

アラミド繊維シート補強された損傷床版に対する管理寿命の推定手法

An Estimation of Management Life for Damaged Concrete Slab Strengthened by Cross Textile Aramid Sheet

鍋島 益弘* , 柑本 哲哉** , 三上 浩*** , 廣瀬 清泰**** , 堀川都志雄*****
Masuhiro NABESHIMA, Tetsuya KOJIMOTO, Hiroshi MIKAMI, Kiyoyasu HIROSE and Toshio HORIKAWA

*工博 大成ロテック(株)中部支社 営業部 (〒460-0008 名古屋市中区栄 2-11-30)

**工修 SRI ハイブリッド(株) ハイブリッド営業部 (〒651-0072 神戸市中央区脇浜町 3-6-9)

***工博 三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

****工修 東洋技研コンサルタント(株)名古屋支社 技術部 (〒460-0003 名古屋市中区錦 1-6-10)

*****工博 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Several fatigue tests have already been carried out to verify effects of repair for deflection and stresses in damaged slabs strengthened by two kinds of cross textile aramid sheet under wheel running machine. On basis of experimental results and ideas of the serviceability limit state, a useful method to be able to judge the fatigue life in management of actual bridge deck slab has been expected at times. Recently a computer program to resolve the previous problems has developed in viewpoint of relation between variation ratios of elastic deflection derived from measurement and numerical values of deflection calculated by thin plate theory.

In this report, the outline of this program and a numerical example are shown, through comparing results about fatigue life obtained respectively by this method and by MATSUI. Also it is described that this method is powerfully an aid to ask the maintenance life in designing way stiffened by aramid sheet for damaged actual slabs.

Key Words: aramid sheet bonding method, management life, fatigue life, deteriorated model, fatigue deterioration

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版という)のひび割れによる損傷事例が、昭和48年頃に始めて報告されて以来、道路管理者ならびに関係者らがその原因の究明に鋭意努力してきた。今日ではその主な要因は、自動車荷重の走行作用が床版に損傷をもたらす、広義の疲労現象であると言われている。

これまで補強工法には、種々の工法が提案・実施されている¹⁾、現在の交通状況に支障をきたすことがない、すなわち交通規制の措置を施さずに、現場施工が可能な床版下面からの補強工法が最適であると、各方面の道路管理者から強く要請されている。また、曲げモーメントのみならず、せん断力にも耐えうる工法で、軽度から重度の低い範囲に及ぶ損傷レベルに対処できる補強性能が望まれている。二方向アラミドシート接着工法のように膜力を利用する補強構造は、橋軸直角方向および橋軸方向の二方向にわたって抵抗し、かつ床版下面での不具合や不整面にも追従でき、力学的にも優れた補強工法として注目されている。

二方向アラミドシート工法研究会(以下、研究会と略称する)では、平成10年度から平成13年度に亘って、大阪工業大学ならびに旧建設省土木研究所の輪荷重走行試験機を用いて、二方向アラミド繊維シート接着工法の疲労耐久性を確認するための走行実験を実施してきた。

これらの実験データの分析により、アラミド繊維シートで補強された損傷床版を対象として、道路管理上の限界に使用限界状態を想定する疲労寿命推定の一手法を提案することができた²⁾。

従来の疲労寿命の概念は、破壊に至る終局状態を供用できる限界として設定されたものであり、走行実験に使用された床版や実橋床版を対象とした試算では、疲労寿命が1千~1万年を超えるような非現実的な結果になることも多い。したがって、道路管理上の視点からは、実用性のある合理的な疲労寿命の推定手法が望まれている。当研究会では、繊維シート補強床版を対象として先に提案している、道路管理上の限界を使用限界状態に設定した疲労寿命を管理上の寿命と位置づけて、管理寿命として定義する。

道路橋床版は輪荷重を直接支持する主要な部材であるため、橋梁の維持管理を計画する上で、ライフサイクルコストの視点からその管理寿命を推定する手法を確立することは重要なテーマである。研究会では、計画的な維持管理を念頭に置いた補修・補強設計の実用に供することを目的とした余寿命(管理寿命)の推定プログラムの開発を進めてきた。本報告では、このプログラムの概要を紹介し、かつ管理寿命の推定手法の妥当性と設計手法として確立するための課題について示す。

