

鋼コンクリート合成床版の構造詳細と内部応力に関する解析検討

Relation between Structural Detail and Internal Stresses for the Steel-Concrete Composite Deck

橋 吉宏*¹, 高山文郷*², 野原 葵*³, 街道 浩*⁴

Tachibana Yoshihiro, Takayama Fumisato, Nohara Mamoru, Kaidou Hiroshi

*¹ 川田工業(株)橋梁事業部営業本部東京営業部 (〒114-8562, 東京都北区滝野川 1-3-11)

*² 川田工業(株)橋梁事業部工事本部東京工事部 (〒114-0024, 東京都北区西ヶ原 3-45-4)

*³ 川田工業(株)橋梁事業部技術本部富山技術部 (〒939-1593, 富山県南砺市苗島 4610)

*⁴ 川田工業(株)橋梁事業部技術本部大阪技術部 (〒550-0014, 大阪市西区北堀江 1-22-19)

Recently, calculating the state of an internal stress of the steel concrete composite deck by the FEM analysis becomes possible, and the attention point is clarified on the performance check of durability of this deck. In this research, internal stresses in plate thickness 8mm and 9mm of the bottom steel plate of steel-concrete composite deck, and when the horizontal rib height was raised were calculated by the FEM analysis. As a result, the sensitivity of an internal stress was small in 8mm and 9mm of the bottom steel plate. Moreover, when the height of a horizontal rib is adjusted from 60% of the concrete slab thickness to 70%, a local stress on the rib has suddenly grown. In conclusion, thickness 8mm of the bottom steel plate should be applicable, and, on the other hand, limit the height of a horizontal rib to 60% or less of the concrete slab thickness in the design basis of the examined steel-concrete composite deck.

Key words: composite deck, bottom plate, horizontal rib, FEM

キーワード：合成床版、底鋼板、リブ、FEM

1. はじめに

鋼コンクリート合成床版は、高耐久性床版として安全性や施工性にも優れていることから、各機関で広く採用されるようになってきている。特に少数主桁に代表される合理化橋梁と合成床版との組合せは、そのメリットから、最近、急増している床版形式である。

この鋼コンクリート合成床版として、現在、さまざまなタイプの床版が開発されている。この中で、ずれ止めに頭付きスタッドを有しリブで補強したロビンソン型の鋼コンクリート合成床版(図1参照)は、昭和58年(1983年)に大阪城新橋に採用されて以降に本格的な研究開発が進められた床版である。これらの合成床版に対する設計規準として、平成9年(1997年)に土木学会より鋼構造設計指針 PartB が刊行され、合成床版の最小床版厚やずれ止めの設計方法などが規定された。本研究で対象としたリブで補強されたロビンソン型合成床版の設計規準は、この鋼構造設計指針 PartB に準じ平成11年(1999年)に初版を制定し、底鋼板厚としてスタッドジベルの施工性から8mm以上、床版内に配置する横リブ高についてはコンクリート版厚の50%程度以下にすることとしている。

このようなリブで補強されたロビンソン型合成床版の設計規準に対して、旧建設省土木研究所で実施した輪荷重走行試験では、試験体の諸元として底鋼板厚9mm、横リブ高についてはコンクリート版厚の50%とした試験体で耐久性の確認試験を実施している(図2参照)。リブで補強されたロビンソン型合成床のこれまでの実績からは、上記の設計規準に準拠して、底鋼板を8mmとした実施例や、横リブ高については設計規準の

範囲内でコンクリート版厚50%を超える実施例がある。これらは、リブで補強されたロビンソン型合成床の設計規準に準拠しているものの、土木研究所の試験体との構造の相違に対しては、性能照査の観点から検証が必要と考えられる。

最近の合成床版に対する研究成果から、合成床版の破壊性状と性能照査にあたっての着目点が明らかになってきたこと¹⁾、FEM解析により合成床版の内部応力状態を推定することが可能になってきたこと²⁾、³⁾などが報告されている。このような研究成果をもとにして、底鋼板の板厚8mmと9mmにおける内部応力、および、横リブ高を高くした場合の内部応力をFEM解析により求め、このタイプの合成床版の性能検証を行った。本文は、これらの検討結果を報告するものである。

