

(16) 負曲げ領域を鋼床版とした連続合成桁の力学性状に関する実験的研究

An experimental study on structural behavior of continuous composite girder with orthotropic steel deck over internal support

中島章典¹・植木雅雄²・土岐浩之³・斉木功⁴・平正和⁵

Akinori Nakajima, Masao Ueki, Hiroyuki Doki, Isao Saiki and Masakazu Hira

¹正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

²学生会員 名古屋工業大学大学院 社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 東北支店土木部設計課 (〒980-0802 仙台市青葉区二日町 1-27)

⁴正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

⁵トピー工業株式会社 鉄構事業部設計部 (〒441-8510 豊橋市明海町 1)

Recently, a composite girder is reconsidered as bridge construction including a continuous type. However, cracks of the concrete slab in the negative moment regions over the internal support of the continuous composite girder bridges are a serious subject. In this paper, an experimental study employing two types of the continuous composite girder specimens is conducted. One of them is a continuous composite girder with the concrete slab along its overall length and the other is a new one, in which a part of the concrete slab over the internal support is replaced by a orthotropic steel deck. Through the experimental investigation, fundamental behavior of the continuous composite girder and an efficiency of the latter new type of continuous composite girder are examined.

Key Words : continuous composite girder, crack of concrete slab, complete composite interaction, orthotropic steel deck, experiment

1. はじめに

最近、鋼桁橋の経済性の観点から、少主桁形式の鋼桁橋が製作・架設される状況にある。このような形式の鋼桁橋は、合成桁特有の合理性および経済性に加え、連続桁の耐震性や防音性、走行性を考慮して、連続桁形式の合成桁橋として設計されるようになってきている。しかし、連続桁橋を合成桁として設計する場合には、かなり以前から指摘されているように、中間支点付近のコンクリート床版（以下、RC床版と呼ぶ）に生じるひび割れ問題が懸念される^{1),2)}。

連続合成桁の中間支点付近のひび割れを防ぐ方法としては、プレストレスを導入する方法、あるいは中間支点付近のずれ止め配置を工夫して、非合成桁的な挙動を期待し、RC床版の引張応力を低減する方法などがある³⁾。

前者の方法としては、支点の昇降や外ケーブルを利用する方法、あるいは床版を直接プレストレスする方法などがある^{4),5)}。しかし、プレストレス導入に伴う連続合成桁の設計や施工が煩雑となることから、プレストレスを導入する方法が敬遠される傾向にある¹⁾。これに対して、後者の方法としては、中間支点付近にずれ止めを設けない断続合成桁や柔なずれ止めを配置する弾性合成桁の考えも利用されている^{6),7)}が、この場合はずれ止めの疲労の問題なども懸念され、必ずしも

十分な実用化の目処は立っていない。

一方、連続合成桁の負曲げの問題を実験的に明らかにする研究も数多く行われている。しかし、その多くは、連続合成桁の負曲げを受ける中間支点付近のみを想定して、試験体を上下逆さにし、RC床版が引張を受ける状態の単純桁として実験を行っている場合が多い^{4),8),9)}。ところが、RC床版を引張り側にした単純桁の実験では、両支点付近において、支点反力がもたらすRC床版と鋼桁間の摩擦力がずれ止めの水平せん断力に含まれてしまうために、両支点付近のずれ止め剛度を過大評価する可能性のあることが指摘されている¹⁰⁾。したがって、連続合成桁の中間支点付近の挙動を実橋に即して把握するためには、単純桁ではなく、やはり連続桁として実験を行うことが望ましいと考えられる。

そこで本研究では、まず、RC床版のひび割れ幅やたわみ、各部のひずみ、また、塑性変形に伴うモーメント再分配など、連続合成桁の基本的な力学性状の把握を目的とし、全長にわたりRC床版の試験体を2体作製した。さらに、床版のひび割れ対策としての新しい提案を目的として、中間支点付近のRC床版を引張強度に優れた鋼に置き換えた試験体を2体作製した。

