論文

アラミドシート補強床版の再補強効果と余寿命に関する力学的評価

三上 浩*，井之上賢一**，水野政純***，廣瀬清泰****，堀川都志雄*****

* 博士(工学)，三井住友建設(株)，技術研究所（〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1）
** ファイベックス(株)，土木部（〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 1 - 1）
***大成ロテック(株)，営業部（〒160-6112 東京都新宿区西新宿 8-17-1）
**** (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）

著者らは実用設計に供することを目指した多層版解析を組み込むことにより，実橋床版の損傷度判定と余寿命が算定できる EXCEL 版の「余寿命推定プログラム」を提案した．本研究ではこのプログラムから算出されるひび割れ密度を有し，かつアラミドシート 1 層が下面に貼付された損傷床版に再補強工を施す例を取り上げ，再補強工による補強効果と延命化される余寿命を力学的に検証する．

キーワード：シート補強工法，増厚工法，再補強工法，余寿命

1. はしがき

著者らは変位関数の級数解で構成される変位法や応力法の誘導と，その計算手法となる調和解析法, STRIP 法，選点法，およびこれらを組み合わせた併用法を開発し，自由辺や局部的な剥離域界面を有する多層版への適用を試みた [1),2),3),4)]．一方損傷 RC 床版のたわみが引張り無視時に達した時点を道路管理上の使用限界状態とする床版の余寿命を推定するプログラムを提案した [5)]．実務設計に資するために，多層版解析を内包する余寿命推定プログラムは EXCEL 版仕様で作成されており，FWD 等で計測される実たわみ値，ひび割れ密度，床版の弾性係数のいずれかを入力すれば，過積載車の年交通量と輪荷重走行実験から得られた回帰式との関係をもとに，床版中央点での主要なたわみや床版の余寿命までが自動的に算出できるので，実務設計の一助になると推察される．

本研究では二方向アラミドシート(厚さ 0.24mm，弾性係数 118kN/mm^2)が，エポキシ樹脂層(厚さ 1mm，弾性係数 2kN/mm^2)を介して，ひび割れ密度 3m/m^2 と 4m/m^2 の損傷床版下面に貼付された 1 層貼りの補強床版を取り上げる．その後に補強床版が疲労作用に晒されて劣化経過を辿る場合を対象に, 本プログラムを活用して再補強工による補強効果と余寿命の算定を力学的観点から検証する．

代表的な再補強工として，次の工法が挙げられる．

1) 先行するアラミドシートに重ねて，更にアラミドシート 1 層を貼付する後追い施工 [5)]，
2) 床版上面を 10mm 程度切削後，増厚コンクリートを敷設するサンドイッチ工法 [6)]，

再補強工が施される時期で床版の劣化度合いがその後の余寿命に大きく関与することが予測されるので，再補強時点による床版たわみの推移に着眼し，各工法での補強効果とこれに伴う余寿命を比較する．

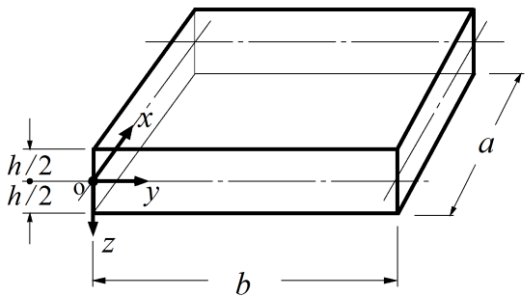
2. 多層版解析の概要

2 つの変位関数 f_3 と θ_3 の基礎式を式(1)に示す．

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

ここで，Δ：3 次元ラプラシアン

式(1)より，全周単純支持版での変位関数が級数展開される（図－1）．



図－1　各層の座標および形状

$$f_3 = \sum_m \sum_n (\mathrm{C}_1 \mathrm{ch}\gamma z + \mathrm{C}_2 \mathrm{sh}\gamma z + \mathrm{C}_3 \gamma z\, \mathrm{ch}\gamma z + \mathrm{C}_4 \gamma z\, \mathrm{sh}\gamma z) \sin\alpha_m x \sin\beta_n y\,,$$

$$\theta_3 = \sum_m \sum_n (\mathrm{C}_5 \mathrm{ch}\gamma z + \mathrm{C}_6 \mathrm{sh}\gamma z) \cos\alpha_m x \cos\beta_n y$$