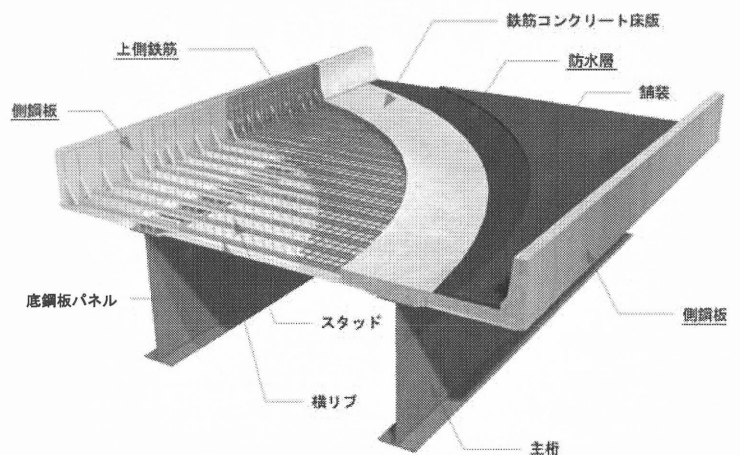


図1 対象としたロビンソン型鋼コンクリート合成床版

2.1 輪荷重走行試験の概要²⁾

図2の土木研究所における輪荷重走行試験は、157kNから4万回ごとに19.6kNづつ荷重を増加して、最終的には392kNで52万回までの輪荷重走行試験である。試験体の底鋼板厚は9mmで、横リブの高さはコンクリート版厚50%の100mmであり、構造諸元を表1に示す。また、コンクリートについては、輪荷重走行試験時で圧縮強度37.6N/mm²、引張強度3.68N/mm²、弾性係数 2.88×10^5 N/mm²であった。

2.2 解析対象

解析対象は、上記の土木研究所において実施した試験体に加えて、表2に示すケースのモデルに対してFEM解析を行った。モデル1は土木研究所で実施した試験体のモデルであり、モデル2はリブ高を変えずに底鋼板を8mmとしたモデル、モデル3、モデル4は、底鋼板を8mmとしてリブ高をコンクリート版厚の60%、70%としたモデルである。

表2 解析対象モデル

	底鋼板厚	横リブ高
モデル1	9mm	100mm (コンクリート版厚50%)
モデル2	8mm	100mm (コンクリート版厚50%)
モデル3		120mm (コンクリート版厚60%)
モデル4		140mm (コンクリート版厚70%)

2.3 解析モデルおよび荷重条件³⁾

解析モデルは、文献3)の日本橋梁建設協会において検討されたモデルを参考にした。各構造部位の要素を図3に示す。コンクリート部はソリッド要素であり、底鋼板と横リブについてはシェル要素である。ただし、応力を詳細に着目したい中央部については横リブについてもソリッド要素とした。鉄筋はロッド要素として、スタッドはバネ要素とした。また、鋼板とコンクリートの付着については、図4に示す界面に接触要素を用いた。この接触要素は付着切れを考慮したモデルであり、コンクリート界面において両者のせん断伝達を無視し、境界面が接触して面圧が発生する場合には面圧力を伝達し、境界面での力が離れる方向の場合には、両面が自由に変位する特性を持つ要素である。図5は中央断面の横リブおよびコンクリートの要素分割であり、載荷ステップとともに示す。コンクリートは骨材とモルタルの複合構造で不均質性を有するため、均質材料として局所的な応力を算出するFEM解析と実構造における局部応力とは相違が生じる。したがって、むやみに要素分割を細かくしても解析精度の信頼性が向上しないので、骨材寸法である20mm程度を要素分割のひとつの目安とした。本解析では、横リブ厚が16mmであることから、16mm角を基準にした要素分割であり、これ以上細かくする必要はないと考えられる。

