

(35) トラス型ジベルを用いた合成床版及び合成鋼床版桁の実験研究

川崎重工業㈱ ○浅 沼 素

〃 佐 野 信一郎

〃 赤 尾 宏

1. はじめに

橋梁の鉄筋コンクリート床版の多くは、現場での型枠・支保工及び鉄筋組立工という労働集約的な非能率作業によって行なわれ、この方面の若年技能者の不足からも、現場施工の簡易化および省力化が望まれる所である。また最近の大型車両の増加は、床版コンクリートのひび割れ損傷をもたらし、これが設計基準の改訂（S48年）にて、床版厚の増厚が規定されるに到った。しかしこれは、死荷重増加と工費増の傾向にあり、他方、これ以前に施工された旧橋床版の補強改修が必要となりつつあり、これに対応できる新しい床版型式が求められている。また、橋梁全体構造的に、型枠鉄筋工が省略され急速施工が可能で強度的に優れた新しい橋梁型式が望まれる。

そこで筆者らは、図-1に示すように、鋼板（底鋼板）上に波型のデッキプレート（又は帯板を折曲げたもの）を溶接し、その上にフラッパーを溶接してトラス状のリップを形成し、このトラス型ジベルにより鋼板とコンクリートを合成した合成床版を考案した。この床版は

- 床版厚が16"と薄く、型枠・支保工及び鉄筋工が省略できる。
- トラス型ジベルが鋼板の剛性を高め、足場として利用できる。
- トラス型ジベルがコンクリートと鋼板との付着せん断に対し有効に作用し、床版厚の薄いことによるせん断耐力の不足を補うことができる。

このような特長を有する合成床版の主桁との取合は、図-1に示すように、主桁フランジと高力ボルト添接にしたものと、主桁腹板と溶接接合したものとが考えられ、合成前の状態から合成床版を主桁フランジの作用をさせると、合成鋼床版桁という新しい型式になる。これを一般の鋼床版桁と比較したとき、コンクリートとの合成効果により次のような特長が考えられ

- 輪圧による板曲げを受けず、板厚が薄くできる。
- グースアスファルトの施工時の熱影響及び経年後の劣化によるデッキプレートの腐食問題の回避。

これらの合成床版及び合成鋼床版桁を実際に適用する場合、ジベルの合成効果が床版の耐荷性、耐久性に關係すると考え、床版が受ける各種の荷重条件に対応した供試体にて、実験検証を行い、同時に合成機構を調べる必要がある。