以上の計4体の試験体を用いて、連続桁として静的載荷実験を行い連続合成桁の基本的な力学性状を比較検討した。

表-1 材料特性

	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
コンクリート	45.3	34.4
	降伏応力 (MPa)	弾性係数 (GPa)
主鉄筋	342.6	190.3
フランジ	382.0	205.8
ウェブ	270.0	205.8

2. 実験概要

2.1 2 径間連続合成桁試験体

試験体の形状を図-1 に示す。試験体は 1 スパン 2000mm, 全長 4200mm の 2 径間連続合成桁とし, 全長 RC 床版の試験体 2 体をそれぞれ, NCB(Normal section Composite Beam)a, NCBb, また, 中間支点付近の RC 床版を鋼に置き換えた試験体 2 体をそれぞれ, VCB(Varied section Composite Beam)40, VCB200 と呼ぶことにする。英文字のあとの数字は, RC 床版との左, 右結合部から鋼床版部へのコンクリート充填量であり, それぞれ左, 右結合部より 40mm, 200mm ずつ充填されていることを示す。支点および荷重点位置の鋼材には, ウェブの座屈防止のために鉛直補剛材を取り付け, ずれ止めには軸径 13mm, 全高 70mm のスタッドを使用し, 支点上より 100mm 間隔で 2 列に溶植した。また, VCB200 では, 図-2 に示す断面 c 内のコンクリートが抜け出すことを防ぐために, 逆向きのスタッドを 80mm 間隔で 2 列に配置し計 8 本溶植した。RC 床版内には, コンクリートのひび割れや圧壊を防ぐために, D13 の異形棒鋼を引張および圧縮に抵抗させる主鉄筋として 2 列 2 段に配置し, その両端を鋼板 (300×90×4mm) に溶接することで定着させた。さらに橋軸直角方向には, D6 の異形棒鋼を配力鉄筋として, せん断力がかかる荷重点側が密になるように配置した。鋼桁上フランジの表面は実橋を想定し, 付着, 摩擦低減のためのグリースを塗布するなどの特別な処理は行っていない。試験体の型枠には, 鋼製型枠と木材を使用した。脱型は打設の翌日に行い, すぐに湿潤養生に入った。7 日間給水を行った後, 乾燥養生を行った。なお, 表-1 に試験体の材料特性を示す。

2.2 実験方法

荷重は全スパンの 1/4 点に 1 点集中荷重とし, ロードセルを取り付けた 9.8MN 油圧ジャッキにより荷重した。荷重中の不等沈下による応力の発生を防ぐため, 荷重ステップごとに図-1, 図-3 の右端における負反力支承の高さ調整を行った。荷重サイクルは 50, 100, 200, 400kN を荷重サイクル内の最高荷重として, それぞれ 1 回ずつ荷重, 除荷を繰り返した。荷重, 除荷を繰り返