表-1 基本入力データの項目

入力データ				
床版諸元	スパン	① 主鉄筋方向	(mm)	2500
		② 配力鉄筋方向	(mm)	5000
	部材厚さ	③ 床版厚さ	(mm)	190.0
④ シート厚さ		(mm)	0.240	
輪荷重	作用位置	⑤ 主鉄筋方向	(mm)	1250
		⑥ 配力鉄筋方向	(mm)	2500
	分布幅	⑦ 主鉄筋方向	(mm)	500
		⑧ 配力鉄筋方向	(mm)	200
荷重	⑨ 輪荷重 P	(kN)	157.0	
床版断面	主鉄筋	⑩ 上側鉄筋かぶり	(mm)	30.0
		⑪ 下側鉄筋かぶり	(mm)	30.0
		⑫ 上側鉄筋量		D16 @ 300
	配力鉄筋	⑬ 下側鉄筋量		D16 @ 150
		⑭ 上側鉄筋量		D10 @ 300
		⑮ 下側鉄筋量		D13 @ 300

表-2 サブ入力データの項目

サブ入力データ			
① 鉄筋のヤング係数	(kN/mm ²)	200	
② 全断面有効時のコンクリートのヤング係数	(kN/mm ²)	27.6	
③ 引張無視時のコンクリートの換算ヤング係数	(kN/mm ²)	14	
④ アラミド繊維シートのヤング係数	(kN/mm ²)	139	
⑤ コンクリートのポアソン比 (全断面有効時/引張無視時)		0.155	/ 0.200
⑥ コンクリートの設計基準強度 σ_{ck}	(N/mm ²)	37.6	
⑦ 配力筋方向(X方向)の項数		1	150 1
⑧ 主鉄筋方向(Y方向)の項数		1	90 1
⑨ 配力筋方向(X方向)の算出点		1	1 1
⑩ 配力筋方向(X方向)の算出始点と間隔	(mm)	2500	0
⑪ 主鉄筋方向(Y方向)の算出点		1	1 1
⑫ 主鉄筋方向(Y方向)の算出始点と間隔	(mm)	1250	0
⑬ 過積載車の年間交通量	(台/年)	57,000	
⑭ 床版の劣化度 $D\delta$		0.4	
⑮ 静的補強効果 (回復率)		0.67 (0.33)	
⑯ 補強前の疲労劣化率 $\tan\alpha$		1.65E-06	
⑰ 補強後の疲労劣化率 $\tan\beta$		7.20E-07	

2. 余寿命推定プログラムの概要

2.1 プログラムの基本構成

本プログラムは、道路を維持管理する上で必要で、かつ実用的な疲労寿命の算定を目的としている。プログラム言語は、VB (Visual Basic) を使用して、グラフィックによる入出力画面および Excel 上で起動する仕様のプログラムを作成した。

実橋の橋梁床版の補強では、橋梁形式により床版の種類が異なる場合、あるいは増桁補強や上面増厚補強が既に施されている場合など、種々の環境が存在する。したがって、プログラムの開発は、実橋への適用を念頭に置けば、床版の種類や境界条件等により幾つかのモデルを設定する必要がある。すなわち、次のような条件の床版モデルが考えられる。

- ① 床版の境界条件 (単純支持, 自由辺, 固定辺等)
- ② 縦桁増設工法が施されている床版
- ③ 上面増厚工法が施されている床版

本プログラムでは、開発の第一段階として、4 辺単純支持版の無補強床版に繊維シート補強のみを施す床版モデルを対象とした。

従来、疲労寿命の算定では、①実橋での陥没破壊、②静的強度や疲労強度試験での破壊、などの破壊現象に至る終局状態を、供用できる限界として設定されてきた。終局限界における押抜きせん断耐力は、土木学会式や松井式等が提案されており、また、輪荷重走行試験に基づいて、松井による S-N 曲線や園田・堀川による S-N 曲線等が提案されてきた¹⁾。

本プログラムにおける疲労寿命の考え方の特徴は、道路管理上の限界を使用限界状態に設定している所であり、設定した床版の使用限界に至るまでの走行回数 (実橋では年数) を以て疲労寿命 (管理寿命) と定めた。使用限界状態としては、これまでの輪荷重走行試験の結果に基づき、走行回数とたわみの関係に松井⁷⁾の提案する使用限界状態の概念を導入する。すなわち、床版の劣化が進行し、たわみの実測値が引張無視時の計算値に到達した時点床版の使用限界と定めた。

プログラムにおける疲労寿命は、次の 4 項目を中心に

構成されている。

- ① はり化した床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} の計算
- ② 床版の押抜きせん断耐力 P_o の計算
- ③ 終局限界状態での疲労寿命の計算
- ④ 使用限界状態での管理寿命の計算

