

各種工法で補強された損傷床版の輪荷重点近傍の局所応力の解析

ANALYSIS OF LOCAL STRESSES OF DAMAGED SLAB STRENGTHENED BY SEVERAL METHODS NEAR WHEEL TIRE LOAD

加藤暢彦*, 堀川都志雄**, 園田恵一郎***

Nobuhiko KATO, Toshio HORIKAWA and Keiichirou SONODA

*ショーボンド建設(株)本社技術部 (〒 536-0022 大阪市城東区永田 3-12-15)

**工博 大阪工業大学教授土木工学科 (〒 535-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

***工博 大阪市立大学教授土木工学科 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Recently several strengthening methods are supplied for repair of damaged RC slab in road bridge. For example, ① carbon fiber sheet bonding method, ② steel plate bonding method, ③ slab depth increasing method, and ④ DRAP method and so on are used. But mechanical characteristics of each method is clearly not solved so far, because complex fields about stresses and displacements yield. Then it is guessed for simplification that the damaged RC slab strengthened by such a method can be substituted by a multi layer plate composited with various materials. It is of course to utilize thick plate theory based on elasticity for calculation of multi layer system. Further an extension of this analytical method is tried by means of Fourier's harmonic manner. The improved method is applied to multi layer plate composited with some girders and discussed stress distributions by various strengthening method under a wheel tire load.

Key Words: analysis of multi layer system, steel plate bonding method, strengthening effect of damaged slab, slab depth increasing method, CFRP bonding method

1. 概要

道路橋 RC 床版のひび割れ損傷事例が報告されて約 25 年がたち、これまで多くの道路管理者や研究者らがこの問題に携わってきた。今日では、その原因の 1 つとして、車両の走行がもたらす広義の疲労作用が挙げられている。損傷床版の室内実験の方法の中でも、自動車荷重を模した輪荷重移動載荷装置による試験が最も実際に近い劣化現象を再現することができると評価されている。また、岡村・園田らは損傷床版の 3 次元解析から、ひびわれ面における捩りせん断応力や横せん断応力の応力集中現象を明らかにした。しかしながら、補強を施された損傷床版の力学的挙動の解明は未だ十分であるとは言いがたい。今日、道路橋 RC 床版の補強工法として、① 鋼板接着工法、② 炭素繊維接着工法、③ 上面増厚工法、④ 下面増厚工法、および⑤ D ラップ工法が挙げられる¹⁾。床版支間部での①、②、④の工法は引張り側に、③と⑤では圧縮側に補強材が設置される構造系である。例えば、①の工法を力学的観点からみれば、支間部においては上層部が RC 床版で、中間層が²⁾エポキシ樹脂、最下層

に鋼板をもつ多層板と解釈される。また、負の曲げモーメントが作用する主桁近傍で、この補強方法が採用される場合には鋼板が最上層に位置し、最下層の RC 床版が桁と合成もしくは非合成で結合される構造系となる。したがって、補強された実橋 RC 床版の桁近傍の応力状態を解析する際には、桁の曲げおよび延び剛性の影響を考慮する必要があると考えられる。

本研究では局所応力が把握できる厚板理論に、桁との合成度の影響が考慮できる桁つき多層板の解析手法を開発する。その応用例として、上記の各種の補強工法が施された RC 床版に輪荷重が作用する問題を取り上げる。正の曲げモーメントを受ける領域では輪荷重点近傍の応力や断面力に着目し、また負曲げの領域においては主桁近傍に発生する応力を計算する。さらに、それぞれの工法による結果と無補強時の床版の鉄筋応力を例に、各工法のもたらす鉄筋応力の低減する度合いを照査する。

2. 厚板理論による多層板の解析³⁾

多層板の解析では層間で伝達される応力を厳密に求め

ることが重要な点となる。すなわち薄板理論の誘導過程で用いられている「平面保持の仮定」等の混入を防止しなければならない。したがって、本研究では三次元弾性論における2つの変位関数に基づく厚板理論を展開し、さらに多層板への適用を試みる。

物体力を考慮しない変位関数の基礎式は次のように示される。

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

ここで、

$$\Delta = \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z \quad (3 \text{次元ラプラシアン})$$