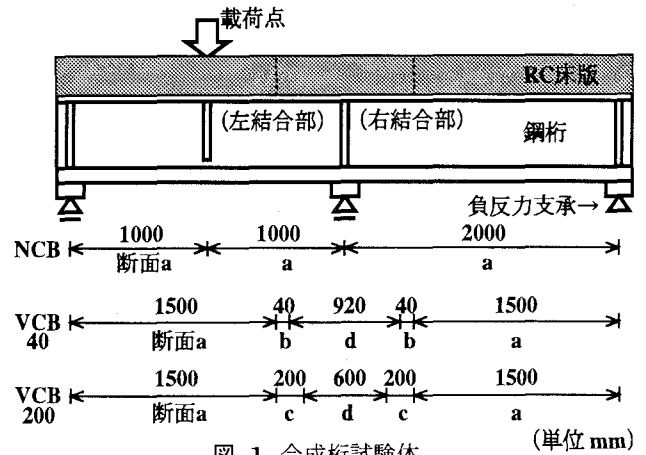


図-1 合成桁試験体

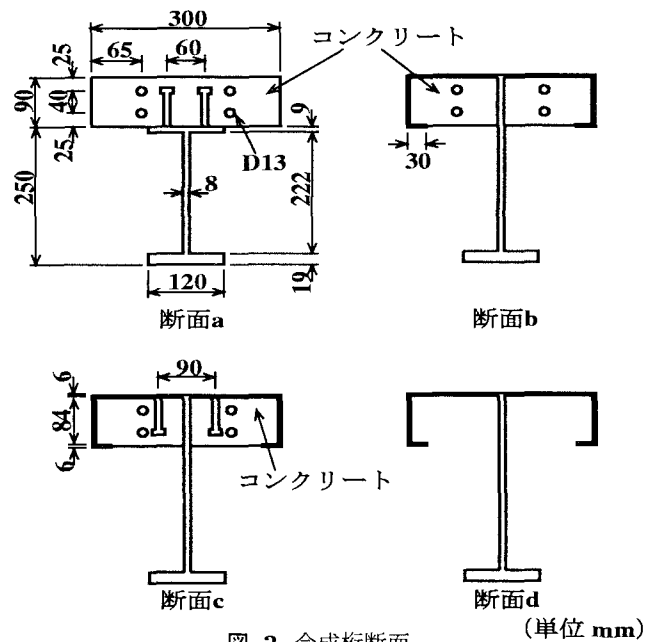


図-2 合成桁断面

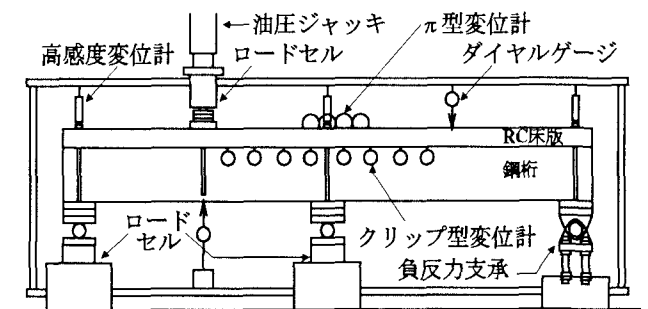


図-3 測定器具設置状況

した後は, 試験体が破壊するまで荷重を行った。

2.3 測定器具の設置方法, 測定位置

荷重荷重によって鋼桁および RC 床版に生じるひずみや各支点反力, 荷重点, スパン 3/2 点, 各支点でのたわみや鉛直変位, 着目点でのひび割れ幅, 鋼桁と RC 床版との相対的なずれ変位, ウェブに生じるせん断ひずみを計測するため, ひずみゲージ, ロードセル, ダ

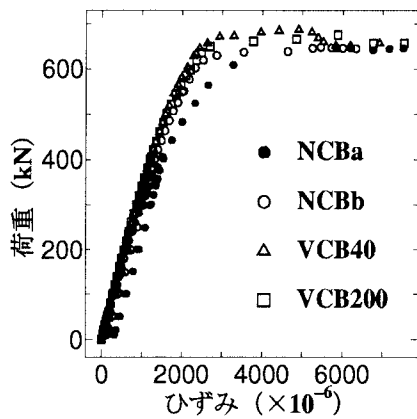


図-4 載荷点における荷重と下フランジのひずみの関係

イヤルゲージ、高感度変位計、 π 型変位計、クリップ型変位計、ロゼットゲージを使用した。なお、載荷点-50mm、中間支点+50mmの断面に貼付してあるコンクリートゲージとウェブのひずみゲージについては、試験体の両側面の同じ高さ位置にゲージを貼付した。測定器具設置状況を図-3に示す。

3. 実験結果および考察

荷重-ひずみ関係 図-4に、実験より得られた荷重と載荷点における下フランジのひずみとの関係を示す。実験値は載荷点直下の、下フランジ下面に貼付したひずみゲージにより計測された値を用いた。図より、最高荷重は VCB の方が NCB より若干大きくなっていることがわかるが、NCBa 以外では、試験体の違いによるひずみの差はほとんど見られない。また、図-4と表-1の材料試験の結果を考慮すると、NCBa, NCBb, VCB40, VCB200の試験体において、それぞれ荷重約460kN, 520kN, 550kN, 550kNで、載荷点下フランジが曲げにより降伏したと予想される。