上記の①および②は松井式³⁾を、③では松井による S-N 曲線⁴⁾を採用し、④は輪荷重走行実験に基づいて研究会が提案している管理寿命の推定法²⁾によっている。

2.2 入力データ

入力データは、表-1に示す床版寸法や輪荷重に関する基本データと、表-2に示すサブデータから構成される。表-2の中の①～⑥は使用材料の諸元であり、⑦～⑫は床版を解析するためのパラメータである。⑬～⑰は、管理寿命の計算に用いる設定値であり、後に詳述する。

2.3 出力データ

出力データの項目を表-3に示す。図-1および図-2には、グラフィックによる入出力画面の一例を示す。

以下、表-3の出力項目について説明を行う。

(1) たわみおよび応力

全断面有効時および引張無視時での応力を算出するための断面力とたわみは、等方性板の薄板理論により計算している。現在の床版モデルは、4 辺単純支持版のみを対象としているため、三角級数で展開された Navier の解を使用した。シート補強後の応力は、シートを鉄筋に換算して算出する RC の慣用式により計算している。

なお、損傷レベルの著しい床版を対象とする場合には、直交異方性版理論を適用する必要がある。

(2) せん断耐力

床版の押抜きせん断耐力 P_o と床版がはり化した場合の押抜きせん断耐力 P_{sx} を計算している。これらには、種々の提案式があるが、ここでは松井の提案する以下の式を採用した。

すなわち、松井式³⁾では、床版上面から中立軸までのひび割れの発生していないせん断破壊面と、床版下面側のかぶり部分の鉄筋のダウエル力による引張破壊面を有効として、式 (1) のように提案されている。

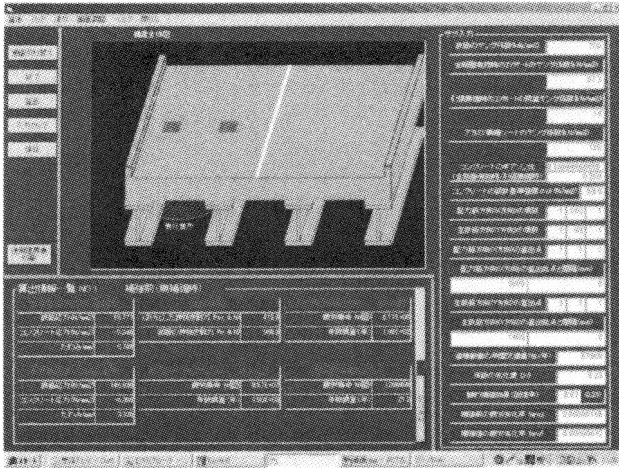


図-1 入出力画面の一例(その1)

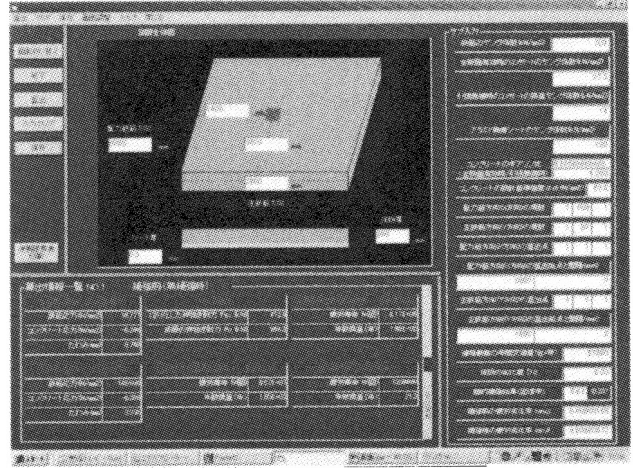


図-2 入出力画面の一例(その2)

$$P_o = \tau_{s,max} \{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + \sigma_{t,max} \{2(a+2d_m)c_d + 2(b+2d_d+4c_d)c_m\} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_{s,max}$: コンクリートの最大せん断応力度
 $= 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$ (kgf/cm²)
 $\sigma_{t,max}$: コンクリートの最大引張応力度
 $= 0.583 (\sigma_{ck})^{2/3}$ (kgf/cm²)
 E_c : 中立軸を算出する際のヤング係数
 $= 210,000 + 900 (\sigma_{ck} - 300)$ (kgf/cm²)

