構造工学論文集 Vol.54A(2008 年 3 月) 土木学会

全周固定される多層版解析の一手法について

On a numerical technique of all fixed slab with multi layers

横山広*，安東祐樹**，関口幹夫***，堀川都志雄****
Hiroshi Yokoyama，Yuuki Andou，Mikio Sekiguchi，Toshio Horikawa

*ショーボンド建設　中部支社（〒920-0362 石川県金沢市古府 1 丁目 140 番地）
**ショーボンド建設　補修工学研究所（〒305-0003 茨城県つくば市桜 1 丁目 17 番地）
***東京都土木技術センター　技術調査課（〒136-0075 東京都江東区新砂 1 丁目 9 番 15 号）
****工博，大阪工業大学　都市デザイン工学科（〒535-0002 大阪市旭区大宮 5 丁目 16 番 1 号）

Stress and displacement generated near a loading point on a multi layer slab have been conventionally estimated from deflection and stress resultant derived from the thin plate theory. To understand the behavior of the slab precisely on a local basis, a three-dimensional analysis is required. This study proposes a method to create clamping conditions approximately through harmonic analysis by placing dummy girders with high flexural rigidity at locations very close to simply-supported edges. A technique that is combined with the point matching method was developed and applied to the calculation of stress and displacement generated near the loading points and on the layer boundaries of a multi-layer slab with all edges clamped. This technique allows description of three-dimensional stress and displacement properties within the slab except near the dummy girders.

Key Words: multi layered slab, fixed condition, local stress, harmonic analysis, point matching method
キーワード：多層版，固定条件，局所応力，調和解析法，選点法

1. はじめに

コスト縮減化や費用対効果の効率化を目指して施工される少数主桁橋梁の床版では，主として PC 床版や合成床版が採用されており，主桁と一体化することによって橋梁構造全体としての合理化が図られている．それらの新しい形式の橋梁では床版の果たす役割は従来に比して増加していると指摘されている．床版下面に鋼板を有する合成床版では，長期間の耐荷性能を保持させる意味からも，鋼材の腐食に起因する断面減少の防止に注目が集められている．その際には上面に敷設されるアスファルト舗装の材料選定や防水層設置の推奨に留意されてはいるものの，舗装や防水層に作用する応力の照査方法は未だ確立されていない．また既存の橋梁床版については，重交通を担う RC 床版でのひび割れ損傷による疲労現象の苦い経験を踏まえた結果，ひび割れ間への雨水の侵入がせん断耐力の低下に大きく影響しているとの結論が定着しており，ここでも防水層の重要性が強調されている．各監督官庁の道路管理者らはひび割れによる劣化損傷の判定を基に床版の延命化を図るため，例えば床版下面に鋼板接着を施す工法や SFRC 上面増厚工法を採用する等の補強対策を講じているが，これらに伴う厳密な応力照査を確認した例は少ない[1]．さらに，寒冷地方で散布される凍結防止剤は，将来的に床版の塩害損傷に発展することが危惧され，その際には断面修復材や電気防食工等の新たな材料層が床版上面に施工されることになる[2]．

力学的立場から見れば，これらの床版は概ね多層系からなる構造形式として近似できると想定される．現状では有限要素法によって床版の応力や変形解析を検証し，実用に供しているものの，変形を表現する形状関数に関して制約があるため，荷重点近傍や多層系構造での層界面の応力等，特に局所応力が卓越する部位での厳密な応力算定には問題があると考えられる．

通常，板の端辺が単純支持と異なる境界条件をもつ薄板理論の級数解法では，全周単純支持された解（Navier の解）を特解とし，境界条件を満足させるための同時解との和で表される一般解が用いられている[3]．この手法は種々の境界を有する床版の設計や照査を行う場合，パーソナルコンピュータでも厳密な解が容易に得られる点が長所であるが，薄板理論は曲げモーメント等の断面力を中心に構成されているので，局所的な応力や変形の算出には不向きであると言われている．それに対して 3 次元理論に基づく厚板理論を全周単純支持の多層板に適用する場合に限定すれば，荷重点直下や近傍での局所挙動の把握に威力を発揮すると評価されている．しかしコンクリート箱桁や鋼製の少数主桁等の剛性の高い主桁に支持される場合の固定辺や，自由辺等の単純支持以外の境界条件を有する多層板の層界面での付着応力や変形状態を求める目的で厚板理論のみに拘泥すれ

