

鋼・コンクリートサンドイッチ合成床版の最小版厚について

Minimum thickness of sandwiches composite deck slabs in Highway Bridge

横山広^{*}, 山下幸生^{**}, 堀川都志雄^{***}

^{*}ショーボンド建設株式会社, 北陸支店技術課 (〒920-0362 金沢市古府 1-140)

^{**}ショーボンド建設株式会社, 補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)

^{***}工博, 大阪工業大学教授, 都市デザイン工学科 (〒535-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Initial cracks in the sandwich composite slabs of road bridges may have adverse effects on the integrity of the composite structure and may cause the load-carrying capacity of the slabs to decrease. In this study, the authors performed computations based on a thick plate theory that enables to calculate exact stresses. In the computations, flexural tensile stresses in sandwich composite slabs were calculated to determine the minimum concrete thickness required for preventing initial cracking. The relationship between deflection and slab thickness was also investigated. Effectiveness of the present calculation method was also examined in comparison with static loading test result and thick plate theoretical calculation value. As the result, the following were obtained. Smaller plate thickness possible compared with the reinforced concrete slab thickness prescribed in Design code for Steel Structures PARTB, when deflection is limited to $L/2000$. The calculated values based on the thick plate theory agree well with the test results at the initial stage of static loading test.

Keywords, sandwiches slab, slab thickness, thick plate theory, flexural tensile strength

1. はじめに

少子高齢化社会への移行を受けて、橋梁建設においても省力化が求められている。また、200年橋梁と言うキーワードに代表されるように高耐久性を期待したミニマムメンテナンス橋の考え方や、ライフサイクルコストの概念による維持管理費の最小化も意識され始めている。本論文で取り扱う鋼・コンクリートからなるサンドイッチ合成床版は、このような社会情勢の変化に対応するものとして開発された。その構造は、上下鋼板を結ぶタイ材に高カポルトを用いて工場で鋼殻パネルを組み立て、現地架設後に高流動コンクリートを充填し鋼部材と一体化させるものである。

本床版構造の疲労耐久性は、過去に行われたクランク式輪荷重走行試験機の荷重漸増載荷試験の結果から現行の道路橋示方書によるRC床版と比較して、優れた耐久性を有していることが確認されている¹⁾。しかしながら、本構造の床版厚さの設定では、実験的に試行錯誤が行われているものの、解析面からの位置付けがなされていない。サンドイッチ床版の実橋における設計では、道路橋示方書²⁾の他にも、土木学会の鋼構造物設計指針(案)PART B³⁾(以下、PART Bと呼ぶ)に依拠して行われているが、本論文で扱うサンドイッチ構造に関しては、下鋼板のみが曲げ抵抗を示すオープンサンドイッチ構造

と同じ扱いとなっており、床版剛性の大きさを実設計に反映できていない。

そこで、著者らが過去に行った床版厚さの検討と同様に⁴⁾、初期ひび割れ発生が床版の耐力低下の引き金になるとの考えを基に、着目位置での厳密なたわみや応力が算出可能な厚板理論を適用して、活荷重載荷時の輪荷重直下の曲げ引張り応力を計算する。そして、本合成床版の最小版厚は、曲げ引張り応力とコンクリートの特性値である曲げ強度との大小関係から、床版にひび割れが発生しない厚さを最小厚さとして定義する。

本論文で採用する厚板理論は、Kirchhoff-Loveの仮定を用いて誘導される薄板理論とは異なり、3次元弾性論の変位関数 f_3 (ガラーキネクトル) と ϕ_3 (ブーシネスクの関数) に基づく理論であり、変位関数 f_3 と ϕ_3 の基礎微分方程式は次のように示される。

