

## 論文

## アラミド繊維シートによる補強時と再補強時での余寿命推定プログラムの開発

三上 浩\*, 井之上賢一\*\*, 今田文男\*\*\*, 河野一資\*\*\*\*, 廣瀬清泰\*\*\*\*\*, 堀川都志雄\*\*\*\*\*

\* 博士(工学), 三井住友建設(株), 技術研究開発本部 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\* ファイベックス(株), 土木部 (〒160-0022 東京都新宿区新宿 5-15-5)

\*\*\* 大成ロテック(株) (〒160-6112 東京都新宿区西新宿 8-17-1)

\*\*\*\* 弘栄貿易(株), 化学品事業部 機能化学品部 (〒530-0001 大阪市北区梅田 2-4-13)

\*\*\*\*\* (株)井沢設計, 技術部 (〒581-0019 大阪府八尾市南小阪合町 5-8-30)

\*\*\*\*\* 工博, 大阪工業大学名誉教授 (〒522-0056 彦根市開出今町 1488-11)

本研究では損傷 RC 床版の劣化診断での現場載荷試験や FWD 試験等による計測たわみが、引張無視時の計算値に到達する時点を使用限界状態とする考え方を念頭に、ひび割れ密度と劣化度の関係、輪荷重走行試験データ、および多層版理論による数値を組み合わせて、既存床版の劣化度判定や床版の余寿命推定を行う EXCEL 版のプログラムを開発する。1層貼りや2層貼りで補強するアラミドシート工法を実橋床版に採用する場合での余寿命を比較検討する。また再補強工法に該当する後追い施工や縦桁増設床版を例に、1層貼りあるいは2層貼りによるそれぞれの工法が床版にどの程度の補強効果と延命化をもたらすのかを試算する。

キーワード: 余寿命推定, シート補強工法, 再補強効果, 多層版解析

## 1. はしがき

損傷 RC 床版を下面側から補強する工法では交通量規制を必要としないので、主に炭素繊維やアラミド繊維によるシート系の補強工法が採用されている。RC 床版の終局限界状態での押し抜きせん断耐力に着眼する輪荷重走行試験が実施され、多くの研究成果を収めている。一方道路管理者らは、持続的な社会資本を維持する立場から使用限界状態に関心を寄せているが、既存床版が使用限界状態に至るまでの劣化過程の挙動や余寿命の推定に着目する研究は数少ない。著者らは床版の劣化進行により、たわみの実測値が引張無視時の計算値に到達した時点道路管理上の目安とする使用限界状態に立脚し、輪荷重走行実験によるたわみの増加と走行回数との関係を回帰直線で表す劣化モデルを用いて、床版の余寿命を推定する手法と実務レベルでの活用を図る余寿命推定プログラム (EXCEL 版) を提案した<sup>1,2)</sup>。しかしひび割れ密度と劣化度の関係や、劣化度とコンクリートの弾性係数の関係等の評価についての課題が残されていた。

本研究では、これらの課題の克服を目的に設計レベルでの評価方法、および多層版解析を導入することにより改良された余寿命推定プログラムを開発する。アラミド補強工法は補強時に樹脂層(厚さ 1mm, 弾性係数 2

kN/mm<sup>2</sup>)を介して、二方向アラミドシート(厚さ 0.24mm, 弾性係数 118 kN/mm<sup>2</sup>)を1層のみ貼り付ける場合と、一度に2層貼りを施す場合が一般的である。これらを実橋床版に適用する場合についてそれぞれの余寿命を計算し、比較検討する。次に補強手順の1つとして再補強とも言える後追い施工を考える。まず1層貼りの施工を先行させ、数年後アラミドシートを再貼付する工程である。このときの余寿命が、1層貼りのみに比べどの程度の延命化が望めるのかを明らかにする。また縦桁設置により補強された既存床版を1層貼りや2層貼りシートで貼付する際に、どの程度の再補強効果が期待できるのかを照査する。

