

(2) 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁の曲げ耐荷力に関する実験的研究

Experimental research on flexural load-carrying capacity of steel-concrete double composite continuous box girder.

泰平詠二*, 大山 理**, 栗田章光***
Eiji Yasuhira, Osamu Ohyama, Akimitsu Kurita

*大阪工業大学大学院工学研究科都市デザイン工学専攻(〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1)

**工博, 片山ストラテック(株)技術本部橋梁設計部(〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

***工博, 大阪工業大学教授, 工学部都市デザイン工学科(〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1)

This paper deals with the steel-concrete double composite continuous box girder bridge, which has two concrete slabs at upper and lower surfaces of the steel box girder. The lower concrete slab exists only in the region of the intermediate supports. This bridge has various advantages, for example, increasing of the flexural rigidity of the girder, reduction of stiffener in the steel box girder and so on. However, ultimate behavior of this type of bridge is not yet clarified perfectly. This paper, therefore, reports the test results concerning the ultimate behavior of the steel-concrete double composite continuous box girder.

Key words: double composite girder, flexural loading capacity
allowable stress design, limit state design

1. はじめに

近年, わが国においては, 公共事業全般に対し, 徹底したコスト削減が求められている. そこで現在, 合理的で経済的に優れている鋼・コンクリート複合橋梁が見直され, さらに, これまでの鋼・コンクリート複合橋梁に比べて, より耐久性の向上が図られ, 施工の合理化, 工期短縮が可能であることなどを目的とした新形式の鋼・コンクリート複合橋梁の開発・研究が行われている^{1)~3)}. その一例として, 1980年代後半にドイツで発展し, 比較的長支間の連続桁橋に適用可能である鋼・コンクリート二重合成連続桁橋が挙げられる^{4)~8)}. 本橋梁形式は, 連続合成桁橋において, 中間支点領域のみ鋼桁下フランジ側にもコンクリート床版を配置した形式である. このような構造形式を採用することにより, 中間支点領域の桁の剛性を合理的に増加させることができ, その結果, 桁高を抑えることができるなどの特徴を有する. しかしながら, 新構造形式であるため, 設計上の未解明な課題を数多く残しており, 耐荷力もその一つである. 現行の道路橋示方書・同解説 II: 鋼橋編⁹⁾では, 2001年3月の改訂により性能照査の考え方が導入されたが, 照査方法としては, 未だ, 許容応力度設計法を用いている. 世界に目を向けてみると, 欧州連合(EU)の加盟国での共通の設計規準である Eurocode¹⁰⁾ (ユーロコード)では, 限界状態設計法を採用している.

わが国でも, コンクリートの分野あるいは鉄道橋の分野では, すでに限界状態設計法に移行しており, 鋼道路橋の分野においても限界状態設計法を取り入れるべく方

向にある. 許容応力度設計法では, 材料や荷重のばらつきなど不確定な要素を一つの安全率でもって評価している. そして, 材料の降伏強度を安全率で割ることで許容応力度を設定し, 発生する応力がこの許容応力度以下になるように設計を行っている. ここで, 許容応力度設計法の問題点としては, 以下のことが挙げられる.

- ・ 構造物の崩壊に対する安全度が明確でない.
- ・ 性格の異なる荷重, 例えば死荷重と活荷重に対して同一の安全率を用いている.
- ・ 鋼材の降伏と座屈という状態に対して一律に 1.7 という安全率を用いている.
- ・ 安全率の数値的根拠が明確でない.

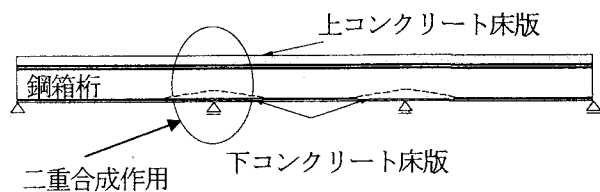
以上のような問題点を解消すべく限界状態設計法に移行するための研究および試設計が盛んに行われている.

本論文では, 鋼・コンクリート二重合成連続桁橋の終局状態における挙動を明確に把握するために載荷実験を行い, その測定値と解析値との比較・検討を行い解析方法の妥当性を検討する.