ここで，$\mathrm{sh}\gamma z = \sinh\gamma z, \mathrm{ch}\gamma z = \cosh\gamma z, \gamma^2 = \alpha_m^2 + \beta_n^2$

$\alpha_m = m\pi/a$ （m=1,2,･･･），$\beta_n = n\pi/b$(n=0,1,2,･･･)

C_1～C_6：各層の上下面の境界条件から決定される積分定数

変位u, v, wと変位関数との関係式を以下に示す.

$$2\mu u = -\partial_x \partial_z f_3 + \partial_y \theta_3\,,\ 2\mu v = -\partial_y \partial_z f_3 - \partial_x \theta_3\,,$$

$$2\mu w = \mu/(\lambda+\mu)[\partial_z^2 + (\lambda+2\mu)(\partial_x^2 + \partial_y^2)/\mu] f_3 \qquad (3)$$

ここで，λ，μ：ラメの定数,

$$\partial_x^2 = \partial^2/\partial x^2,\ \partial_y^2 = \partial^2/\partial y^2,\ \partial_z^2 = \partial^2/\partial z^2$$

式(2)と(3)をN層からなる全周単純支持の多層版に適用すれば，接合界面に作用するx, y, z方向の伝達力X_i, Y_i, Z_i（i=1, N−1）で表される伝達力ベクトル$\mathbf{R}_i$の連立方程式が，Fourier 級数の各項ごとの「変位の連続条件式」から得られる.

最下面のたわみw_lは最下層上面での伝達力から求められる.

$$2\mu w_l = \sum_m \sum_n \left[X_{N-1}\mathrm{D}_8\alpha_\mathrm{g} + Y_{N-1}\mathrm{D}_8\beta_\mathrm{g} + Z_{N-1}\mathrm{D}_7\gamma_\mathrm{g}\right] \sin\alpha_m x \sin\beta_n y \qquad (4)$$

ここで，$\mathrm{D}_7 = (1-\nu_N)(\mathrm{ct}\,\zeta/\mathrm{D}_m - \mathrm{tn}\,\zeta/\mathrm{D}_p)$,

$\mathrm{D}_8 = (1-\nu_N)(1/\mathrm{D}_m - 1/\mathrm{D}_p)$,

$\mathrm{D}_m = (\mathrm{ct}\,\zeta - \mathrm{tn}\,\zeta) - 1$,

$\mathrm{D}_p = (\mathrm{tn}\,\zeta - \mathrm{ct}\,\zeta) - 1$,

$\alpha_\mathrm{g} = \alpha_m/\gamma^2$, $\beta_\mathrm{g} = \beta_n/\gamma^2$, $\gamma_\mathrm{g} = 1/\gamma$,

$\mathrm{ct}\,\zeta = \cosh\zeta/\sinh\zeta$，$\mathrm{tn}\,\zeta = \sinh\zeta/\coth\zeta$,

$\zeta = \gamma h_N/2$，

h_N: N層の版厚，ν_N: N層のポアソン比

3. アラミドシート 1 層貼りの補強床版の余寿命

数値計算では床版の全断面有効時と引張り無視時での曲げ剛性を勘案する換算弾性係数の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.

ひび割れ密度 3 m/m^2 と 4 m/m^2 での床版中央に輪荷重 98 kN（載荷面積 200 mm×500 mm）が作用する例を扱い，床版の諸元を表−1 に示す. なお橋軸方向のスパンを 4 m, 過積載車の年交通量を 57000 台/年とする.