2. 多層版解析の概要<sup>3)</sup>

水平面内の座標  $x, y$  の原点をそれぞれ版の隅角部に、またそれらと直交する  $z$  座標を版中央面に設定する(図-1)。変位関数 Galerkin-vector  $f_3$  と Boussinesq 関数  $\theta_3$  の基礎式、および変位との関係式を以下に示す。

・変位関数の基礎式

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \theta_3 = 0 \quad (1)$$

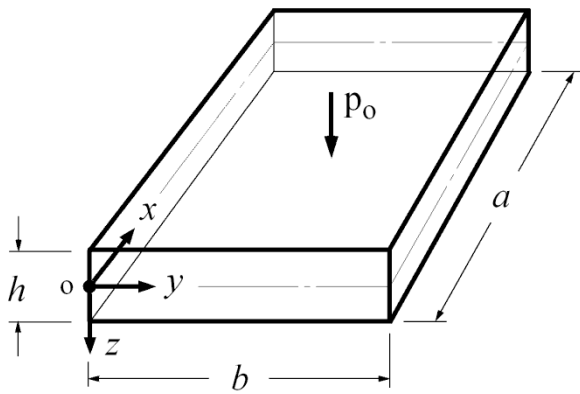


図-1 板の形状

・変位と変位関数の関係式

$$\left. \begin{aligned} 2\mu u &= -\partial^2 f_3 / \partial x \partial z + \partial \theta_3 / \partial y \\ 2\mu v &= -\partial^2 f_3 / \partial y \partial z - \partial \theta_3 / \partial x \\ 2\mu w &= \mu / (\lambda + \mu) [\partial^2 / \partial z^2 \\ &\quad + (\lambda + 2\mu) / \mu (\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2)] f_3 \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、 $\Delta$  : 3次元ラプラシアン,  $\lambda, \mu$  : ラメの定数  
式(1)の変位関数は Fourier 級数で展開される。

$$\left. \begin{aligned} f_3 &= \sum_m \sum_n (C_1 \text{ch}\gamma z + C_2 \text{sh}\gamma z \\ &\quad + C_3 \gamma z \text{ch}\gamma z + C_4 \gamma z \text{sh}\gamma z) \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \\ \theta_3 &= \sum_m \sum_n (C_5 \text{ch}\gamma z + C_6 \text{sh}\gamma z) \cos \alpha_m x \cos \beta_n y \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで、 $\alpha_m = m\pi/a$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ),  $a$  :  $x$  方向のスパン  
 $\beta_n = n\pi/b$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ),  $b$  :  $y$  方向のスパン  
 $\gamma^2 = \alpha_m^2 + \beta_n^2$ ,  $\text{ch}\gamma z = \cosh \gamma z$ ,  $\text{sh}\gamma z = \sinh \gamma z$   
 $C_1 \sim C_6$  : 各層の上下面の境界条件から決定される積分定数

全周単純支持版の上面に作用する  $x, y, z$  方向の表面力をそれぞれ  $X_u, Y_u, Z_u$ , また下面の表面力を  $X_l, Y_l, Z_l$  とし, 式(3)の6つの積分定数とこれらの表面力とを関係づける。さらに式(2)を用いれば, 各方向の上下面における変位が求められる。2つの版が版厚方向に接合されているとき, 上側の版下面における変位と下側の版上面での

表-1 床版の諸元

橋軸直角方向 スパン(mm)	版厚 (mm)	下鉄筋被り (mm)	上側鉄筋 (mm)	下側鉄筋 (mm)
2700	190	40	D16@250	D16@125

変位との連続条件式を満足するように構成すれば, 接合面に働く伝達力に関する連立方程式が Fourier 級数の各項ごとに成立し厳密解が得られる。この操作を多層版に適用すれば漸化式系の方程式が形成される。

### 3. アラミドシート補強工法による余寿命推定

床版の劣化度判定には, a) ひび割れ密度による指標, b) 実測たわみによる指標がある。a) は広汎に利用されているが, 劣化度との関係が明確ではない。そこでひび割れ密度と劣化度の関係式<sup>4)</sup>を導入すれば, a) は大きな役割を果たすと期待される。松井<sup>5)</sup>は  $D_\delta = 1$  となるときを使用限界状態と定義する提案式を示した。

$$D_\delta = (\delta_{\text{実}} - \delta_{\text{全}}) / (\delta_{\text{引}} - \delta_{\text{全}}) \quad (4)$$

