

トラス型ジベルを用いた合成床版の耐力と 疲労強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE AND FATIGUE STRENGTH OF STEEL-CONCRETE
COMPOSITE SLABS WITH TRUSS-TYPED SHEAR CONNECTORS

中井 博*,松本 雅治**, 中村 求***,山本 晃久****, 真田 健司*****

By Hiroshi NAKAI, Masaharu MATSUMOTO, Motomu NAKAMURA, Akihisa YAMAMOTO and Kenzi SANADA

In recent years, the development of bridge slabs with high strength and durability as well as low maintenance costs instead of the ordinary reinforced concrete slabs tends to be required strongly by several highway administrators, because of the severe traffic loading conditions in highway bridges. For highway bridges, a steel-concrete composite slab with truss-typed shear connectors is newly developed herein. This paper reports a series of tests, which were conducted for evaluating (1) the strength of the shear connector itself, (2) the ultimate strength, and (3) the fatigue strength of the composite slab using truss-typed shear connectors.

1. はじめに

近年、道路橋のRC床版では、現場での型枠・支保工や鉄筋工などに携さわる熟練労働者の不足、天然骨材の枯渇に伴う建設材料費の上昇や、建設技術者の人件費の高騰などが、深刻な問題になっている。また、重交通下でのRC床版の損傷が大きな問題となっておりと同時に、これらの損傷を防止するための床版厚の増加に伴う死荷重増は、上部構造のみならず下部構造の設計にも影響を与えている。このような観点から、鋼とコンクリートとを一体化させた合成床版が注目され、種々の形式の合成床版の研究が行われている。

そこで、今回、新しい床版形式として、薄鋼板上にジベル斜材とフラットバーとで成形したトラス型ジベルを溶接することにより、鋼板とコンクリートとを合成した図1に示す合成床版¹⁾を考案した。

本文では、この合成床版を実橋の床版として適用するために行っている一連の試験²⁾のうち、(1) 合成作用を調べるための基本的試験である押し抜きせん断試験と、(2) この試験で決定された最適な形状のトラス型ジベルを取り付けた合成床版の静的な曲げ耐力実験、および(3) 繰り返し荷重に対する健全性の低下に着目して行った定点疲労実験結果について報告する。このうち、(3) はとくに疲労損傷がどのように合成床

* 工博	大阪市立大学教授	工学部土木工学科	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
**	阪神高速道路公団課長	大阪第一建設部	(〒542 大阪市中央区西心斎橋1-2-4)
***	阪神高速道路公団係長	大阪第一建設部	(〒542 大阪市中央区西心斎橋1-2-4)
****	工修 川崎重工業係長	計画部	(〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島8)
*****	工修 川崎重工業	西部橋梁設計部	(〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島8)

版全体の強度、および剛性に影響を及ぼすかを調べた。

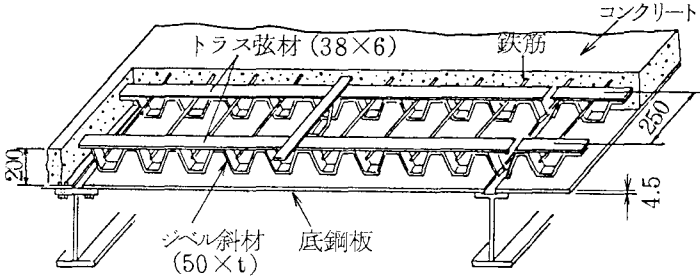


図1 トラス型ジベルを用いた合成床版の概要図

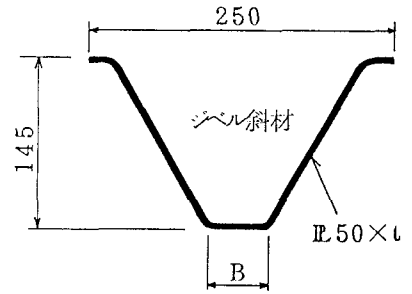


図2 ジベル斜材の形状

2. 実験概要

表1 試験種類および供試体数

2.1 押し抜きせん断試験

図2、および表1に示すように、ジベル斜材の板厚 t 、および溶接長 B をパラメータとして抽出し、押し抜きせん断試験を行った。供試体の寸法および荷重方法を、図3に示す³⁾。こ