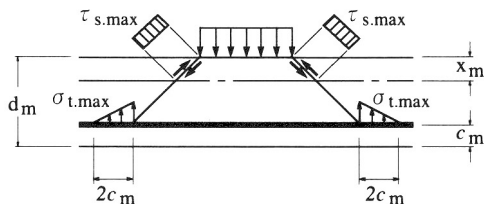
c_m : 主鉄筋のかぶり深さ

a, b : 主鉄筋方向, 配力鉄筋方向の載荷板の辺長

x_m, x_d : 主鉄筋断面, 配力鉄筋断面の中立軸距離

d_m, d_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ

c_m, c_d : 主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり深さ



一方、輪荷重走行試験の結果より、RC床版の疲労破壊の現象は、床版の終局状態において、主鉄筋方向のせん断力が床版の挙動に対して支配的であるとして、S-N線図の縦軸に作用荷重Pとはりのせん断耐力 P_{sx} との比をとった両対数型の式(2)あるいは(3)を提案している⁴⁾。ここで、貫通ひび割れによってはり化した床版のせん断耐力 P_{sx} の算出時のはり幅Bは、疲労を考える場合の輪荷重に対する終局状態の有効幅とも考えられるもので、押抜きせん断耐力の評価式(1)における配力鉄筋断面の寄与分を差し引き、式(4)のように提案している。

$$\text{乾燥状態} : \log(P/P_{sx}) = -0.07835 \times \log N + \log 1.51965 \quad (2)$$

$$\text{湿潤状態} : \log(P/P_{sx}) = -0.07835 \times \log N + \log 1.23660 \quad (3)$$

ここに、P : 作用荷重

$$P_{sx} = 2 \tau_{s,max} x_m B + 2 \sigma_{t,max} c_m B \quad (4)$$

$$B = b + 2d_d \quad (5)$$

表-3 出力データの項目

補強前(無補強時)			
全断面有効時 (主鉄筋方向)	1. 鉄筋応力	(N/mm ²)	28.947
	2. コンクリート応力	(N/mm ²)	-6.043
	3. たわみ	(mm)	0.971
引張無視時 (主鉄筋方向)	4. 鉄筋応力	(N/mm ²)	212.179
	5. コンクリート応力	(N/mm ²)	-8.399
せん断耐力	6. たわみ	(mm)	3.996
	7. はり化した押抜き耐力 P_{sx}	(kN)	354.4
終局限界状態 疲労寿命	8. 床版の押抜き耐力 P_o	(kN)	676.0
	9. 疲労寿命 N	(回)	6.80E+06
	10. 年数換算	乾燥状態 (年)	1.19E+02
	11. 疲労寿命 N	(回)	4.90E+05
使用限界状態 疲労寿命	12. 年数換算	湿潤状態 (年)	8.59E+00
	13. 疲労寿命 N	(回)	1100002
	14. 年数換算	(年)	19.3

補強後(シート補強後)			
全断面有効時 (主鉄筋方向)	15. 鉄筋応力	(N/mm ²)	/
	16. コンクリート応力	(N/mm ²)	/
	17. たわみ	(mm)	/
引張無視時 (主鉄筋方向)	18. 鉄筋応力	(N/mm ²)	178.068
	19. コンクリート応力	(N/mm ²)	-7.739
せん断耐力	20. たわみ	(mm)	3.472
	21. はり化した押抜き耐力 P_{sx}	(kN)	467.8
終局限界状態 疲労寿命	22. 床版の押抜き耐力 P_o	(kN)	807.6
	23. 疲労寿命 N	(回)	2.35E+08
	24. 年数換算	乾燥状態 (年)	4.13E+03
	25. 疲労寿命 N	(回)	1.69E+07
使用限界状態 疲労寿命	26. 年数換算	湿潤状態 (年)	2.97E+02
	27. 疲労寿命 N	(回)	3520248
	28. 年数換算	(年)	61.8

シートの補強効果			
① 鉄筋応力の低減率(回復率)	(%)		83.9 (16.1)
② コンクリート応力の低減率(回復率)	(%)		92.1 (7.9)
③ たわみの低減率(回復率)	実験値	(%)	67.0 (33.0)
	計算値	(%)	86.9 (13.1)
④ 終局限界状態での疲労寿命の増加率	乾燥状態	(倍)	34.61
	湿潤状態	(倍)	34.61
⑤ 使用限界状態での疲労寿命の増加率	(倍)		3.20

なお、シート補強後の P_{sx} および P_o の計算では、式(1)および(4)の適用に際し、シートを鉄筋に換算するだけでは適用できないため、既往の押抜きせん断試験結果⁵⁾との整合から、次のような手法によれば、押抜きせん断耐力 P_o が実験値と比較的によく一致することが確かめられている。

- ① シートはヤング係数比で鉄筋に換算する。
- ② シートを換算して加算した引張鉄筋の有効高さは床版厚(圧縮縁からシートまでの距離)とする。
- ③ ②の有効高さを用いて中立軸位置を算出する。
- ④ 主鉄筋と配力筋のかぶり厚さ c_m, c_d は実際に配