アラミドシート 1 層貼りの余寿命は輪荷重走行実験による回帰式をもとに，補強時を起点とすれば，ひび割れ密度 3 m/m^2 で 30.2 年，4 m/m^2 で 19.5 年と得られ，それぞれ図−2 と 3 に表す．なお，ひび割れ密度 3 m/m^2 と 4 m/m^2 は，それぞれ全断面有効時と引張り無視時に対応しており，級数の項数はm, nとも 100 である.

全断面有効時での余寿命は，引張り無視時の約 1.5 倍程度となる.

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)
2000	180	40	D16@220	D16@110

注）アスファルト舗装厚 80mm
樹脂層厚 1mm
アラミドシート層厚 0.24mm
アラミドシートの弾性係数 118kN/mm^2

回復率=(補強前のたわみ−補強後のたわみ)/補強前のたわみを導入すれば，1 層貼り施工直後のひび割れ密度 3m/m^2 と 4m/m^2 での回復率は，それぞれ 54%と 30%と得られる．因みに全断面有効時と同等なたわみ値での回復率はそれぞれ 62%と 68%である．すなわち余寿命の推定は，年交通量と補強工法下での輪荷重走行実験による回帰直線から得られる勾配，および補強直後のたわみに支配されると言える.

4. アラミドシート 1 層貼りによる後追い施工

3 で示された補強床版の疲労による劣化過程は図−2 と 3 の回帰直線式で表現される．任意の経年時に，更にアラミドシート 1 層を貼り付ける後追い施工を考える．後追いシートを接着する際には，先行するシートをケレンする等の作業工程を伴うので，接着性能の低下が見込まれる．そこで諸般の事象を勘案して，2 層貼りの回帰直線の傾きを 25%程度大きく設定する.

ひび割れ密度 3m/m^2 の床版を例に，後追い施工する経年時期を 5 年ごとに変化させる場合での中央点のたわみと余寿命の比較を表−2 にまとめる．また施工時期による余寿命の変化を図−4 に示す．経年が 5 年以降では，直線的に余寿命が逓減しているのが判る.

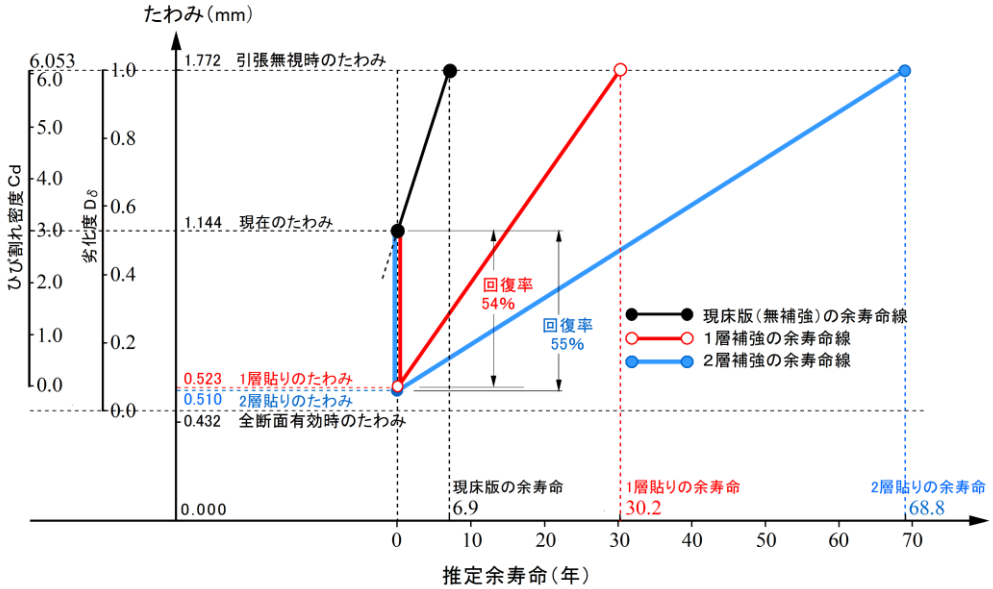
例えば再施工の時期が 10 年での経年劣化状況と余寿命を図−5 に示す.