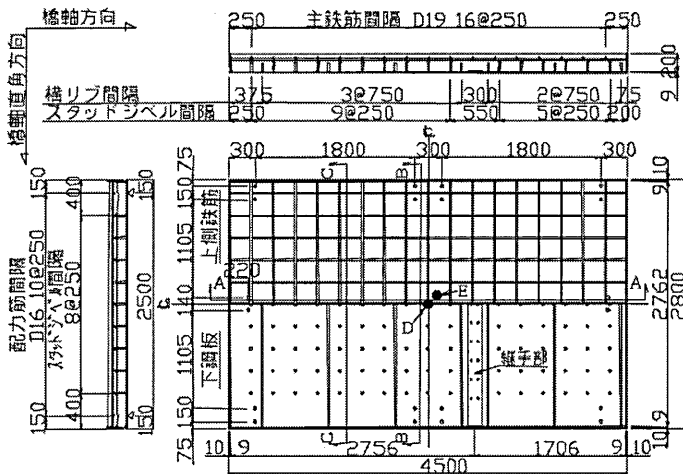
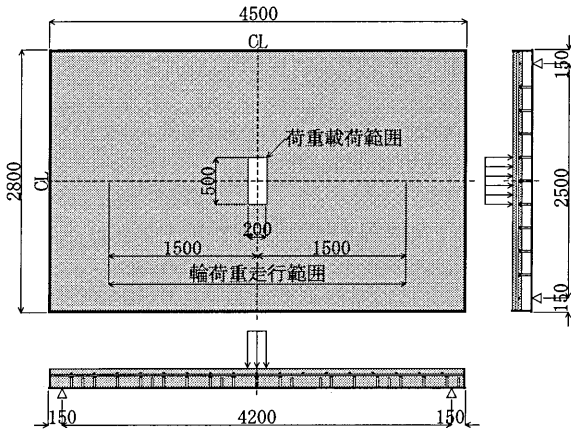


図2 土木研究所における輪荷重走行試験・試験体

表1 試験体の構造諸元²⁾

		単位	構造諸元
コンクリート	版厚	mm	200
	設計基準強度	N/mm ²	30
下鋼板	板厚	mm	9
	断面	mm	100×16
横リブ	橋軸方向間隔	mm	750
	寸法	mm	φ16×120
スタッド	橋軸方向間隔	mm	250
	橋軸直角方向間隔	mm	250
主鉄筋 (橋軸直角方向)	呼び	-	D19
	間隔	mm	250
配力鉄筋 (橋軸方向)	呼び	-	D16
	間隔	mm	250

2. 輪荷重走行試験とFEM解析

土木研究所における試験体についてFEM解析により解析を行った結果に対して、解析モデルのパラメータとして底鋼板厚と横リブ高を変化させたモデルによる解析を行い比較検討を行うこととした。ここで、応力度については、最大応力度に加えて移動荷重による応力振幅量についても算出して、検討を行うこととした。

