

## 論文

## シート補強工法における補強効果と再補強工による余寿命の比較

三上 浩\*, 藤田広志\*\*, 井之上賢一\*\*\*, 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)

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

\*\*\* 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 番 1 号)

\*\*\*\* (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)

アラミドシート補強工法のシート材には, a)繊維を縦横に織り込む Type T と, b)一方向のみに強度をもつシートを上下に束ねる Type S がある. それぞれに等方性体や異方性体での変位関数を適用して, シート補強される損傷床版の弾性たわみによる補強効果に着目する. 両タイプでの初期時や再補強時を対象に, どの程度の延命化が図れるのかを比較し, Type T が Type S よりも優れていることを示す.

キーワード: 異方性体, シート補強工, 補強効果, 再補強工

## 1. はしがき

損傷床版のアラミドシート補強工法のシート構造機能に着目して, a)予め繊維を縦横に織り込み二方向に強度を発揮する膜要素タイプを Type T, b)一方向のみに強度を示すシート 2 枚を互いに直交させるとともに上下方向に束ねて層構造をなすタイプを Type S と名付ける. 力学的にはそれぞれが樹脂で含浸した Type T は等方性体で, Type S は層状の異方性体と見做すことができる.

本研究では, ①異方性薄板理論における Huber の提案式<sup>1)</sup>と三次元等方性体の構成則を念頭に置き, 直交異方性体<sup>2)</sup>の独立な 9 個の弾性定数を低減した異方性体(以下, Huber 型異方性体という)の変位関数を誘導し, この関数群が擬重調和形と擬調和形の関数に帰着することを提示する. ②Type T に対しては等方性体での Galerkin-vector と Boussinesq 関数を用い, 強軸方向を互いに直交させて多層系要素となる Type S には, Huber 型異方性体の変位関数を上下の薄層にそれぞれ適用し, これらを Fourier 級数展開する. ③輪荷重の走行疲労によるひび割れ損傷床版の補強問題を取上げ, 床版下面に Type T や Type S が施されるシート補強工を例に, 床版のたわみや応力に関する変動を調べる. 特に補強前後でのたわみに着目し, Type T や Type S の補強工法による補強効果から, Type T と Type S のそれぞれの層数がどのような関係にあるのかを検証する. ④文献 3)の手法を用いて, Type T と Type S でそれぞれシート補強される損傷床版の余寿命推定を試み, さらに初期補強時から数年経過後に再補強工が施される場合についても, 再補強工後の余寿命

推定をもとに, どの程度の延命化が期待できるのかを力学的見地から検討する.

## 2. 変位関数の基礎式と変位の関係式

異方性薄板理論での Huber の提案式と等方性体の構成則を念頭に, 直交異方弾性体の弾性定数を置き換える. 例えば(x 方向の弾性定数  $E_x$ ) ≤ (y 方向の弾性定数  $E_y$ ) となる三次元の Huber 型異方性体での構成則は式(1)のように示される.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_x + \sqrt{\alpha}\lambda\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_z, \quad \tau_{xy} = \sqrt{\alpha}\mu\gamma_{xy}, \\ \sigma_y &= \sqrt{\alpha}\lambda\varepsilon_x + \alpha(\lambda + 2\mu)\varepsilon_y + \sqrt{\alpha}\lambda\varepsilon_z, \quad \tau_{xz} = \mu\gamma_{xz}, \\ \sigma_z &= \lambda\varepsilon_x + \sqrt{\alpha}\lambda\varepsilon_y + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_z, \quad \tau_{yz} = \sqrt{\alpha}\mu\gamma_{yz}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで,  $\lambda, \mu$ : 等方性体のラメの定数,  $\alpha = E_y/E_x$

式(1)の弾性定数はエネルギー正值の条件を満たすとともに,  $\alpha=1$  のとき等方性体の構成則に帰着することは言うまでもない.