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

$$\text{ここに,} \quad \Delta = \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z$$

$$\partial^2 x = \partial^2 / \partial x^2, \partial^2 y = \partial^2 / \partial y^2, \partial^2 z = \partial^2 / \partial z^2$$

x, y, z 方向の変位 u, v, w と変位関数との関係式は以下のように示される。

$$2\mu u = -\partial x \partial z f_3 + \partial y \phi_3$$

$$2\mu v = -\partial y \partial z f_3 - \partial x \phi_3$$

$$2\mu w = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 z + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} (\partial^2 x + \partial^2 y) \right] f_3$$

ここに、 λ, μ : Láme の定数

本研究で活荷重による初期ひび割れに着目する理由は、昭和40年代後半に顕在化したRC床版の陥没損傷が、各種機関の輪荷重走行試験等の積極的な研究により、乾燥収縮や過大な輪荷重による初期ひび割れが発生した後に、荷重の走行繰返し作用を受けてひび割れが徐々に進展し、ついには陥没破壊に至る疲労現象であることが明らかになった事実を踏まえている。

本論文では、はじめに①床版支間、床版厚さ（コンクリート、鋼板の厚さ）、コンクリートの強度をパラメータとして、曲げ引張り応力と曲げ強度の大小関係から決定される最小床版厚さの検討を行う。次に②最小床版厚さにおけるたわみを計算し、PART Bに示されているL/2000のたわみ制限値と比較してその使用性能を評価する。最後に③でサンドイッチ床版の静的押抜き試験の結果と厚板理論での計算値を比較して、本解析方法の有効性を検討する。

2. サンドイッチ床版の構造と特徴

サンドイッチ床版の断面を図-1に示す。上・下鋼板の板厚は同一の $t=6\text{mm}$ が用いられ、鋼板は高ナットと高力ボルトで位置形状が保持される。使用する高力ボルトはM22のサイズで、ボルト側からの締め込みでも安定した軸力が容易に得られるようにトルシアボルトと同様のピンテールを付与したボルトを新たに開発している。また、鋼殻パネルの主桁への固定にも高力ボルトを用いており、溶接を用いないことで本床版の疲労耐久性の向上を目指している。

この床版の特徴としては、完成型で鋼板とコンクリートが合成断面を構成して、曲げ剛性の高い構造が期待できるので床版厚さが低減でき、床版の軽量化が図れることが挙げられる。また、工場で製作する鋼殻パネルはそれ自体で自立するため、コンクリート打設時の支保工が不要となる。施工性に関しては、現場作業が鋼殻パネルの架設と高流動コンクリートの打設のみであり現場工期が短縮できる。鋼殻パネルの下鋼板はコンクリート打設時にも主桁断面として抵抗するため、主桁の鋼重も低減できることになる。さらに床版と主桁鋼重の低減効果によって上部工が軽量化でき、下部工への負担も軽減してコスト縮減にも寄与し、橋梁全般にわたるトータルコストの面での経済的な工法となる。特に杭基礎を必要とす

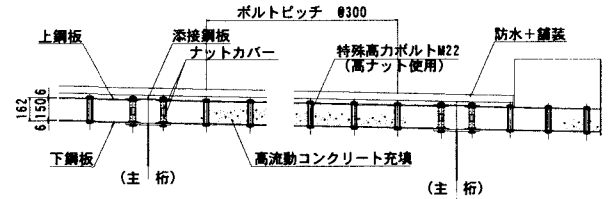
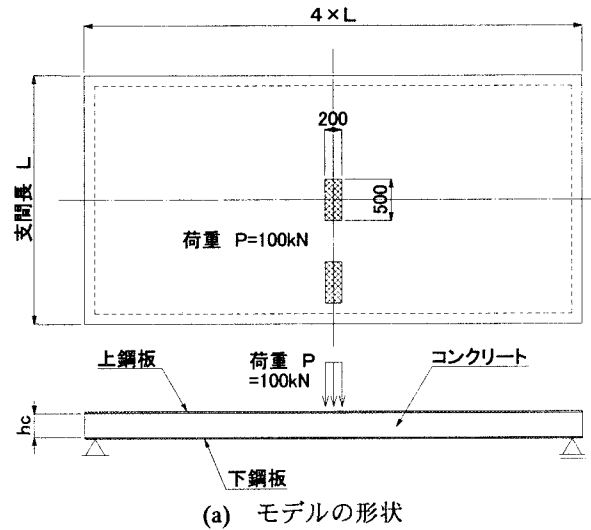
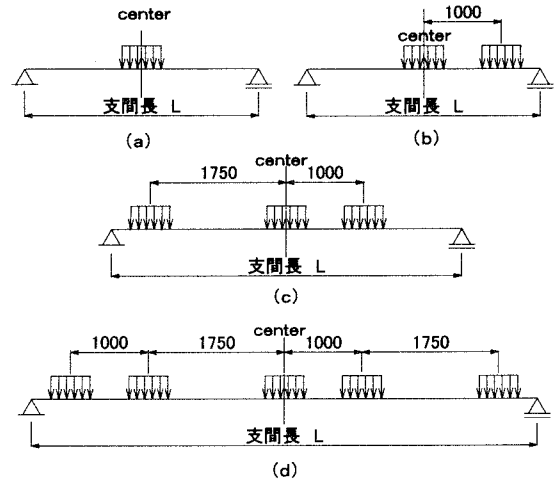