ここで、 $D_\delta$  : 劣化度,

$\delta_{\text{実}}$  : 実測たわみ,

$\delta_{\text{全}}$  : 全断面有効時たわみ,

$\delta_{\text{引}}$  : 引張り無視時たわみ

本研究の数値計算では床版を全断面有効時や引張り無視時での RC 部材として扱い, それぞれの曲げ剛性を勘案する換算弾性係数からなる版剛性を導入することにより, 多層版解析でのたわみを算出する。

余寿命推定プログラムを起動して, ひび割れ損傷を受けた実橋タイプのモデルA (供用期間 50 年) の床版中央に輪荷重 98kN (載荷面積 200mm × 500mm) が作用する場合の例を取り上げる。この床版の諸元を表-1 に示す。なお橋軸方向のスパンを 5400mm, 過積載車の年間交通量を 50,000 台/年と設定する。

以下の手順①と②に従ってプログラムに入力すれば, アラミドシートの1層貼りや2層貼りで補強する場合の余寿命が自動的に計算されて, 出力される (手順③)。

・手順① (図-2)

床版の諸元を図中の青色の欄に入力する。

入力データ				
床版諸元	スパン	① 主鉄筋方向	(mm)	2700
	部材厚さ	② 床版厚さ	(mm)	190.0
		③ シート1層の厚さ	(mm)	0.240
輪荷重	荷重	④ 輪荷重 P	(kN)	98.0
床版断面	主鉄筋	⑤ 下側鉄筋かぶり	(mm)	40.0
		⑥ 上側鉄筋量		D16 @ 250
		⑦ 下側鉄筋量		D16 @ 125

図-2 入力画面 (その1)

・手順② (図-3)

サブデータ, 例えばアスファルト舗装厚, ひび割れ密度, 年間交通量等を追加入力し, 実行モードを稼働する. 本例ではひび割れ密度が  $2\text{m}^2$  の時, 劣化度  $D\delta$  は 0.378 と求められる (図-3 右).

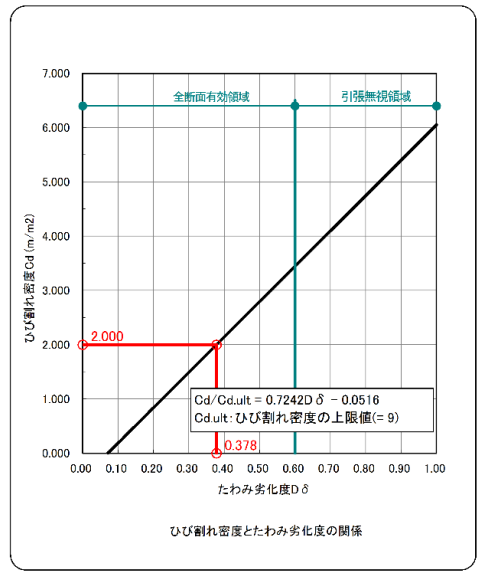
サブ入力データ		
① 鉄筋のヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	200
② 全断面有効時のコンクリートのヤング係数 (n = 7)	(kN/mm <sup>2</sup> )	28.6
③ 引張無視時のコンクリートの換算ヤング係数 (n = 15)	(kN/mm <sup>2</sup> )	13.3
④ アラミド繊維シートとのヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	118
⑦ アスファルト舗装厚さ ※舗装を無視する時は0を入力する	(mm)	50.0
⑧ アスファルトのヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	2.000
⑨ アスファルトのポアソン比	---	0.400

⑩ 床版のひび割れ密度 Cd	(m <sup>2</sup> )	2.000	ON
⑪ 床版の劣化度 Dδ	---	0.378	OFF
⑫ 床版の実測たわみ W	(mm)		OFF
⑬ 過積載車の年間交通量	(台/年)	50,000	