支点反力の弾性解との比較 図-5に曲げモーメント再分配を見るため、荷重と支点反力の弾性解との比の関係を示す¹¹⁾。図中の弾性解とは、引張コンクリートを無視（鉄筋は考慮）し、さらに線形弾性体を仮定してFEMにより計算した値である。つまり弾性解との比が1から離れるにしたがって、モーメント再分配が大きくなることを示す。ただし、荷重が小さい段階からずれているのは、弾性解にせん断力を考慮していないためと考えられる。図-5-aより、全スパン RC 床版の NCBb では荷重が500kNを越えたあたりから、弾性解との比は中間支点では小さく、左支点では大きくなっている。これは、中間支点付近が塑性化したためと考えられる。また、最終的には弾性解との比が中間支点では大きく、左支点では小さくなっている。これは載荷点下フランジの降伏によるものであると考えられる。モーメントの大きさを比較すると中間支点より載荷点の方が大きい。載荷点と中間支点間ではせん断力が大きいためフ

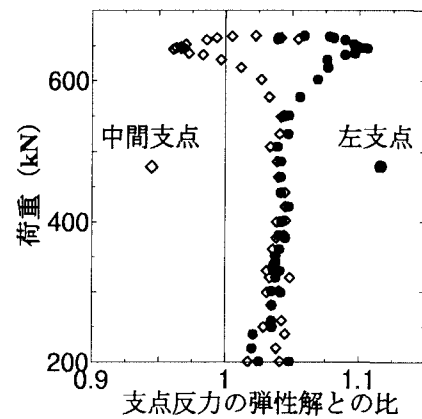


図-5-a 全スパン RC 床版試験体 (NCBb)

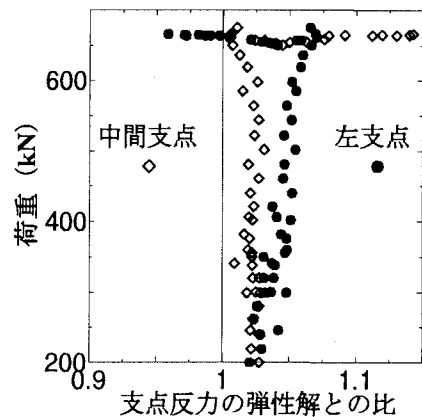


図-5-b 一部鋼床版試験体 (VCB200)

図-5 支点反力の弾性解との比較

ランジのひずみは小さいにもかかわらず、中間支点付近のウェブが塑性化した可能性がある。また、図-5-bより、一部鋼床版の VCB200 でも最終的な挙動はほぼ同様であるが、図-5-aと比較すると弾性解との比が中間支点では小さく、左支点では大きくなる傾向があまりみられない。これは、図-2より、VCBのウェブの断面積がNCBに比べ大きいため、中間支点付近の降伏による影響が大きく現れなかったためと考えられる。以上のように、本研究の連続合成桁におけるモーメント再分配は複雑であることがわかる。

荷重-たわみ関係 図-6に載荷点および3/2点の荷重とたわみの関係を示す。図-6-aの載荷点でのたわみからも、最高荷重は一部鋼床版である VCB の方が若干大きい。試験体の違いによるたわみの差はほとんどないと言える。これに対して、図-6-bに示すスパン3/2点でのNCBとVCBの荷重-たわみ関係における曲げ剛性の差異は、橋軸方向の断面剛性の差異によるものであり、また、支点反力の場合と同様に、NCBでは最高荷重付近で複雑な性状を示していることがわかる。

荷重-ひび割れ幅関係 図-7に π 型変位計により計測した荷重とひび割れ幅の関係を示す。この図に示すひび割れ幅は、それぞれの試験体における測定結果の中で最も大きいひび割れが生じた点、NCBでは中間支点、