変位関数と変位 u, v, w との関係式は以下のように得られる。

$$\begin{aligned} 2\mu u &= -\partial x \partial z f_3 + \partial y \phi_3 \\ 2\mu v &= -\partial y \partial z f_3 - \partial x \phi_3 \\ 2\mu w &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 z + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} (\partial^2 x + \partial^2 y) \right] f_3 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 λ, μ : Lame の定数

板の中央面に座標原点をおき、水平面内に x - y 平面を、また板厚の方向に z 軸を設定する。

式(1)の変位関数を三角級数で展開すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} f_3 &= \sum_m \sum_n \left[C_1 \text{ch}\gamma z + C_2 \text{sh}\gamma z + C_3 \gamma z \text{ch}\gamma z + C_4 \gamma z \text{sh}\gamma z \right] \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \phi_3 &= \sum_m \sum_n \left[C_5 \text{ch}\gamma z + C_6 \text{sh}\gamma z \right] \cos \alpha_m x \cos \beta_n y \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_m = m\pi/a, \beta_n = n\pi/b, \gamma^2 = \alpha_m^2 + \beta_n^2$

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

a, b : x, y 方向の支間長

$C_1 \sim C_6$: 板の上下面の境界条件より決定される積分定数

式(3)を式(2)に代入すれば、例えば変位 w が求められる。

$$\begin{aligned} 2\mu w &= -\sum_m \sum_n \left[C_1 \text{ch}\gamma z + C_2 \text{sh}\gamma z + C_3 \{ \gamma z \text{ch}\gamma z - 2(1-2\nu) \text{sh}\gamma z \} + C_4 \{ \gamma z \text{sh}\gamma z - 2(1-2\nu) \text{ch}\gamma z \} \right] \\ &\quad \cdot \gamma^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \end{aligned} \quad (4)$$

変位を Hooke の法則に代入すれば応力が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\sum_m \sum_n \left[C_1 \text{sh}\gamma z + C_2 \text{ch}\gamma z + C_3 \{ \gamma z \text{sh}\gamma z - (1-2\nu) \text{ch}\gamma z \} + C_4 \{ \gamma z \text{ch}\gamma z - (1-2\nu) \text{sh}\gamma z \} \right] \\ &\quad \cdot \gamma^3 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \tau_{xz} &= -\sum_m \sum_n \left[C_1 \text{ch}\gamma z + C_2 \text{sh}\gamma z + C_3 \{ \gamma z \text{ch}\gamma z + 2\nu \text{sh}\gamma z \} + C_4 \{ \gamma z \text{sh}\gamma z + 2\nu \text{ch}\gamma z \} + \frac{\beta_n}{2\alpha_m \gamma} (C_5 \text{sh}\gamma z + C_6 \text{ch}\gamma z) \right] \\ &\quad \cdot \alpha_m \gamma^2 \cos \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \tau_{yz} &= -\sum_m \sum_n \left[C_1 \text{ch}\gamma z + C_2 \text{sh}\gamma z + C_3 \{ \gamma z \text{ch}\gamma z + 2\nu \text{sh}\gamma z \} + C_4 \{ \gamma z \text{sh}\gamma z + 2\nu \text{ch}\gamma z \} - \frac{\alpha_m}{2\beta_n \gamma} (C_5 \text{sh}\gamma z + C_6 \text{ch}\gamma z) \right] \\ &\quad \cdot \beta_n \gamma^2 \sin \alpha_m x \cos \beta_n y \end{aligned} \quad (5)$$

全周単純支持された板の上面に力 X_u, Y_u, Z_u が、また下面には X_ℓ, Y_ℓ, Z_ℓ が作用している場合の境界条件は次のように示される。

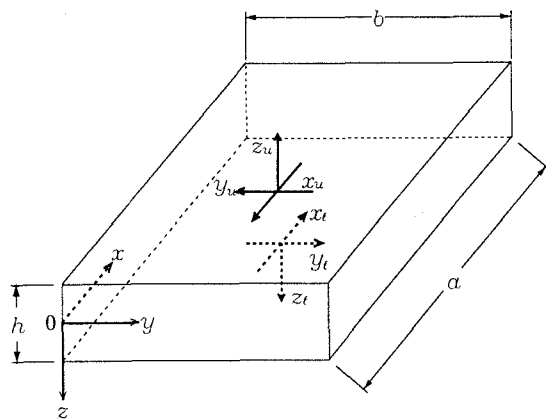


図-1 全周単純支持された板

$$\begin{aligned} z = -h/2; \quad \sigma_z &= Z_u, \tau_{xz} = X_u, \tau_{yz} = Y_u \\ z = h/2; \quad \sigma_z &= Z_\ell, \tau_{xz} = X_\ell, \tau_{yz} = Y_\ell \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、下添字 u, ℓ は板の上・下面を意味する。