置されている鉄筋のかぶり厚さを採用する。

上記②の仮定は、シートの膜作用による効果を便宜的に置き換えたものであり、理論的根拠は明確ではない。

(3) 終局限界状態の疲労寿命

P は入力値であるので、式 (4) の P_{sx} を用いて、式 (2) あるいは式 (3) の S-N 曲線より、終局状態に至る疲労寿命 N は輪荷重の走行回数で計算される。

疲労寿命は疲労に影響を与える輪荷重の走行回数で計算されるが、この走行回数を実橋での疲労寿命として表す場合には、年数で表現する必要がある⁵⁾。過積載車の年間交通量⁶⁾は、対象橋梁において疲労に重大な影響を与える大型車の輪荷重の年間通過台数のことを意味し、サブ入力データ(表-2)における過積載車の年間交通量(台/年)で N を除すことによって疲労寿命を年数に換算する。過積載車の年間交通量の設定は、路線の交通特性により異なるため、橋梁毎に設定する必要があるが、疲労寿命の計算結果に与える影響は大きいので、その合理的な評価が課題である。

(4) 使用限界状態の疲労寿命

使用限界状態の疲労寿命^{2), 5)}は、研究会の提案する RC 床版の劣化モデルにより計算される。以下、その計算過程について示す。

3. RC床版の劣化モデルの設定

3.1 使用限界状態の設定

前述のように、松井⁷⁾の提案する式 (6) を用いて RC 床版の疲労限界を設定する。

$$\text{床版の劣化度 } D_{\delta} = \frac{W_{実} - W_{全}}{W_{引} - W_{全}} \quad (6)$$

ここに、 $W_{実}$ ：ある段階における実際の活荷重たわみ

$W_{引}$ ：引張無視時の活荷重たわみの計算値

$W_{全}$ ：全断面有効時の活荷重たわみの計算値

D_{δ} ：床版の劣化度を表し、損傷のない初期の状態では 0、たわみが引張無視時の計算値に到達した時点で 1.0 となる。

すなわち、床版の活荷重たわみが引張無視時の計算値に到達する $D_{\delta}=1.0$ の時点でも床版の使用限界と定義する。

3.2 劣化モデルの設定²⁾

これまでの実験結果^{5), 8)}の考察より、図-3のようにたわみと輪荷重の走行回数の関係で表した RC 床版を次のような劣化過程にモデル化している。

- ① 疲労限度以下の輪荷重下では、床版のたわみはほぼ全断面有効時の計算たわみ近傍で推移する。
- ② 疲労劣化の影響を受ける過積載車等の輪荷重のもとでは、ほぼ一定の傾き $\tan \alpha$ でたわみが増加するとともに、劣化が進行する領域となる。
- ③ このまま劣化が進行すれば、たわみの実測値が引張無視時の計算値に到達し、使用限界状態に至る(図中の R 点)。
- ④ 図中の P 点でシート補強を施したとすれば、補

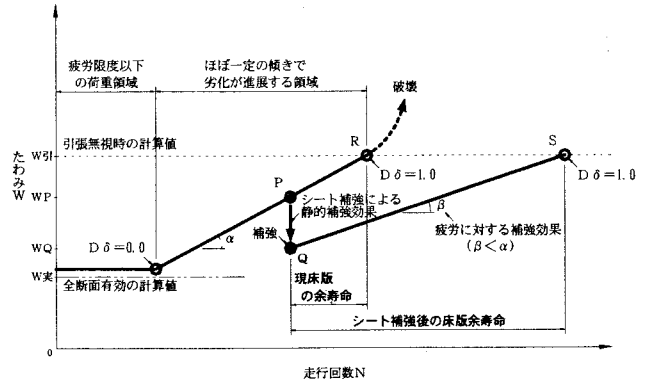


図-3 疲労劣化の過程と余寿命推定の模式図

強時点でたわみは減少して、Q 点のたわみまで回復する。この補強効果が、実験値より設定される表-2 の入力値の静的補強効果(回復率)である。

この時の P 点の位置は、床版の劣化度 D_{δ} の入力値から計算される。すなわち、使用限界を対象とするため、現床版の損傷度を表す指標として式 (6) の劣化度を用いている。

⑤ P 点からの残された現床版の疲労寿命、すなわち使用限界状態に至る現床版の余寿命(表-3の補強前の疲労寿命 N)は、PR 間の走行回数で与えられる。

⑥ シート補強後は、Q 点からスタートすることとなり、②と同様に補強後におけるほぼ一定の傾き $\tan \beta$ でたわみが漸増し始め、たわみの実測値が引張無視時の計算値に到達する使用限界 S 点までの走行回数が補強床版の余寿命(表-3の補強後の疲労寿命 N)、すなわち管理寿命になる。