実験の種類として、床版としての耐荷性、耐久性及び破壊性状を調べるための

- ①主鉄筋方向正曲げ実験
- ②配力鉄筋方向正曲げ実験
- ③負曲げ実験
- ④繰返し載荷実験

ジベルとしてそのずれせん断耐力を調べる

- ⑤ジベル押し抜きせん断実験

合成桁としての静的耐荷力を調べる

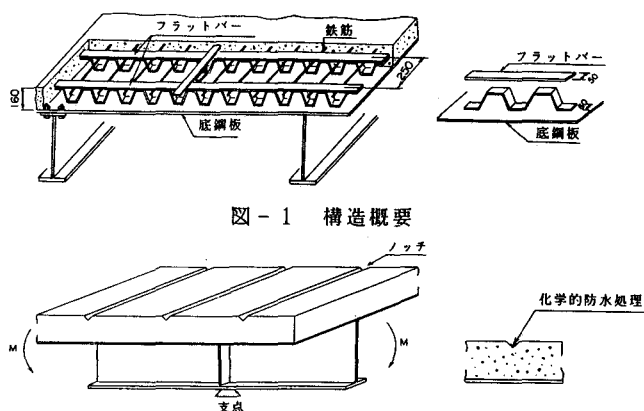


図-1 構造概要

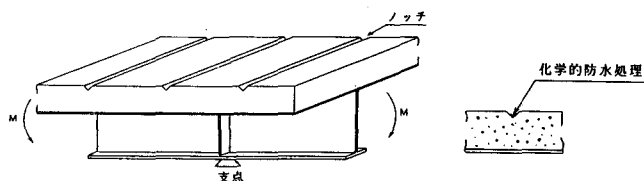


図-2 支点上ノッチ

⑥合成鋼床版桁の正曲げ実験

連続桁に適用したとき、支点上負曲げ領域に発生するコンクリートのひび割れを意図的に制御するため、床版表面にV型ノッチを施し(図-2),その効果を調べる

⑦合成鋼床版桁の負曲げひび割れ制御実験

但し実橋に際してこのV型ノッチ部に化学的防水処理を施すものである(図-2)。

2. 実験内容と供試体の設計

実験に用いたコンクリートの材料諸元は、設計基準強度 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 、粗骨材寸法 25mm 、スランプ 9cm 、空気量 4% 、水セメント比 49% としている。

合成鋼床版桁の供試体について、設計基準強度 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 、粗骨材寸法 25mm 、スランプ 9cm 、空気量 4% 、水セメント比 45.5% としている。コンクリートの養生は、スポンジマットによる湿潤養生としている。供試体の設計計算で用いた鋼とコンクリートとの弾性係数比は 7 を用いている。鋼板及び鉄筋の材質は、それぞれSS41、SD30としている。

2-1. 主鉄筋方向正曲げ実験

供試体は、図-3に示すように、巾 1.0m 、長 3.0m の単純版を用い、トラス型ジベルを主筋方向(曲げ方向)に 250mm 間隔、配力鉄筋方向に 750mm 間隔に配置している。載荷は2点集中線荷重の梁として行っている。

計算による曲げ耐力は、鉄筋コンクリート梁の理論により、コンクリートの圧縮強度 $\sigma_{ck}=290\text{kg}/\text{cm}^2$ とし、 $P_{mu}=38.2\text{t}$ である。せん断耐力は、コンクリートの斜めひび割れ発生等のせん断力(Vc)とトラス斜材が降伏するときのせん断力(Vwy)の和として、Ritter-Mörschのトラス理論を用い

$$V_u = V_c + V_{wy} = V_c + A_w f_{wy} (\sin \alpha + \cos \alpha) \frac{Z}{s}$$