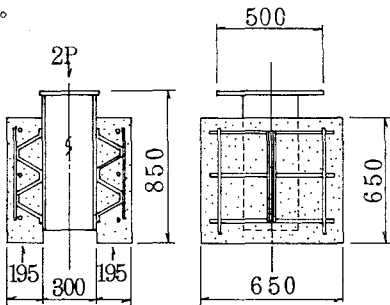
B (mm)	t (mm)	32	45	6.0	
40		4	4	4	
50		4	4	4	
60		4	4	4	

* まわし溶接施工

こで、トラス型ジベルのせん断耐力をできるだけ正確に求めるため、供試体の寸法、および組立は文献³⁾の方法によった。また、H形鋼とコンクリート部分との接触面には、シリコンプレーを散布し、境界面における付着の影響が小さくなるように配慮した。

これらの供試体に、100t油圧ジャッキによって残留ずれ δ が0.08mmになるまで荷重と除荷とを数回繰返しを行い、そののち破壊に至るまで荷重を漸増させた。また、溶接長のパラメータの一つとして $t=4.5$ mm、および $B=50$ mmのものに対し、まわし溶接を行って、その効果を調べた。

荷重-ずれ曲線を図4に例示する。以下では、残留ずれ量0.08mmに対応する荷重を、せん断耐力と呼ぶこととする。



(a) 断面図 (b) 側面図

図3 押し抜きせん断供試体の詳細

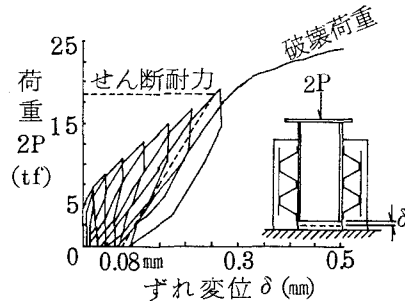


図4 荷重-ずれ曲線の一例

2.2 曲げ耐力実験

押し抜きせん断試験で得られた最適なトラス型ジベルを取り付けた合成床版が、所要の曲げ耐力を有しているかどうかを確認するために、図5に示す正曲げ（支間部の挙動）、および負曲げ（支点部の挙動）に対する耐力実験を行った。また、ジベル斜材の板厚の影響、および排水樹の有無の影響についても合わせて検討した。

正曲げ実験の荷重方法は、せん断力が作用しない純曲げを受ける状態にするために荷重分配桁を通して2点集中荷重とし100t油圧ジャッキを用いて、順次静的に荷重し最終的には、破壊に至るまで荷重した。一方

負曲げ実験の載荷方法は、集中載荷とし100t油圧ジャッキを用いて、静的に漸増させて載荷した。そして、最終的には、たわみ量が過大となったため、実験を終了した。なお、この負曲げ供試体の底鋼板のない中央部における鉄筋の鉄筋量 ρ および周長率 ρ は、それぞれ $\rho=0.03$ 、および $\rho=0.063$ である。さらに、排水樹の影響は、正曲げ供試体の一部に排水樹を設置し荷重を排水樹近傍部にロードセルを介して載荷することにより調べた。

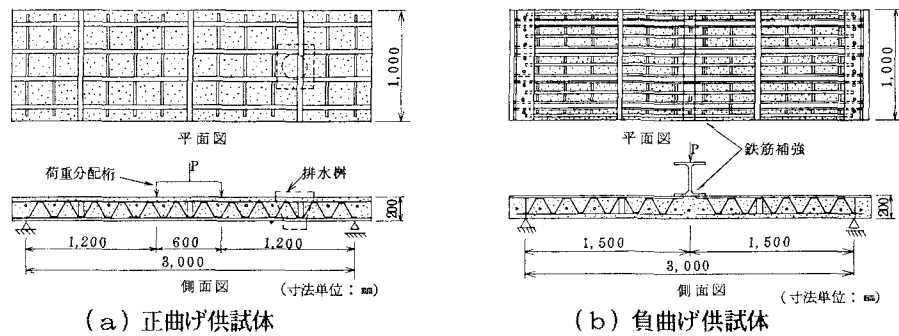


図5 曲げ耐力実験供試体の詳細

2. 3 定点疲労実験

静的載荷実験にもとづいて決定されたトラス型ジベルを有する合成床版の底鋼板、およびトラス型ジベル、ならびに継目部の鉄筋が、繰り返し荷重のもとで疲労損傷を起こさないか否か、また充填コンクリートに発生するひび割れが、合成床版全体の健全性に悪影響を及ぼさないか否かを調べるため、定点疲労実験を行った。