式(1)を応力のつり合い式に代入して, 変位で表される Navier の式を求めると,

$$\begin{aligned}\{(\lambda + 2\mu)\partial_x^2 + \sqrt{\alpha}\mu\partial_y^2 + \mu\partial_z^2\}u + \sqrt{\alpha}(\lambda + \mu)\partial_x\partial_yv \\ + (\lambda + \mu)\partial_x\partial_zw = -X, \\ \sqrt{\alpha}(\lambda + \mu)\partial_x\partial_yu + \{\sqrt{\alpha}\mu\partial_x^2 + \alpha(\lambda + 2\mu)\partial_y^2 + \sqrt{\alpha}\mu\partial_z^2\}v \\ + \sqrt{\alpha}(\lambda + \mu)\partial_y\partial_zw = -Y, \\ (\lambda + \mu)\partial_x\partial_zu + \sqrt{\alpha}(\lambda + \mu)\partial_y\partial_zv \\ + \{\mu\partial_x^2 + \sqrt{\alpha}\mu\partial_y^2 + (\lambda + 2\mu)\partial_z^2\}w = -Z\end{aligned}\quad (2)$$

ここで,  $X, Y, Z : x, y, z$  方向の物体力,

$u, v, w : x, y, z$  方向の変位,

$$\partial_x = \partial/\partial x, \partial_x^2 = \partial^2/\partial x^2, \dots$$

独立な物体力  $X, Y, Z$  に対応する形で, Huber 型異方性体でのベクトル形式の変位関数が, 式(2)から誘導される. 例えば Huber 型異方性体での変位関数の  $z$  方向成分  $f_3$  と  $\theta_3$  の基礎式, ならびに変位との関係式は異方性パラメータ  $\alpha$  や  $\beta$  を媒介にして次式で得られる.

### 1) Mode-M ( $E_x \leq E_y$ )

$$\begin{aligned} (\partial_x^2 + \sqrt{\alpha}\partial_y^2 + \partial_z^2)^2 f_3 &= -2Z(\lambda + \mu)/(\lambda + 2\mu), \\ (\partial_x^2 + \sqrt{\alpha}\partial_y^2 + \partial_z^2) \theta_3 &= 0 \\ 2\mu u &= -\partial_x \partial_z f_3 + \sqrt{\alpha} \partial_y \theta_3, \\ 2\mu v &= -\partial_y \partial_z f_3 - \partial_x \theta_3, \\ 2\mu w &= (\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu) [\partial_x^2 + \sqrt{\alpha}\partial_y^2 \\ &\quad + \mu/(\lambda + 2\mu)\partial_z^2] f_3 \end{aligned} \quad (3)$$

### 2) Mode-D ( $E_x > E_y$ )

$$\begin{aligned} (\sqrt{\beta}\partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2)^2 f_3 &= -2Z(\lambda + \mu)/(\lambda + 2\mu), \\ (\sqrt{\beta}\partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2) \theta_3 &= 0 \\ 2\mu u^p &= -\partial_x \partial_z f_3 + \partial_y \theta_3, \\ 2\mu v^p &= -\partial_y \partial_z f_3 - \sqrt{\beta} \partial_x \theta_3, \\ 2\mu w^p &= (\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu) [\sqrt{\beta}\partial_x^2 + \partial_y^2 \\ &\quad + \mu/(\lambda + 2\mu)\partial_z^2] f_3 \end{aligned} \quad (3')$$

ここで,  $\beta = E_x / E_y$

他の物体力  $X, Y$  に対応する変位関数の  $x, y$  方向成分 ( $f_1, \theta_1$ ) や ( $f_2, \theta_2$ ) も同様に導くことができる.  $\alpha=1$  のとき変位関数  $f_3$  は Galerkin-vector の  $z$  方向成分に, また変位関数  $\theta_3$  は Boussinesq 関数の  $z$  方向成分に帰着し, 他の関数 ( $f_1, \theta_1$ ) と ( $f_2, \theta_2$ ) もそれぞれ Galerkin-vector や Boussinesq 関数の  $x$  と  $y$  方向成分と一致する.

なお式(1)と異なる弾性定数を任意に選択すれば, エネルギー正值の条件を満足しないか, あるいは得られた変位関数は式(3)のような分離形式にはならず, 煩雑な 6 階型の偏微分方程式に留まることを確かめている.