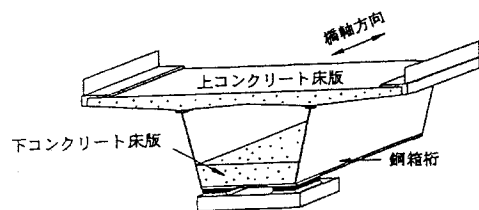
2. 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋

本研究で対象とする鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の構造形式および特徴について述べる. 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋とは, 連続桁の中間支点領域にのみ, 図-1に示すように鋼箱桁内部の下フランジおよびウェブの一部とコンクリート床版をずれ止めを介して

合成させて構造形式のことである^{2)~8)}。中間支点領域に下コンクリート床版を配置する目的は、鋼下フランジを薄くし、かつ補剛材を削減するとともに、桁の剛性を増すことなどである。



(a) 側面図



(b) 中間支点領域の断面図

図-1 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の概要

本形式橋梁の特徴を列挙すると以下のとおりである。

- 1) 桁高を低くおさえることが可能になり、景観面でも有利となる。
- 2) 下コンクリート床版打設以降に荷重される荷重に対し、局部座屈による応力の低減がなくなる。

- 3) 中間支点領域の鋼桁の板厚を低減することが可能になるとともに、下フランジの横リブを少なくし、工場製作の省力化を図ることもできる。
- 4) 中間支点領域の鋼箱桁を大ブロックで一括架設することも可能になり、工期短縮を図ることもできる。
- 5) 支間の長大化が可能である。
- 6) 径間部の正曲げモーメント、たわみの値が低減されるため、たわみ制限の厳しい高速鉄道用橋梁への適用は効果的である。

また、マイン橋(ドイツ・ナンテンバッハ)や北陸新幹線・北陸道架道橋(日本・新潟県)のように、鉄道橋に本形式橋梁を採用した場合、騒音および振動の低下にもつながるというプラスアルファの効果も発揮する。しかしながら、本研究で対象している終局耐力や、コンクリート床版の打設順序に伴うコンクリート応力の変化など未解決な問題点が少々残されている。

3. 曲げ耐力実験

3.1 概要

本章では、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の曲げ耐力実験を行い、終局耐力および降伏後の挙動を把握するとともに、本研究における解析手法の妥当性を検証することを目的としている。

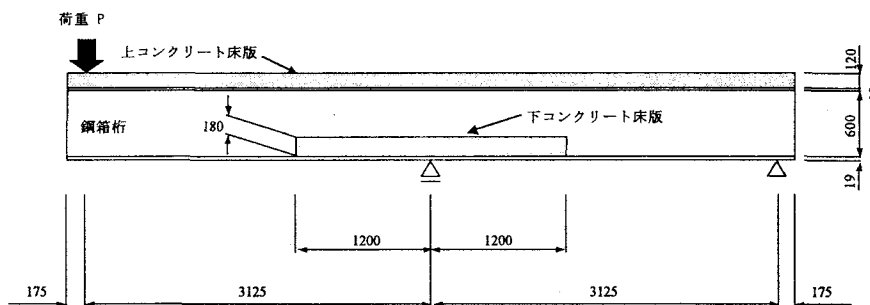
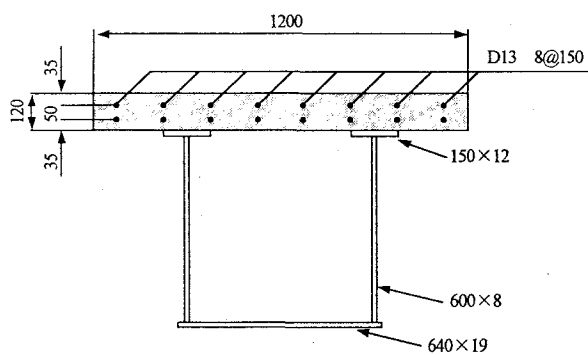
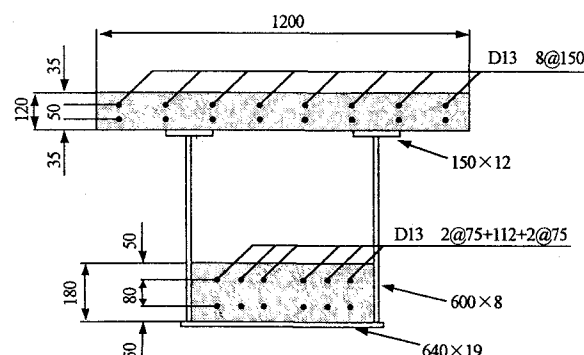