計算 + 作図実行

注1) 青色着色部を入力する。  
 注2) ⑩床版のひび割れ密度 Cd, ⑪床版の劣化度 Dδ, ⑫床版の実測たわみ W の内, いずれか1つを入力する。  
 ・ひび割れ密度 Cd を入力した場合: 右表より Dδ を読み取り, 実測たわみ W が計算される。  
 ・劣化度 Dδ を入力した場合: Dδ から実測たわみ W が計算される。  
 ・実測たわみ W を入力する場合: 現場での載荷実験等による実測たわみを入力した場合は, Cd, Dδ に関係なく, 入力値は実測たわみ W として使用される。  
 ※ 補強後の計算で用いる厚板モデルでは, 舗装, 床版, 樹脂, アラミドシートを考慮し, 2層貼り+1層貼り補強でそれぞれ6層と4層の厚板モデルを使用する。舗装を考慮しない場合(舗装厚さ=0と入力の場合)は, 床版厚を2層に分割したモデルに置換して計算を行う。



注) 土木学会鋼構造委員会「道路橋床版の合理化検討小委員会」道路橋床版の要求性能と維持管理技術」p.53, 図-6.2.5より引用

図-3 入力画面 (その2)

・手順③ (図-4)

補強前での原床版の全断面有効時と引張り無視時のたわみ, および使用限界状態に至る余寿命の年数が得られる. また同時に1層貼りや, 2層貼りでのアラミドシート補強後でのたわみと余寿命も計算される.

補強前(無補強時)		
基本データ	Ⓐ 床版のひび割れ密度 Cd	2.000
	Ⓑ 床版の劣化度 Dδ	0.378
	Ⓒ n = 15の時の等価弾性係数 Er,15	6.039
	Ⓓ 現在の床版の換算ヤング係数比 n	10.47
	Ⓔ 現在の床版の等価弾性係数 Er	19.110
現況データ	Ⓕ 全断面有効時の活荷重たわみ W <sub>o</sub>	0.683
	Ⓖ 引張無視時の活荷重たわみ W <sub>c</sub>	3.062
	Ⓗ 現在の床版の活荷重たわみ W	1.582
使用限界状態 疲労寿命	① 床版の劣化率 tan α	1.600E-06
	Ⓙ 余寿命 N	924762
	Ⓚ 余寿命の年数換算	18.5

補強後(シート補強後)		
1層貼り補強	Ⓘ 床版の活荷重たわみ W (厚板理論)	0.868
	Ⓜ たわみの低減率 (Ⓘ/Ⓗ)	55%
	Ⓝ たわみの回復率 (1-Ⓘ/Ⓗ)	45%
	Ⓢ 床版の劣化率 tan β 1	7.024E-07
	Ⓣ 使用限界状態の余寿命 N1	3122691
	Ⓤ 余寿命の年数換算	62.5
2層貼り補強	Ⓡ 床版の活荷重たわみ W (厚板理論)	0.848
	Ⓟ たわみの低減率 (Ⓡ/Ⓗ)	54%
	Ⓣ たわみの回復率 (1-Ⓡ/Ⓗ)	46%
	Ⓛ 床版の劣化率 tan β 2	2.732E-07
	Ⓜ 使用限界状態の余寿命 N1	8106255
	Ⓨ 余寿命の年数換算	162.1
余寿命の比	Ⓩ 1層貼り補強 (Ⓣ/Ⓤ)	3.38
	Ⓩ 2層貼り補強 (Ⓣ/Ⓤ)	8.77
	Ⓩ 2層貼り補強/1層貼り補強 (Ⓣ/Ⓣ)	2.60