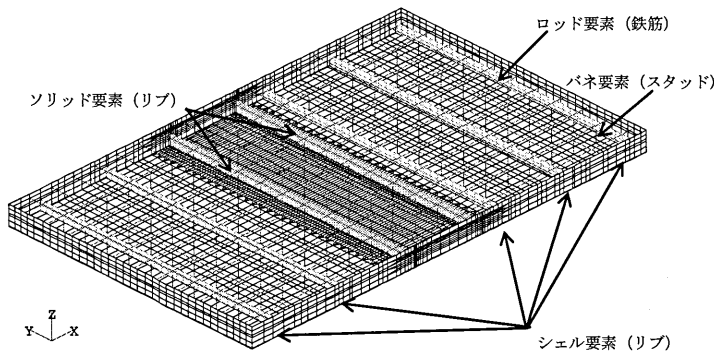


図3 各構造部の要素³⁾

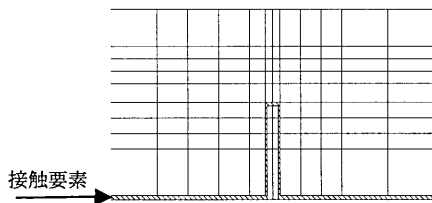


図4 横リブのモデル化と接触要素³⁾

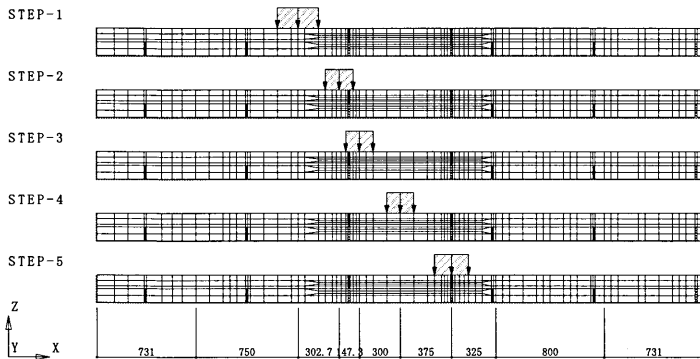


図5 FEM解析における移動荷重ステップ

要素の特性として、コンクリートの弾性係数は試験値である $2.88 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、鋼の弾性係数は $2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、スタッドのバネ定数は押抜き試験により得られた値として $K_x=K_y=1.875 \times 10^5 \text{ N/mm}$ 、 $K_z=3.23 \times 10^5 \text{ N/mm}$ とした。

FEM解析においては、荷重荷重をT荷重98kNとして、図5に示すような荷重ステップで解析を行った。なお、解析は弾性解析で行っており、各ステップにおける荷重の荷重幅は、文献3)と同様に要素分割の影響により若干異なる幅になっているが、T荷重の大きさは同じである。

2.4 試験結果と解析値との比較

図6, 7に、試験における測定値とモデル1のFEM解析値との比較を行う。図6は、図2に示すD点のたわみであり、測定値は98kN換算値である。また、図7(a), (b)は、図2に示すE点の橋軸方向と橋軸直角方

向の底鋼板のひずみであり、98kN換算値である。たわみについては、走行回数が小さい範囲では若干測定値に比べて解析値が大きい傾向であった。また、底鋼板ひずみについては、橋軸直角方向 ε_y については解析値が大きい傾向であり、この理由としては付着切れとスタッド付近ではせん断力の受け渡しがあるためにひずみが乱れることによることが考えられる。なお、橋軸方向 ε_x についてはほぼ一致している。このようなモデル化による解析は、弾塑性や疲労の影響が考慮されていないものの、設計検討時の構造詳細の評価には、十分に適用可能と考えられる。なお、参考値として、RC計算した場合のひずみ値は $\varepsilon_x=95\mu$ 、 $\varepsilon_x=120\mu$ である。

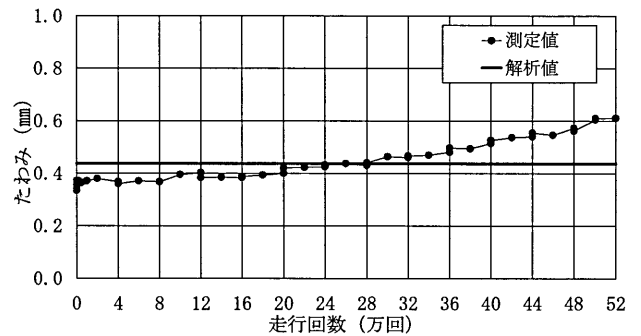
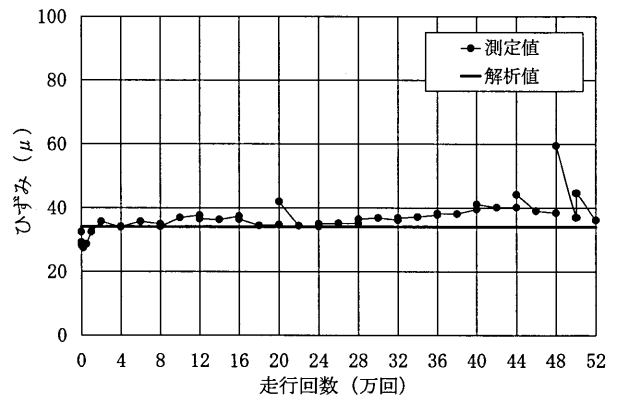
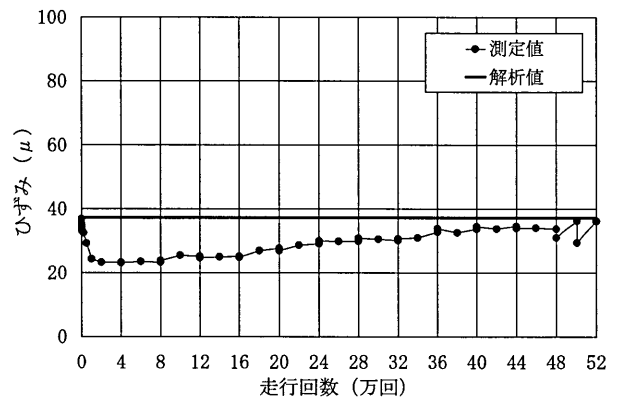