### 3. 変位関数の級数表示

図-1 に示す床版の隅角点に  $x, y$  座標を, 版中央面に  $z$  座標を置けば, 変位関数  $f_3$  と  $\theta_3$  の Fourier 級数展開は以下の式で与えられる.

$$\begin{aligned} f_3 &= \sum \sum [C_1 \operatorname{ch} \gamma z + C_2 \operatorname{sh} \gamma z \\ &\quad + C_3 \gamma z \operatorname{ch} \gamma z + C_4 \gamma z \operatorname{sh} \gamma z] \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \theta_3 &= \sum \sum [C_5 \operatorname{ch} \gamma z + C_6 \operatorname{sh} \gamma z] \cos \alpha_m x \cos \beta_n y \end{aligned} \quad (5)$$

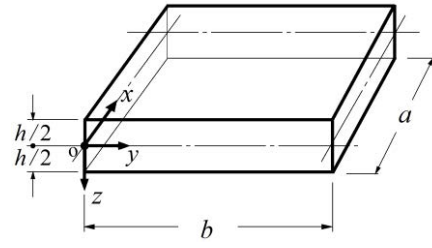


図-1 座標および形状

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

$$\gamma^2 = \alpha_m^2 + \sqrt{\alpha}\beta_n^2 \quad \text{for Mode-M}$$

$$\gamma^2 = \sqrt{\beta}\alpha_m^2 + \beta_n^2 \quad \text{for Mode-D}$$

$$\operatorname{ch} \gamma z = \cosh \gamma z, \operatorname{sh} \gamma z = \sinh \gamma z,$$

$C_1 \sim C_6$  は版の上下面での境界条件より決定される積分定数.

例えば Mode-M での変位  $w$  と応力  $\sigma_x$  は次のように得られる.

$$\begin{aligned} 2\mu w &= -\sum \sum [C_1 \operatorname{ch} \gamma z + C_2 \operatorname{sh} \gamma z \\ &\quad + C_3 \{\gamma z \operatorname{ch} \gamma z - 2(1 - 2\nu) \operatorname{sh} \gamma z\} \\ &\quad + C_4 \{\gamma z \operatorname{sh} \gamma z - 2(1 - 2\nu) \operatorname{ch} \gamma z\}] \\ &\quad \cdot \gamma^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \sigma_x &= \sum \sum [C_1 \operatorname{sh} \gamma z + C_2 \operatorname{ch} \gamma z \\ &\quad + C_3 \{\gamma z \operatorname{sh} \gamma z + (1 + 2\nu\gamma^2/\alpha_m^2) \operatorname{ch} \gamma z\} \\ &\quad + C_4 \{\gamma z \operatorname{ch} \gamma z + (1 + 2\nu\gamma^2/\alpha_m^2) \operatorname{sh} \gamma z\} \\ &\quad + \sqrt{\alpha} \beta_n / \alpha_m \gamma (C_5 \operatorname{ch} \gamma z + C_6 \operatorname{sh} \gamma z)] \\ &\quad \cdot \alpha_m^2 \gamma \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \end{aligned} \quad (6)$$

同様に Mode-D についての変位  $w$  と応力  $\sigma_x$  も求められる.

$$\begin{aligned} 2\mu w &= -\sum \sum [C_1 \operatorname{ch} \gamma z + C_2 \operatorname{sh} \gamma z \\ &\quad + C_3 \{\gamma z \operatorname{ch} \gamma z - 2(1 - 2\nu) \operatorname{sh} \gamma z\} \\ &\quad + C_4 \{\gamma z \operatorname{sh} \gamma z - 2(1 - 2\nu) \operatorname{ch} \gamma z\}] \\ &\quad \cdot \gamma^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \sigma_x &= \beta \sum \sum [C_1 \operatorname{sh} \gamma z + C_2 \operatorname{ch} \gamma z \\ &\quad + C_3 \{\gamma z \operatorname{sh} \gamma z + (1 + 2\nu/\sqrt{\beta} \cdot \gamma^2/\alpha_m^2) \operatorname{ch} \gamma z\} \\ &\quad + C_4 \{\gamma z \operatorname{ch} \gamma z + (1 + 2\nu/\sqrt{\beta} \cdot \gamma^2/\alpha_m^2) \operatorname{sh} \gamma z\} \\ &\quad + \beta_n / \alpha_m \gamma (C_5 \operatorname{ch} \gamma z + C_6 \operatorname{sh} \gamma z)] \\ &\quad \cdot \alpha_m^2 \gamma \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \end{aligned} \quad (6)'$$