ば，3 次元的な端辺での境界条件を満足させることは厖大な計算量と多大の労力を要するため現実的ではないと推量される．

これに代わる方策の一つとして，著者らは特解として全周単純支持された厚板理論から誘導される解を用い，さらに境界条件を満たすように薄板理論の同次解とを併用するハイブリッド法（混合法）の適用例を発表した[4]．しかしこの方法を多層板に適用する場合，応力で規定される応力境界では各層から得られる端部の曲げおよびねじりモーメントや，軸力を合算した合モーメントや合軸力等の換算断面力が，また変位境界に対しては各層の水平および鉛直方向のそれぞれの変位を勘案した擬似的なたわみやたわみ角等の換算物理量の導入が必要となる．何れにしても「平面保持の仮定」から導かれる薄板理論を併用していることが，3 次元的な観点からすると厳密性に欠けていると言わざるを得ない．したがってそれらの問題に対応するためには3次元解に出来る限り近く，かつ簡便な計算で固定境界をもつ床版の解析手法の開発が望まれることになる.一方,岡村,島田らは Mindlin 解の積分値を基本系に据え，選点法を用いて等方性半無限体から厚版を切り出す手法を確立した[5]．スパンに比べて比較的厚い範疇の版厚を有する全周固定版の数値解を導いているが，橋梁床版を対象とした版厚程度については何ら言及していない．また，この方法を多層版に適用するには煩雑な操作と工夫が必要になると予測される．

本研究では単純支持辺の近傍に大きな曲げ剛性をもつダミー桁を配置することにより，端部近辺が固定条件に近い状態を生み出す手法を提案する．輪荷重が作用する実橋床版を念頭において，相対２辺が固定で他の２辺が単純支持される場合には調和解析法のみを採用し，さらに全周固定される床版については調和解析法と選点法を併用することによって，多層版の輪荷重点近傍の応力や変位，および舗装とコンクリートのような異種材料が接する界面に働く付着せん断応力の数値解析を試みる．なお，提案する多層版の解析手法は厚板理論のみで構成されているので，桁近傍を除けば版内部においてはほぼ３次元解の性質を保持している点が特徴である．

2. 固定条件を作る操作

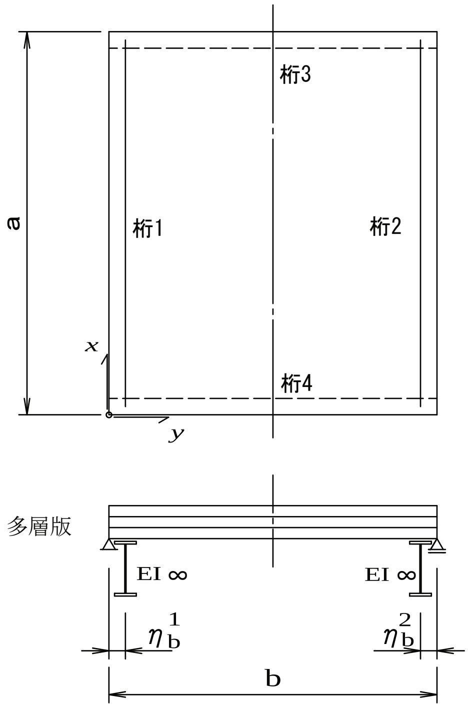
固定条件を生み出すための操作概要を理解するために，薄板理論に限定して説明するが多層版についても同様に扱うことができる．本節では固定条件を有する板に荷重が作用する場合の計算結果と Timoshenko による古典解[3] との比較を通して，本解法の妥当性を吟味する．

2.1 相対２辺が固定，残りの２辺が単純支持される板

図−1 のように板の隅角点に座標原点を置く．y=0 と b の辺を固定とすれば，x 軸方向に関して調和解析法が適用できる．

薄板理論のたわみの基礎方程式は次のように与えられる．

$$D\Delta\Delta w = q(x, y) \tag{1}$$



図−1　計算モデル

ここで，D：板剛度 $=Eh^3／12(1-\nu^2)$,

$q(x, y)$：分布荷重,

E：板の弾性係数,

h：板厚,

ν：ポアソン比,

Δ：2 次元ラプラシアン,

任意荷重 q を受ける全周単純支持板の２重 Fourie 級数で展開されるたわみ解 w_0 は以下のように得られる．

$$D\cdot w_0 = \sum_m\sum_n q_{mn}/\gamma^4 \sin\beta_n y \sin\alpha_m x \tag{2}$$

ここで，q_{mn}：$q(x,y)$の Fourier 係数,

m,n：x および y 方向の級数項,

a：x 軸（橋軸）方向のスパン,

b：y 軸（橋軸直角）方向のスパン,

$$\alpha_m = m\pi/a, \beta_n = n\pi/b, \gamma^2 = \alpha_m{}^2 + \beta_n{}^2$$

同様に，y=0 と b の境界辺近傍に配置されるダミー桁 1 と 2 での鉛直方向反力を X^1 および X^2 とおけば，これらの x, y 方向の級数展開は次のように示される．

$$X^i = \sum_m X^i{}_m \sum_n \rho^i{}_n \sin\beta_n y \sin\alpha_m x \quad (i=1,2) \tag{3}$$

ここで,

$X^i{}_m$: 桁 i での反力 X^i の x 方向の Fourier 係数,

$v_b{}^i$: 桁 i の上フランジ幅,

$\eta_b{}^i$: 桁 i の取付け位置,

$$\rho^i{}_n = 4\sin\beta_n v_b{}^i \sin\beta_n \eta_b{}^i / b\beta_n$$

荷重が橋軸直角方向の中央($y = b/2$) に関して対称に作用する場合には,それぞれの桁反力は同一となる.桁反力のみによるたわみを w_1 で表すと,

$$D \cdot w_1 = 2\sum_m X_m \sum_n \rho_n / \gamma^4 \sin\beta_n y \cdot \sin\alpha_m x \tag{4}$$

となり, 板のたわみ w はこれらの合計($= w_0 + w_1$) で表される.次に,x 方向について調和解析法を適用して,桁が配置されている位置 $y = \eta_b$ の位置で総たわみ w が零となるように設定すれば,級数の m 項ごとに桁反力の係数 X_m が成立する.