図6 たわみの測定値と解析値の比較

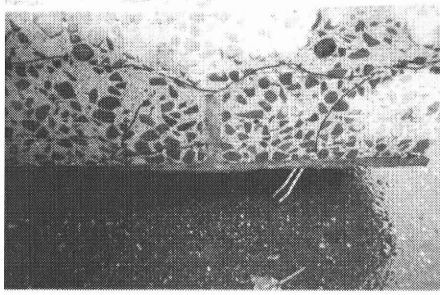


(a) 橋軸方向 ε_x

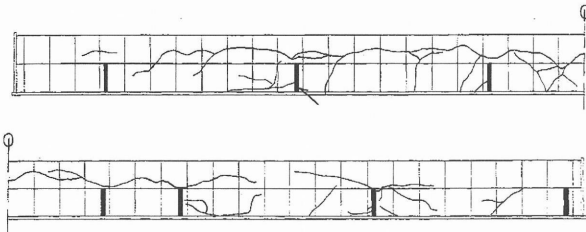


(b) 橋軸直角方向 ε_y

図7 底鋼板ひずみの測定値と解析値の比較



(a) ひび割れ写真



(b) A-Aラインにおけるひび割れマップ

図8 試験終了後に確認されたひび割れ

3. 合成床版の損傷とFEM解析による挙動の推定

土木研究所における輪荷重走行試験では、392kNで52万回の繰返し載荷で破壊が生じなかったが、試験終了後に切断したところ、図3の試験体のA-Aラインで図8に示すひび割れが観察された。

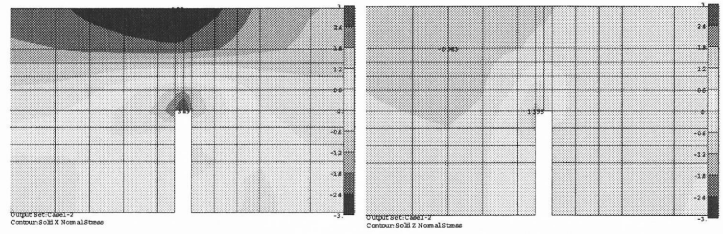
これらの結果から、横リブまわりのコンクリート部が着目点であることがわかる。そこで、リブ周りの要素の応力コンター図を調べることで、定性的な応力状態の把握を試みた。図9は、モデル2～4の橋軸方向の曲げ σ_x と水平ひび割れ方向である鉛直方向の応力である σ_z の応力コンター図であり、 σ_z が最も大きくなる解析Step2における応力コンター図である。

これらの応力コンター図をみると、リブ上で橋軸方向の曲げ σ_x が大きくなっていることがわかる。これは、接触要素を用いると、図10に示すように見かけの中立軸が上がるような挙動をするためであると考えられる。また、鉛直応力度 σ_z については、リブ上の左側に荷重があると、荷重側リブ直上隅角部では引張応力が生じるがリブ反対側では圧縮応度も発生する傾向にある。これは、図11に示すように、局所的なせん断力が働くためであると考えられ、荷重の移動に伴い応力が交番することがわかる。この現象は、リブ高が大きくなるにしたがい顕著になることがコンター図から推定できる。