### 4. ひび割れ損傷床版への適用

輪荷重 98kN (載荷面積 200mm × 500mm) が, 全周単純支持の床版中央に作用する場合を想定する. 床版の損傷度を余寿命推定プログラム<sup>3)</sup>から求め, 床版の損傷程度に応じたひび割れ密度 2m/m<sup>2</sup> の全断面有効時の領域と引張り無視時の 4m/m<sup>2</sup> の領域を代表例として取上げる.

主筋方向のスパンを 2.5m, 配力筋方向のスパンを 5m とする床版の諸元を表-1 にまとめる (図-2). 損傷床版に Type T (目付量 870g/m<sup>2</sup>, 公称厚 0.24mm) と Type S (目

表-1 床版の諸元

名称	厚さ (mm)	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
アスファルト舗装	80	2.0	0.4
RC床版 注1)	200	全断面有効時 19.11	0.2
		引張り無視時 9.66	
樹脂層	1.0	2.0	0.4
Type T	0.24	$E_x = E_y = 118.0$	0.3
Type S	強軸方向 y	$E_y = 97.66,$ $E_x = 0.009766$	0.3
	強軸方向 x	$E_y = 0.009766,$ $E_x = 97.66$	

注1) RC床版は換算弾性係数を示す。

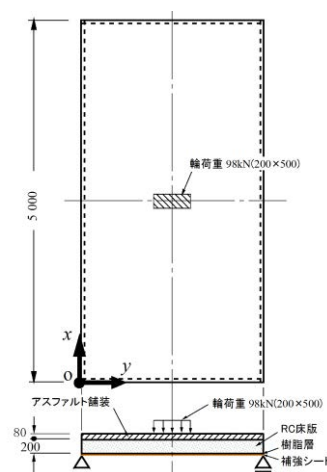


図-2 計算モデル床版

表-2 床版中央点でのたわみと応力の比較 (x=2500mm, y=1250mm)

損傷度	ひび割れ密度 2m/m <sup>2</sup>				ひび割れ密度 4m/m <sup>2</sup>			
	Type T		Type S		Type T		Type S	
シート名称	1	2	1	2	1	2	1	2
層数	1	2	1	2	1	2	1	2
w (mm)	0.578	0.566	0.583	0.576	0.950	0.915	0.965	0.943
	0.573	0.561	0.578	0.571	0.940	0.905	0.955	0.933
$\sigma_x$ (N/mm <sup>2</sup> )	-2.060	-2.032	-2.071	-2.053	-1.600	-1.564	-1.612	-1.589
	2.520	2.437	2.555	2.510	2.201	2.073	2.257	2.185
$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	-2.630	-2.596	-2.645	-2.621	-2.079	-2.038	-2.099	-2.074
	2.952	2.860	2.988	2.930	2.567	2.425	2.625	2.533

表-3 輪荷重端部でのたわみと応力の比較 (x=2500mm, y=1500mm)

損傷度	ひび割れ密度 2m/m <sup>2</sup>				ひび割れ密度 4m/m <sup>2</sup>			
	Type T		Type S		Type T		Type S	
シート名称	1	2	1	2	1	2	1	2
層数	1	2	1	2	1	2	1	2
w (mm)	0.537	0.525	0.541	0.534	0.881	0.848	0.895	0.874
	0.534	0.523	0.539	0.532	0.875	0.843	0.889	0.869
$\tau_{yz}$ (N/mm <sup>2</sup> )	-0.376	-0.374	-0.377	-0.376	-0.352	-0.349	-0.351	-0.351
	-0.012	-0.022	-0.007	-0.013	-0.020	-0.038	-0.012	-0.022