$$= 19.1 + 12.5 = 31.6\text{t} \quad (P_{su}=63.2\text{t})$$

設計荷重は、道示の単純版としての曲げモーメント相当値から求め $P_T=5.7\text{t}$ である。

2-2. 配力筋方向正曲げ実験

供試体は、図-4に示すように、実橋の配力筋方向の曲げを対象にしたもので、曲げ方向に、ジベルを1条と鉄筋D16φを 250mm 間隔に配置してい

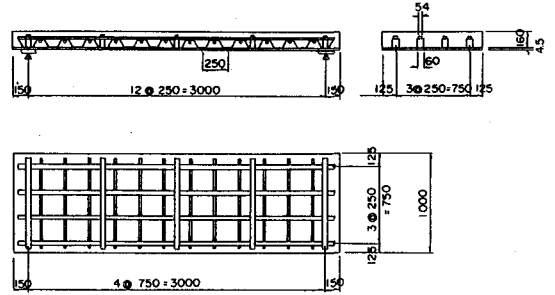


図-3 主筋方向供試体

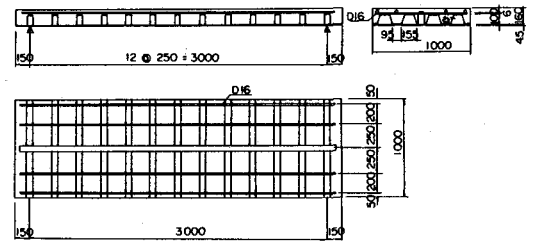


図-4 配力筋方向供試体

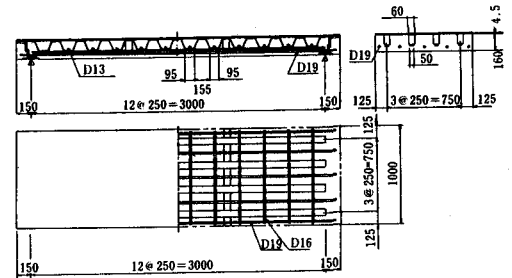


図-5 負曲げ供試体

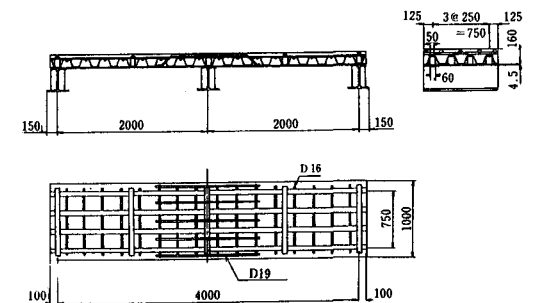


図-6 繰返し載荷供試体

計算による耐力は、上記2-1と同じ考えにより
曲げ耐力 $P_{mu} = 36.2 \text{ ton}$ 、せん断耐力 (V_u) は、

設計荷重は、道示の曲げモーメントから $Pt = 4.5$ tonである。

実橋に於ける主筋方向の主桁支点上の負曲げを対象にした供試体で、図-5に示すように、250mmのジベル間隔の間に鉄筋D19φを配置している。

2-4. 繰返し載荷実験

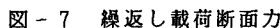
床版は輪荷重による繰返し荷重を受け、その影響を調べるため、道示に示されている輪荷重に衝撃荷重を加えた 12.0t を荷重振幅にとり繰返し載荷を行う。50万回毎に静的に計測し、繰返し数にともなう応力、たわみ、ひび割れ量の変化を調べるものである。供試体は、図-6に示すような2径間連続版とし、正曲げ負曲げが同時に検証できるようにした。部材断面は前述の正曲げ及び負曲げ供試体と同一にしている。載荷荷重は、設計応力に近い値となるように設定した。

荷重速度: 3.5 N^2

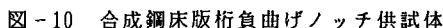
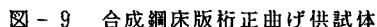
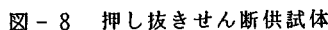
断面力の計算は、等方性断面とし、コンクリートのひび割れによる断面欠損を無視した全断面一定としたものと、ひび割れの発生による断面欠損を考慮した有効断面として計算したものについて図-7に示す。応力計算値は、応力の再配分が完了した断面力について、支間中央は全断面有効として計算し、支点上は、コンクリートの引側を無視した有効断面として計算したものを表-1に示す。

トラス型シベルのコンクリートと合成した状態でジベルのせん断強度を調べるため、図-8に示すような、ジベル方向に押し抜いたもの、ジベル直交方向に押し抜いた2種類について行う。

ジベルの溶接は、トラス底部2辺のすみ肉溶接にしている。計算によるせん断耐力は、ジベル斜材断面積とせん断強度 ($\tau_y = 1850 \text{ kg/cm}^2$) の積か



	支間中央 (kg/cm) 全断面	支点上 (kg/cm) 有効断面
コンクリート	- 78	-
鉄筋 (フラットバー)	- 207	915
底鋼板	430	341



ら $P_{su} = 20.4^t$ になる。

2-6. 合成鋼床版桁の正曲げ実験

合成床版と桁とが一体化した合成鋼床版桁の静的耐荷力を検証するため、図-9に示すような、支間9.0M、桁高65.0cmを用い、合成断面の中立軸の位置を、デッキ面から69mmと腹板上部に位置するように設計した。計算による全塑性極限荷重 $P_u = 101^t$ 、設計荷重 $P_T = 43^t$ である。

2-7. 合成鋼床版桁の負曲げひび割れ制御実験

この合成鋼床版桁を連続桁に適用した場合、中間支点上は負曲げとなる。この支点上にジベルが設置され、コンクリートと一体化しているため、コンクリートにひび割れが発生する。このひび割れを所定の位置に発生させるために、図-10に示すようにV型のノッチを施し、この切欠き効果を利用して、ノッチ部のみにひび割れが発生するようにした。