供試体の詳細を、図6に示す。この図からわかるように正曲げモーメントを受ける部分、ならびに負曲げモーメントを受ける部分の疲労特性を同時に検討するため、供試体は2径間の連続梁として設置した。

載荷方法については、図7に示すとおりで、容量50tfのアクチュエーターを使用し、荷重分配桁を介して供試体の各スパン中央に荷重を載荷した。載荷荷重と繰り返し回数とを表2に示す。ここで、載荷繰り返し数 200万回までの上限荷重（荷重ステップ1）は、道路橋示方書⁴⁾より算定される床版の設計曲げモーメントと供試体に作用する正曲げモーメントとが等価な値となるように設定した。

表2 載荷荷重と繰り返し回数

荷重ステップ	載荷荷重 (tf)		載荷速度 (Hz)	載荷繰り返し回数 N (×10 ⁴ 回)
	上限荷重 P_u	下限荷重 P_L		
ステップ1	14.0 × 2	1.0 × 2	3.0	200
ステップ2	17.0 × 2	1.0 × 2	3.5	100
ステップ3	20.0 × 2	1.0 × 2	3.5	100

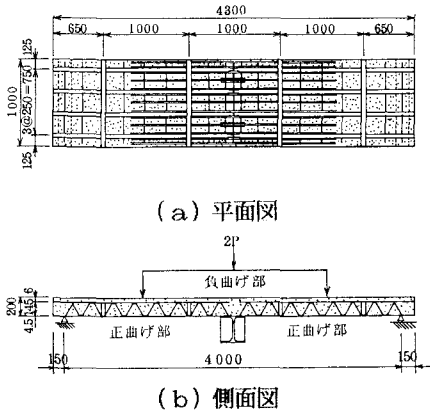


図6 定点疲労実験供試体の詳細

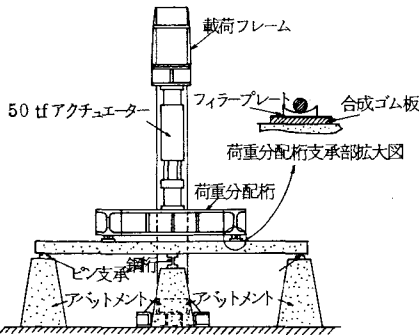


図7 載荷方法

3. 実験結果および考察

3.1 押し抜きせん断試験

(1) ジベル斜材の板厚-耐力-溶接長の関係

試験結果を整理したものを、図8に示す。この図から、せん断耐力は、ジベルの厚さに比例して増加している。これは、ジベルに作用する水平せん断力に対して抵抗する断面積が増大するためである。またせん断耐力は、溶接長にも比例している。この理由は、溶接長が短い場合、その両端に応力が集中するのに対し溶接長が長い場合、応力が全体に平均化されて応力集中が緩和されるためであると考えられる。さらに、まわし溶接は、応力集中を緩和し、応力をよりスムーズにジベルに伝えるため、せん断耐力を高めている。

(2) ジベル斜材の板厚-破壊荷重-溶接長の関係

ジベル斜材の板厚-破壊荷重-溶接長の関係を図9に、また破壊パターンの分布を図10に示す。破壊荷重は、せん断耐力と同様に、ジベル厚さに比例している。また、破壊パターンは、溶接長にも依存している。それらをジベルの厚さごとに考察すると、つぎのとおりである。

① $t=3.2\text{mm}$ の場合：破壊は、すべて母材で発生し、破壊荷重は溶接長に比例している。これは、溶接長が増すことにより、応力集中が緩和したためと考えられる。

② $t=4.5\text{mm}$ の場合：破壊は、溶接部と母材とで発生している。この板厚では、溶接部の強度と母材の強度とがほぼ等しい状態にあると考えられる。Bが40から50になるときに比べ、Bが50から60になるときの破壊荷重の増加が少ないのは、図10に示したように、2つの破壊パターンが混在していること、また溶接線方向の応力分布に影響されているためと思われる。

③ $t=6.0\text{mm}$ の場合：上記②の傾向が、より明確に現れている。そこで、溶接長をパラメータとしFEM解析を行ってみると、溶接の始末端で応力が集中し、溶接長が伸びるにしたがって応力の最大値が減少している。また、応力の最大値に着目すれば、 $B=40$ の場合が最大であり、 $B=50$ と60の差は小さい。これらのことが実験値に見られるように破壊荷重に差異がでない理由になっていると思われる。