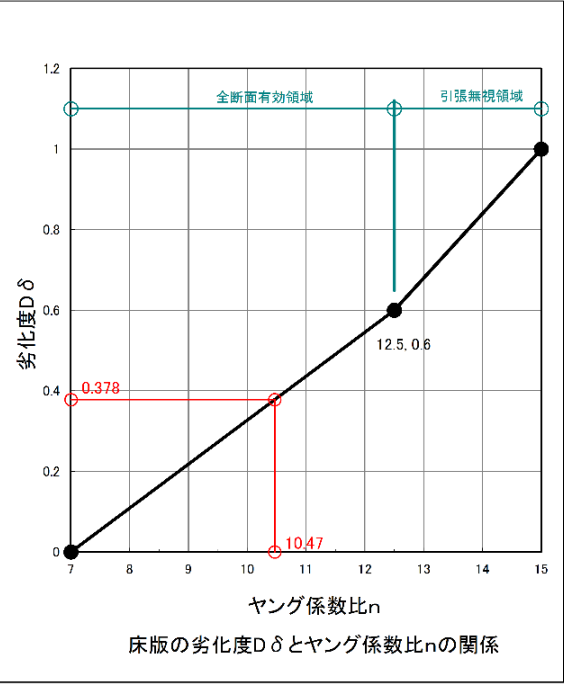


図-4 出力画面 (その1)

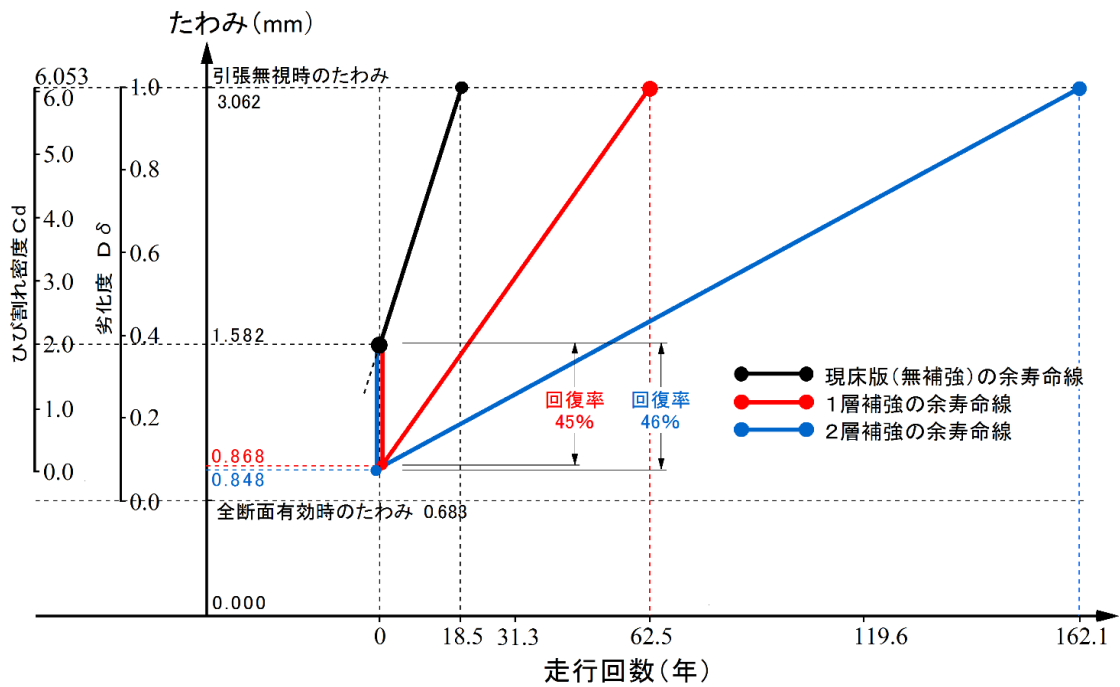


図-5 出力画面 (その2) : 余寿命の推定図

表-3 余寿命の比較

項目	無補強	1層貼り	2層貼り	後追い施工
年数	18.5	62.5	162.1	119.6

表-4 主鉄筋応力の比較

位置	B	C	D
応力 (N/mm <sup>2</sup> )	18.7	45.6	41.4

アラミドシートを1層貼り、あるいは2層貼り施工する場合での余寿命を推定すれば、補強時を起点としてそれぞれ62.5年および162.1年と得られ、2層貼りの方が延命化が図れる(図-5)。