経年数が大きい程たわみの回復率が増大する傾向にあるのは，劣化が進行している補強床版の方が新規に貼り付けたアラミドシートによるたわみの補強効果が表れていることを意味している.

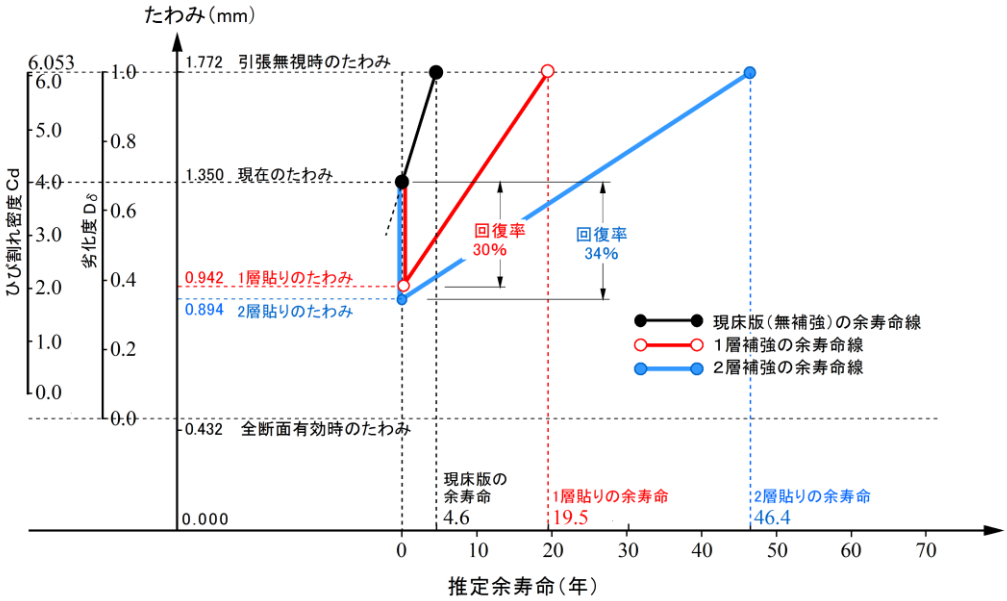
後追い施工時点を 10 年とする場合，1 層貼り床版での使用限界状態に至る余寿命は残り 20.2 年で，後追い施工による余寿命は接着性能が低下する状況下でも 38.3 年となり，その差 38.3−20.2=18.1 年は延命化が期待できる年数（以下，期待延命年数と名付ける）として求められる．後追い施工の時期が早い程，延命化が図れると推察される.

同様にひび割れ密度 4m/m^2 の床版では，5 年ごとの変化についての中央点たわみと余寿命の比較を表−3 に表し，また再施工の時期が 10 年での経年劣化状況と余寿命を図−6 に示す.

ひび割れ密度 4m/m^2 の床版についても，3m/m^2 と同様に経年数に比例してたわみの回復率は大きくなっている.



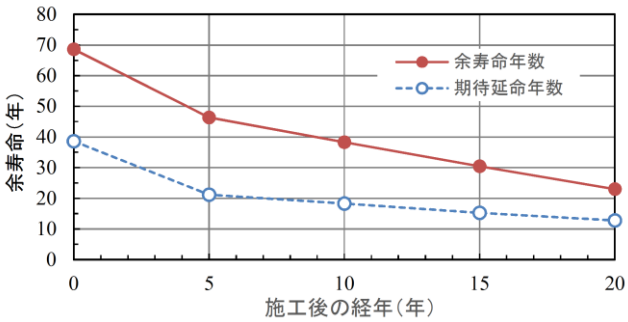
図－2　アラミドシート補強の余寿命推定図(ひび割れ密度 3 m/m²)