ノッチの間隔は、図-10に示すように、特別の根拠なく、曲率の大きい支間中央部を密に、端部を粗く配置した。

3. 実験結果と考察

3-1. 主鉄筋方向正曲げ実験

支間中央の底鋼板、コンクリートの荷重-ひずみ曲線及び支間1/4点のトラス斜材の荷重-ひずみ曲線を、図-11に示す。コンクリート引張側にひび割れが発生してくる15~18 t 付近に変曲点が発生し、これと対応してトラス引張斜材にひずみが発生してくる。これは、曲げひび割れの発生による断面欠損による変曲点であり、コンクリートの斜め方向の引張力をトラス斜材が負担してくるためである。ひび割れが伸展した極限状態では、トラス斜材にも大きなひずみが発生し斜め引張力に抵抗している。荷重-たわみ曲線は図-12に示すように、荷重-ひずみ曲線とよく一致した性状を示している。破壊は、図-13に示すよう曲げ圧縮破壊となった。実験値は、鉄筋コンクリート梁としての計算値とよく一致している。

3-2. 配力鉄筋方向の正曲げ実験

支間中央の底鋼板、コンクリート表面の荷重-ひずみ曲線及びトラス斜材の荷重-ひずみ曲線を図-14に示す。上記正曲げ実験と同様、ひび割れの発生する12~15 t 付近からトラス斜材に大き

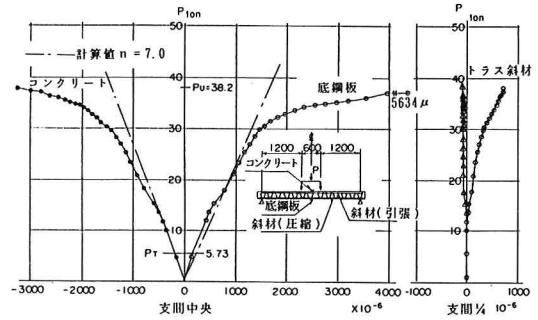


図-11 荷重・ひずみ曲線

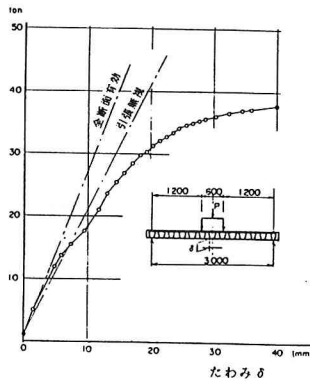


図-12 荷重・たわみ曲線

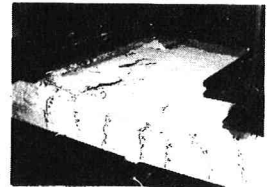


図-13 破壊状況

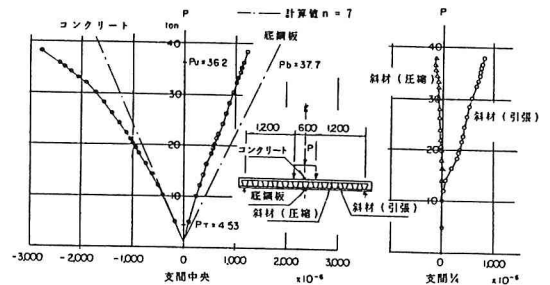


図-14 荷重・ひずみ曲線

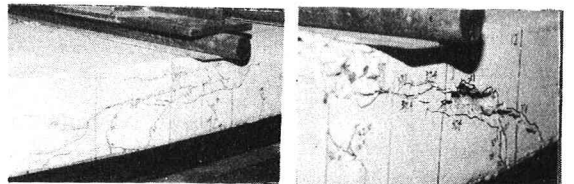


図-15 破壊状況

くひずみが発生している。しかし、図-11と比較し終局時の伸び延性（ねばり）の少ない性状を示している。破壊はせん断による斜め引張破壊となった（図-15）。しかし、耐荷力は、計算による曲げ耐力と一致した。計算のせん断耐力（ 44^t ）は、曲げ耐力（ 36.2^t ）より高いにもかかわらず、このようにせん断による斜め引張破壊となったことは、この種の厚さの薄い合成床版は、斜めひび割れによるせん断破壊を起しやすい性状を示しているとも考えられ、せん断補強筋の必要性を示唆している。