任意の荷重と桁反力による影響を含めた総たわみ w を用いて,板内部での曲げモーメント Mx, My およびせん断力 Qx, Qy 等が求められる.

等分布満載荷重 q が作用する正方形板(スパン a)の主な位置での計算結果と古典解との比較を表−1 と表−2 に示す. なお,$v_b/a = \eta_b/a = 0.01$ としている.

表−1 中央点でのたわみと曲げモーメント

	$w\,(qa^4/D)$	$Mx\,(qa^2)$	$My\,(qa^2)$
Timoshenko	0.00192	0.0244	0.0332
本解法	0.00184	0.0235	0.0327
誤差(%)	4.3	3.7	1.5

表−2 固定辺中央での曲げモーメント

	$My\,(qa^2)$
Timoshenko	-0.0697
本解法	-0.0653
誤差(%)	6.3

表によれば古典解との誤差は 6〜2%程度に留まっているが,固定辺での精度が中央点に比べて粗いことが判る.

2.2 全周固定される板

全周固定される薄板の級数解は,全周単純支持される解を特解に,x および y 軸方向の固定条件を満足させる同時解を重ね合わせて,次のように表される.

$$D \cdot w = \sum_m \sum_n q_{mn} / \gamma^4 \sin\beta_n y \sin\alpha_m x$$

$$+ \sum_m (A_m ch\alpha_m y + B_m sh\alpha_m y + C_m \alpha_m y ch\alpha_m y$$

$$+ D_m \alpha_m y sh\alpha_m y) \sin\alpha_m x$$

$$+ \sum_n (E_n ch\beta_n x + F_n sh\beta_n x + G_n \beta_n x ch\beta_n x$$

$$+ H_n \beta_n x sh\beta_n x) \sin\beta_n y \tag{5}$$

ここで, $ch\alpha_m y = \cosh\alpha_m y$,

$sh\alpha_m y = \sinh\alpha_m y$,

x=0, a での固定条件 w=0 と θx=0, および y=0, b での固定条件 w=0 と θy=0 を同時に満足させるには,例えば式(5)中の双曲線関数を sine あるいは cosine 級数で次式のように再展開する等の工夫が必要である.

$$sh\alpha_m y = 2/b \sum_n \beta_n sh\alpha_m b (-1)^{n+1} / \gamma^2 \sin\beta_n y$$

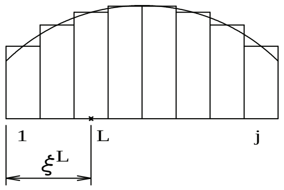
$$ch\alpha_m y = 2/b \sum_n \beta_n \{1 - (-1)^n ch\alpha_m b\} / \gamma^2 \sin\beta_n y \tag{6}$$

未定係数 A_m〜H_n は特有な連立方程式から決定されるが,得られた数値解に対する収束性が課題になる.したがって,この方法を多層版に持ち込むことは煩雑な計算過程を経なければならず,得策とは言えない.

本研究では以下のような手順で,任意荷重下での全周固定正方版の解析を進める.

① 荷重のみが作用する場合の x 軸と平行に配置されたダミー桁 1 と 2 の反力 $R_1{}^0$ と $R_2{}^0$ を 2.1 節と同様にして求める.

② y 軸と平行なダミー桁 3 と 4 に作用する反力分布を求めるために, 例えば桁 3 については図−2 に示す j 個の矩形状選点ブロック $R_3{}^k$ と (k=1, j)に置き換えた後,各反力ブロックによるダミー桁 1 と 2 での反力 $R_1{}^k$ と $R_2{}^k$ を計算する.桁 4 に対しても同様の操作により反力 $R_4{}^k$ (k=1, j)を計算する.



図−2 反力を求めるための選点ブロック

③ 各選点ブロックの中央位置 $x = \xi^L$ (L=1, j)で,①と②から得られる総たわみが零となるように, 桁 3 と 4 の反力 $R_3{}^L$ と $R_4{}^L$ を決定する.