式(6)を用いて積分定数 C_1, \dots, C_6 が決定される。これらの定数を代入することにより、それぞれの変位と応力が得られる。

さらに、板の上・下面での変位は力 X_u, \dots, Z_l で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 2\mu w^u &= \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_u \left\{ 1 + (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_p} \right) \right\} \right. \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_u \left\{ 1 + (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_u \left\{ (1-\nu) \left(\frac{\tan \zeta}{D_p} + \frac{\text{ct} \zeta}{D_m} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_l \left\{ (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} - \frac{1}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_l \left\{ (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} - \frac{1}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_l \left\{ (1-\nu) \left(\frac{\tan \zeta}{D_p} - \frac{\text{ct} \zeta}{D_m} \right) \right\} \\
 &\cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\
 2\mu w^l &= \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_u \left\{ (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} - \frac{1}{D_p} \right) \right\} \right. \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_u \left\{ (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} - \frac{1}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_u \left\{ (1-\nu) \left(\frac{\text{ct} \zeta}{D_m} - \frac{\tan \zeta}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_l \left\{ 1 + (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_l \left\{ 1 + (1-\nu) \left(\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_p} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_l \left\{ -(1-\nu) \left(\frac{\tan \zeta}{D_p} + \frac{\text{ct} \zeta}{D_m} \right) \right\} \\
 &\cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y
 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\zeta = \gamma l / 2$, $\tan \zeta = \tanh \zeta$, $\text{ct} \zeta = \coth \zeta$

$D_p = \zeta (\tan \zeta - \text{ct} \zeta) - 1$, $D_m = \zeta (\text{ct} \zeta - \tan \zeta) - 1$

ν : ポアソン比

上添字(バー)は各々の表面力のフーリエ係数を示す。

全周単純支持の k 層からなる多層板を考えてみる。

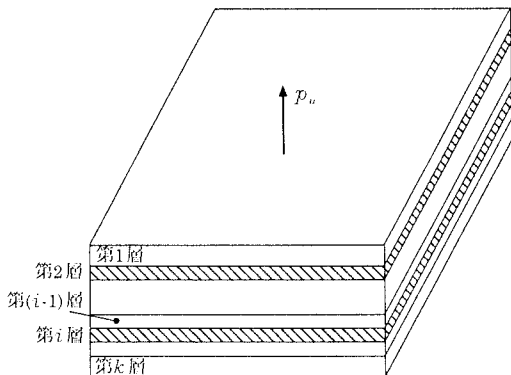


図-2 k 層からなる多層板

第 $(i-1)$ 層と第 i 層の板が接合される場合、接合面で互いに力が授受される。これらの力を $\mathbf{X}_{i-1} = (X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$ とすれば、第 $(i-1)$ 層の下面の変位 $(u_{i-1}^l, v_{i-1}^l, w_{i-1}^l)$ と第 i 層の上面の変位 (u_i^u, v_i^u, w_i^u) は連続していなければならない。そこで次のような変位の連続条件式が成立する。

$$u_{i-1}^l = u_i^u, \quad v_{i-1}^l = v_i^u, \quad w_{i-1}^l = w_i^u, \quad (8)$$