なお実行モードの打込み後から出力画面の終了までの所要時間は、NEC社製LS550/Fで11秒であった。

#### 4. 後追い施工(再補強)での余寿命推定

1層を先行して貼付した後に、補強時B点と使用限界状態のF点に至る途上の、例えば経過点Cで2層目を貼付する(以下、後追い施工という)工程を想定する。この年数は補強開始時から31.3年経っており、補強床版のたわみは1.965mmにまで増加している。さらにアラミドシートをもう1層貼付すれば、たわみは1.856mm(D点)まで回復し、2層貼りと同一の傾きを用いると余寿命は

88.3年と得られる(図-6)。なお、2層目を施工する際には1層目のシート下面をケレンする必要があるため、実際にはこの傾きは少し大きくなると予測される。

それぞれの余寿命を比較すれば、表-3のようにまとめられる。

補強当初時に1層貼りよりも2層貼りの方が床版の余寿命は長くなることは前述の通りである。また後追い施工は1層貼りよりも延命化が望めるが、2層貼りに比べれば余寿命は短いことが判る。

また主鉄筋応力は版厚内の鉄筋位置でのひずみから推算され、図-6の主な点での応力比較を表-4に示す。補強作業ごとに主鉄筋応力の緩和状況が読み取れる。

しかし1層貼り後の打音検査で、床版と樹脂層の界面で剥離現象が顕出している場合には、後追い施工する前に再注入により界面修復し、かつ剥離領域が補強床版に及ぼす影響を解析で確認することも必要である<sup>36)</sup>。

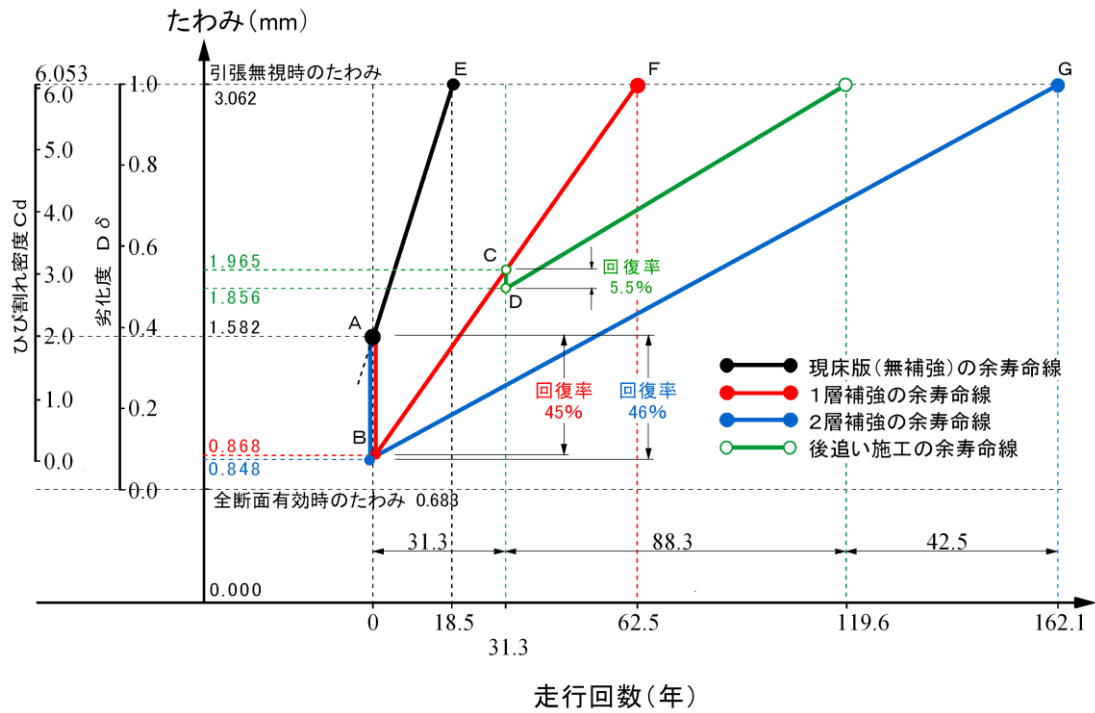


図-6 余寿命の推定 (使用限界状態)

