5999	0.841	0.077	73923	0.794
2	0.059	9851	0.614	0.059	9532	0.614	0.061	82941	0.500
3	0.058	18288	0.386	0.058	11979	0.386	0.062	112456	0.206
4	0.055	21265	0.159	0.059	35049	0.159			
1	0.079	5747	0.870	0.077	4568	0.841	0.098	11820	0.891
2	0.074	15547	0.685	0.078	7090	0.614	0.11	15235	0.734
3	0.079	19718	0.500	0.078	8362	0.386	0.097	17660	0.578
4	0.076	20113	0.315	0.061	10096	0.159	0.11	18768	0.422
5	0.075	48367	0.130				0.11	29148	0.266
6							0.13	32645	0.109
1	0.14	58	0.891	0.14	391	0.870	0.16	2917	0.891
2	0.15	920	0.734	0.13	510	0.685	0.21	3014	0.734
3	0.13	970	0.578	0.16	544	0.500	0.17	3163	0.578
4	0.13	1669	0.422	0.16	551	0.315	0.26	3240	0.422
5	0.12	2889	0.266	0.13	2696	0.130	0.26	3273	0.266
6	0.14	4464	0.109				0.20	3489	0.109

せん断応力 S : [N/mm²] 使用限界寿命 N : 回

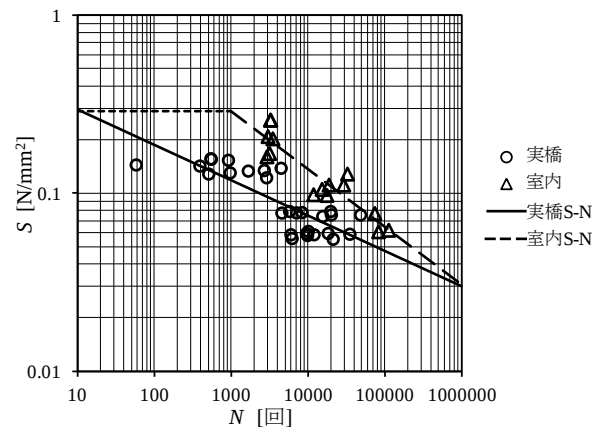
表-5 輪荷重走行帯と非走行帯の分散分析

		平方和	自由度	不偏分散	F値	F値	供試体数
		T	f	$S=T/f$	$F_0=S_A/S_B$	$(\alpha=5\%)$	k
(a)応力レベル1	群間	0.000	$w-1=1$	$S_A=0.000$	0.000	5.987	8
	群内	0.500	$k-w=6$	$S_B=0.083$			
(b)応力レベル2	群間	0.334	$w-1=1$	$S_A=0.334$	4.650	5.591	9
	群内	0.503	$k-w=7$	$S_B=0.072$			
(c)応力レベル3	群間	0.062	$w-1=1$	$S_A=0.062$	0.291	5.117	11
	群内	1.903	$k-w=9$	$S_B=0.211$			

は採取コアが直径 10[cm]の円形、室内供試体が 1 辺 15[cm]の正方形である。試験温度は道路橋床版防水便覧⁴⁾に準拠し、約 23℃とした。また静的せん断強度は、実橋供試体について未実施であり、室内供試体は、0.29[N/mm²]である。

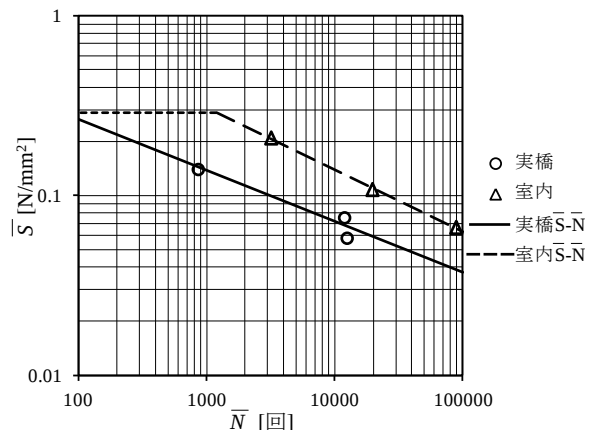
4.2 せん断疲労試験機

せん断疲労試験には大阪大学で開発された、回転式せん断疲労試験機を用いた。载荷機構を図-4 に示す。楕円形をした回転カムによる強制変位付与部と、床版、床版防水層および舗装からなる供試体の防水層接合面に、水平せん断応力をばねの力と与えるユニットから構成される。ばねは長径と短径の差分、強制変位が付与され、楕円形カムの回転運動により、ばねを通じて供試体に 80[rpm]の繰り返しせん断応力を生じさせるものである。



実橋 : $\log S = -0.198 \log N + \log 0.465$
 室内 : $\log S = -0.324 \log N + \log 2.719$

図-5 S-N 曲線



実橋 : $\log \bar{S} = -0.284 \log \bar{N} + \log 0.950$
 室内 : $\log \bar{S} = -0.345 \log \bar{N} + \log 3.342$

図-6 $\bar{S}$ - $\bar{N}$ 曲線

ユニットは供試体前後にばねを設けた構造となっており、回転カム側が载荷側、他方が反力側である。供試体に安定した荷重を与えるために载荷側、反力側それぞれに 2 本のばねが並列に設置されている。