したがって、P 点と Q 点での床版の余寿命は次式で推定できる。

現床版(無補強)の余寿命 L_0 (P 点) :

$$L_0 = (W_{引} - W_P) / \tan \alpha \quad (7)$$

シート補強後の床版の余寿命 L_r (Q 点) :

$$L_r = (W_{引} - W_Q) / \tan \beta \quad (8)$$

ここで、 W_P はシート補強時点での既設床版のたわみであり、静的補強効果(回復率)によって W_P から減少したたわみ W_Q は、劣化度と回復率との相関から、式 (6) の劣化度を指標として推定することが可能である。しかし、劣化度と回復率の定量的な相関は得られていないため、実験値から得られた回復率を入力値としている。

4. 静的補強効果の設定

静的補強効果は、損傷劣化により剛性が低下した床版に補強を施した時点で、たわみが低減する割合によって表すこととし、補強前のたわみに対する補強後のたわみの比を入力値(表-2)としている。

このたわみの低減効果は、損傷度(劣化度)により異なるが、一般には損傷度が高いほど回復率も大きくなる傾向が見られる。平成 13 年度に実施したアラミドシート 1 層貼り補強の実験値⁵⁾では約 0.67 (回復率 0.33)、そして

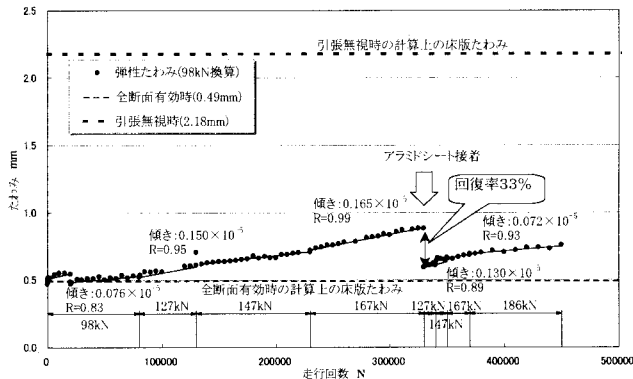


図-4 アラミドシート1層貼り補強の実験結果

平成 12 年度に旧建設省土木研究所で実施された 2 層貼りの実験データ^{9,10)}では約 0.62 (回復率 0.38) の結果が得られている。図-4に 1 層貼り補強の場合のたわみと走行回数の関係を表した実験結果を、図-5には同様の、2 層貼りの実験結果を示すが、土木研究所での実験データは階段荷重で行われているので、B 活荷重 98kN 時に換算している。静的補強効果は、実験データとしては少ないが、損傷度に応じて 0.62 ~ 0.67 (回復率 0.38 ~ 0.33) の範囲で設定することとした。今後、損傷度に応じたたわみの低減効果の算出法について検討する必要がある。

5. 疲労劣化率の設定

疲労劣化率 $\tan \alpha$ および $\tan \beta$ は、図-3に示されている疲労に対する劣化率で、それぞれ補強前と補強後において走行回数の増加とともにほぼ一定の傾きで漸増するたわみの変化率と定義され、疲労劣化の速度を表す指標となる。すなわち、床版の使用限界(たわみが引張無視時の計算値に到達する時点)が管理上の限界であるとすれば、その間のたわみと走行回数の関係はほぼ線形な関係に近似できるため、横軸に走行回数、縦軸にたわみをとれば、輪荷重の走行に伴ってたわみが増加する割合はその直線の傾きで表すことができる。

図-6は、土木研究所で実施されたアラミドシート 2 層貼りの実験データ^{9,10)}を、157kN 時から 235kN 時までの各荷重段階毎のたわみと走行回数の関係に着目して抽出したものであり、荷重毎に疲労劣化率 $\tan \beta$ を線形回帰により求めた結果である。表-4は、これらを相関係数 R とともに示したもので、どれも比較的高い相関 ($R > 0.7$) が得られている。

余寿命の計算に用いる劣化率は、既往の 1 層貼りの実験値²⁾との整合と、実際に計測された輪荷重の最大値は 157kN 程度であることを考え併せて、走行荷重が 157kN もしくは 177kN の作用下での劣化率の採用が妥当と考えられる。ここでは、既往の実験値を含め、表-5に示す値を採用することとした。2 層貼りの劣化率は、1 層貼りの 1/2 以下の値となっている。