④ 最後に, 荷重およびダミー桁 1〜4 に生ずる全ての反力を多

層版に作用させて，版内部でのたわみおよび曲げモーメントを計算する．

等分布荷重下での計算結果と古典解との比較を表−3 と表−4 にまとめる．古典解との誤差は 1〜7%に収まっているが，前節と同様，固定辺での誤差が大きいことが判る．

なお，本解法ではダミー桁 3 と 4 に作用する反力ブロックの一部を零として解放すれば，x=0 と a の辺が部分固定される場合の解も容易に得られることになる．

表−3　中央点でのたわみと曲げモーメント

	$w\,(qa^4/D)$	$Mx\,(qa^2)$	$My\,(qa^2)$
Timoshenko	0.00126	0.0231	0.0231
本解法	0.00128	0.0255	0.0231
誤差（%）	1.6	2.6	0.9

表−4　固定辺中央での曲げモーメント

	$My\,(qa^2)$
Timoshenko	-0.0513
本解法	-0.0479
誤差（%）	6.6

3. 全周固定される多層版の解析

厚板理論は Galerkin-vector f_3 と Boussinesq の変位関数 θ_3 から誘導される．変位関数の基礎式と，変位関数と各変位 u，v，w との関係式は以下のように表される．

$$\Delta\Delta f_3 = 0\,,\quad \Delta\theta_3 = 0 \tag{7}$$

$$2\mu u = -\partial^2 f_3/\partial x\partial z + \partial\theta_3/\partial y\,,$$

$$2\mu v = -\partial^2 f_3/\partial y\partial z - \partial\theta_3/\partial x\,,$$

$$2\mu w = \mu/(\lambda+\mu)\partial^2 f_3/\partial^2 z + (\lambda+2\mu)/(\lambda+\mu)(\Delta - \partial^2/\partial^2 z)\,f_3 \tag{8}$$

ここで，λ，μ：ラメの定数,

⊿：3 次元ラプラシアン,

u，v，w : x，y，z 方向の変位,

式(8)の変位関数を 2 重 Fourier 級数で展開すれば,

$$f_3 = \sum_m\sum_n (C_1 ch\gamma z + C_2 sh\gamma z + C_3\gamma z ch\gamma z + C_4\gamma z sh\gamma z)\sin\alpha_m x\sin\beta_n y\,,$$

$$\theta_3 = \sum_m\sum_n (C_5 ch\gamma z + C_6 sh\gamma z)\cos\alpha_m x\cos\beta_n y \tag{9}$$