第 $(i-1)$ 層と第 i 層の接合面に作用する力を $X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}$ とすれば、式(7)を式(8)に代入して、例えば z 方向の連続式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2\mu_{i-1}} \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_{i-2} \left\{ (1-\nu_{i-1}) \left(\frac{1}{D_m^{i-1}} - \frac{1}{D_p^{i-1}} \right) \right\} \right. \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_{i-2} \left\{ (1-\nu_{i-1}) \left(\frac{1}{D_m^{i-1}} - \frac{1}{D_p^{i-1}} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_{i-2} \left\{ (1-\nu_{i-1}) \left(\frac{\text{ct} \zeta_{i-1}}{D_m^{i-1}} - \frac{\tan \zeta_{i-1}}{D_p^{i-1}} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_{i-1} \left\{ 1 + (1-\nu_{i-1}) \left(\frac{1}{D_m^{i-1}} + \frac{1}{D_p^{i-1}} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_{i-1} \left\{ 1 + (1-\nu_{i-1}) \left(\frac{1}{D_m^{i-1}} + \frac{1}{D_p^{i-1}} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_{i-1} \left\{ -(1-\nu_{i-1}) \left(\frac{\tan \zeta_{i-1}}{D_p^{i-1}} + \frac{\text{ct} \zeta_{i-1}}{D_m^{i-1}} \right) \right\} \\
 &\cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \\
 &= \frac{1}{2\mu_i} \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_{i-1} \left\{ 1 + (1-\nu_i) \left(\frac{1}{D_m^i} + \frac{1}{D_p^i} \right) \right\} \right. \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_{i-1} \left\{ 1 + (1-\nu_i) \left(\frac{1}{D_m^i} + \frac{1}{D_p^i} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_{i-1} \left\{ (1-\nu_i) \left(\frac{\tan \zeta_i}{D_p^i} + \frac{\text{ct} \zeta_i}{D_m^i} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_i \left\{ (1-\nu_i) \left(\frac{1}{D_m^i} - \frac{1}{D_p^i} \right) \right\} \\
 &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_i \left\{ (1-\nu_i) \left(\frac{1}{D_m^i} - \frac{1}{D_p^i} \right) \right\} \\
 &+ \bar{Z}_i \left\{ (1-\nu_i) \left(\frac{\tan \zeta_i}{D_p^i} - \frac{\text{ct} \zeta_i}{D_m^i} \right) \right\} \\
 &\cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y
 \end{aligned}$$

第 i 番目の接合面に働く力を $\mathbf{X}_{i-1} = (X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$ とおけば、 x, y, z 方向の連続条件式は、フーリエ級数の項 (m, n) に対して次のような漸化形式となる。

$$\mathbf{a}_1 \mathbf{X}_{i-2} + \mathbf{a}_2 \mathbf{X}_{i-1} + \mathbf{a}_3 \mathbf{X}_i = \mathbf{0} \quad (9)$$

式(9)を k 層からなる多層板に適用すれば以下の式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{X}}_0 \\ \bar{\mathbf{X}}_1 \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{X}}_i \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{X}}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで、

[**A**] : 接合面に作用する力 \mathbf{X}_i ($i=0, k$) に関する
 柔性マトリックス

多層板の最上面と最下面の力 \mathbf{X}_0 および \mathbf{X}_k が規定されている場合、式(10)を解けば各接合面に働く力 \mathbf{X}_i が求められる。さらに、これらの伝達力を用いて各層の変位と応力が得られる。

3. 桁と結合された多層板への適用

図-3 に示される r 本の桁と結合される多層板 (k 層) を考える。

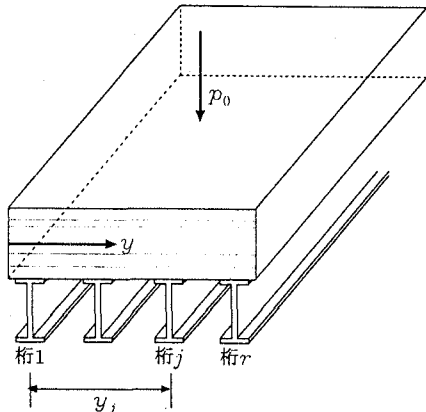


図-3 桁数 r と結合される多層板

桁 j による多層板への反力は、主として鉛直方向の反力と橋軸方向 (x 方向) の水平力が挙げられる。また桁 j のフランジ幅 B_j は多層板のスパン b に比して小さいので、これらの反力はフランジ内で一様であると仮定する。

例えば、多層板と桁 j との鉛直方向の変位の連続条件についての展開は以下の通りである。

① 多層板の最上面に作用する外荷重 $\mathbf{X}_0=(0, 0, p_0)$ のみによる多層板の解は、各項 (m, n) についての調和解析から得られる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{X}}_1^0 \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{X}}_i^0 \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{X}}_{k-1}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{X}}_0 \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (11)$$