図-2 実験供試体側面図 [寸法単位: mm]



(a) 通常合成断面



(b) 二重合成断面

図-3 実験供試体断面図 [寸法単位: mm]

まず、3.2 では、実験供試体の概要ならびに材料特性について示す。つぎに、3.3 では、本研究で用いた曲げ耐荷力の算定手法について示す。最後に、3.4 では、測定値と解析値との比較・検討結果を示し、種々の考察を加えることにする。

3.2 実験の概要

本実験で使用した実験供試体の側面図および断面図を、それぞれ図-2 および図-3 に示す。供試体は全長 6.6m、桁高 75.1cm、上コンクリート床版厚は 12cm である。また、下コンクリート床版厚は 18cm となっている。本実験で用いた供試体は、クリープおよび乾燥収縮の測定実験を行った供試体⁸⁾を部分的に切断したものである。断面決定は、ドイツにおいて実際に施工された二重合成橋梁であるエルベ橋の断面構成比の値を参考に行った⁸⁾。ずれ止めの設計にあたっては、上・下コンクリート床版とも、道路橋示方書・同解説 II:鋼橋編⁹⁾に準拠して、スタッドの配置間隔、本数などを決定した。

つぎに、コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108(コンクリート圧縮強度試験法)に基づいた。鋼桁の強度に関してはミルシートの値に従うこととした。各材料の材料特性を表-1 に示す。また、表-1 に示す材料強度を用いて終局強度の算出を行っている。

実験状況を写真-1 に示す。

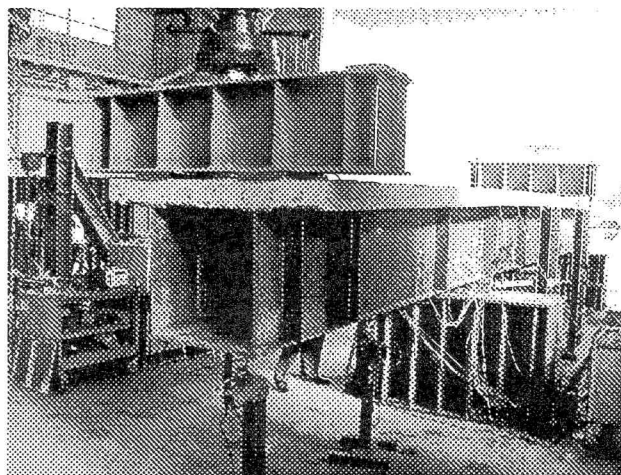


写真-1 載荷状況

は、終局状態に至るまで圧縮フランジおよびウェブが局部座屈による強度低下を起こさず、断面が全塑性状態に達して十分な塑性回転能を発揮できるような比較的厚肉の断面のことをいう。これに対して、ノンコンパクト断面は、溶接プレートガーターのように鋼部材が降伏強度に達する前に局部座屈を起こして終局状態に至るような、比較的スレンダーな断面をいう。このような区分は、Eurocode4¹⁰⁾、AASHTO¹¹⁾など、各国で採用されている。

例えば、Eurocode4 においては、断面を以下の 4 つのクラスに分類している。

クラス 1: 不静定構造物の塑性ヒンジにおいて、モーメントの完全な再分配が起こるような十分な回転性能をもつ断面。

クラス 2: コンパクト断面として全塑性モーメントには達するが、鋼桁の局部座屈によって、回転能に限界のある断面。

クラス 3: セミコンパクト断面で、圧縮フランジは降伏するが、局部座屈によって全塑性モーメントには達しない断面。

クラス 4: スレンダーな断面で、圧縮フランジは降伏には至らず、局部座屈によってする断面。

鋼圧縮フランジに適切なずれ止めでもってコンクリート床版がつく合成桁では、正の曲げモーメントを受ける場合は、クラス 1 に分類される。一方、負の曲げモーメントを受ける場合については、圧縮フランジおよびウェブの局部座屈に関係する幅厚比を用いてクラス 2、もしくはクラス 3 に分類されるか判定する必要がある。