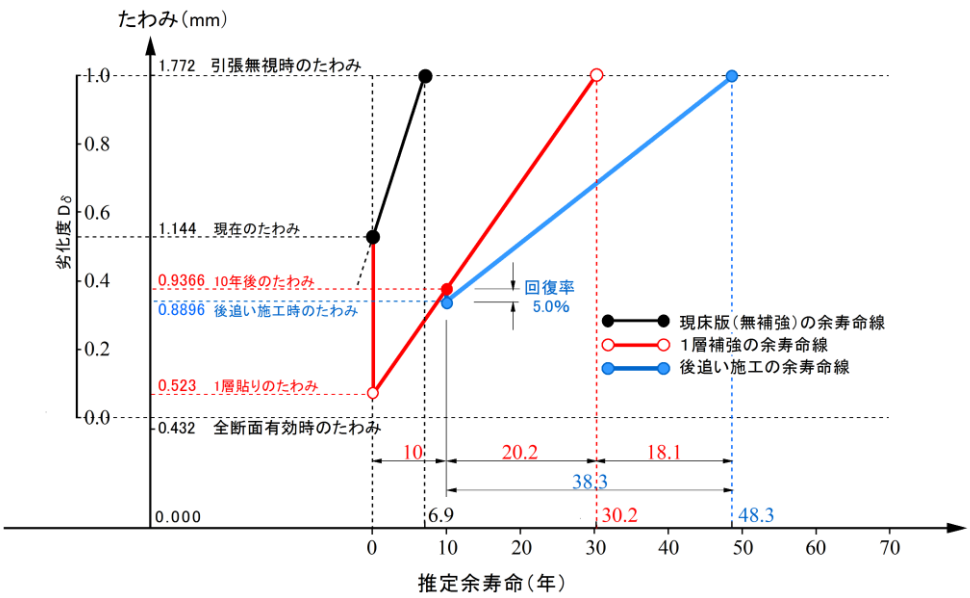
図－3　アラミドシート補強の余寿命推定図(ひび割れ密度 4 m/m²)

表－2　ひび割れ密度 3m/m² 時のたわみと余寿命の変化

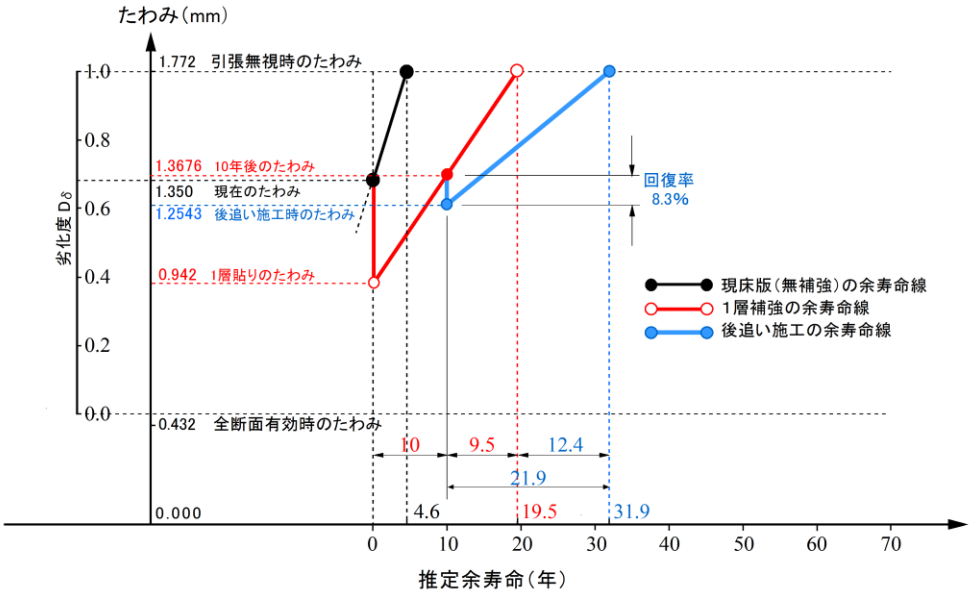
施工後の経年	0	5	10	15	20
1 層貼りのたわみ w_C(mm)	0.523	0.7298	0.9366	1.1434	1.3502
2 層貼りのたわみ w_D(mm)	0.510	0.7021	0.8896	1.0692	1.2421
回復率(%)	2.5	3.4	5.0	6.5	10.8
余寿命年数	68.6	46.4	38.3	30.5	23.0
期待延命年数	38.6	21.2	18.1	15.3	12.8