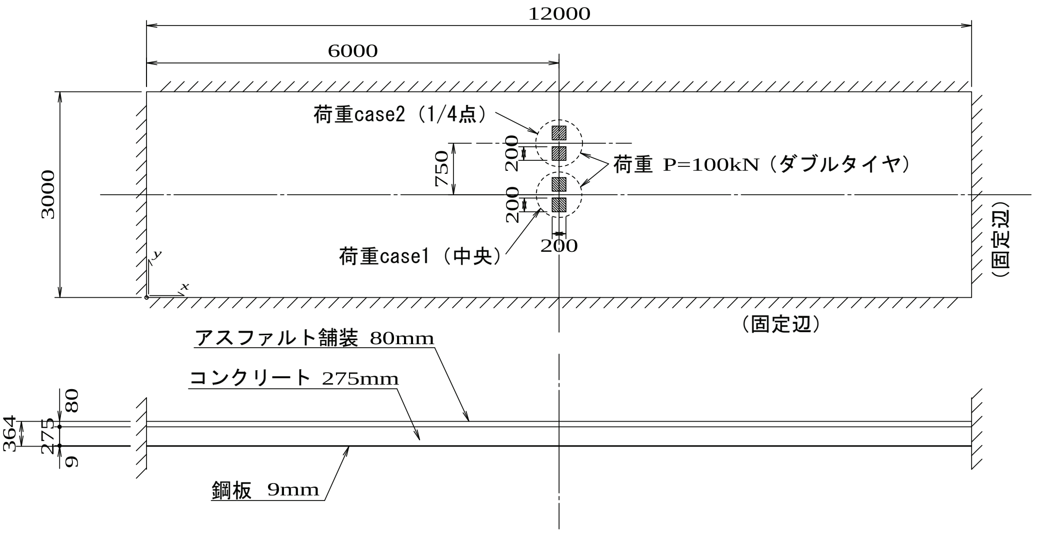
ここで,

C_1〜C_6 : 版の上･下面の境界条件より決定される未定定数

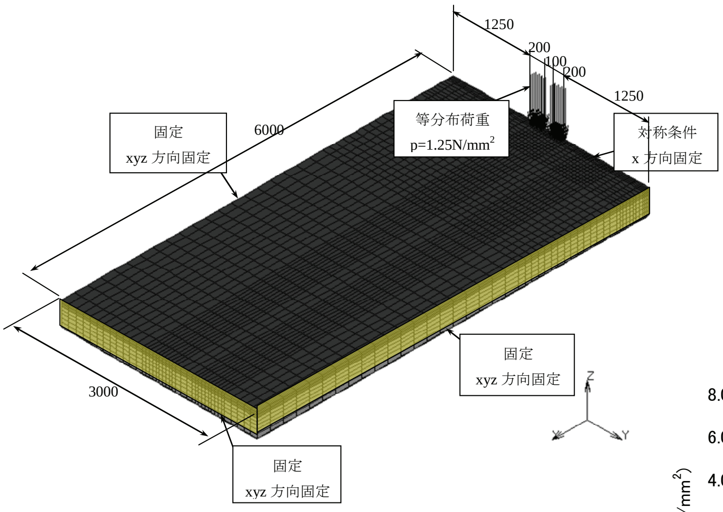
a ：x 軸（橋軸）方向のスパン,

b ：y 軸（橋軸直角）方向のスパン,

n 層からなる多層版に式(9)を適用する．全周固定される多層版の解析は, 2.2 節で述べた手順に従って第 1 層上面の応力条件を用いて荷重 q を考慮しつつ，第 n 層の下面にダミー桁 3 と 4 での反力ブロックを作用させる．その後選点ブロックの中央位置での総たわみを零とする条件から，ダミー桁 3 と 4 の反力ブロック R_3^L と R_4^L（L=1，j）を計算する．なお，荷重 q および桁からの反力ごとに多層版解析を行う必要があることを付記しておく．



図−3　鋼・コンクリート合成床版の計算モデル　（単位 : mm）

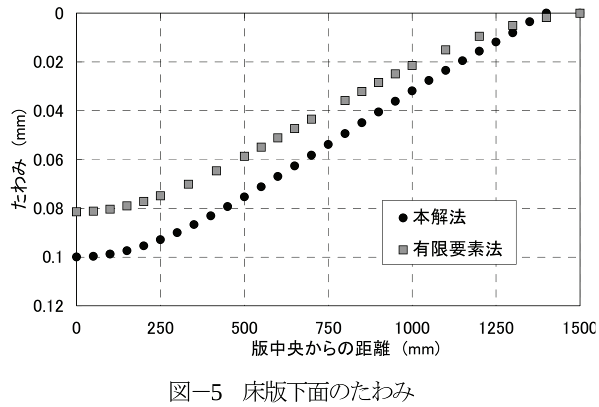


図−4　有限要素法の計算モデル（単位：mm）

4. 数値計算例

全周固定される長方形多層床版（辺長比 1 : 4）問題を取り上げ，輪荷重点近傍に発生する応力および変位に着目する（図−3）．ダミー桁 1 は y=100mm，桁 2 は y=2900mm，および桁 3 と 4 はそれぞれに x=100mm と 11900mm に配置し，各桁のフランジ幅は何れも 100mm に設定している．

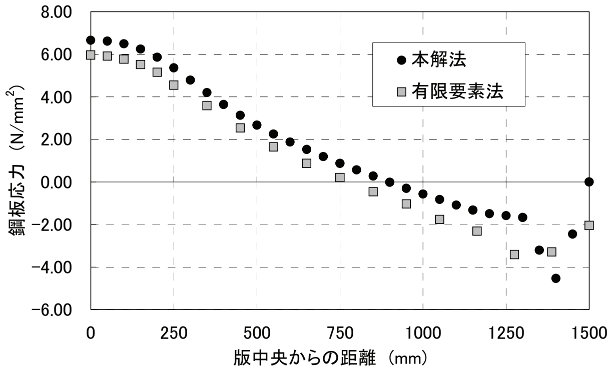
実橋床版で遭遇するのと同等な多層版の諸元を表−5 にまとめる．載荷荷重は道路橋示方書[6)]（以下，示方書と称す）に示されている P=100kN を採用し，その形状は実車輌を想定したダブルタイヤとした．載荷パターンは輪荷重が床版中央に位置する対称載荷の case1 と偏心載荷の case2 とする．比較のために 3 次元有限要素法による結果と本計算結果を掲げ，本計算手法の妥当性を吟味する．なお，有限要素法は汎用プログラムである MSC　Software 社の MSC.Marc を使用した．要素は 8 節点のアイソパラメトリック要素であり，図−4 に示す舗装 2 層，コンクリート版 5 層，鋼板 1 層の要素分割を採用し，想定ひずみ法による曲げ特性の改善を図った．なお，舗装とコンクリートの付着せん断応力の解析では，ヤング係数が大きく異なる材料の界面への着目であることから，節点を共有した方法では精度が



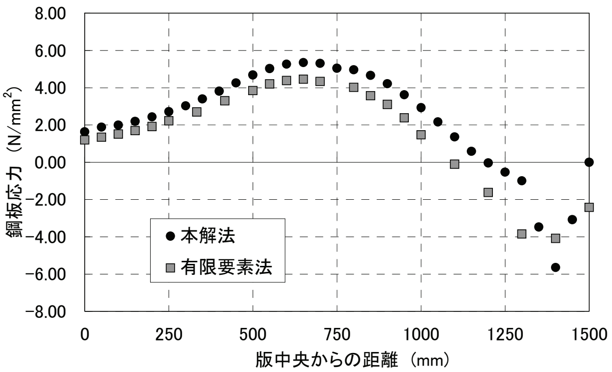
図−5　床版下面のたわみ

表−5　計算に用いた物性値

種　別	ヤング係数 (N/mm^2)	ポアソン比
コンクリート	2.80×10^4	0.167
鋼	2.10×10^5	0.3
アスファルト舗装	5.00×10^2	0.4
床版厚	284　mm（底鋼板を含む）	
鋼板厚さ	9　mm	
舗装厚さ	80　mm	