3-3. 負曲げ実験

支間中央の荷重-ひずみ曲線、荷重-たわみ曲線をそれぞれ図-16、図-17に示す。これに示されるように、終局荷重付近まで直線的に上昇し、その後水平状に長く伸びている。これは、圧縮側が鋼板であるために、圧壊現象が生じないこと、ジベルのフラットバー、斜材、底鋼板で囲まれた空間にコンクリートが充填されていることによる断面形状保持が良好なことによるためである。図-19はその供試体の削り面を示す。この断面形状保持の持続は、たわみ性状に現われ、 110^{mm} 以上のたわみ変形（図-18）にもかかわらず、なお持続耐力を有していたが、装置の関係から、計測は中止した。

3-4. 繰返し載荷実験

繰返し数と応力の関係を図-20に示す。0～50万回でみられる応力変化、即ち、支点上の鉄筋と底鋼板の応力低下及び支間中央のコンクリートと底鋼板の応力上昇は、中間支点上負曲げによるひび割れの発生による断面欠損による応力の再配分と考えられる。実験値と計算値とを比較すると、支間中央部は全断面有効として計算したものに近く、支点部は有効断面として計算したものに一致している。繰返し数とたわみ・ひび割れ巾の関係を図-21に示すように、たわみ量は終始一定であったが、支点上負曲領域に発生したひび割れ巾は、 0.04^{mm} から 0.1^{mm} まで変化した。これは一般に、設計上許されているひび割れ巾は 0.2^{mm} の半分である。支点上に発生したひび割れ量は、図-22に示すように3条ほどで、これは1万回までに全て発生したもので、表面上それ以後の伸展はなかった。

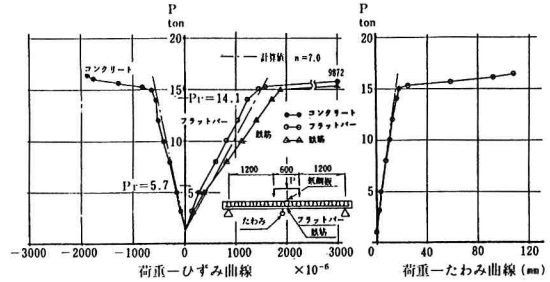
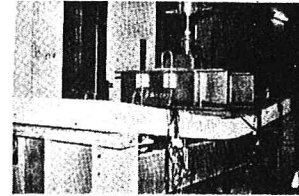
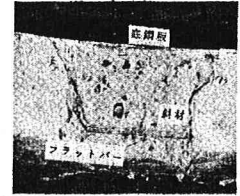