(3) トラス型ジベルの設計

(水平せん断力とせん断耐力との比較)

4辺単純支持されたトラス型ジベルを有する合成床版 ($3.0\text{m} \times 6.0\text{m}$) を対象に、弾性板理論を用い、安全率 $\gamma=3$ を見込んだ設計水平せん断力を求めると、 7.5tf となる。この値を満足するジベル形状は、図8よりジベル厚さ 4.5mm で、溶接長 50mm の場合に相当する。さらに、この板厚は、図10に示すように、破壊形状が混在している範囲であり、最も経済的な板厚となっている。

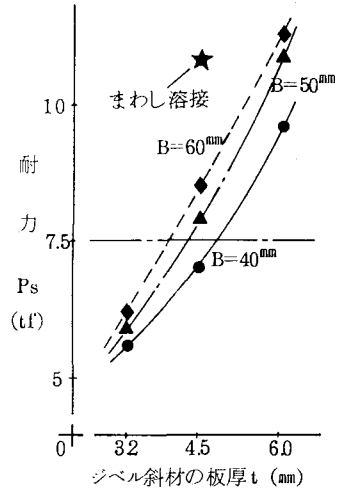


図8 ジベル斜材の板厚-耐力-溶接長の関係

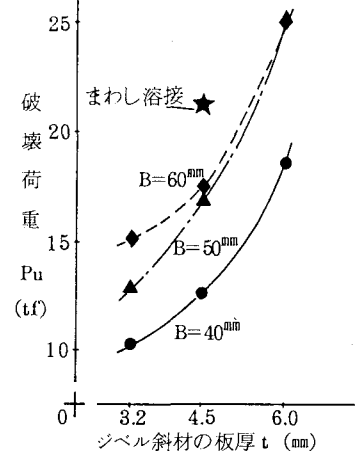


図9 ジベル斜材の板厚-破壊荷重-溶接長の関係

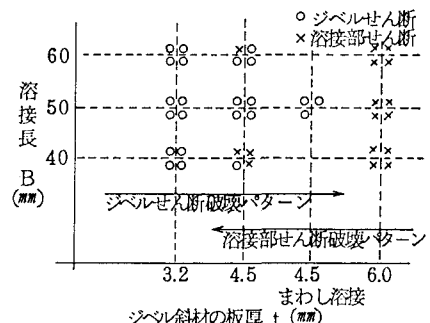


図10 破壊パターンの分布

3. 2 曲げ耐力実験

(1) 実験結果の総括

曲げ耐力実験で得られたひび割れ発生荷重、および破壊荷重の実験値と破壊荷重の計算値とをまとめたものを表3に示す。ここで、破壊荷重の計算値は、複鉄筋長方形断面を有する鉄筋コンクリート梁⁷⁾と仮定して求めた。また、計算に用いた材料定数は、それぞれについて行った材料試験結果を用いた。実験値は、同タイプの供試体について各2体の実験を行い、その結果を平均したものである。ちなみに、底鋼板の降伏点：2,865kgf/cm²、鉄筋の降伏点：3,900kgf/cm²、コンクリートの圧縮強度：290kgf/cm²およびコンクリートのヤング率： 2.5×10^5 kgf/cm²であった。

表3 曲げ耐力実験結果

表3より、正曲げを受ける合成床版の一般部の実験値と計算値とは、よく一致している。しかし、負曲げを受ける合成床版の実験値については、計算値に比べ、やや高めの値が得られた。これは、荷重をH形鋼を通して載荷したため、完全な集中荷重とならなかったことや、その他の供試体と比較してコンクリートの圧縮強度が高かったことなどが考えられる。

	正曲げ一般部		負 曲 げ		正曲げ排水桝部	
ジベル板厚	4.5mm	6.0mm	4.5mm	6.0mm	4.5mm	6.0mm
ひびわれ荷重 (tf)	12.0	18.0	6.0	4.0	4.0	6.0
破壊荷重 (tf) (実験値)	34.6	34.4	28.0	28.5	34.0	34.0
破壊荷重 (tf) (計算値)	34.3	34.3	22.8	22.8	34.3	34.3

また、排水桝をもち正曲げを受ける合成床版の耐力の計算は、排水桝の存在を考えず、充実断面で行ったところ、計算値と実験値とはよく一致した。このことより、排水桝の影響は、無視して計算してよいと考えられる。