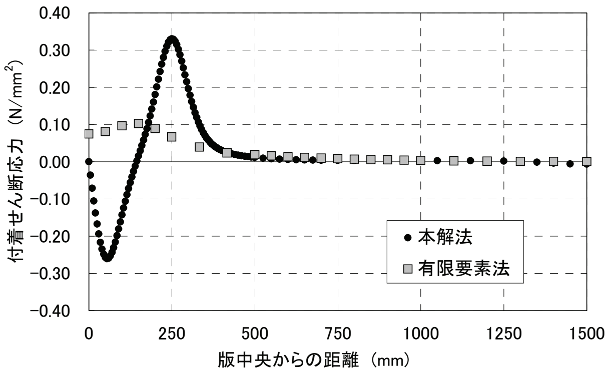


(a)　case1（版中央載荷）



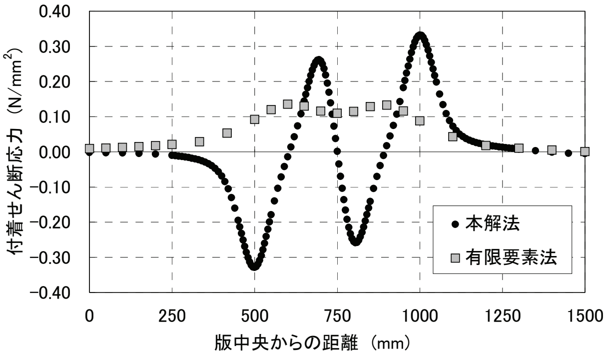
(b)　case2（版中央から 750mm 直角方向が荷重中心）

図−6　鋼板の橋軸直角方向応力



(a)　case1（版中央載荷）

図−7　舗装・コンクリート界面の付着せん断応力



(b)　case2（版中央から750mm直角方向が荷重中心）

図−7　舗装・コンクリート界面の付着せん断応力

期待できないのでCoulomb Frictionモデルによる接触条件を考慮した接着要素を界面部に導入したうえでずれがないものとして解析した．

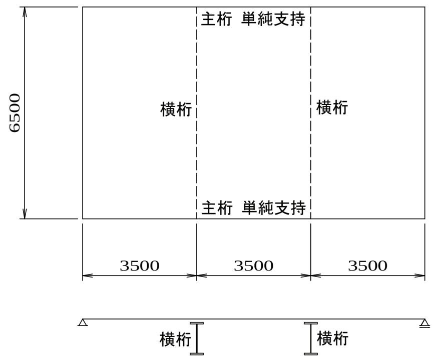
4.1　たわみおよび鋼板に発生する応力

図−5に版中央に荷重を載荷するcase1における橋軸直角方向のたわみの計算結果を示す．ピーク値は版中央で発生しており，有限要素法の値が約0.08mmで本研究の解法による値が約0.1mmと本解法の値の方が25%程度大きい値を示している．

図−6は鋼板下面に発生する橋軸直角方向の応力分布を示したもので，case1の荷重状態を図−6(a)，case2を図−6(b)にまとめる．版中央に載荷したcase1では分布形状とそのレベルがほぼ一致しており，荷重位置が版中央から橋軸直角方向に750mmずれた位置に載荷したcase2でも分布形状はほぼ一致している．応力の大きさは何れの荷重ケースでも本解法による数値が大きめの値を示しており，case2でのピーク値は本解法が約20%程度大きくなっている．たわみおよび鋼板応力に差が生じている理由は多層構造の版モデルに対しての有限要素法の要素分割が影響していると考えられる．

4.2　舗装とコンクリート界面での付着せん断応力

材料物性の異なる多層版では，各層間で付着せん断応力が発生することになり，特に繰り返し作用を受ける道路橋床版構造では，その発生レベルが使用性や耐久性に影響することは明白である．図−7はアスファルト舗装とコンクリート床版の接触界面における橋軸直角方向の付着せん断応力の分布を示したものである．図−7(a)はcase1の荷重状態のものであり，本解法の数値はダブルタイヤの両側端をピークとした分布形状が得られているのに対して，有限要素法はなめらかな分布形状になっており一致していない．図−7(b)はcase2の荷重状態のものであるがcase1と同様に，ダブルタイヤの接地形状に合致した付着せん断応力の分布が得られているのに対して，有限要素法ではその