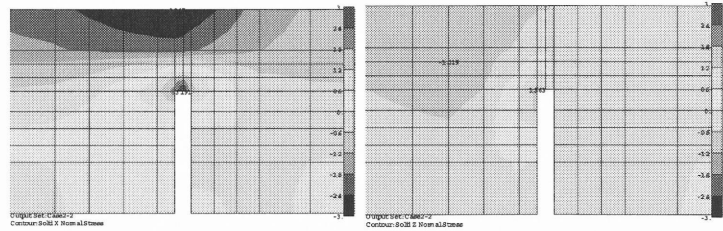
4. 構造の相違とFEM解析による内部応力の変化

4.1 解析モデルにおける着目点

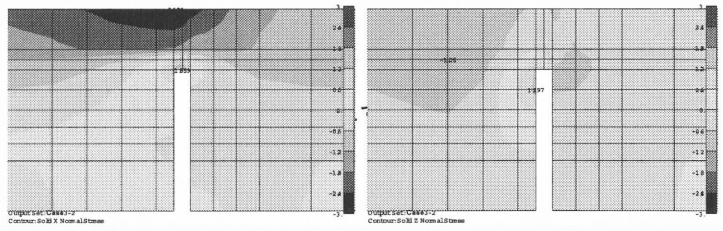
以上に示した結果をふまえ、FEM解析において図12に示した着目点の応力値を、それぞれの解析モデルにおいて比較検討した。ここで、図12に示した中立軸は、



(a) モデル2 (横リブ高50%)



(b) モデル3 (横リブ高60%)



(c) モデル4 (横リブ高70%)

図9 載荷Step2における横リブ周りの応力コンター図

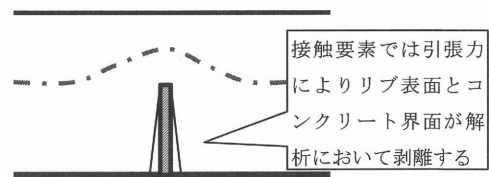


図10 リブ上での見かけの中立軸

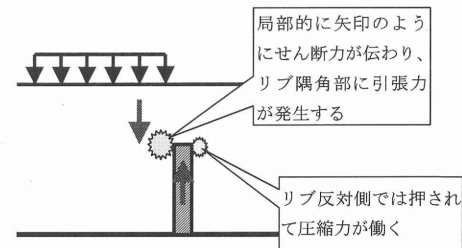
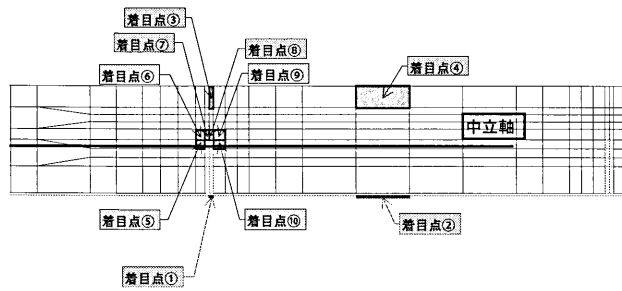
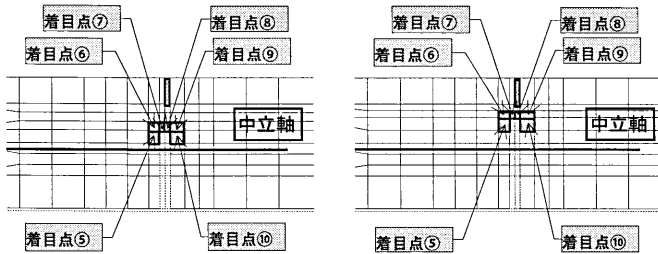


図11 リブ位置における鉛直方向応力度の分布

床版としてRC断面で算出した場合の中立軸位置である。



(a) モデル1、2 (横リブ高50%)



(b) モデル3 (横リブ高60%)

(c) モデル4 (横リブ高70%)

図12 FEM解析における着目点

ここで、図9における応力コンター図を参考にして、曲げによる応力度と、せん断による鉛直応力度について、それぞれ以下の着目点で比較を行うことにした。

- 着目点①-④,⑦⑧：曲げによる応力 σ_x 、 σ_y
- 着目点⑤⑥⑨⑩：ひび割れ方向の鉛直方向応力 σ_z

ここで、着目点⑦⑧については、最小骨材寸法に対して要素分割が細かいことから、2つの要素の平均で応力度の比較を行うことにした。

4.2 曲げ応力度の変化

表3、4に、荷重載荷Step 2およびStep 4の各着目点における応力度を示す。

表3、4ともに、底鋼板を9mmから8mmに変更することにより、底鋼板の曲げ応力度は3%増加し、コンクリート上縁要素の応力度は最大で1%増加した。設計計算におけるRC計算では、底鋼板を9mmから8mmに変更することにより、底鋼板の曲げ応力度は12%増加し、コンクリート上縁応力度は4%増加するが、実際の挙動に近いFEM解析では板厚の変化による応力度の感度は小さい。