さらに、今回の実験では、ジベル板厚を4.5mmと6.0mmとした場合の実験も行ったが、各実験とも曲げ耐力は同じであった。これは、押し抜きせん断試験結果からもわかるように、ジベルの板厚が4.5mmの場合でも底鋼板とコンクリートとが十分に合成されているので、耐力がジベルの板厚で決まらず、底鋼板の板厚に支配されているためと考えられる。そこで、より高い静的曲げ耐力を必要とする床版を計画する場合は、底鋼板の板厚を増厚するのが有効であると考えられる。

(2) 正曲げ実験結果

支間中央の荷重－たわみ曲線を、図11に示す。この図から、たわみは、最初、荷重の増加にしたがって、直線的に増加することがわかる。そして、荷重がP=12～13tfに達した段階で、たわみの傾きが変化する。これは、コンクリートにひび割れが発生し、全断面有効の状態（n=8）から、コンクリートの引張強度が作用しない状態（n=15）に変化するためである。その後、P=30tf付近までは、ほぼ直線的に増加し、荷重が30tfを過ぎると、荷重はほとんど増加せず、たわみだけが增加していく。これは、引張部材である底鋼板が降伏点に達しているためである。

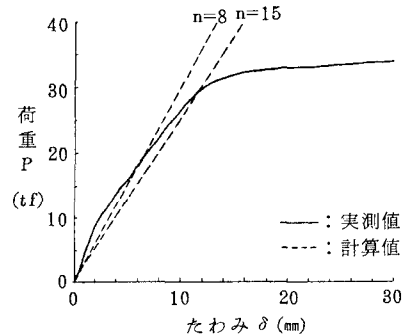


図11 支間中央の荷重－たわみ曲線

最終的には、圧縮側のコンクリートが圧縮強度に達し供試体は曲げ破壊に至った。この破壊過程において肉眼で確認できるひび割れが発生した荷重は、表3に示すように、ジベル板厚が4.5mmで12tf、また6.0mmで18tfであった。ひび割れは、ほぼ等間隔にトラス部材を貫くように発生した。図11に、鋼とコンクリートとのヤング係数比をn=8とn=15とした場合のたわみの計算値を示す。これより、ヤング係数比n=15として計算すれば、たわみは、安全側の評価ができることがわかった。

(3) 負曲げ実験結果

支間中央の荷重－たわみ曲線を、図12に示す。正曲げを受ける合成床版の場合と同様に、最初、たわみは荷重の増加に伴い、直線的に増加する。そして、荷重が $P = 6\text{tf}$ に達した時点で、たわみの傾きが変化する。また、荷重が $P = 25\text{tf}$ あたりで、引張鉄筋が降伏点に達し、たわみは急激に増加した。

最終的には、供試体は破壊せず、たわみが過大になったため実験を中止した。この時点の載荷荷重を破壊荷重とした。この破壊過程において、肉眼で確認できるひび割れが発生した荷重は、表3に示すように、ジベル板厚が 4.5mm で 6tf 、また 6.0mm で 4tf であった。ひび割れは、載荷点付近に向かって放射線状に発生した。

図12には、ヤング係数比 $n = 8$ と $n = 15$ とした時のたわみの計算値を示す。この図からは、 $n = 8$ あるいは $n = 15$ としても明確な差が見られない。しかし、この負曲げモーメントを受ける部分は、RC構造であるので、道路橋示方書に示された $n = 15$ を使用するのが望ましいと考えられる。

(4) トラス型ジベルを有する合成床版の合成作用

佐藤らの研究成果⁹⁾を用いて、引張部材である底鋼板と圧縮部材であるコンクリートとの合成作用を検討した。その結果、今回考案したトラス型ジベルを用いた合成床版の合成作用を評価すれば、この床版では、完全合成板としての軸方向力、および水平せん断力と比較しても、これらの作用力は8%の減少にとどまっている。また、完全合成板としてのたわみ、および曲げモーメントと比較しても、わずか4%だけ増加するという結果を得た。これらのことより、トラス型ジベルを有する合成床版の合成作用は高く、完全合成板として取り扱ってもよいと思われる。