本実験で対象とする鋼・コンクリート二重合成連続桁橋の場合、負の曲げモーメントを受ける区間に鋼桁下フランジ内部にコンクリート床版が打設されている。したがって、クラス 1 断面として塑性理論によって曲げ耐荷力の算定を行うことにする。

表-1 各部材の材料特性

上コンクリート 床版	コンクリート 一軸圧縮 試験結果	圧縮強度	41.3 N/mm ²
		ヤング係数	2.69×10^4 N/mm ²
		ポアソン比	0.20
下コンクリート 床版	コンクリート 一軸圧縮 試験結果	圧縮強度	40.6 N/mm ²
		ヤング係数	2.82×10^4 N/mm ²
		ポアソン比	0.17
鋼桁 (SS400)	上フランジ	降伏強度	265 N/mm ²
		引張強度	430 N/mm ²
	ウェブ	降伏強度	309 N/mm ²
		引張強度	432 N/mm ²
	下フランジ	降伏強度	286 N/mm ²
		引張強度	430 N/mm ²
鉄筋 (SD295A)	上床版	降伏強度	390 N/mm ²
	下床版	降伏強度	377 N/mm ²

3.3 曲げ耐荷力算定

(1) 合成桁の曲げ耐荷力

鋼桁の終局強度の算定にあたっては、断面を構成する板の幅厚比に応じてコンパクト断面とノンコンパクト断面に区別して算定する必要がある¹⁰⁾。コンパクト断面と

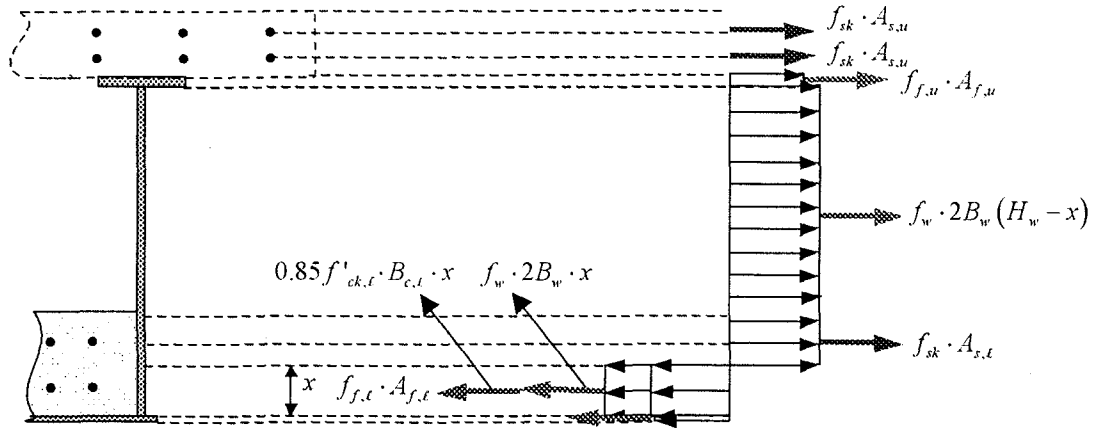


図-4 塑性中立軸が下床版上段鉄筋と下段鉄筋の間にあると仮定した場合の応力分布

(2) 二重合成連続箱桁橋の曲げ耐力算定

曲げ耐力の算出にあたって、まずは塑性中立軸の算定を行わなければならない。一例として、塑性中立軸が下コンクリート床版の上段鉄筋と下段鉄筋の間($50 < x < 130$)にあると仮定する。その時の応力分布は図-4 のようになる。上コンクリート床版および下コンクリート床版の引張力を受ける領域に関しては、コンクリート断面の抵抗を無視し、軸方向鉄筋のみを考慮して算出することとする。

図-4 より、断面内の力のつりあいから塑性中立軸の位置は、式(1)より求められる。なお、記号の説明は、紙面の都合上、割愛する。

$$x = \frac{f_{sk}(2A_{s,u} + A_{s,\ell}) + f_{f,u} \cdot A_{f,u} + f_w \cdot A_w - f_{f,\ell} \cdot A_{f,\ell}}{4f_w \cdot B_w + 0.85f'_{ck,\ell} \cdot B_{c,\ell}} \quad (1)$$