図-16 荷重・ひずみ曲線 図-17 荷重・たわみ曲線



負曲げ試験載荷の変形状況
図-18



負曲げ試験載荷後の供試体削り面の状況
図-19

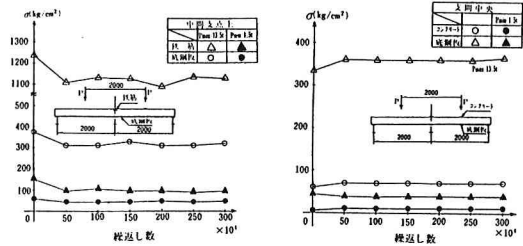


図-20 繰返し数と応力の関係

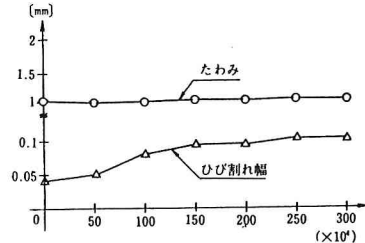


図-21 繰返し数とたわみ・ひび割れ巾の関係

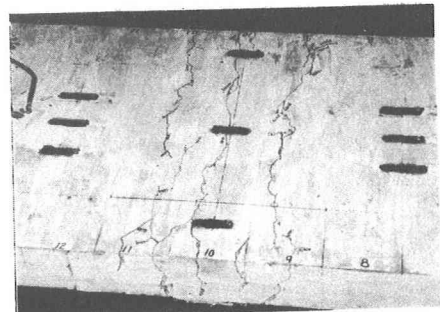


図-22 ひび割れ発生状況

また正曲げ部のひび割れの発生はなかった。

300万回終了後、供試体の健全性を調べるためジャッキ能力 50ton を片側径間の中央に載荷し、計測した。図-23は支間中央の荷重-ひずみ曲線を示し、全断面有効とした計算値とよく一致している。このことは、300万回終了後も供試体が健全であることを示し、正曲げ部のひび割れの発生は 20t 付近から新しく発生し、これに対応しトラス斜材のひずみも大きく変化している。 50ton の集中載荷の影響を受けなかった他の径間の、ジベル線上を支間中央長手方面に切断したものを、図-24に示す。この部分に於いて、ひび割れに相当するものは見られなかった。

3-5. ジベル押し抜きせん断実験

トラス型ジベルのジベル方向、ジベル直角方向にそれぞれ押し抜いた荷重-変位の関係を図-25に示す。いずれも、載荷点に近いジベル斜材から順次切断し、コンクリート版の頂部が開くように崩壊した。図-26はジベル方向に押し抜いたトラス斜材の荷重-ひずみ曲線で、圧縮、引張が交互に発生している。

3-6. 合成鋼床版桁の正曲げ実験

支間中央の荷重-ひずみ曲線及び荷重-たわみ曲線をそれぞれ図-27、図-28に示す。いずれも計算値とはよく一致している。載荷荷重の増加にともない供試体は弾性から塑性状態に変化し、合成断面の中立軸は腹板内から床版内に移動し、デッキプレートのひずみも圧縮から引張に変化している。このデッキプレートの圧縮から引張への変化後も相当の持続耐力を有していることは、ジベルが十分にコンクリートと合成し、ずれ止め効果を発揮しているためである。破壊は、支間中央部のコンクリートの圧縮破壊にて崩壊した(図-29)。

3-7. 合成鋼床版桁負曲げひび割れ制御実験

負曲げ載荷にともなうひび割れの発生状況を、図-30に示す。ひび割れ線に添えている数字はひび割れ発生時の荷重を示す。ひび割れ発生量を把握するため、荷重ブロックを $0\sim 20\text{ton}$ 、 $0\sim 40\text{ton}$ 、 $0\sim 70\text{ton}$ に分けて示した。荷重 $0\sim 20\text{ton}$ までは $600\sim 1200\text{mm}$ の間隔でノッチ部にひび割れが発生し、荷重 40ton で全てのノッチ部にひび割れが発生した。これは設計荷重 34ton の1.2倍に