図－4　施工時期による余寿命の変化



図－5　再施工時期が 10 年の余寿命推定図(ひび割れ密度 3m/m²)



図－6　再施工時期が 10 年の余寿命推定図(ひび割れ密度 4m/m²)

表－3　ひび割れ密度 4m/m² 時のたわみと余寿命の変化

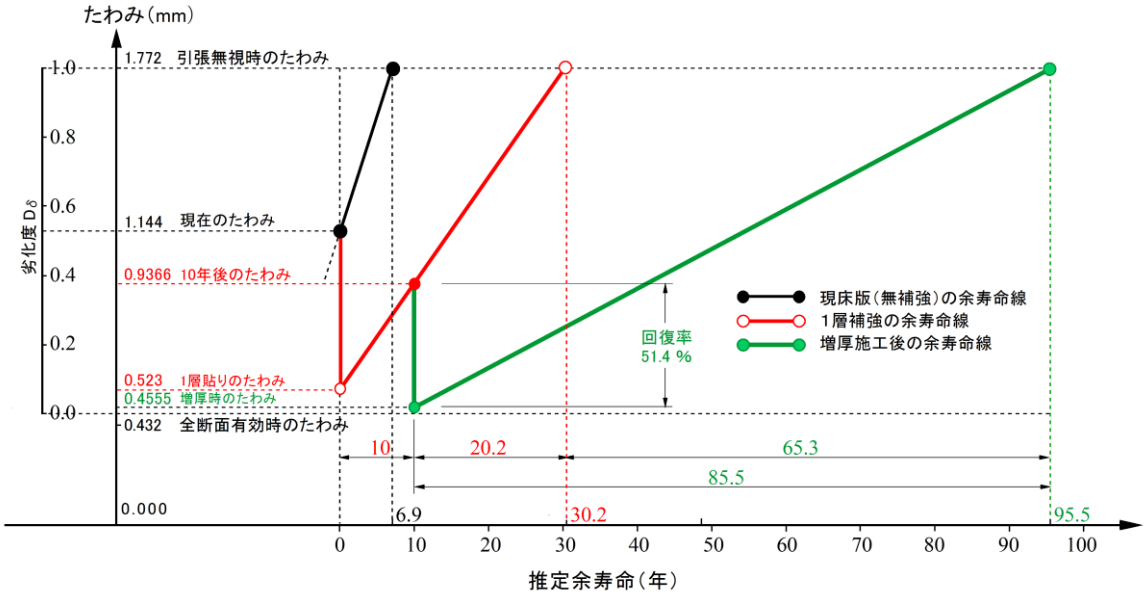
施工後の経年	0	5	10	15
1 層貼りのたわみ w_C(mm)	0.942	1.1548	1.3676	1.5804
2 層貼りのたわみ w_D(mm)	0.8946	1.0788	1.2543	1.4228
回復率(%)	5.0	6.6	8.3	10.0
余寿命年数	46.4	29.3	21.9	14.8
期待延命年数	26.9	14.8	12.4	10.3