4.3 せん断疲労試験結果

表-4 にせん断疲労試験結果を示す。せん断応力は供試体に導入した最大せん断応力であり、 N は使用限界寿命である。使用限界寿命とは、荷重载荷回数と舗装-コンクリート間のずれとの関係における急変点として定義される⁴⁾。試験結果について見てみると、室内供試体についてはばらつきが小さいのに対し、実橋供試体は非常にばらつきが大きいことが分かる。

4.4 統計的処理

(1) 輪荷重走行帯および非走行帯

せん断疲労試験の結果から、せん断疲労寿命に関して非常にばらつきが大きいことが確認された。したがって輪荷重の作用がせん断疲労寿命に影響を与えているかどうかは、このままでは容易に判断することができず、何らかの統計的処理⁵⁾が必要であると考えられる。そこでメディアンランク法により、それぞれの応力レベルで



(a) 標準的な断面

(b) 床版コンクリート含む



(c) 珪砂が著しく多い

図一7 実橋供試体破壊断面の一例

の生存確率 $P(N)$ を求めた。ただし同一応力レベルであっても若干供試体ごとにせん断応力が異なってしまう。しかしこの差異は小さいものとして捉え、同一試験条件とみなす。床版防水層のせん断疲労寿命の分布形は、 $S-N$ 曲線が N の対数によって表されることが多い⁴⁾ことから、対数正規分布に従うと仮定する。

表-5 はこれら 3 つの応力レベルについて、それぞれ輪荷重走行帯および非走行帯の試験結果が、疲労寿命の対数値に有意差があるかどうかを、分散分析によって検討した結果を示している。なお、せん断応力の小さい順に、応力レベル 1-3 とする。本検討から輪荷重の有無に危険率 5% で有意差は無いという結果になった。

(2) 実橋供試体および室内供試体

前項で輪荷重走行帯と非走行帯の試験結果に有意差が無いことが示された。以下、両者を実橋供試体と扱い、実橋供試体および室内供試体の $S-N$ 曲線を図-5 に示す。

また室内供試体と実橋供試体について前項と同様に疲労寿命が対数正規分布に従うと仮定し、それぞれの応力レベル $\bar{s}$ に対して $P(N)=0.5$ に相応する平均疲労寿命 $\bar{n}$ を求めると、 $\bar{s}-\bar{n}$ 曲線は図-6 のようになる。この結果から実橋供試体は室内供試体と比較して、およそ 1 オーダーせん断疲労寿命が小さいことが読み取れる。

5. 破壊断面

同一応力レベルにおいて、疲労寿命が平均疲労寿命に比べ極端に小さいものは特徴的な破壊断面を呈した。図-7 に実橋供試体における破壊断面の一例を示す。(a) は標準的な断面であり、(b)、(c) は観察された特徴的な破壊断面である。(a) は床版防水層の破壊であり、断面全域に渡り床版防水層が十分に塗布されており、珪砂が破壊断面に付着していることが確認できる。(b) は破壊断面に床版コンクリートが含まれている。コンクリートの材料破壊部は劣化している様子が観察された。(c) は床

版防水層の破壊であるが、標準的なものに比べ珪砂の量が著しく多い。また破壊断面に対して珪砂の多くが付着しておらず、接着不良であると考えられる。

6. まとめ

本論文は設置から 5 年経過した道路橋床版防水層を対象として、引張接着試験およびせん断疲労試験を実施し、付着性状について検討したものである。以下に得られた知見を示す。

- 床版全面に渡り実施した引張接着試験では、車道幅員端部に設置されたウレタン樹脂系防水はすべて付着性能を消失していた。一方アスファルト加熱型塗膜系防水では、局部的に付着性能の低いものがあり、コア採取位置による付着性能の大小関係を見出すことが出来なかった。多くが床版防水層の破壊であるが、床版コンクリートの砂利化も一部確認された。
- せん断疲労試験は輪荷重作用の有無に着目し、施工や環境による影響が少ないと考えられる、隣接する輪荷重走行帯および非走行帯を対象に実施した。試験結果はばらつきが大きく、分散分析によると有意差は無い結果となった。実橋供試体と室内供試体を比較すると、せん断疲労寿命はおおよそ 1 オーダーの差が生じる結果を得た。
- 実橋供試体について破壊断面を観察すると、多くは床版防水層の破壊であったが、疲労寿命が平均疲労寿命に比べ極端に小さいものは、床版コンクリートの材料破壊や、珪砂の量が著しく多く接着不良のものが確認された。珪砂散布に関しては、接着性を阻害しない均一な散布方法などを検討する必要があると考えられる。それぞれのコアはお互いに近い位置で採取されているにも関わらず、施工状況や床版コンクリートの状態が異なっているものと推察される。
- 本論文では 1 橋に対して引張接着試験およびせん断疲労試験を実施したが、劣化経過のメカニズムは不明な点が多い。施工法や劣化要因などについて、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版、2007。
- 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付着評価に関する検討、平成 20 年度土木学会北海道支部論文報告集、第 65 号、2009。
- 3) 澤松俊寿、岡田慎哉、山崎達哉：一般国道 275 号志寸川橋の床版陥没について－防水層を含めた床版の劣化損傷状況の調査－、第 56 回北海道開発技術研究発表会、2013。
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007。
- 5) 井上正一、西林新蔵、吉野公：コンクリートの圧縮疲労強度の特性値に関する研究、土木学会論文集、No. 451/V-17、pp.59-67、1992。
- 6) 松下博通、徳光善治：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集、第 284 号、pp.127-138、1979。