図-1 サンドイッチ床版の断面 (単位: mm)



(a) モデルの形状



(b) 荷重載荷状態 (単位: mm)

図-2 計算モデル

る連続桁でのコストの低減効果が顕著な工法と言える。

3. 計算モデル

本論文では輪荷重直下の局所的な変形や応力に着目しているため、計算上のモデルは図-2(a)に示す全周単純支持で橋軸直角方向の長さに対して橋軸方向の長さを4倍とした一方向版としている。荷重は図-2(b)に示すように、

表-1 材料の物性値

材料名	曲げ強度 (kN/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
コンクリート(30N/mm^2)	4.06	28	0.167
(40N/mm^2)	4.91	31	0.167
(50N/mm^2)	5.70	33	0.167
鋼板		210	0.3

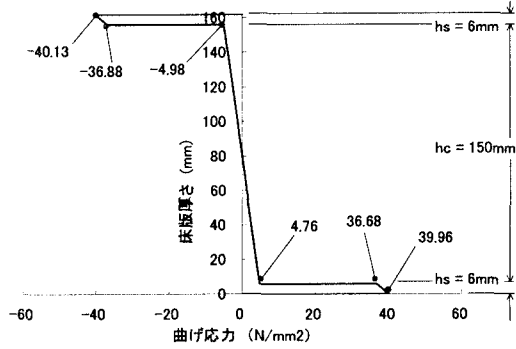


図-3 サンドイッチ床版の応力分布 (単位: N/mm^2)

着目する断面に対して最も不利になるようにT荷重を橋軸直角方向に満載荷している。計算に用いたコンクリートおよび鋼板の物性値は表-1の通りである。

図-3は、厚板理論で計算した床版支間3mでコンクリート強度が 40N/mm^2 のときの応力分布を示したものである。本論文で着目しているのは図中のコンクリート下縁の曲げ引張応力である。

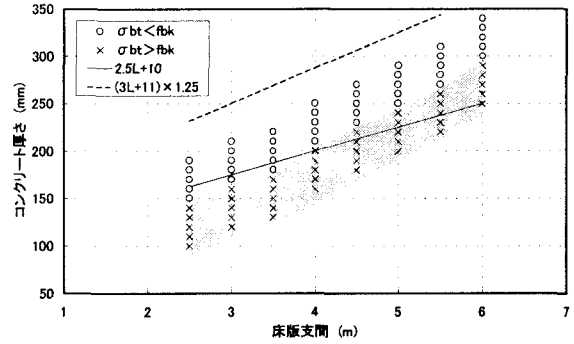
実橋では床版上にはアスファルト舗装が存在するが、そのヤング係数が低下する夏期時には、床版の応力低下にほとんど寄与しないため、ここでは舗装による影響を無視した3層版のモデルとしている。