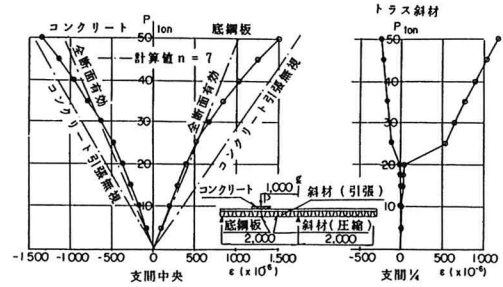


図-23 荷重-ひずみ曲線



図-24 切断面

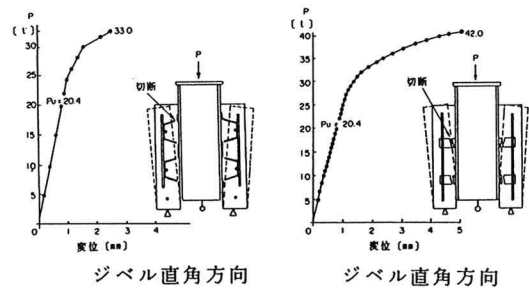


図-25 荷重-変位曲線

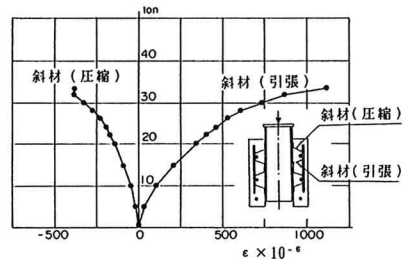


図-26 荷重-ひずみ曲線

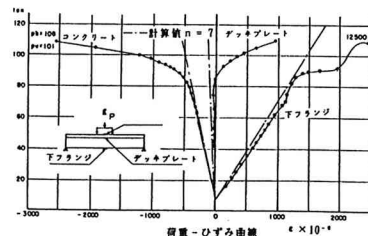


図-27 荷重-ひずみ曲線

相当している。以上のことから、ノッチの効果があることが確認された。

桁の曲率とひび割れの発生間隔（ノッチ間隔）との関係を調べてみると

桁の曲率（ k ）と、ひび割れ間隔（ ℓ ）との積は一定であると予想され計算してみると、

荷重 20^{ton} での発生ひび割れ間隔平均 870^{cm}

$$k = \frac{M}{E_s I_s} = 0.011 \times 10^{-3}$$

$$k \ell = 0.011 \times 10^{-3} \times 870 = 9.6 \times 10^{-4}$$

荷重 40^{ton} での発生ひび割れ間隔平均 375^{cm}

$$k \ell = (2 \times 0.011 \times 10^{-3}) \times 375 = 8.0 \times 10^{-4}$$

定性的に、 $k \ell = \text{一定}$ 、という関係があると考えられる。

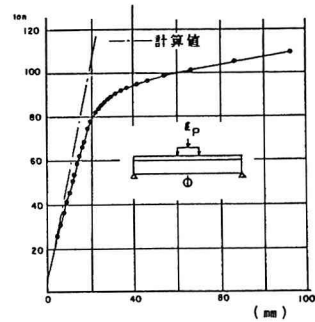


図-28 荷重・たわみ曲線

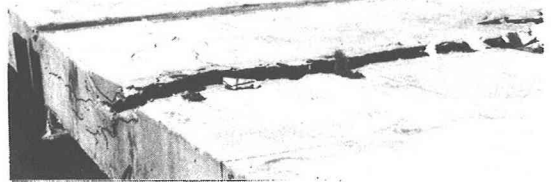


図-29 破壊状況

4. 実験結果のまとめ

4-1 合成床板について

合成床版は、一般の鉄筋コンクリート床版と比較して、床版厚が薄く、鋼板を片側全面に用い、鉄筋比が高いことから、計算上の曲げ強度は高くなるが、せん断強度は高くならないことから、ややもするとせん断の影響によるコンクリートの斜め引張破壊を生じやすいことが予測され、せん断補強作用のあるトラス形状をもつジベルを用いたのであるが、実験結果からも

① トラス型ジベルのせん断補強効果のあることが確認され

- 250mm間隔にトラス型ジベルを配置したものは、せん断破壊は発生せず、完全な曲げ圧縮破壊となった。
- 1000mm間隔にトラス型ジベルを配置したものは、計算通りの耐力を示したが、せん断の影響による斜め引張破壊となった。

② トラス型ジベルは、50mmの巾をもつ三角形の閉断面の連続体であるため、この閉断面内にコンクリート充填され、底鋼板とフラットバーの形状保持が十分なされる。これが負曲げ実験で示されるような、ねばりのある特性を示した。