ここで

上添字 0 は外荷重を意味する。

② 式(11)より得られた第 k 層の上・下面に働く力 $\mathbf{X}_{k-1}^0=(X_{k-1}^0, Y_{k-1}^0, Z_{k-1}^0)$ と $\mathbf{X}_k^0=(0, 0, 0)$ とから、桁 j の位置での第 k 層下面の変位 $w_{k,j}^0$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} w_{k,j}^0 &= \frac{1}{2\mu_k} \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_{k-1}^0 \left\{ (1-\nu_k) \left(\frac{1}{D_m^k} - \frac{1}{D_p^k} \right) \right\} \right. \\ &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_{k-1}^0 \left\{ (1-\nu_k) \left(\frac{1}{D_m^k} - \frac{1}{D_p^k} \right) \right\} \\ &+ \bar{Z}_{k-1}^0 \left\{ (1-\nu_k) \left(\frac{\text{ct}\zeta_k}{D_m^k} - \frac{\text{tn}\zeta_k}{D_p^k} \right) \right\} \left. \right] \\ &\quad \cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y_j \end{aligned} \quad (12)$$

③ 桁 j の鉛直方向の反力 Z_{kj} はフランジ内で一様である場合のフーリエ展開は次のようになる。紙面の都合上、以下の記述では橋軸方向の水平力 X_{kj} に関する項を省略する。

$$Z_{kj} = \sum_m Z'_{kj} \left[\sum_n \rho_j \sin \beta_n y \right] \sin \alpha_m x \quad (13)$$

ここで、

$$\rho_j = \frac{4}{b\beta_n} \sin \beta_n \frac{B_j}{2} \sin \beta_n y_j$$

B_j : 桁 j のフランジ幅, y_j : 桁 j の位置

この荷重による第 k 層下面の変位 $w_{k,j}^j$ は、外荷重と同様の操作により以下のように得られる。

$$\begin{aligned} w_{k,j}^j &= \frac{1}{2\mu_k} \sum_m Z'_{kj} \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} \bar{X}_{k-1}^j \left\{ (1-\nu_k) \left(\frac{1}{D_m^k} - \frac{1}{D_p^k} \right) \right\} \right. \\ &+ \frac{\beta_n}{\gamma} \bar{Y}_{k-1}^j \left\{ (1-\nu_k) \left(\frac{1}{D_m^k} - \frac{1}{D_p^k} \right) \right\} \\ &+ \bar{Z}_{k-1}^j \left\{ (1-\nu_k) \left(\frac{\text{ct}\zeta_k}{D_m^k} - \frac{\text{tn}\zeta_k}{D_p^k} \right) \right\} \left. \right] \\ &+ \rho_j \left\{ -(1-\nu_k) \left(\frac{\text{tn}\zeta_k}{D_p^k} + \frac{\text{ct}\zeta_k}{D_m^k} \right) \right\} \\ &\quad \cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y_j \end{aligned} \quad (14)$$

④ 桁 j のたわみ $w_{b,j}$ ははりの基礎微分方程式より求められる。

$$w_{b,j} = \frac{1}{EI_j} \sum_m \left[-\frac{1}{\alpha_m^4} Z'_{kj} \right] \sin \alpha_m x \quad (15)$$

ここで、 EI_j : 板 j の曲げ剛性

⑤多層板の最下面の変位と桁 j の連続条件式は、例えば z 方向について記せば

$$w_{k,j}^0 + w_{k,j}^j = w_{b,j} \quad (16)$$

式 (16) より桁 j の反力 Z_{kj} の x 方向の大きさ Z'_{kj} が項 m ごとに得られる。その後、再び式 (10) に代入して多層板の解析を実行すれば、各層の変位と応力が得られる。

4 数値計算例

現在、ひびわれ損傷を受けた床版の補強対策には①炭素繊維工法、②鋼板接着工法、③Dラップ工法、および④上面増厚工法が採用されている。これらの工法を力学的観点から見れば、損傷床版 + 接着材 + 補強材からなる多層板ととらえることができる。

本論文では A) 正の曲げモーメントを受ける場合と B) 負の曲げが作用する、すなわち主桁近傍にある場合の 2 つのケースを想定して、本解析法による計算結果を以下に示す。補強材の力学的特性とそれぞれの工法での諸元を表-1 に示す。エポキシ樹脂のヤング率 $2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比を 0.4 としている。また、損傷床版は版厚 18 cm、上・下かぶり 4 cm、下側鉄筋 8-D19 (@125mm) = 22.92 cm^2 、上側鉄筋 4-D19 (@250 mm) = 11.46 cm^2 である。なお、厚板理論では引張り無視時の応力分布は扱えないので、引張り無視時のときの曲げ剛性と等価な等方性板に置換している。さらにこの場合のポアソン比は 0.2 である。