4. 厚板理論によるサンドイッチ床版の計算

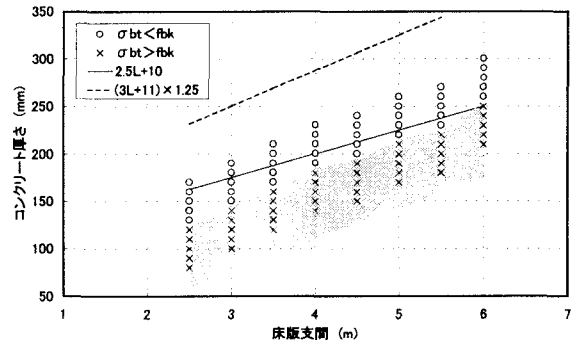
4.1 曲げ引張応力と曲げ強度で決定される床版の最小厚さ

活荷重による曲げ引張り応力が曲げ強度を超えると有害な初期ひび割れが発生するものとして、床版支間と床版厚さ、コンクリート強度をパラメータとしてひび割れの発生が起こらないための最小のコンクリート厚さ hc を求める。

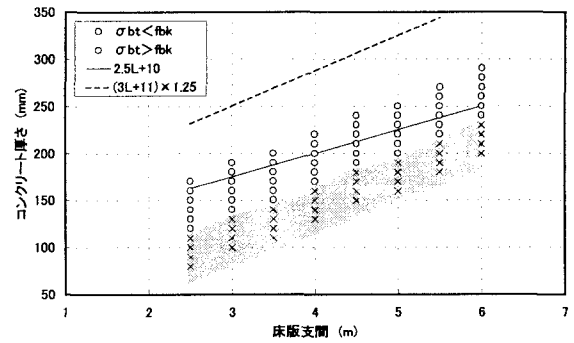
図-4(a)–(c)に鋼板厚さが上下ともに6mmの場合のコンクリート厚さと床版支間の関係を示す。図には比較のためにPART Bと道路橋示方書による鉄筋コンクリート床版の連続版における床版厚さの算定式の値も示している。曲げ引張り応力が曲げ強度を上回る場合には、ひび割れ発生の危険性があるものとして×を(薄墨の領域)、逆に曲げ強度が上回る場合には床版構造としての安全性



(a)コンクリート強度 30N/mm^2



(b)コンクリート強度 40N/mm^2

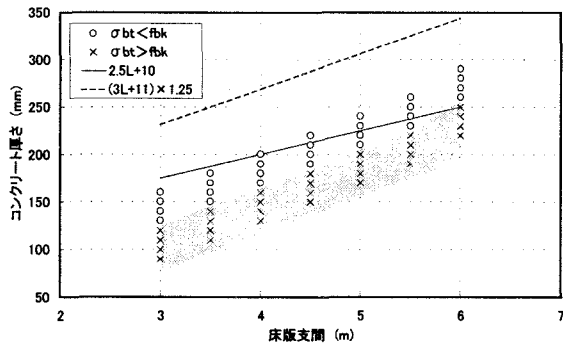


(c)コンクリート強度 50N/mm^2

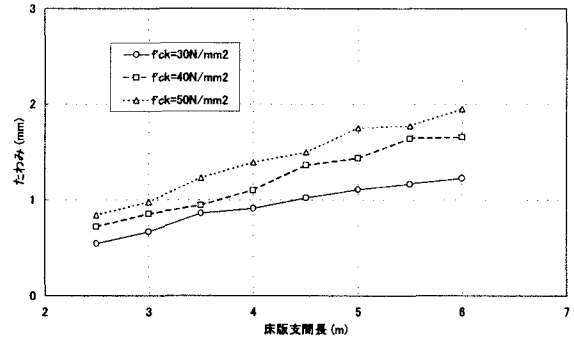
図-4 コンクリート厚さと床版支間の関係 (上鋼板=6mm, 下鋼板=6mm)