この時の終局曲げ耐力は、式(2)で算出される。

$$\begin{aligned} M_{u,D} = & f_{sk,\ell} \cdot A_{s,\ell} \left(H_{c,\ell} - c_\ell - \frac{x}{2} \right) + f_w \cdot B_w (H_w - x) H_w \\ & + \frac{1}{2} f_{f,u} \cdot A_{f,u} (H_{f,u} + 2H_w - x) \\ & + f_{sk,u} \cdot A_{s,u} (H_{c,u} + 2H_{f,u} + 2H_w - x) \\ & + \frac{1}{2} f_{f,\ell} \cdot A_{f,\ell} (H_{f,\ell} + x) \end{aligned} \quad (2)$$

3.4 測定結果と解析結果の比較・検討

(1) 降伏時

断面の降伏までは、以下に示す仮定のもと、弾性理論

により解析を行う。

- ・材料の弾性範囲内では、フックの法則に従う。
- ・平面保持の仮定が成立する

降伏荷重の算出にあたっては、次式により上コンクリート床版内の鉄筋、上フランジ上縁および下フランジ下縁で算出し、最小値を降伏荷重とした。

$$P_y = \frac{M_y}{\ell} \quad (3)$$

ここで、 ℓ : 荷重載荷位置からの距離

M_y : 降伏モーメントであり次式より算出される

$$M_y = \frac{f_y \cdot I}{y} \quad (4)$$

ここで、 f_y : 各材料の降伏強度 [N/mm²]

I : 合成断面の断面 2 次モーメント [mm⁴]

y : 中立軸からの距離 [mm]

今回の実験では、桁全域に負の曲げモーメントが生じる。そこで、引張力を受ける上コンクリート床版も有効とした状態Ⅰと、上コンクリート床版を無視し、軸方向鉄筋のみを考慮した状態Ⅱの 2 つのモデルを用いて解析を行った。この状態Ⅱにおける降伏荷重を算出した結果、各断面とも上フランジ上縁が降伏するという結果が得られた。

測定結果の一例として、中間支点部の上フランジ下面、ウェブ中央ならびに下フランジ下面の荷重-ひずみ関係を図-5 から図-7 にそれぞれ示す。なお、解析における降伏荷重の値は 464kN であった。

図-5 から図-7 より、497kN で上フランジが降伏した

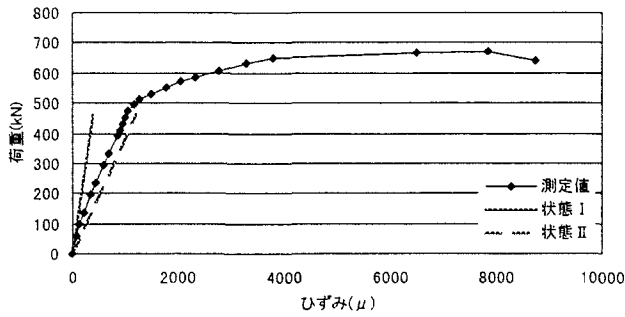


図-5 荷重－ひずみ関係(上フランジ下面)

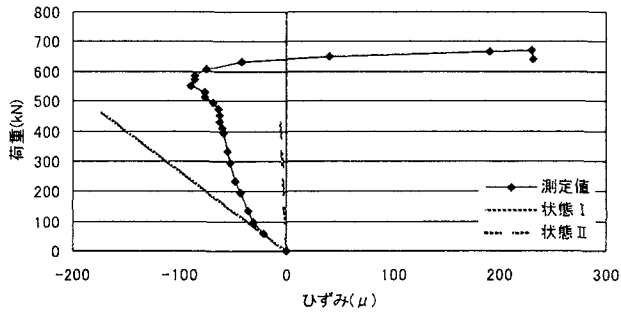


図-6 荷重－ひずみ関係(ウェブ中央)

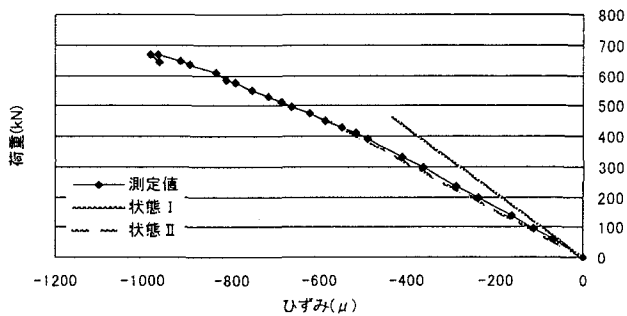


図-7 荷重－ひずみ関係(下フランジ下面)