A) 正の曲げモーメント

正の曲げモーメント下における補強工法の概要は図-4のように示される。なお、上面増厚工法は下面増厚工法と同じであるとして扱っている。計算に用いた床版の形状・寸法と輪荷重の位置を図-5に示す。

輪荷重は現行の道示で規定されている後輪一輪のみを取り上げている。もし、軸重が作用する場合には本解析法の荷重展開を再度行えばよい。

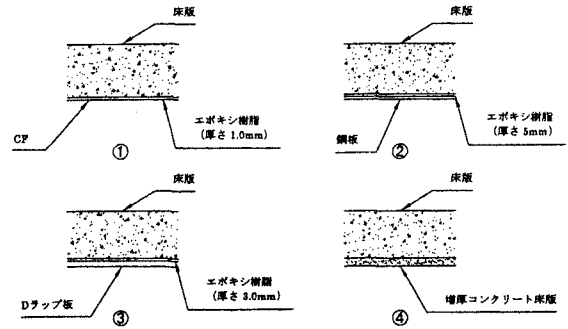


図-4 補強工法の概要(正の曲げモーメント)

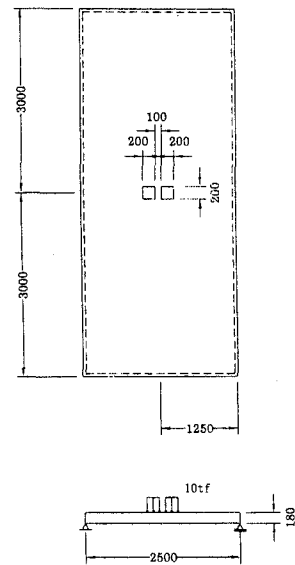


図-5 床版の形状・寸法と輪荷重位置

各補強工法による床版のたわみや応力、および補強材に作用する応力の比較を表-2 に示す。無補強床版の下側鉄筋に作用する応力の低減率が大きいのは、②~④の工法であり、①の工法では期待できないことが分かる。

すなわち走行疲労実験の結果と照合すれば、①の工法が施された損傷床版の耐力が向上している理由は、床版の曲げ剛性の向上ではなく、ひび割れの動きを抑制しているためと推察される。

表-1 補強材の材料特性と諸元

	ヤング率 ($\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$)	厚さ (mm)	ポアソン比	接着層の厚さ (mm)
CF	230	0.167	0.1	1.0
鋼板	210	4.5	0.3	5.0
DRAP(中間のぼり 層を含む)	20	27.0	0.16	3.0
増厚コンクリート	32	30.0	0.16	0.0

表-2 床版のたわみと鉄筋応力の比較

	床版の主筋方向 モーメント (tf·m/m)	床版の主筋方向 の軸力 (tf/m)	床版下面の たわみ (mm)	補強材の応力 (kgf/cm^2)	床版上面の 応力 (kgf/cm^2)	主筋応力 (kgf/cm^2)	低減率 (%)
上面CFRP	1.499	-0.019	1.719	693	-33	611	-11.6
下面鋼板接着	0.649	-0.107	0.794	244	-9	499	17.4
上面Dラップ	0.739	-0.089	0.853	34	-12	489	19.0
下面増厚コンクリート	0.722	-0.092	0.867	33	-12	489	19.0
補強筋	全断面有効時	1.570	0.008	—	-28	16	—
	引張り無視時	1.570	-0.002	1.854	—	-35	604

B) 負の曲げモーメント

負の曲げモーメントを受ける補強工法の概要を図-6に示す。計算に用いた床版の寸法と輪荷重の位置を図-7に示す。なお、桁と床版との間にはハンチ(5 cm)が設けられているため桁からの反力による荷重分散角度を45°として考慮しており、また桁の曲げ剛性を無限大としている。桁直上での床版や補強材のたわみや応力、さらに、輪荷重点直下でのたわみや応力の比較をそれぞれ表-3と表-4に示す。