また、図10に示したように、接触要素で境界をモデル化すると床版の中立軸下側ではリブとコンクリートが離れる挙動を示し、リブ付近では見かけの中立軸が変化するような応力の流れになり、局部的に応力が増加する。この増加量について、リブ間に載荷したStep 4との比較を行うと、底鋼板下面とコンクリート上縁要素ではともに応力が約45%増加する結果であった。本解析モデルでは、リブ高が大きくなればリブ位置に

表3 内部応力の比較 (リブ位置)

載荷位置	Step 2		
応力度	σ_x 最大値・Mpa ()は比率%		
着目点	①	⑦⑧平均	③
モデル1	9.97 (100)	3.37 (100)	-3.14 (100)
モデル2	10.22 (103)	3.49 (97)	-3.14 (100)
モデル3	11.13 (112)	3.19 (95)	-3.12 (99)
モデル4	11.69 (118)	1.86 (55)	-2.92 (93)

載荷位置	Step 2		
応力度	σ_y 最大値・Mpa ()は比率%		
着目点	①	⑦⑧平均	③
モデル1	9.66 (100)	0.27 (100)	-3.10 (100)
モデル2	9.95 (103)	0.28 (103)	-3.13 (101)
モデル3	10.98 (112)	-0.25 (-93)	-3.09 (100)
モデル4	11.71 (118)	-1.04 (-385)	-3.02 (97)

表4 内部応力の比較 (リブ間)

載荷位置	Step 4	
応力度	σ_x 最大値・Mpa ()は比率%	
着目点	②	④
モデル1	6.82 (100)	-2.18 (100)
モデル2	7.05 (103)	-2.17 (100)
モデル3	7.19 (105)	-2.16 (99)
モデル4	7.34 (108)	-2.15 (99)

載荷位置	Step 4	
応力度	σ_y 最大値・Mpa ()は比率%	
着目点	②	④
モデル1	7.44 (100)	-2.79 (100)
モデル2	7.68 (103)	-2.81 (101)
モデル3	8.10 (109)	-2.74 (98)
モデル4	8.24 (111)	-2.73 (98)

における底鋼板の応力度はさらに増加する傾向であった。表3、4でリブ高が大きくなると、コンクリート上縁要素の応力度は小さくなっているが、これは要素中心における応力度を出力しているため、要素分割の影響であると考えられる。また、リブ上に働く曲げ応力度⑦⑧について、リブ高が大きくなると小さくなるのは、床版全体としての中立軸(図12参照)に関係して小さくなるものと考えられる。

4.3 鉛直応力度の変化

表5に、各着目点におけるリブ周りの鉛直応力度の最大引張応力度と、Step 1~5における応力振幅量を示す。

モデル1、2の比較で底鋼板を9mmから8mmに変更しても、局所的な鉛直応力度および応力振幅量は、ほとんど変化しないことがわかる。

ひび割れの起点となっているリブ直上隅角部のコンクリート要素⑥⑨における比較を行うと、移動荷重による最大引張応力度の増加は、モデル3のリブ高が60%では応力増加量は10%以下であるが、モデル4のリブ高が70%では35%程度増加した。また、リブ上を

表5 内部応力の比較（リブまわり）

载荷位置	Step 2		Step 4	Step 3
応力度	σ_z 最大値・Mpa ()は比率%			
着目点	⑤	⑥	⑨	⑩
モデル1	1.91 (100)	0.88 (100)	0.84 (100)	1.67 (100)
モデル2	1.93 (101)	0.91 (103)	0.84 (100)	1.68 (100)
モデル3	1.83 (96)	0.94 (107)	0.92 (109)	1.64 (98)
モデル4	1.85 (97)	1.19 (135)	1.11 (132)	1.64 (98)