ことがわかる。

上・下フランジおよびウェブともひび割れ発生荷重の100kN までは状態Ⅰに等しい挙動を示したが、荷重の増加に伴い上・下フランジは状態Ⅱに近づいて行った。上フランジの降伏により、ウェブは降伏には至っていないが、ひずみの増加が大きくなった。ウェブについては、630kN を超えた付近から圧縮域から引張域に転移し、中立軸の位置が下がってきていることがわかる。なお、解析値と測定値の差異は、7%程度であった。

(2) コンクリートのテンションスティフニング効果の考慮

図-5 から図-7 より、荷重の増加に伴い測定値は状態Ⅱに近づいていくが、上コンクリート床版の合成への寄与分だけひずみの値は小さくなっていると考えられる。そこで、ひび割れ間のコンクリートが引張力を負担するテ

ンションスティフニング効果を考慮した解析を行い、弾性範囲の測定値との比較を行う。

テンションスティフニング効果を Bode¹²⁾は、コンクリート床版内の橋軸方向鉄筋の横断面積を増大した形で桁の曲げ剛性を評価する実用的な式を与えている。

$$A_{r,id} = \frac{A_r}{1 - \frac{\beta \cdot f_{ct,m}}{\rho \cdot \sigma_{r,II}}} \quad (5)$$

ここで、 $A_{r,id}$ ：コンクリートのテンションスティフニングを考慮した鉄筋の断面積

A_r ：コンクリート床版内の鉄筋の断面積

ρ ：鉄筋比(A_s/A_c)

$f_{ct,m}$ ：コンクリートの有効引張応力度

$\sigma_{r,II}$ ：完全ひび割れ状態(状態Ⅱ)で算出される鉄筋の応力

式(5)より、テンションスティフニング効果を考慮した結果、降伏荷重は測定値との差異は見うけられず、良好な一致を示した。つぎに、上および下フランジにおける荷重-ひずみ関係を図-8 および図-9 に示す。

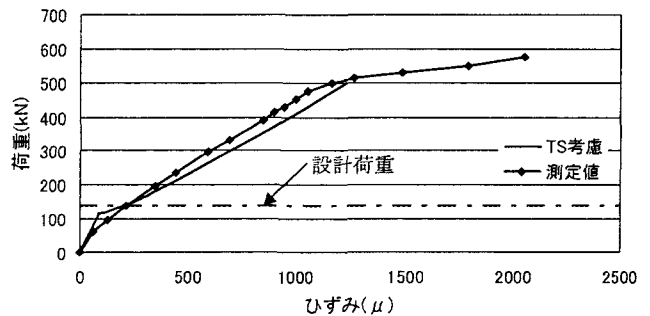


図-8 テンションスティフニングを考慮した荷重－ひずみ関係(上フランジ下面)

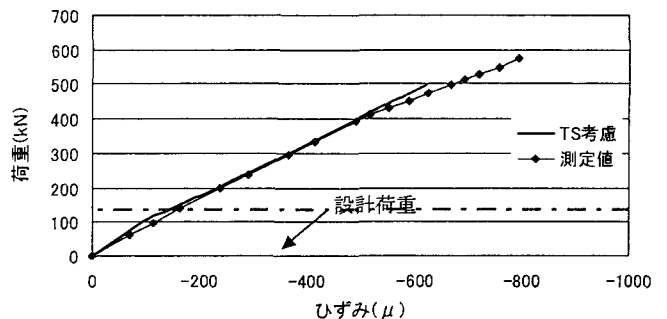


図-9 テンションスティフニングを考慮した荷重－ひずみ関係(下フランジ下面)

また、設計荷重作用時のひずみ分布図を図-10 に示す。図-8 および図-9 より、テンションスティフニング効果を考慮することにより、解析の精度が高くなることがわか