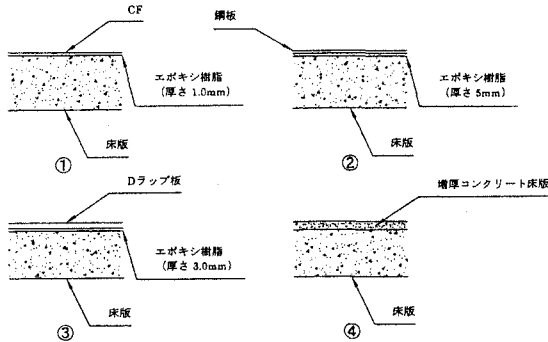


図-6 補強工法の概要(負の曲げモーメント)

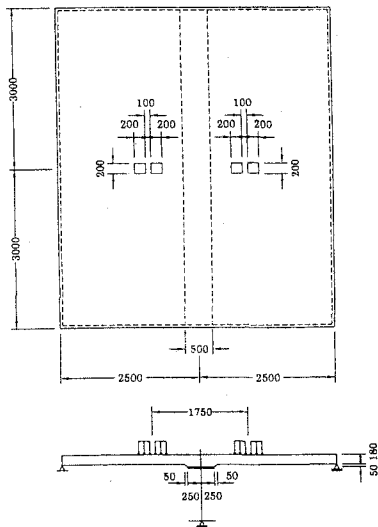


図-7 床版の寸法と輪荷重位置

表-3 床版のたわみと鉄筋応力の比較(桁直上)

	床版の主筋方向 モーメント (tf・m/m)	床版の主筋方向 の軸力 (tf/m)	床版下面の たわみ (mm)	補強材の応力 (kgf/cm ²)	床版下面の 応力 (kgf/cm ²)	主筋応力 (kgf/cm ²)	低減率 (%)
上面CFRP	-1.244	-0.013	0.0	624	-19	319	6.2
上面鋼板接着	-0.565	-0.080	0.0	180	-13	74	78.2
上面Dラップ	-0.637	-0.070	0.0	30	-14	100	70.6
上面増厚コンクリート	-0.507	-0.079	0.0	33	-12	62	81.2
補強筋	全断面有効時	-1.300	-0.007	—	-25	14	—
	引張り無視時	-1.300	-0.007	—	-20	340	—

表-4 床版のたわみと鉄筋応力の比較(輪荷重点直下)

	床版の主筋方向 モーメント (tf・m/m)	床版の主筋方向 の軸力 (tf/m)	床版下面の たわみ (mm)	補強材の応力 (kgf/cm ²)	床版上面の 応力 (kgf/cm ²)	主筋応力 (kgf/cm ²)	低減率 (%)
上面CFRP	0.873	0.0007	0.676	-355	-19	330	7.3
上面鋼板接着	0.414	0.048	0.328	-134	-10	61	82.9
上面Dラップ	0.486	0.037	0.363	-16	-12	108	69.7
上面増厚コンクリート	0.408	0.045	0.297	-17	-10	64	82.0
補強筋	全断面有効時	0.908	-0.003	—	-16	9	—
	引張り無視時	0.908	-0.003	—	-20	356	—

鉄筋応力の低減率が大きいのは、②あるいは③の工法があげられる。しかし、上面増厚工法において旧床版と増厚部コンクリートとの付着性能が不十分である場合には、多層板は重ね板の状態になり、鉄筋応力の低減は期待できないと予想される。したがって、上面増厚工法では旧床版との付着性能が十分発揮させることが必要であると考えられる。

5 あとがき

多層板が桁と合成される場合の解析には、選点法による手法がよく採用されている。しかし選点法を用いる場合、桁との間で授受される伝達力の個数が多くなり、結果として大きな次元の連立方程式に帰着される。小容量の計算機によって大次元の連立方程式を精度よく解くには工夫が必要になる。本研究では調和解析法による手法を提案し、桁つき多層板の解析を可能にした。

本解析法を用いて、ひび割れ損傷床版に施されている鋼板接着工法を始めとする各種補強工法の力学的特性を明らかにした。正および負の曲げモーメントを受ける2つのケースを取上げ、無補強床版の鉄筋応力がどの程度低減するのか、また補強材に作用する応力の試算を行った。

6 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団, 道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性, 平成 3 年 12 月
- 2) 日本道路公団, 床版上面増厚工法マニュアル, 平成 5 年 2 月
- 3) 堀川都志雄, 直交異方性厚版の弾性理論とその応用に関する研究, 大阪市立大学 学位請求論文, 1984 年 5 月