③ 繰返し載荷実験でみられるように、300万回の繰返し載荷後も、供試作は十分な強度を有し、ひび割れの伸展も極めて少なかった。

④ トラス型ジベルによる断面形状保持（合成効果）が良好で、一般の鉄筋コンクリート梁の計算法とよく一致する。

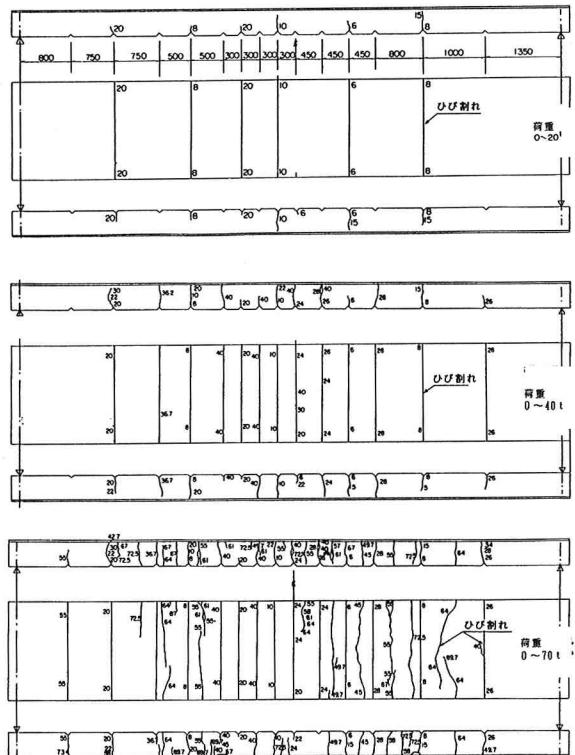


図-30 ひび割れ発生状況

4-2 合成鋼床版桁について

床作用する合成床版を主桁作用として用いたとき、トラス型ジベルは、コンクリートと主桁フランジ（デッキプレート）とのせん断力の受け渡しを行い、実験結果からも、桁軸方向と桁軸直角方向に配置されたトラス型ジベル作用により、主桁合成断面としての所定の強度が示された。今回の実験では主桁作用としてのせん断力をジベルのひずみから検出することができなかった。

負曲げ領域のコンクリートのひび割れを、V型ノッチにて、その発生をノッチ箇所集中させることができることが確認された。但し、床版厚16cm、ノッチ深さ25mmとした今回の実験ケースについてである。

5. あとがき

鋼板上にトラス状のリブを溶接し、鋼板を補剛することによりコンクリート打設時の型枠及び支保工として利用することができる。このトラス状のリブ、即ち、トラス型ジベルは、鋼板とコンクリートとを合成するジベルとしての作用をすることが、これまでの一連の実験から確認され、要約すると

- ずれ止め作用
- 斜めひび割れを防止するせん断補強筋の作用
- トラスの三角形空間にコンクリートが充填されることによる断面形状保持（一体化）作用

他方、ジベルによるコンクリートとの合成は圧縮領域に用いると効果的であるが、コンクリートに引張が働く負曲げ領域ではひび割れが発生し、効果的でない。このひび割れを所定の所に必ず発生させ、こゝに化学的防水処理をすることにより、ひび割れ箇所からの雨水の侵入を防止することができる。こうした狙いに対しV型のノッチはひび割れを制御する上で効果のあることが確認された。しかし、今後、数多くの実験より定量的に確認すべき問題かもしれない。また、化学的防水処理の効果についても検討していかねばならない。また、このV型ノッチはコンクリートの乾燥収縮に対しても有効に作用すると考えられ、今後のテーマでもある。

今後は、トラス型ジベルの最適形状問題、形状寸法からくるせん断強度の評価、及び製作架設等の諸問題について検討していくものである。

最後に、実験に際し、指導していただいた東京大学の西野教授、長谷川助教授、上野助手に感謝の意を表するものである。

参考文献

- (1) 浅沼・佐野・赤尾、トラス型ジベルを用いた合成床版の実験、土木学会年次学術講演会（第39回、第40回）
- (2) 太田俊昭、内 一元、立体トラス型ジベルを有する合成床版の解析、土木学会年次学術講演会（第39回）
- (3) 太田俊昭、奥石正巳、積層化有限要素法によるトラス型ジベル付合成床版の解析、土木学会年次学術講演会（第40回）
- (5) 新津、大貫、浅島、落合；鋼製型枠合成床版を用いた合成桁の設計・施工、橋梁と基礎1981
- (6) 園田、堀川、広瀬；道路橋鋼板・コンクリート合成床版のずれ止めの設計に対するせん断有効幅、土木学会論文報告集No.338
- (7) 土木学会；鋼とコンクリートの合成構造に関する調査研究報告書（昭和57年度、58年度および59年度首都公団委託）
- (8) 日本道路協会；道路橋示方書（昭和53年版、昭和55年版）
- (9) 阿部英彦；鉄道用合成桁のずれ止めに関する研究 鉄道技術研究所報告（昭和50.3）
- (10) 土木学会；コンクリート構造の限界状態設計法試案（昭和56.4）