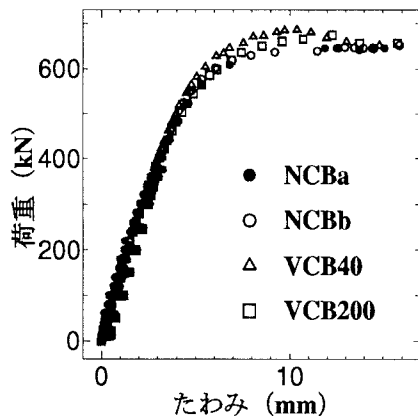


図-6-a 荷重点

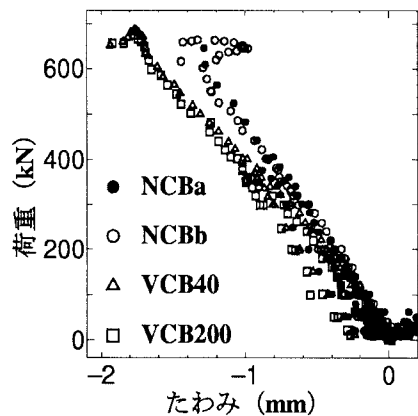


図-6-b スパン 3/2 点

図-6 荷重とたわみの関係

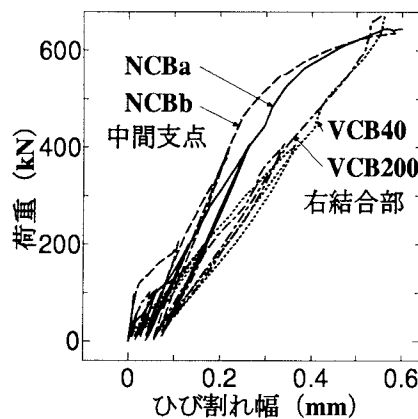


図-7 荷重とひび割れ幅の関係

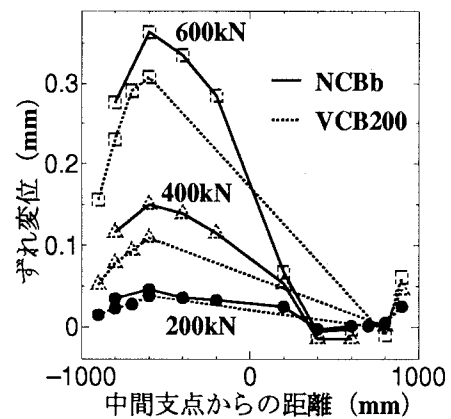


図-8 橋軸方向のずれ変位分布

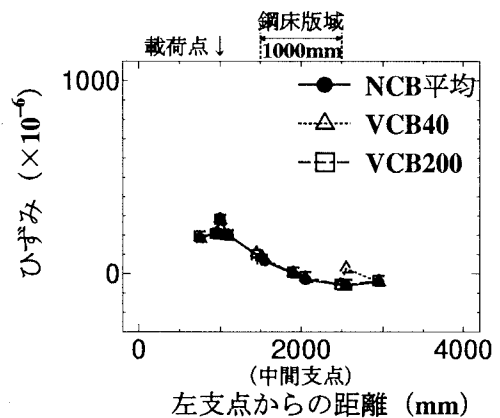


図-9-a 荷重約 100kN

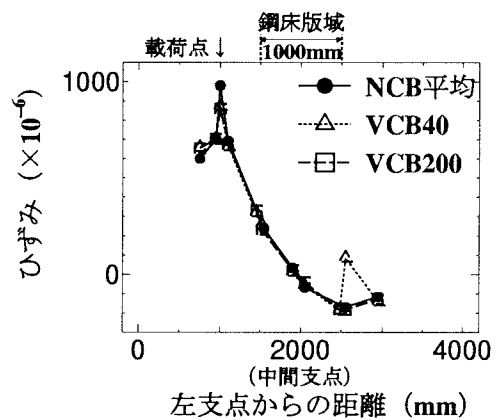


図-9-b 荷重約 300kN

図-9 下フランジの橋軸方向ひずみ分布

VCB では断面が変わる右結合部のものである。VCB の右結合部にはかなり大きなひび割れ（口開き）が生じると予想されたが、図からわかるように NCB とそれほど変わらない結果となった。また、NCB の挙動は曲線的であるのに対し、VCB では直線的である。後者の理由は、荷重の増加により RC 床版と鋼床版結合部の鉄筋溶接がはずれたり、鋼板とコンクリートの付着が弱くなることなどから、コンクリートが割れるのではなく鋼床版から抜け出しているような挙動をしていることによると考えられる。特にコンクリート充填量