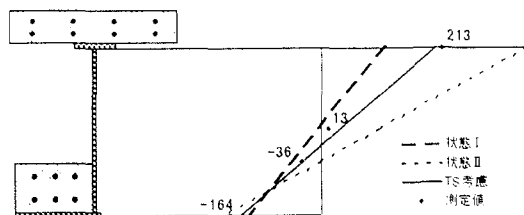


図-10 設計荷重時のひずみ分布

った。図-10 より測定値とテンションスティフニングを考慮した場合の解析値との差異は小さいが、上フランジにおいては測定値が大きくなっている。

(3) 終局時

つぎに、終局時の解析値と測定値との比較を行った。まず、終局曲げ耐力を塑性理論によって求めた結果、塑性中立軸の位置は下コンクリート床版内下段鉄筋の位置になった。表-2 に、終局荷重の測定値および解析値を示す。表-2 より、解析値と測定値の差異は 3%しかなく、良好な一致を示したといえる。したがって、本研究で用いた解析手法で対象橋梁の終局限界耐荷力を評価しても問題ないことがわかった。

表-2 終局荷重の比較

解析値 (=①)	測定値 (=②)	差異 (=1-①/②)×100 [%]
650	671	3.1

4. まとめ

本文は、近年、注目を集めている鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋を対象に終局状態の挙動を把握するため、比較的大型な供試体を用いて、曲げ耐荷力実験を行った。実験供試体より得られた測定値と解析値との比較・検討の結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 降伏荷重の比較については、測定値は解析値よりも大きな値を示した。しかしながら、中間支点上では約 7%と測定値と解析値との差異はわずかしかなかったことがわかった。測定値の方が大きくなった原因としては、解析では引張力を受ける上コンクリート床版の剛性を無視して解析を行っていたが、実際には、上コンクリート床版の剛性が寄与していたためだと考えられる。
- 2) 1)の結果より、引張域のコンクリートの引張分担力を考慮したテンションスティフニング効果を考慮し

た解析を行った結果、測定値と解析値は良好な一致を示した。よって、テンションスティフニング効果を考慮することによって、より精度よく評価できることがわかった。

- 3) 終局荷重の比較については、測定値 671kN、解析値 650kN とその差異は 3%程度であり良好な一致を示した。よって、本研究で用いた解析方法の妥当性が明らかになった。

最後に今後の課題について述べると以下のことが挙げられる。

- 1) セン断に対する安全性の検討
- 2) 曲げとせん断の相互作用
- 3) 下コンクリート床版のずれ止めの安全性について

参考文献

- 1) 土木学会 鋼・コンクリート合成構造連合委員会：構造工学シリーズ 9-A 鋼・コンクリート複合構造物の理論と設計 (1)基礎編：理論編，丸善(株)，1999 年 4 月。
- 2) 川田忠樹監修・野村國勝，梶川靖治編著：複合構造橋梁，技報堂出版(株)，1994 年 9 月。
- 3) NCB 研究会編：新しい合成構造と橋，(株)山海堂，1996 年 2 月。
- 4) 土木学会 鋼・コンクリート合成構造連合委員会：構造工学シリーズ 9-B 鋼・コンクリート複合構造物の理論と設計 (2)応用編：設計編，丸善(株)，1999 年 4 月。
- 5) 白水晃生：最近のドイツ橋梁事情，橋梁と基礎 Vol.32/No.6，pp.37～46，(株)建設図書，1998 年 6 月。
- 6) 栗田章光，大山 理，Marcus Rutner：二重合成連続箱桁橋の現状と課題，鋼橋と橋に関するシンポジウム論文報告集 Vol. 4，pp.13～18，2001 年 8 月。
- 7) 栗田章光，吉田順一郎，大山 理：ヨーロッパにおける最近の鋼・コンクリート複合橋梁，第 1 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.15～30，1998 年 8 月。
- 8) 大山 理：鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋のクリープおよび乾燥収縮挙動に関する研究，大阪工業大学博士学位論文，2001 年 11 月。
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編・II 鋼橋編)・同解説，丸善(株)，2002 年 3 月。
- 10) CEN：Eurocode-4 Design of Composite Steel and Concrete Structures Part2 :Bridges，ENV1994-2，1997.12。
- 11) AASHTO：Standard Specifications for Highway Bridges，13th Ed.，1983。
- 12) H. Bode：Euro-Verbundbau，Konstruktion und Berechnung，2.Auflage，Werner Verlag，pp.201～213。