が確保できるものとして○印で表現している。図-4(a)はコンクリート強度が 30N/mm^2 の場合のもので、床版支間3.5mまではPART Bの床版厚さよりも小さな床版厚さが設定でき、道路橋示方書による鉄筋コンクリート床版の厚さよりも十分小さいことが判る。そして図-4(b)のコンクリート強度が 40N/mm^2 になれば曲げ強度の増加に伴い、PART Bよりも小さな床版厚さが可能となり、支間長が5.5mまで拡張できる。図-4(c)のコンクリート強度が 50N/mm^2 では、6mを超える床版支間長でもPART Bよりも小さな床版厚さが設定できることになる。

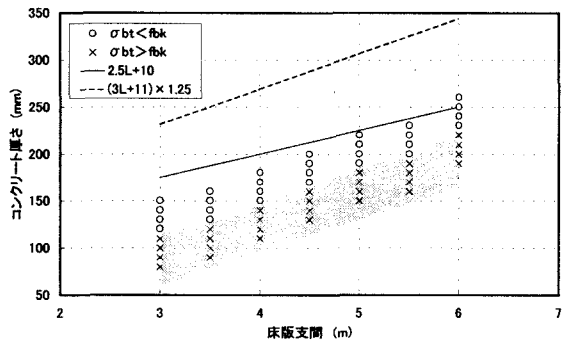
図-5(a)–(c)は上鋼板の厚さが6mmで、下鋼板を9mm



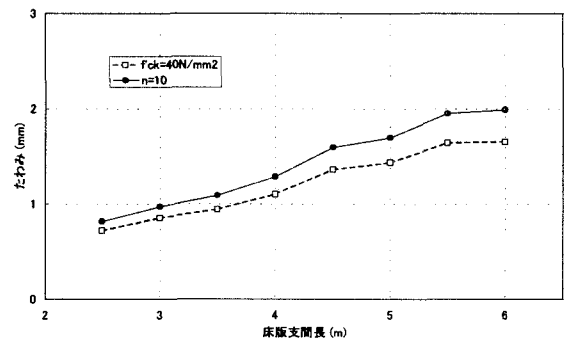
(a)コンクリート強度 30N/mm²



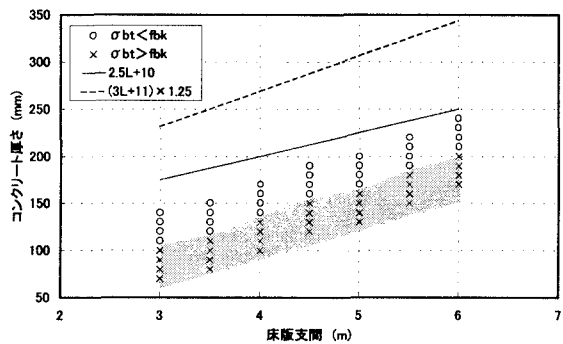
(a)コンクリート強度 30, 40, 50N/mm²



(b)コンクリート強度 40N/mm²



(b)コンクリート強度 40N/mm², n=10



(c)コンクリート強度 50N/mm²

図-5 コンクリート厚さと床版支間の関係
(上鋼板=6mm, 下鋼板=9mm)

とした場合の計算結果を示したものである。下鋼板の厚さの増加に伴い、コンクリート強度が 30N/mm² の場合でも、コンクリート厚さが PART B を下回る範囲が 5.5m まで拡張できる。図-5(b), (c) はコンクリート強度をそれぞれ 40N/mm², 50N/mm² とした場合の計算結果であり、○印と×印が拮抗する位置が右側にシフトして、長支間化に向かうと推測される。

ここで、コンクリート厚さを hc=150mm に固定した場合の適用支間長に着目すれば、上下鋼板が 6mm の場合には、コンクリート強度が 50N/mm² で 3.5m まで適用でき、下鋼板を 9mm にすることで、さらに 4.0m まで拡張