の少ない VCB40 は、載荷後試験体の観察により、その様子が確認された。

ずれ変位分布 図-8 に橋軸方向の鋼桁と RC 床版に生じるずれ変位分布を示す。実験値はスタッドの位置に設置したクリップ型変位計により計測した値である。載荷点と中間支点間のせん断力が大きいため、その位置のスタッドに作用する水平せん断力が大きくなり、その間のずれ変位が大きくなっている。また、載荷点と中間支点間のずれ変位は VCB に比べ NCB の方が大きくなっている。これは、この区間が正の曲げモーメン

ト区間であり、VCB では鋼床版内の鉄筋が溶接されたダイヤフラムにより、RC 床版のずれが抑えられているため、NCB に比べずれ変位が小さくなったからと考えられる。また、負曲げによりひび割れの影響の大きいと考えられる中間支点付近においても、ずれ止め剛度が小さくなり、それに対応してずれが大きくなる様子は見られなかった。

橋軸方向ひずみ分布 図-9 は鋼桁下フランジ上面（載荷点直下のみ下面）の橋軸方向ひずみ分布を示す。白抜き三角で表した VCB40 の右から 2 番目の実験値は、荷重が小さい段階からその両隣の値に対してずれている。しかし、この図に示した載荷点からスパン 3/2 点の間の橋軸方向ひずみ分布についても、NCB と VCB の試験体による差異はほとんど認められない。

断面高さ方向ひずみ分布 図-10-a に載荷点における桁高方向のひずみ分布を示す。この断面は、鉛直補剛材や載荷点の影響を避けるため、中間支点側に 100mm 移動させた断面のものであり、RC 床版部の値は鉄筋のひずみである。図より、荷重 300kN では明らかに平面保持は成立しておらず、完全合成と非合成の中間である不完全合成の挙動をしていることがわかる。

また、図-10-b に中間支点における桁高方向のひずみ分布を示す。この断面は、中間支点から、負反力支承側に 50mm 移動させた断面でのものであり、VCB の一番上の値は、鋼床版上のひずみである。一部鋼床版の VCB では荷重の大きさによらず平面保持が成立している。しかし、全長 RC 床版を有する NCB では、荷重が大きくなるにつれてやはり平面保持が成立していないことがわかる。ただし、中立軸の位置が低いのは中間支点部の下フランジに溶接してあるソールプレートの影響であると考えられる。

さらに、図-10-c にスパン 3/2 点における桁高方向のひずみ分布を示す。この断面は、スパン 3/2 点から、中間支点側に 50mm 移動させた断面でのものであり、VCB40 と VCB200 における RC 床版内のひずみの差異は以下のような理由によると考えられる。つまり、一部鋼床版の試験体においては、右結合部より右側も、負曲げ領域であるため RC 床版と鋼桁が同じ曲率を保つためには、RC 床版が伸びなければならない。既に示してあるように、VCB40 は鋼床版内からコンクリートが抜け出している傾向が強いため、右結合部より右側のコンクリートはそれほどひび割れずにすむ。一方、VCB200 は右結合部でコンクリートがひび割れている可能性が強いため、同じ曲率を保つためには、右結合部より右側のコンクリートが多くひび割れる必要があり、その結果、同図の VCB200 の方が鉄筋のひずみが大きくなっている。

ひび割れ性状 図-11 に RC 床版に生じたひび割れの様子を示す。ひび割れは、実験終了後（一部実験中）にマークしたものである。図-11-a に示す NCBb で