载荷位置	Step 1 ~ Step 5			
応力度	σ_z 応力振幅量・Mpa ()は比率%			
着目点	⑤	⑥	⑨	⑩
モデル1	2.25 (100)	1.10 (100)	0.98 (100)	1.94 (100)
モデル2	2.27 (101)	1.12 (102)	0.98 (100)	1.95 (100)
モデル3	2.38 (104)	1.46 (130)	1.20 (122)	2.10 (108)
モデル4	2.65 (118)	1.89 (169)	1.96 (200)	2.46 (127)

荷重が移動すると、リブ周りでは圧縮応力度も発生して応力が交番することがわかる。モデル3のリブ高60%はこの圧縮応力度が増加して応力振幅量としては30%の増加で、モデル4のリブ高70%では70%~100%と急増した。リブ上のコンクリート厚が小さいと、コンクリート部のせん断抵抗面積が小さくなり局所的な応力集中が生じやすいものと考えられ、リブ高が60%を超えるとその影響が顕著になることが推測される。

要素⑤⑩については、リブ直上隅角部のコンクリート要素⑥⑨に比べて最大引張応力度は大きくなっている。リブ直上からはずれたところに最大応力が発生するのは、文献4)で弾性解析を行った場合にこのような傾向になり、リブ上での応力集中を再現するには弾塑性解析が必要であることが報告されている。また、リブ高が大きくなると最大引張応力度が逆に小さくなる傾向にあることから、本解析モデルにおいては、リブ高の影響はひび割れの始点となっている要素⑥⑨で判断するのが妥当であると考えられる。

5. まとめ

土木研究所において実施された試験体を対象として、底鋼板の板厚と横リブ高をパラメータとしたFEM解析を実施することにより、本研究で対象とした合成床版の設計方法に対する検討を行い、以下のことがまとめられた。

- ① 底鋼板8mmと9mmでは、リブ直上のコンクリートの局部応力はほとんど変化しないが、床版上下縁の曲げ応力度は底鋼板で3%の増加量、床版上縁コンクリートで1%の増加量であった。
- ② 曲げ応力度はリブ間とリブ直下で異なり、底鋼板の応力度はリブ直下ではリブ間に比べて45%の増加量であった。この増加量は、床版上縁コンクリートも同様であった。
- ③ 横リブ高60%については、リブ直上のコンクリートに発生する局所的な引張応力度は横リブ高さ50%に比べ最大で9%の増加量、移動荷重による応力振幅量は最大で30%の増加量であった。

- ④ 横リブ高70%については、リブ直上のコンクリートに発生する局所的な引張応力度は横リブ高さ50%に比べ最大で35%の増加量、移動荷重による応力振幅量は最大で200%の増加量であった。

以上の結果から、底鋼板については9mmを8mmにしても応力の感度が小さく、底鋼板厚8mmの使用は問題ないと考えられた。

一方、横リブの高さについてはコンクリート版厚の60%から70%にするとリブ直上の局部応力が急増することが明らかになった。リブ付近のコンクリートが受ける応力振幅とリブからのひび割れの発生との関係や、ひび割れ発生と床版としての耐久性との関係については今後の研究が待たれるところであるが、リブ直上の局部応力の急増は床版としての耐久性の観点から避けるべきであると考えられる。したがって、本研究で対象とした合成床版では横リブ高さをコンクリート版厚の60%以下に制限する必要があると考えられた。

謝辞：本文におけるFEM解析については、松井繁之先生ならびに日本橋梁建設協会・床版小委員会床版技術部会の関係者各位に、多大なご指導および協力を賜りました。ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋吉宏・横山仁規・上村明弘・高田和彦・数藤久幸・佐藤徹；鋼・コンクリート合成床版の施工と維持管理について、土木学会第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.205~210、2006。
- 2) 街道浩・渡辺滉・橋吉宏・松井繁之・堀川都志雄；鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価、構造工学論文集、Vol.50A、pp.1119~1130、2004。
- 3) 倉田幸宏・鈴木統・橋吉宏・小林潔・上村明弘；鋼・コンクリート合成床版の解析のモデル化に関する検討、土木学会第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.199~204、2006。
- 4) 結城陽一・春日井俊彦・高田和彦・水越秀和；帯板ジベルを用いた合成床版の破壊性状に関する解析的検討、土木学会第62回年次学術講演会概要集I、2007。