6. 余寿命推定プログラムによる計算例

ここでは、本プログラムで行った計算例を示す。表-1 および表-2の入力値に対して得られた結果が表-3の出力

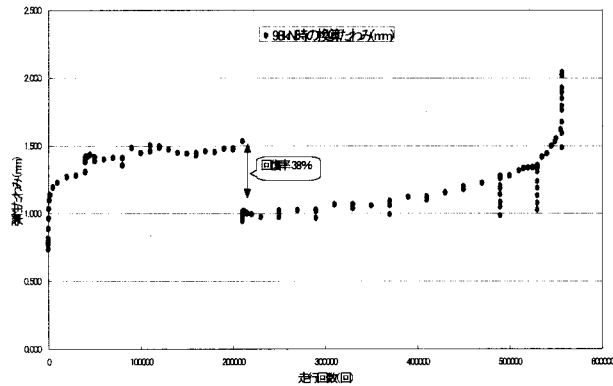


図-5 アラミドシート2層貼り補強の実験結果

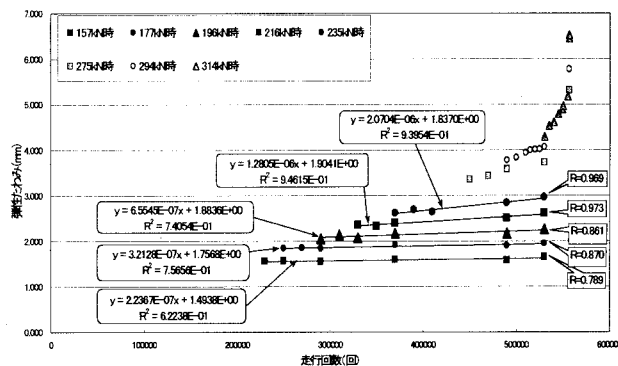


図-6 アラミドシート2層貼り補強の実験結果

表-4 2 層貼り補強の場合の疲労劣化率 $\tan \beta$

荷重時	疲労劣化率 $\tan \beta$ (傾き)	相関係数 R
157kN 時	2.236×10^{-7}	0.789
177kN 時	3.212×10^{-7}	0.870
196kN 時	6.554×10^{-7}	0.861
216kN 時	1.280×10^{-6}	0.973
235kN 時	2.070×10^{-6}	0.969

表-5 補強前および補強後の疲労劣化率

アラミドシートの接着層数	補強前の疲労劣化率 $\tan \alpha$	補強後の疲労劣化率 $\tan \beta$
1 層貼り	1.65×10^{-6}	7.20×10^{-7}
2 層貼り		3.21×10^{-7}

注) どれも 8 7 タイプの二方向シートによる実験値。

値である。この計算例は、前述の土木研究所で実施されたアラミドシート 2 層貼りの実験床版を計算モデルとして、アラミドシートを 1 層貼りに置き換えて行ったものである。補強時の損傷床版は、ひび割れ密度が 2 ~ 6 m^2 程度の損傷レベルを想定して、劣化度を 0.4 と設定した。輪荷重は、実測される最大値に近い 157kN とし、年間交通量は 57,000 台/年と設定している²⁾。

計算結果では、補強前後に対する余寿命は、終局限界の乾燥状態でそれぞれ、119 年および 4,130 年の非現実的な値となっているのに対し、使用限界の余寿命(管理寿命)では、それぞれ 19.3 年および 61.8 年となり、管理上の目標値として現実的な結果が得られている。図-7には、計算結果をグラフィック表示した画面のイメージを示す。

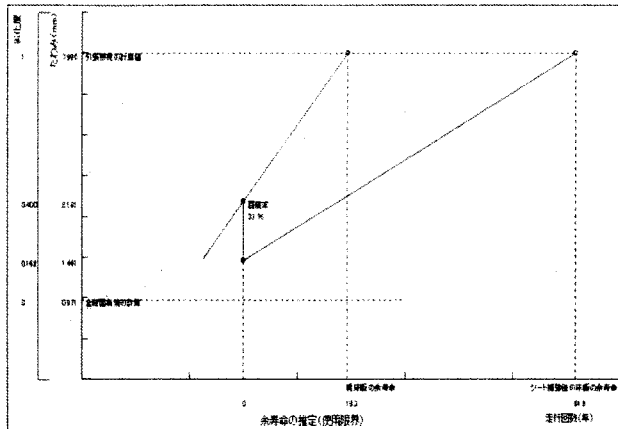


図-7 計算結果のグラフィック表示

7. 今後の課題

管理上の余寿命の推定を、補強設計という実務レベルでの実用に供することを目的としたプログラム開発を行ったが、推定の精度や設計レベルで要求される精度、あるいは統一的な各指標値の設定など残されている課題も多い。現時点で指摘される主な課題として次の点があげられる。