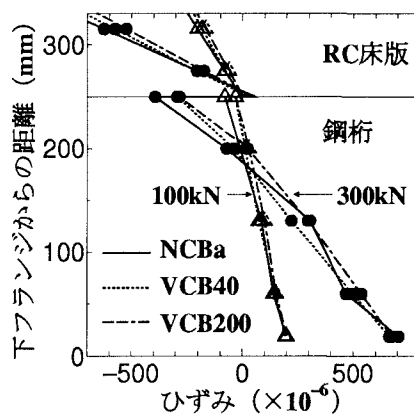


図-10-a 載荷点

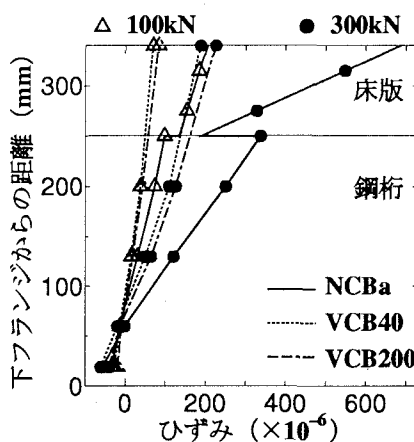


図-10-b 中間支点

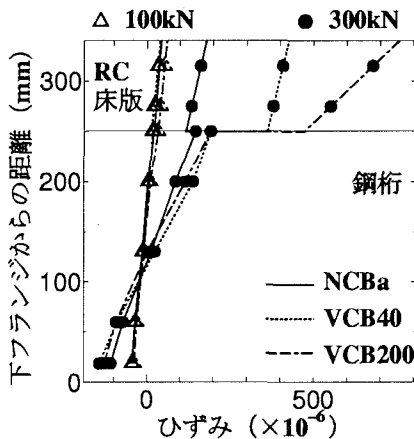


図-10-c スパン 3/2 点

図-10 桁高方向ひずみ分布

は、載荷点の右側から 3/2 点にかけてまばらにひび割れが生じていることがわかる。また図-11-b、図-11-c より、VCB200 の方が VCB40 よりひび割れが多いことがわかる。理由は上述したとおり VCB40 の方は、鋼床版内から鉄筋コンクリートが抜け出していることによるものであると考えられる。なお、NCBa, NCBb, VCB40, VCB200 の最高荷重は、それぞれ 646kN, 664kN, 687kN, 675kN であった。