表-5 床版の諸元

橋軸直角方向 スパン(mm)	版厚 (mm)	下鉄筋被り (mm)	上側鉄筋 (mm)	下側鉄筋 (mm)
2850	180	30	D16@220	D16@110

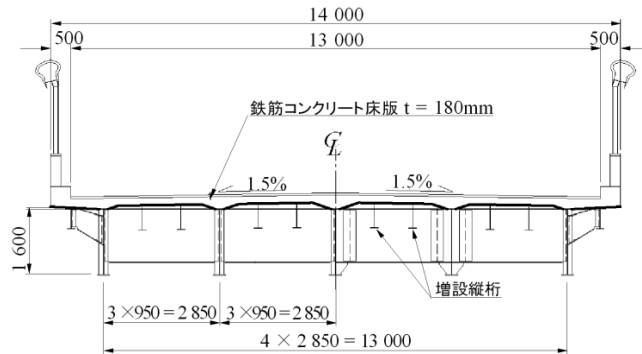


図-7 縦桁の配置図

### 5. 縦桁増設床版にシート貼付する再補強効果

ある実橋タイプのモデル B (供用期間 40 年) は竣工後 20 年を経て、主桁間に 2 本の縦桁が設置されている。それから 20 年後に (竣工後 40 年) にアラミドシート貼付が施工される再補強の例を取り上げる。床版の諸元を表-5 に、縦桁の配置図を図-7 に示す。

縦桁設置後から 20 年経過後にシート貼付される現床版が使用限界状態に達するまでの劣化の変遷状況を図-8 に示す。

縦桁設置時のひび割れ密度を  $2\text{m}^2$  と仮定すると、図-8 の点 A が定まる。竣工後 20 年を経た点 A (床版たわみ  $1.738\text{mm}$ ) で縦桁補強すれば、床版のたわみは点 B まで回復する。そこでこのたわみと等価な全周単純支持版の橋軸直角方向スパンを求めると  $1605\text{mm}$  と算出される。その後床版は疲労作用の影響を受けて劣化が進行すると

推測される。縦桁増設後の劣化速度は不明であるが、以下では原床版の劣化速度 ( $0.080\text{mm}/\text{年}$ ) の 70% 程度に緩和する傾き  $0.056\text{mm}/\text{年}$  を採用する。床版はこの劣化直線を進んで 20 年経過して点 C に至る。その後床版に 1 層貼り、あるいは 2 層貼りのシート補強を施せば、たわみは 1 層貼りでは点  $D_1$  まで、2 層貼りでは  $D_2$  までそれぞれ回復する。

縦桁設置時を起点として、余寿命を推定すれば表-6 のようにまとめられる。アラミドシート貼付施工により床版の延命化が望めることが判る。

主要点での床版たわみと主鉄筋応力の比較を表-7 にまとめる。

縦桁のみで補強された場合とアラミドシートを貼付する場合を比べれば、床版の余寿命は 1 層貼りで約 1.5 倍、2 層貼りで約 3.3 倍の延命化が期待できる。

表-6 余寿命の比較

項目	縦桁のみ	1層貼り	2層貼り
年数	49.2	71.5	163.6

表-7 たわみ, 鉄筋応力の比較

位置	B	C	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
たわみ (mm)	0.365	1.485	1.311	1.187
主鉄筋応力 (N/mm <sup>2</sup> )	11.9	89.5	72.6	60.5