表－4　ひび割れ密度 3m/m² 時のたわみと余寿命の変化

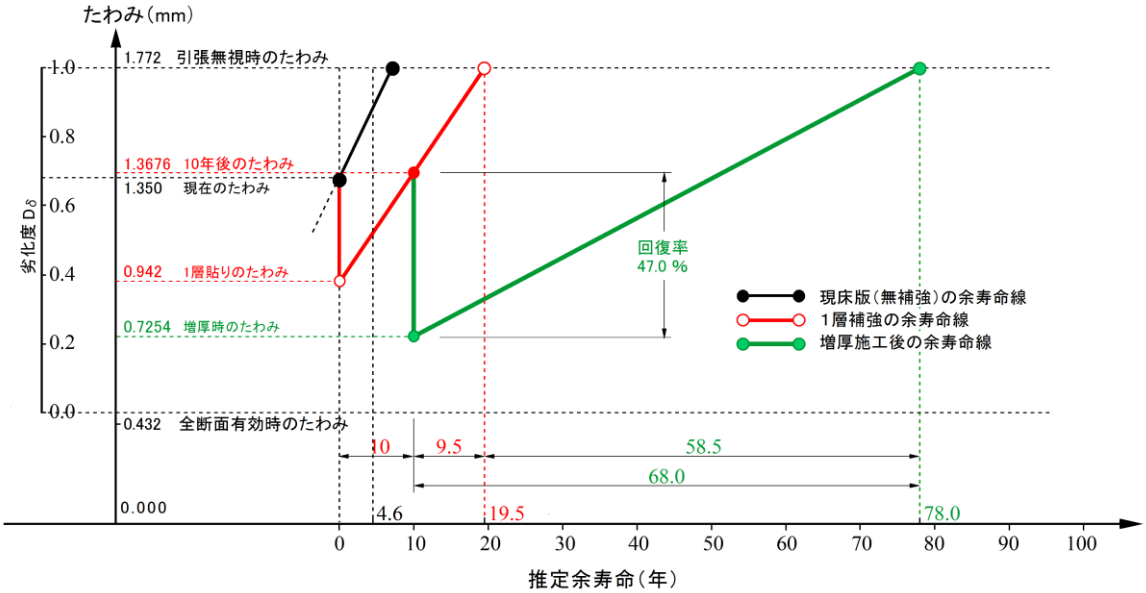
施工後の経年	0	5	10	15	20
1 層貼りのたわみ w_C(mm)	0.523	0.7298	0.9366	1.1434	1.3502
増厚時のたわみ w'_D(mm)	0.2680	0.3544	0.4555	0.5746	0.7144
回復率(%)	48.8	51.4	51.4	49.7	47.1
余寿命年数	97.7	92.1	85.5	77.8	68.7
期待延命年数	67.5	66.9	65.3	62.5	58.5

表－5　ひび割れ密度 4m/m² 時のたわみと余寿命の変化

施工後の経年	0	5	10	15
1 層貼りのたわみ w_C(mm)	0.942	1.1548	1.3676	1.5804
増厚時のたわみ w'_D(mm)	0.4584	0.5816	0.7254	0.8890
回復率(%)	51.3	49.6	47.0	43.7
余寿命年数	85.3	77.4	68.0	57.4
期待延命年数	65.7	62.9	58.5	52.9



図－7　再施工時期が 10 年の余寿命推定図(ひび割れ密度 3m/m²)



図－8　再施工時期が 10 年の余寿命推定図(ひび割れ密度 4m/m²)

後追い施工時点が 10 年では，1 層貼り床版の余寿命は残り 9.5 年で，後追い施工による余寿命は 21.9 年となり，その差 12.4 年が延命化する年数となる．後追い施工の時期が早い程，延命化が図れるのは同様である．

また補強床版のひび割れ密度が低い全断面有効時の状態の方が，引張り無視時に比べて後追い施工による延命化が望めると判断される．

5. 増厚コンクリートによるサンドイッチ工法

本論文でのサンドイッチ工法は，表－1 の床版上面を 10mm 切削し，その後弾性係数 30kN/mm^2 の増厚コンクリート 60mm とアスファルト舗装厚 30mm で構成されている．