図-6 コンクリート最小厚さにおけるたわみ

できることになる。一方、支間長 6.0m の長支間に対しては、上下鋼板を 6mm とした場合にはコンクリート厚さ hc=240mm となり、下鋼板を 9mm にすれば hc=210mm の厚さとなる。サンドイッチ床版では、床版厚さの種類を多くしないことが経済性の向上につながるため、5.0~6.0m 程度では 210mm の厚さの設定が適当と思われる。

床版厚さの設定では、コンクリート強度の影響が大きく、適用支間長を考慮したうえで適切な強度設定が必要になることが理解できる。特に本構造で使用する高流動コンクリートでは配合強度に対して実強度が大きくなる傾向があるため、実設計に当たってもこれらを考慮することが望ましい⁵⁾。

もし、版構造としてのコンクリートの曲げ強度が把握できれば、より妥当な最小厚さが設定できることは言うまでもない。

4.2 たわみに関する評価

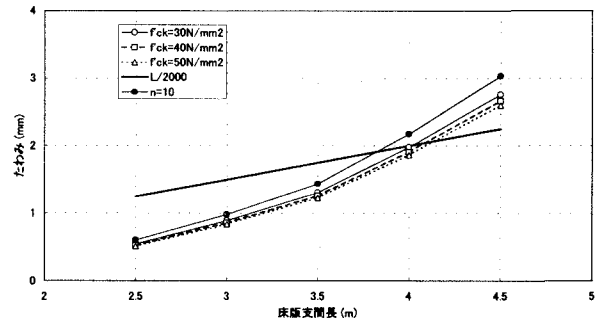
鋼・コンクリートサンドイッチ合成床版では、鋼材断面を大きくすることで床版厚さが低減できることになるが、低減することによる影響で活荷重載荷時のたわみが大きくなることは容易に理解できる。図-6(a) は曲げ引張り応力と曲げ強度の大小関係から決まるコンクリートの最小厚さが算定された場合の支間長とたわみ量の関係を示したものである。図によれば、すべてのたわみ量が

PART B に示されている参考値の $L/2000$ を超過していないことが判る。図-6(b)はコンクリート強度が 40N/mm^2 での、コンクリートの最小厚さにおける支間長毎のたわみ量を、また参考として鋼板とコンクリートのヤング係数比を $n=10$ としてコンクリートのヤング係数を低下させた場合のたわみ量の結果を同時に示している。 $n=10$ の計算結果は 40N/mm^2 に比べて同じ支間長でも大きなたわみ量を示すが、 $L/2000$ には達していない。よって、サンドイッチ床版は最小厚さとした場合でも十分な曲げ剛性を有しており、有害なたわみにより、通行車両に悪影響を及ぼすことはないものと考えられる。

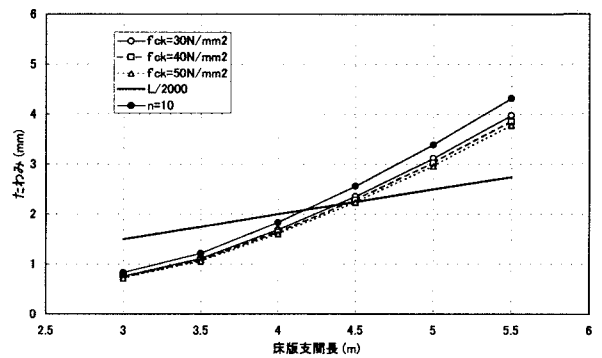
図-7(a)と(b)にコンクリート厚さを 150mm に、また上鋼板厚さを 6mm として固定し、下鋼板を 6mm もしくは 9mm とした場合の床版支間長とたわみ量の関係を示す。図によれば、コンクリート強度の差によるたわみ量の変化は少なく、下鋼板が 6mm の場合で 4.0m までは $L/2000$ を下回ることになる。次に下鋼板を 9mm にすれば 4.5m 付近まで $L/2000$ を下回ることが判る。すなわち、下鋼板を 9mm にすれば、コンクリート厚さを 150mm に限定する場合、適用可能な最大支間長は 50cm 程度長くなる。