注) 応力 $\tau_{yz}$ の上段の値は床版中央面を示す

付量 720g/m<sup>2</sup>, 公称厚 0.24mm) のシート補強工を施す。文字 T は縦横繊維が編み込まれる二方向シートを、文字 S は一方向のみに強度を発揮するシートを上下に束ねる一方向シートを意味する。本論文でのシート層数を Type T では樹脂層+シート層を 1 層分とし、Type S では樹脂層+縦方向シート+横方向シートを 1 層分として扱う。また表-1 の異方性パラメータ  $\alpha=10^4$  の値は、主筋方向

の応力 $\sigma_y$ に比べ、配筋方向の応力 $\sigma_x$ や捩りに関するせん断応力 $\tau_{xy}$ の抵抗が小さくなることを示している。

版の中央点と荷重端部における損傷床版の上面(表中の上段)と下面(下段)での変位(=たわみ)と応力の比較を表-2 と 3 に示す。なお級数の項数  $m, n$  は 150 と 100 である。

いずれのひび割れ密度でもシート層数の増加につれて、たわみや応力は次第に減少するが、同じ層数であれば

表-4 床版上面でのたわみ補強率の比較 (x=2500mm, y=1250mm)

損傷度	ひび割れ密度 2m/m <sup>2</sup>				ひび割れ密度 4m/m <sup>2</sup>					
	Type T	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	Type S	S <sub>0</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>6</sub>
w <sup>u</sup> (mm)		0.591	0.578	0.566	0.554		0.988	0.950	0.915	0.883
Δw <sup>u</sup> (mm)		--	0.013	0.025	0.037		--	0.038	0.073	0.105
Δw <sup>u</sup> /w <sub>0</sub> <sup>u</sup> (%)		--	2.200	4.230	6.261		--	3.846	7.389	10.628
Type S		S <sub>0</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>6</sub>		S <sub>0</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>6</sub>
w <sup>u</sup> (mm)		0.591	0.576	0.561	0.548		0.988	0.943	0.903	0.862
Δw <sup>u</sup> (mm)		--	0.015	0.030	0.043		--	0.045	0.085	0.126
Δw <sup>u</sup> /w <sub>0</sub> <sup>u</sup> (%)		--	2.538	5.076	7.276		--	4.555	8.603	12.75

表-5 各 Type の回帰式と相関係数

名称	ひび割れ密度 2m/m <sup>2</sup>	ひび割れ密度 4m/m <sup>2</sup>
Type T	y <sub>TS</sub> =2.081x <sub>TS</sub> +0.051, R=0.9996	y <sub>TS</sub> =3.543x <sub>TS</sub> +0.152, R=0.9985
Type S	y <sub>SS</sub> =1.218x <sub>SS</sub> +0.068, R=0.9988	y <sub>SS</sub> =2.115x <sub>SS</sub> +0.132, R=0.9993

注) 表中 R は相関係数を意味する。

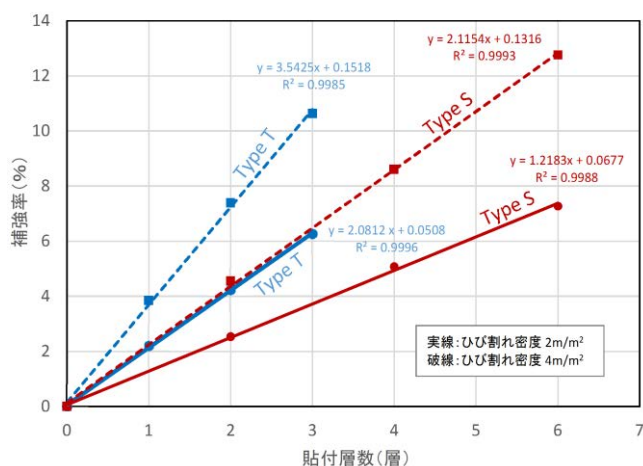


図-3 たわみ補強率と貼付層数の関係

Type T の値よりも Type S の方が大きくなる。また中央面でのせん断応力 $\tau_{yz}$ の Type S の値は Type T とほぼ一致するが、床版下面での界面応力は Type T の方が Type S よりも大きくなっている。このことは Type S の付着抵抗が小さく、RC 床版の分担する割合が Type T に比べて高くなっていることを伺わせている。