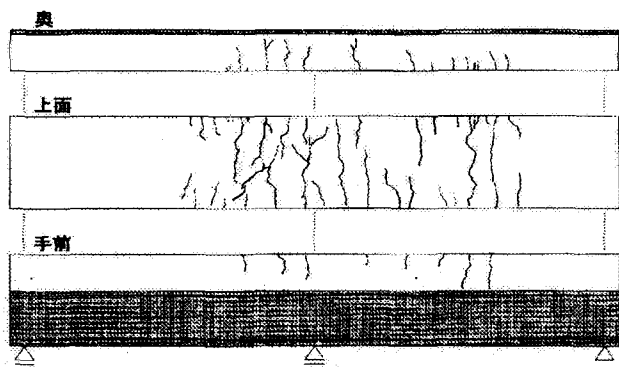


図-11-a NCBb

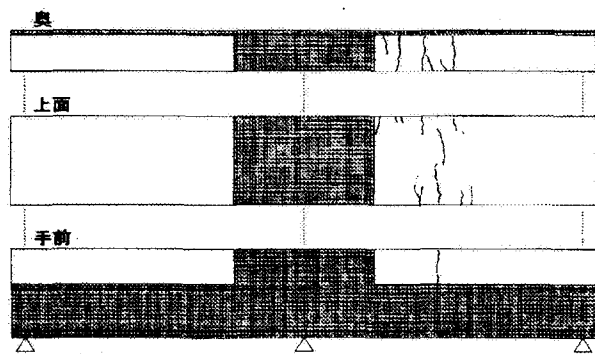


図-11-b VCB40

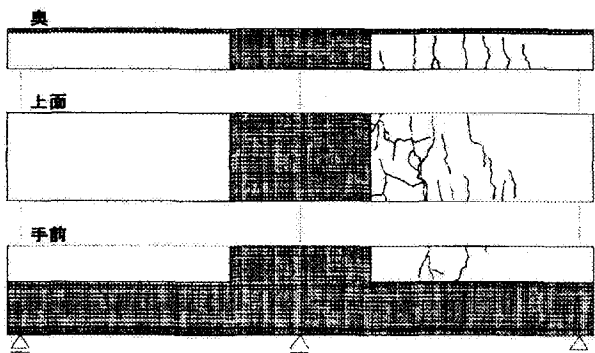


図-11-c VCB200

図-11 最高荷重におけるひび割れ性状

4. おわりに

本研究では、連続合成桁の基本的な力学性状の把握を目的とし、全長にわたり RC 床版の連続合成桁試験体を 2 体、床版のひび割れ対策の全く新しい提案を目的として中間支点付近の RC 床版を鋼に置き換えた試験体を 2 体、計 4 体の静的載荷実験を行った。そして、連続合成桁の基本的な力学性状を比較検討し、以下のような知見を得た。

1. 本研究の試験体の場合、載荷点と中間支点までの距離が桁高に比べて短く、その間に生じるせん断力の影響が大きかった。そのため、載荷点下フランジ降伏より、中間支点付近のウェブがせん断応力の影響により先に降伏したと考えられ、曲げモーメント再分配やたわみなどにその影響が現れた。
2. 試験体には比較的十分にずれ止めを配置し完全合

成に近い設計を行ったが、桁高方向のひずみ分布から、正曲げ、負曲げ領域とも荷重の初期段階でのみ平面保持は成り立ち、それ以降は平面保持は成り立たず、不完全合成の挙動が見られた。

3. 全長 RC 床版の試験体と一部鋼床版の試験体とで比較を行うと、両者の RC 床版のひび割れ性状は異なるが、たわみ、ひずみ分布、着目点でのひび割れ幅など基本的な力学性状に大きな差異は見られなかった。

本研究で提案した一部鋼床版の試験体は、負曲げ領域の RC 床版のひび割れ対策として、その有効性が確認された。ただし、鋼床版と RC 床版の結合部における施工上の問題や構造上の問題があり、コンクリートも鋼床版内から抜け出した可能性が高い。したがって、引張を受ける結合部の構造詳細については、さらに、改善を試みるのが今後の課題である。

参考文献

- 1) (社)日本橋梁建設協会：連続合成桁設計法調査検討業務，1995.3.
- 2) NCB 研究会：新しい合成構造と橋，1996.2.
- 3) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計（1）基礎編：理論編，構造工学シリーズ 9-A，1999.4.
- 4) 三輪 寛，依田照彦，熊谷洋司，相場 充：軸方向にプレストレスされた床版を有する連続合成桁中間支点部の挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.584，pp.255-265，1998.1.
- 5) 中井 博，山内幸裕，袴田文雄，酒造敏廣，山本竜太郎：プレキャスト床版を用いた負の曲げモーメントを受ける弾性合成桁の実験的研究，構造工学論文集，vol.34A，1998.3.
- 6) 橋 善雄，足立善雄：不完全合成桁について，土木学会論文集，No.112，pp.11-19，1964.12.
- 7) 稲葉紀昭，井口光雄：鉄道橋用断続合成桁の設計法の提案，構造工学論文集 Vol.41A，pp.1085-1096，1995.3.
- 8) 橋 善雄，向山寿孝，湊勝比古：プレストレスしない連続合成げたの静的実験，土木学会誌，pp.51-61，1968.10.
- 9) Hamada, S. and Longworth, J. : Bucking of Composite Beams in Negative Bending, Journal of Structural Division, Proc. of ASCE, Vol.100, No.ST11, pp.2205-2222, 1974.11.
- 10) 中島章典，溝江慶久，廣田篤，吉原知佳，西園広之，大江浩一：押抜きおよび桁試験によるスラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度の検討，構造工学論文集 Vol.44A，pp.1505-1514，1998.3.
- 11) 津田 守，佐藤良一，鳥取誠一，手塚正道：持続荷重を受ける PRC 連続はりの挙動について，コンクリート工学年次論文報告集，pp.697-702，1995.