図−8　計算モデル（単位：mm）

応力レベルも小さくかつ分布形態も異なる．たわみと鋼板応力について述べた4.1節と同様，採用された形状関数では，界面応力を忠実に表現できていない．

本解法の計算結果はcase1とcase2でその最大値が0.33N/mm^{2}程度と一致しており，最大値の発生位置もダブルタイヤの両外側の側端となっている．このことから，付着せん断応力は荷重位置に関係なく載荷位置付近の局所的挙動であることが理解できる．因みに，床版防水を設計する際のせん断応力の基準値として　　τa=0.20N/mm^{2}が提唱されていることから[7]，実際の後輪1輪当たりの荷重50kNに衝撃係数を加味した場合を想定すれば，この規格値を超過することになり，舗装とコンクリートの接触界面や防水層の接着面ではく離等の問題が生じる危険性がある．

5.　既往の試験結果による評価

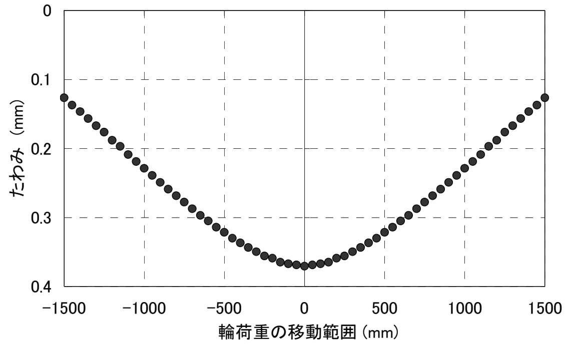
本研究で示す固定辺を持つ床版の解析法の妥当性と応用性を評価するために，横桁で支持される合成床版の移動載荷疲労試験を扱った萩原らの論文[8]と比較する．試験供試体の平面形状は橋軸方向長さ10.5m，橋軸直角方向長さ6.50m（主桁間隔）であり，橋軸方向に3.50m間隔で4本の横桁が配置されている．本研究における解法を適用する際には，固定辺を生み出すため

表−6　材料物性値

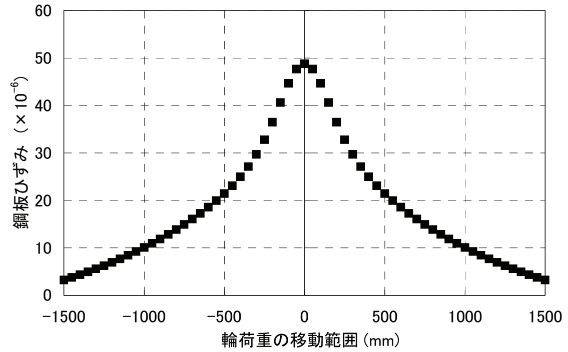
種　別	ヤング係数(N/mm^2)	ポアソン比
コンクリート	2.88×10^4	0.167
鋼	2.0×10^5	0.3
床版厚	267mm（底鋼板を含む）	
鋼板厚さ	8mm（補剛リブ22mm）	

表−7　計算結果の比較表

着目位置		単位	萩原らの値		本論文の	数値の比較	
			計測値 *a*	解析値 *b*	方法 *c*	*a*/*c*	*b*/*c*
たわみ	中央側載荷点直下	mm	0.43	0.45	0.37	1.16	1.22
	載荷点の中間部		0.41	0.42	0.35	1.17	1.20
	支点側載荷点直下		0.34	0.34	0.30	1.13	1.13
圧縮縁コンクリートひずみ		$\times10^{-6}$	-38.0	-52.0	-54.0	0.70	0.96
引張縁鋼板ひずみ		$\times10^{-6}$	40.0	40.0	48.5	0.82	0.82



図－9　輪荷重走行時の床版中央のたわみ



図－10　輪荷重走行時の鋼板ひずみ

の曲げ剛性を無限大としたダミー桁を，横桁として実際の曲げ剛性を与えて配置し図－8 に示すようにモデル化した．固定辺の主桁部分の支持条件は単純支持となっている．計算に用いた物性値を表－6 に示す．

表－7 に本解法による計算結果と萩原らの報告値の一覧を示す．表中の萩原らの値は論文中に示されている図からの引用値であるため，若干の誤差を含んでいる．

萩原らの解析値は 3 次元有限要素法によるもので主桁, 横桁, 合成床版の底鋼板をシェル要素で，コンクリートと底鋼板の補剛リブをソリッド要素でモデル化しており，底鋼板に溶植される頭付きスタッドはコンクリートと底鋼板の節点を共有するモデル化を行っている．なお，本解法による計算では，底鋼板の補剛リブは寄与しないものとして無視しており，コンクリートと底鋼板の界面にはずれがなく完全に一体化しているものと見なした．