5. 静荷重試験での計算

サンドイッチ合成床版の耐荷性能を把握する目的で、実物大供試体による静的押抜き試験を行った。図-8 は、供試体形状を示すもので、床版厚さは上下鋼板が 6mm 、コンクリート厚さが 150mm の合計 162mm である。支持条件は橋軸直角方向が単純支持で橋軸方向の端部は横桁による弾性支持とした。四隅には床版供試体の回転を拘束せず浮き上がりを防止するための金具を設置している。試験時のコンクリート強度は 45.7N/mm^2 でヤング係数は 25.7kN/mm^2 、ポアソン比は 0.150 であった。図-9 に荷重試験における荷重とたわみの関係を示す。図中には、上下鋼板とコンクリートの接触界面にずれがないものとした場合の計算値と、下鋼板とコンクリートの界面の水平方向のずれを許容する不完全合成の状態、かつ $n=10$ のヤング係数比をもつ場合の計算結果を示している。図によれば、荷重荷重 200kN までの試験データは上下鋼板とコンクリートにずれがない計算値とずれを許容した計算値の中間に位置し、その後はずれを許容したデータよりもたわみ量が大きくなるという結果となった。荷重荷重 200kN で試験データの荷重-たわみ曲線に折れ点が生じている理由としては、コンクリート下縁に曲げひび割れが発生していることが推察される。因みに、厚板理論による計算での本供試体のコンクリートの物性値による曲げ引張り応力が曲げ強度に達する荷重は $P=182\text{kN}$ であり、折れ点の荷重に近い値であった。よって、この計算結果からもひび割れ発生荷重が推察される。図-10 は荷重荷重 200kN での荷重位置における橋軸直角方向の下鋼板下縁のひずみ分布を示したものである。図中には、



(a)上下鋼板 6mm, コンクリート 150mm



(b)上鋼板 6mm, 下鋼板 9mm, コンクリート 150mm

図-7 コンクリート厚さを一定にした場合の床版支間-たわみ関係

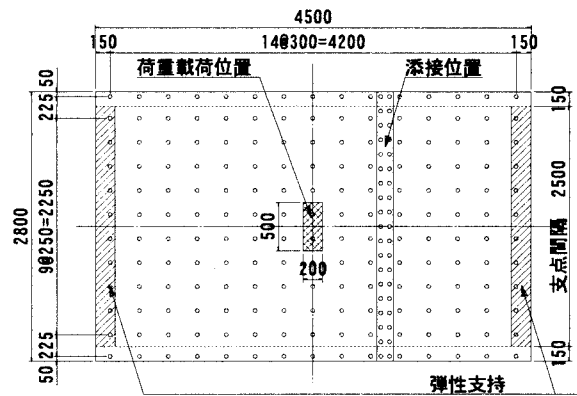


図-8 供試体形状 (単位: mm)

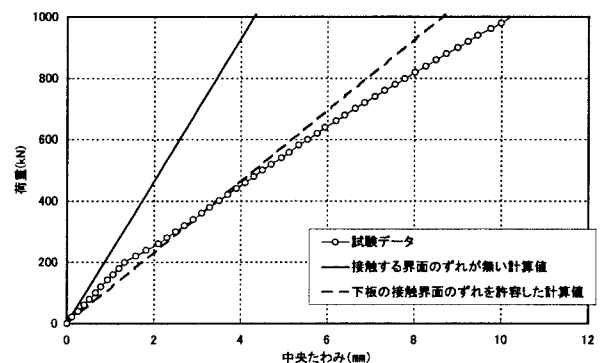


図-9 荷重-たわみ関係

厚板理論の計算結果と高力ボルト位置を示している。図によれば計算値が試験結果を上回っているがその差は小さく、中央付近の分布形状も類似していることが判る。

以上の結果、厚板理論による計算は、静的載荷試験での初期の段階の荷重とたわみや、ひずみとの関係を良く再現していることが理解できる。

6. まとめ

本論文では着目点の厳密なたわみや応力が計算できる厚板理論を用いて、鋼・コンクリートサンドイッチ合成床版における、コンクリート下縁に発生する曲げ引張り応力と曲げ強度の大小関係から決定される最小床版厚さの検討を行った。また、最小床版厚さにおけるたわみを計算し、PART B に示されている $L/2000$ のたわみ制限値と比較してその使用性能を評価した。そして、各計算結果の妥当性を評価するために実物大供試体による静的押抜き試験の結果と厚板理論での計算値を比較して、その計算手法の有効性を検討した。以下に、本論文で得られた結果を列挙する。