### 5. 各シートにおけるたわみの補強効果と等価層数

損傷床版の余寿命算出において、例えば床版上面(u)での活荷重たわみを採用し、シート補強工による補強効果を調べるために、たわみの補強率 $\Delta w^u/w_0^u$ を導入する。

床版中央点での結果は表-4 のように表される。なお下添字は層数を示し、0 は無補強時を意味する。

表-4 の補強率と層数との関係は表-5 の回帰直線式で整理される(図-3)。

相関係数 R はいずれも 0.7 以上であるので、標本点をよく網羅しているのが判る。例えばひび割れ密度 2m/m<sup>2</sup> の場合、同じ補強効果  $y_T = y_S$  を得る Type S の層数  $x_S$  は  $x_T=1$  に対し、

$$x_S = 2.081/1.218 x_T + (0.051 - 0.068)/1.218 = 1.709 x_T - 0.0140 \div 1.695 \quad (7)$$

となる。またひび割れ密度 4m/m<sup>2</sup> では、

$$x_S = 3.543/2.115 x_T + 0.0202/2.115 = 1.675 x_T + 0.010 \div 1.685 \quad (8)$$

と得られる。

Type S の等価層数は Type T の 1 層に対する比率で約 1.69~1.70 倍となる。このことから Type S の等価層数は次の要因に支配される。

- Type T と同じ弾性定数とする場合の Type S との比較から、シート構造の差異による構造特性が求められる。 $x_T=1$  に対する  $x_S$  の等価層数は 1.42 と得られ、Type T の膜作用による効果は 1.42 倍と推量される。
- Type S の目付量が Type T と同じ目付量とする場合での差は目付量比のみとなるので、後者に対する  $x_S$  の値は 1.21 ( $\div 870/720$ ) 倍となる。
- Type S の等価層数は Type T の 1.69 倍と求められる。近似的には a と b の値を用いて、(シートの構造特性値 1.42)  $\times$  (目付量比 1.21)  $\div$  1.72 倍と類推できる。

表-6 再補強時での余寿命比較

シート名称	Type T			Type S		
	再補強時期(年)	3	5	7	3	5
換算弾性定数 $E_r$ (kN/mm <sup>2</sup> )	14.89	12.82	11.14	14.96~12.86	12.92~10.26	11.27~8.35
再補強前のたわみ $w^b$ (mm)	0.6932	0.7733	0.8534	0.6982~0.7811	0.7783~0.9164	0.8584~1.052
再補強後のたわみ $w^a$ (mm)	0.6750	0.7503	0.8253	0.6872~0.7669	0.7644~0.8966	0.8412~1.026
たわみの補強率(%)	2.6	3.0	3.3	1.6~1.8	1.8~2.2	2.0~2.5
余寿命(年)	46.8	44.6	42.3	25.9~46.1	23.5~43.8	21.2~41.4

表-7 余寿命の回帰式

シート名称	回帰式
Type T	$L_r = 50.192 - 1.125 x, R = -0.9999$
Type S	$L_r = 29.41 - 1.175 x, R = -0.9999 \sim L_r = 49.62 - 1.175 x, R = -0.9999$