- ① 実橋床版モデルへの対応
- ② 損傷レベルの指標値の設定
- ③ シート補強による静的補強効果の定量的評価
- ④ シート補強後の疲労劣化率の定量的評価

以下、これらの課題について示す。

(1) 実橋床版モデルへの対応

実橋床版にシート補強を適用する場合には、既に増桁補強や上面増厚補強が施されていることが多く、また床版の境界条件も種々の条件が存在する。このため、プログラムの開発を進めるにあたっては、諸条件を有する実橋の床版モデルに対応できる床版の解析手法、例えば縦桁を有する床版や多層系床版に対処できる理論を取り込む必要がある。また、損傷レベルの高い床版に対しては、曲げ剛性の違いが盛り込める直交異方性版理論の適用も必要となる。

(2) 損傷レベルの指標値の設定

RC 損傷床版の損傷レベルを表す定量的な指標としては、従来よりひび割れ密度が用いられているが、劣化の指標となる弾性たわみとの相関性は明確ではない。このため、本プログラムでは、弾性たわみと相関している松井の提案する劣化度を損傷レベルの指標として採用した。しかし、ひび割れ密度は、損傷度の指標として既に定着し、損傷度の評価基準としても使用されていることを考えれば、この劣化度とひび割れ密度の相関性を定量的に定めることが望まれる。

(3) シート補強による静的補強効果の定量的評価

静的補強効果として定義しているたわみの低減量は、シートを考慮して換算した板剛度より得られるたわみの低減量よりも、実験値の方が相当大きく現れることがこれまでの実験結果^{5, 8)}により確かめられている。

例えば、本計算例の表-3では、“シートの補強効果の

③の計算値”に示されるように、計算によるたわみの回復率は約 13 %で、実験で確認される 30 ~ 40 %に比して小さいことが分かる。

静的補強効果を適正に評価するためには、実験データを収集・分析することにより、床版の劣化度に応じた評価方法を定める必要がある。

(4) シート補強後の疲労劣化率の定量的評価

疲労劣化率は、余寿命推定において重要なパラメータの一つであり、本プログラムでは実験結果に基づいて設定されているが、推定の精度を確保するためには、さらに多くの実験的調査が必要とされる。すなわち、疲労劣化率は、荷重レベル、損傷レベル、および補強レベル等々の影響により異なるものであるため、これらの相関性を明らかにするための実験的調査が必要となる。

8. まとめ

二方向アラミドシート工法研究会では、RC 損傷床版の使用限界に基づく疲労寿命を管理上の視点で捉えた管理寿命として位置づけることにより、設計の実務レベルで役立つ余寿命推定のプログラム開発を行った。開発の第一段階でもあり残されている課題も多く、ここで提案した管理寿命の推定手法が、橋梁の維持管理を実施するための一手法として有用なものとなれば幸いである。

最後に、アラミドシート 2 層貼りの走行実験を実施し、貴重な実験データを提供して頂いた独立行政法人土木研究所の方々へ深く感謝致します。また、プログラム作成にあたり、ご助言とご協力を頂いた大阪工業大学卒業生上田康夫氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計，平成12年10月。
- 2) 三上，田村，角田，廣瀬，堀川：二方向アラミド繊維シート接着補強床版の疲労耐久性評価の一手法，第3回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 169-174，平成15年6月。
- 3) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文報告集，第348号/V-1，pp. 133-141。
- 4) 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年7月。
- 5) 二方向アラミドシート研究会：二方向アラミドシート接着工法の疲労耐久性評価(大阪工大輪荷重試験機による走行載荷実験)報告書，平成14年8月。
- 6) 小塩，山田，貝沼，小幡，古市：鋼床版部材を用いた走行車輛の輪重推定，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1141-1151，1998年3月。
- 7) 松井繁之，前田幸雄：道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第374号/I-1，1986年10月。
- 8) 二方向アラミドシート研究会：二方向アラミドシート接着工法(1層貼り)の効果確認実験輪荷重走行実験報告書，平成13年10月。
- 9) 三上，柑本，鍋島，堀川：二方向ケブラー繊維シートで下面補強した損傷床版の疲労耐久性，第2回道路橋床版シンポジウム論文集，pp. 83-88，平成12年10月。
- 10) 国土交通省土木研究所ほか：道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その4) -標準試験方法および第4回試験報告-，2001年9月。