文献 6)の走行実験によるサンドイッチ工法での回帰直線の傾きを用いて，4. と同様のひび割れ密度についての再補強工の経年劣化状況と余寿命を表－4 と 5 で表し，再施工時期が 10 年の場合を図－7 と 8 に示す．

サンドイッチ工法での回復率はほぼ 50%程度であり，増厚コンクリートの曲げ抵抗が大きいことを意味している．いずれのひび割れ密度でも 1 層貼りされた補強時当初のたわみよりも施工直後のたわみは小さくなっており，ひび割れ密度 3m/m^2 での直後のたわみはほぼ原床版の全断面有効時のたわみ 0.432mm にまで回復している．

増厚施工の時点を 10 年とする場合，1 層貼り床版での使用限界状態に至る余寿命は前述の 20.2 年で，増厚後の余寿命はひび割れ密度 3m/m^2 と 4m/m^2 では 85.5 年と 68.0 年で，その差 85.5-20.2=65.3 年と 68.0-9.5=58.5 年がそれぞれ延命化される年数となる．

後追い施工と同様に，増厚施工の時期が早い程延命化が期待でき，かつ補強床版のひび割れ密度が低い全断面有効時の状態の方が，引張り無視時に比べて増厚施工によっても延命化が望めると言える．

6. 考　察

得られた知見を以下に列記する．

損傷床版の補強工法には，床版下面から施工する方法や上面から施す方法等種々の工法が実施されている．しかし補強後も床版は走行する車両重量を直接担って疲労作用を受けることになり，補強材も含めた床版構造が劣化過程に陥ると考えられる．つまり床版システムに対する再補強工への取り組みが望まれると推量される．

(1) この観点に立って，著者らはアラミドシートが貼付された補強床版を基本に，床版の上面および下面から手当する 2 つの再補強工を提案した．

(2) 多層版解析では，高精度の級数解を組み込んだ余寿命推定プログラムに，ひび割れ密度等の外部情報を入力する．原床版が保有するたわみと余寿命を算出すると共に，アラミドシート 1 層が貼付された補強床版のたわみや余寿命を算定した．

(3) 輪荷重走行実験による補強床版の疲労特性を踏まえた再補強工を例に取り上げ，ひび割れ密度の異なる補強床版に対する各工法での実施時期による影響が，どの程度補強床版のたわみや余寿命に関与するのかを追跡した．

(4) その結果，いずれの工法においてもひび割れ密度が低い全断面有効時で，かつ早期に手当する再補強工の方が，補強床版の余寿命を延命化させることが判った．

7. あとがき

再補強工についての研究は殆どなく，接合界面での剥離域に樹脂材を再注入する等の補修工も含めて，補強済みの床版システム自身は経過年数につれて劣化することを踏まえると，今後再補強工の研究についても着手する必要があると推量される．

参考文献

1) 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.

2) 三上　浩，高島輝雄，廣瀬清泰，堀川都志雄：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，土木学会構造工学論文集,Vol.60A,pp.1134-1139,2014.

3) 廣瀬清泰，鍋島益弘，堀川都志雄：剥離域を有する張出し多層版の併用法による数値解析，土木学会構造工学論文集，Vol.62A, pp.1135-1140,2016.

4) 三上　浩，井之上賢一，水野政純，河野一資，廣瀬清泰，堀川都志雄：変位法の剛支持領域をもつ多層版への適用，土木学会構造工学論文集，Vol.62A,pp.1141-1148,2016.

5) 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：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，第八回道路橋床版シンポジウム , pp. 295-300, 2014.

6) 川西 寛，堀川都志雄，松井繁之，西川和廣：道路橋床版の上面増厚工法,下面シート接着工法および両者を併用したサンドイッチ工法の疲労耐久性評価，橋梁と基礎，pp. 25-34, 2001 年 9 月.

（2016 年 7 月 18 日受付）