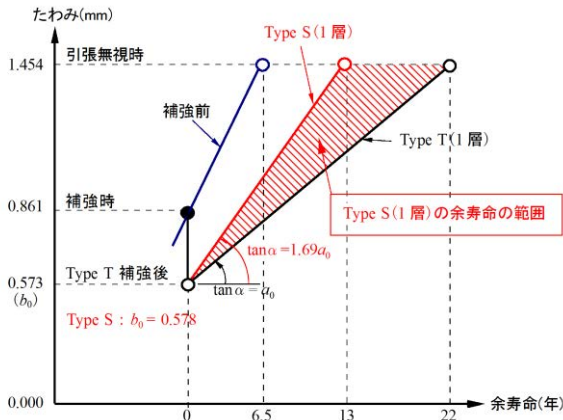


図-4 Type T および Type S の余寿命

## 6. 初期補強工と再補強工での余寿命推定

Type T の輪荷重走行試験の結果<sup>3)</sup>から、復元力特性に関連するたわみの弾性成分を抽出し、このたわみが床版の使用限界状態に至るまでの疲労による劣化回帰式を導けば<sup>3)</sup>、表-1 に示す床版のひび割れ密度が 2m/m<sup>2</sup> で、例えば年間 6 万台の過積載車の交通量があるときの劣化回帰式は式(9)となる。

$$w_T^1 = 0.04005t + 0.573 \quad (9)$$

ここで、 $w_T^1$ : たわみ,  $t$ : 年数, 上添字 1 は初期補強工を, 下添字 T は Type T を示す。

因みに初期補強工時に 1 層, または 2 層貼りされた Type T での余寿命はそれぞれ 22 年と 50.2 年であった。

劣化回帰式は弾性成分に依存することから Type S での回帰式の勾配を, Type T の 1 層分に相当する倍数 1.69 (≒ 構造特性/目付量比) を Type T の勾配に乗じた値

と仮定する。Type S の輪荷重走行による試験結果が不明であるので, Type S での劣化過程は式(10)の回帰式の範囲内に留まると予測される。

$$w_S^1 = (1.0 \sim 1.69) \times 0.04005t + 0.578 \quad (10)$$

その結果と劣化過程を図-4 に示すと, Type S は斜線の範囲内に収まる。

Type S の余寿命は約 13~22 年の範囲内にあると推定され, Type T よりも短いことが判る。しかし Type T と Type S の構造特性の差異を考慮すれば, Type S の余寿命は約 13 年近傍にあると推測される。

次に初期補強工の数年後に各 Type が 2 層構造となる再補強工が施される場合を考える。Type S での余寿命長さ 13 年を勘案して, 例えば再補強時期を両 Type とも初期補強後 3 年, 5 年および 7 年に設定する。再補強後の Type T と Type S での初期補強時を起点とする 2 層貼り補強工時の劣化回帰式は式(11)で示される。

$$\begin{aligned} w_T^2 &= 0.01779(t-t_0) + w_T^a, \\ w_S^2 &= (1.0 \sim 1.69) \times 0.01779(t-t_0) + w_S^a \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $w_T^a, w_S^a$ : それぞれ再補強直後の Type T と Type S のたわみ,

$t_0$ : 再補強時期の年数, 上添字 2 は再補強工を示す。

その結果を表-6 にまとめ, 再補強時期が 5 年での各 Type の劣化過程と余寿命を図-5 に示す。

Type T の劣化経路は, 初期補強工時①→5 年経過時②→再補強工時②'→使用限界時③を辿り, 初期時に 2 層貼り補強工する余寿命 50.2 年の約 90%程度に至る。同様に等価層数 1.69 を採用する場合の Type S は, ①→④→④'→⑤の劣化過程と示され, 初期時の 2 層貼りでの余寿命 29.4 年の約 80%となる。Type S の余寿命は, Type T の約 50%程度に留まると推測される。