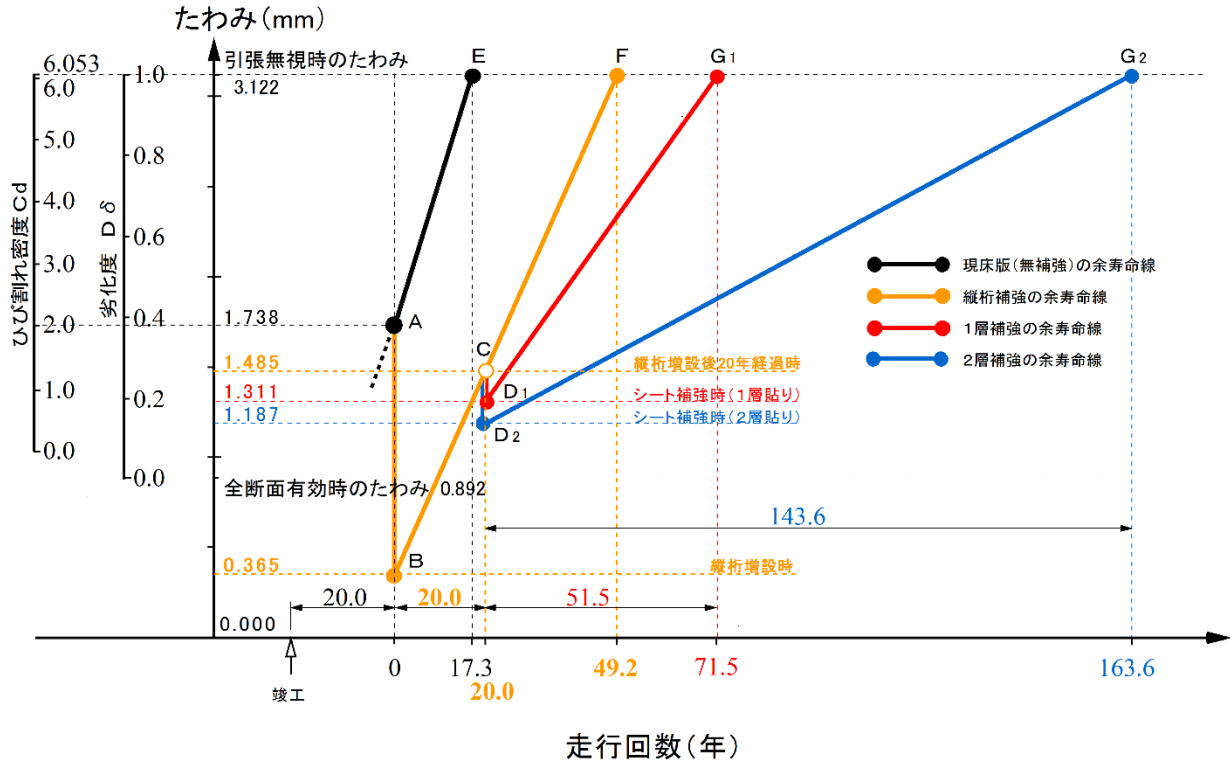


図-8 アラミドシート貼付による余寿命

## 6. あとがき

得られた知見を以下に列記する。

- 1) 本論文では調和解析法による多層版解析を採用しているが、接合面の一部で剥離等の不連続性をもつ領域が存在する場合には、選点法を用いることにより対処できる。
- 2) 現場での試験車や FWD 等で計測される実測のたわみ値や、それに替わるひび割れ密度を本プログラムに入力すれば、現床版の劣化度や余寿命推定が可能になる。
- 3) アラミドシート貼付に関して1層貼りよりも2層貼りの方が原床版の延命化が望める。また後追い施工により余寿命は延びるが、シートを貼付する時期が適切であれば再補強効果の向上が期待できる。
- 4) 縦桁増設後での床版の劣化速度の策定は、アラミドシートを貼付する時期の採択にも関係する重要な事柄であり、再補強効果が小さくなることも予測される。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 鍋島, 柑本, 三上, 廣瀬, 堀川: 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, 第4回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.55-60, 平成16年11月.
- 3) 三上 浩, 高島輝雄, 廣瀬清泰, 堀川都志雄: 二方向アラミド繊維シート補強床版の界面剥離に関する数値解析, 土木学会構造工学論文集, Vol.59A, pp.1065-1074, 2013.
- 4) (社) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の合理化検討小委員会: 道路橋床版の要求性能と維持管理技術, p.53, 2008.
- 5) 森, 松井, 若下, 西川: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究, 橋梁と基礎, pp. 25-31, 1995年3月.
- 6) 三上, 高島, 廣瀬, 堀川: 調和解析法と選点法からなる併用法による多層版の数値解析, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.1134-1139, 2014.