表によれば，本解法による厚板理論計算のたわみは萩原らの値よりも小さくなっており，その差は 20%程度となっている．ひずみに関してはたわみとは逆に本解法が大きめの18%程度の値を示しており，コンクリートひずみでは萩原らの解析値とほぼ同等である．これらの計算結果の差はコンクリートと鋼板の合成状態の取り扱いの違いによるものと推察されるが，実用上は十分な精度であると考えられる．よって，本研究で提案する厚板理論による多層版の解析手法は，固定辺を有する各種の構造体への適応性が高いと判断できる，萩原らの実験値に対してさらに精度を向上させるためには頭付きスタッドの位置でのみ鋼板との接合を図る選点法による不完全合成の状態とする必要がある[9]．

図－9 と図－10 は輪荷重が床版上を移動する場合の本解法による床版中央でのたわみと鋼板ひずみの計算結果を示している．図－9 のたわみの変化はなめらかな曲線となっているが，図－10 の鋼板ひずみは走行荷重が中央に近づくとひずみ増加が急速に大きくなる傾向を表している．本解法によれば比較的簡単に局所的な部位も含めた応力や変位の値が得られるので，有限要素法による計算結果の評価だけではなく，走行試験中の供試体挙動も容易に確認することが可能である．

6. まとめ

本研究ではコンクリート箱桁や少数主桁等の剛性の高い桁で支持される場合の合成床版の底鋼板とコンクリートや舗装とコンクリートとの接触界面における局所応力の厳密解を得るために，全周固定の条件を有する多層版の解析問題を厚板理論のみで構成される解法で提案した．この解析法の妥当性を評価するために，一般的な道路橋合成床版モデルを対象として，有限要素法によるたわみや鋼板応力，付着せん断応力とを比較し，さらに既往の研究である横桁で支持された合成床版の輪荷重走行試験の成果とも比較した．本研究で得られた知見を以下にまとめて列挙する．

1) 相対 2 辺で単純支持辺の近傍に剛性の大きなダミー桁を配置する本研究での提案は Timoshenko の古典解に対する誤差は小さく良好な精度を有している．ただし，ダミー桁の影響により固定辺での誤差が若干大きくなる傾向がある．
2) 道路橋合成床版をモデルに本解法と有限要素法のそれぞれを適用した結果を比較すると，たわみと鋼板応力はその分布形状が一致しており，鋼板応力でその発生レベルもほぼ一致していた．よって，本研究で提案した解析手法は固定辺を有する多層版問題に適した手法であることが示された．
3) 合成床版モデルにおける舗装とコンクリートの接触界面の付着せん断応力に関しては，提案する解法で応力分布が輪荷重の作用状態に対応した形状で表現されているが，有限要素法では異なる形状となった．これは有限要素法の要素分割に原因があると考えられるが，有限要素法の局所応力の把握には注意を払う必要があり，本研究の解法が適していることが明らかとなった．
4) 局所荷重下での多層版の応力計算が可能な本手法によれば，合成床版モデルの舗装とコンクリート接触界面の付着せん断応力の発生レベルは，実際のタイヤ荷重 P=50kN が作用した場合でも防水層の規格値 τa=0.20N/mm^2 を超過することとなり，接触界面にずれやはく離等の問題が生じる危険性がある．
5) 横桁で支持された合成床版の試験結果と本解法による計算結果とを比較した結果，その差のほとんどは 20%程度に収

まっており実用上十分な精度が得られた.

近年，社会資本としての道路橋の維持管理に対する意識が高まってきているが，その耐久性評価に当たっては道路橋を構成する各種材料の特性を考慮した検討が必要である．その検討手法として有限要素法による解析が広く採用される傾向にあるが，本研究の計算例に限定すれば，局所応力の着目に当たっては計算値の妥当性に問題があるのに対して，提案した解析手法による計算手法は局所応力についても高い適応性を有していることが判った．さらに本研究で記した付着せん断応力は，実際のタイヤ荷重でも基準値を超える懸念があり，防水層の重要性が叫ばれる中で付着せん断応力への着眼が必要となることは自明のことである.

参考文献

1) 加藤暢彦，堀川都志雄，園田恵一郎：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，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.61-66，1998.10.
2) 社団法人日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書，1999.11.
3) S.P.Timoshenko and S.Woinowsky-krieger, *Theory of Plate and Shells*, 2nd ed., McGraw-HILL.
4) 横山　広，関口幹夫，堀川都志雄：主桁近傍の床版最小厚さに関する研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1353-1358，2005.3.
5) 島田　功，岡村宏一：厚い長方形スラブの応力と変形，土木学会論文報告集，No.233，pp.13-23，1975.
6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，2002.3.
7) 財団法人災害科学研究所，道路橋床版高機能防水システム研究委員会：「道路橋床版高機能防水システムの耐久性評価に関する研究」報告書，2005.9.
8) 萩原直樹，青木圭一，栗田繁実，阪野崇人，永山弘久：横桁で支持された合成床版の移動載荷疲労試験，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.285-290，2006.7.
9) 横山　広，安東祐樹，谷口義則，関口幹夫，堀川都志雄；局部はく離を考慮した輪荷重下における舗装と床版界面の応力解析，構造工学論文集，Vol.53A，pp.980-987，2007.3.

（2007 年 9 月 18 日受付）