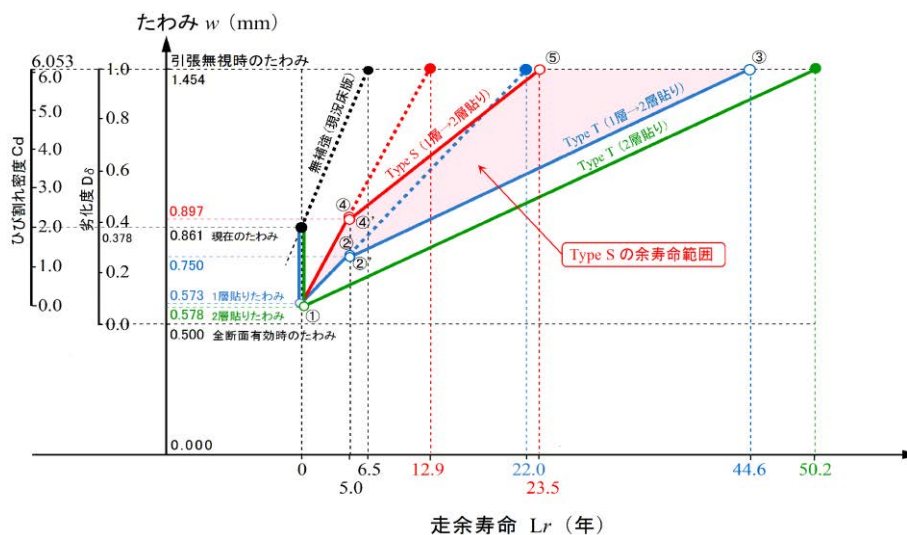


図-5 再補強時期が5年での各 Type の劣化過程と余寿命

各 Type とともに再補強時期が早ければ早い程、再補強工の余寿命に与える影響は大きくなっている。補強前後のたわみ  $w^b$  と  $w^a$  はいずれの補強時期でも Type S の方が Type T よりも大きく、Type S の曲げ抵抗が小さいことを示唆しており、たわみの補強率に関しても Type T > Type S となり、Type T の方が補強効果が高いことが読み取れる。

また Type T の余寿命は3年、5年および7年のどの時期でも Type T > Type S と得られ、それぞれ 1.0~1.8 倍、1.0~1.9 倍および 1.0~2.0 倍と長くなる。

また各 Type での再補強工を施す時期  $x$  と余寿命  $L_r$  の関係を表す回帰式を表-7に示す。

Type S の余寿命は  $L_r=29.41-1.175x$  と  $L_r=49.62-1.175x$  の範囲内にあると推測される。

初期補強工と再補強工での比較によれば、Type T の補強工法の方が、Type S の工法よりも優れた延命策であると判断される。

## 7. まとめ

得られた知見を以下に列記する。

- ① 異方性薄板理論の Huber の提案式と等方性体の構成則をもとに、独立な物体力に伴う Huber 型異方性体の構成則からベクトル形式の変位関数が導かれ、 $\alpha=1$  の時これらは等方性体の変位関数に帰着する。
- ② 一方向のみに強度をもつ縦・横シートを上下に重ね、Type T と同じ弾性定数をもつ場合の Type S でのたわみは、二方向シートの Type T よりも 1.42 倍大きく、Type T は膜作用効果を発揮していることが判る。
- ③ シート層数の増加につれて、RC 床版の上下面でのたわみや応力はともに減少傾向を示す。しかし床版中央面でのせん断応力  $\tau_{yz}$  は Type T と Type S で差はないが、床版下側の界面では Type T の方が Type S よりも大きい。同じ層数の場合、Type S での床版の

分担力は Type T に比べて大きくなり、たわみや応力が Type T よりも増大していることと符合する。

- ④ 全断面有効時と引張り無視時でのたわみに関する補強効果によれば、Type T の1層分は Type S の約 1.7 層分に相当する。
- ⑤ Type T と Type S の構造特性の差異を勘案すれば、再補強工による Type T の余寿命は Type S に比べて長くなり、概ね 1.8~2.0 倍以上の延命化が期待できると推察される。

## 8. あとがき

Type T は Type S に比べて、膜効果を発揮する構造特性をもつ Type T の方が RC 床版との付着性能も高く、補強後の RC 床版の曲げ抵抗や引張り抵抗に寄与し、既存床版への負担が小さくなる。再補強工を施す状況下においても Type T は Type S よりも長い延命効果をもたらすと推測できる。今後は本研究の変位関数を活用して、縦・横シートの目付量が互いに異なる等の異方性状を呈する多層系構造への適用を図る予定である。

## 参考文献

- 1) Timoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger, S.: Theory of Plates and Shells, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1955.
- 2) K. Sonoda and T. Horikawa: Displacement functions for an orthotropic elastic body and their applications to thick plate problems, Theo. Appl. Mech., Vol. 29, pp. 117-126, 1979.
- 3) 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論文報告集, pp. 295~300, 2014.

(2018年7月20日受付)