- (1) 曲げ引張り応力と曲げ強度の大小関係で決まる最小厚さを計算した結果、サンドイッチ床版では PART B よりも小さな床版厚さの設定が可能で、コンクリート厚さを 140mm に固定した場合には、下鋼板が 6mm で 3.5m まで下鋼板を 9mm にすれば 4.0m の床版支間長まで適用できることが判った。ただし、床版厚さの設定では、コンクリート強度の寄与する影響が大きく、適用支間長を考慮したうえで適切な強度設定が必要になる。
- (2) たわみに着目した計算の結果、コンクリート強度が 30, 40, 50N/mm²での最小厚さにおけるたわみ値は $L/2000$ よりも小さく、 $n=10$ とした場合でも $L/2000$ を超過しないことが判った。コンクリートの最小厚さを固定した場合の $L/2000$ を超過しない支間長は、下鋼板が 6mm のとき 4.0m で、下鋼板を 9mm とすれば 4.5m 付近まで拡張でき、曲げ引張り応力と曲げ強度の大小関係で決まる床版支間長よりも 50cm 程度大きい。
- (3) サンドイッチ床版の静的載荷試験の結果と厚板理論の計算結果を比較した結果、載荷初期では上下鋼板

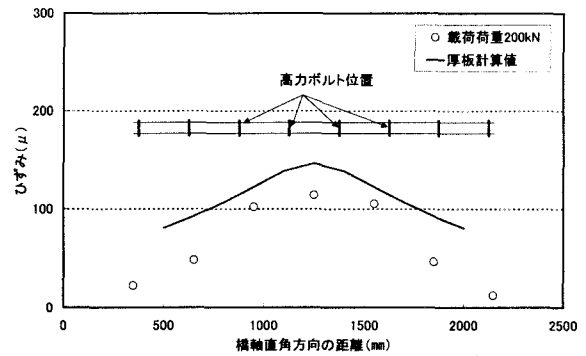


図-10 載荷荷重 200kN のひずみ分布

とコンクリートとの間でずれがない計算値と下鋼板のずれを許容した計算値の中間に位置し、その後はずれを許容する計算値よりたわみが大きくなるという結果となった。ひずみに着目した場合でも分布形状が類似しており、厚板理論による計算は静的載荷試験での初期段階の結果とよい一致を見ている。

本合成床版は剛性が大きく、最小厚さが小さいことから軽量となり、上部工のみならず下部工も含めた橋梁全体のコスト縮減に寄与することが可能になると推量される。本論文では最小厚さや適用支間の検討を行ったが、今後は、上下鋼板を結ぶ高力ボルト、高ナットの最適間隔について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 近藤悦郎, 池田憲二, 温泉重治, 松井繁之, 鋼・コンクリート合成サンドイッチ床版を用いた橋梁の研究開発, 橋梁と基礎 vol.36 No.7, pp.33-38, 2002.7.
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書(I 共通編, II 鋼橋編, III コンクリート橋編)・同解説, 平成 14 年 3 月
- 3) (社)土木学会: 鋼構造物設計指針(案)PART B (合成構造物), 平成 9 年 9 月
- 4) 横山広, 堀川都志雄: 道路橋床版の最小厚さに関する研究, 構造工学論文集 Vol.48A, pp.1169-1176, 2002.3.
- 5) (社)土木学会: 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, コンクリート技術シリーズ No.15, 平成 8 年 12 月.