3. 3 定点疲労実験

(1) 鉛直変位と載荷繰返し数の関係

各スパン中央部の鉛直変位と載荷繰返し数との関係を、図13に示す。この図より、スパン中央部の鉛直変位の測定値は、荷重ステップ1では、中間支点上（負曲げ部分）におけるひび割れの影響のため、若干、減少傾向が表れているものの、ほぼ理論値に等しい値を示している。さらに、荷重ステップ2、ならびに荷重ステップ3においても、ほぼ理論値と等しい値を示している。また、図14に示す400万回終了後の荷重－変位曲線も、ほぼ直線関係を示しており、弾性体としての健全性を維持していることがわかる。

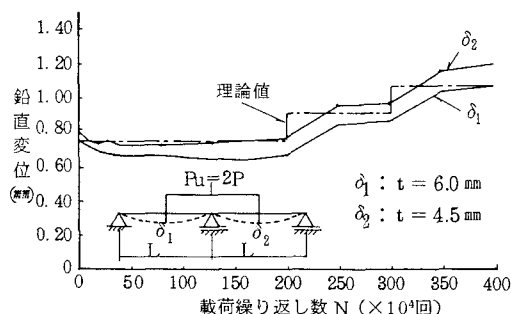


図13 スパン中央部の鉛直変位と載荷繰返し数との関係

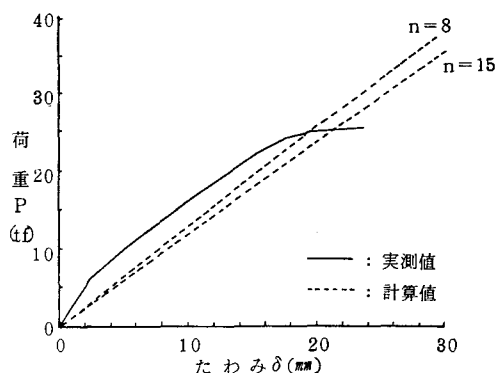


図12 支間中央の荷重－たわみ曲線

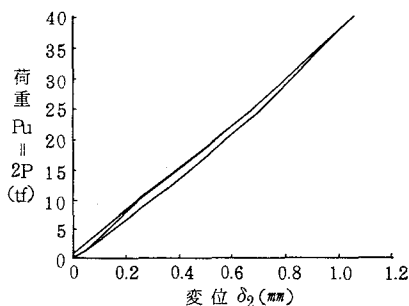


図14 400万回時の荷重－変位曲線

(2) ひずみと載荷繰返し数との関係

載荷繰返し数0回のときのひずみの測定値を基準とした供試体各部のひずみ測定値の比率と載荷繰返し数との関係を、図15に示す。この図より、引張側の鉄筋のひずみ ε_{s1} は、ひび割れの発生による引張側コンクリート断面の減少にしたがって、増加していく傾向が顕著に現われている。一方、圧縮側の鉄筋のひずみ ε_{s2} については、ほとんど変化が現われておらず、載荷荷重の比率と同様に推移している。

つぎに、正曲げコンクリートのひずみ ε_{U2} 、および底鋼板のひずみ ε_{L2} は、両者とも同様な傾向を示しており、載荷繰返し数が200万回までは、ほぼ一定のまま推移している。しかし、200万回以降では、負曲げ部分のひび割れの影響が大きくなり、負曲げ部分の断面力が正曲げ部分に再分配され、正曲げ部分のひずみが増加している。

ここで、本実験供試体の疲労損傷の度合いを確認するために、400万回時の静的試験結果より、上限荷重が作用するときの供試体各部に発生する応力の照査をすれば、以下のようである。

コンクリート（正曲げ部分）： $\sigma_o = 34.0 \leq \sigma_{oa} = 90$ (kgf/cm²)

底鋼板（正曲げ部分）： $\sigma_s = 485.1 \leq \sigma_{sa} = 1,400$ (kgf/cm²)

引張側鉄筋（負曲げ部分）： $\sigma_s = 896.7 \leq \sigma_{sa} = 1,400$ (kgf/cm²)

すなわち、本実験供試体は疲労実験終了後も健全な状態であることがわかる。

しかしながら、負曲げ部分（RC構造）の引張鉄筋については、コンクリートのひび割れの進行とともに、かなり高い応力レベルで繰返し作用を受ける。しかも、この部分の損傷は、供試体全体の安全性に重大な影響を及ぼすものと考えられるため、とくに疲労を考慮した照査を行うことが必要である。参考のために、鉄筋コンクリート用の異形鉄筋（材質：SD30）のS-N曲線⁷⁾に、400万回時の引張側鉄筋に発生する応力振幅をプロットしたものを、図16に示す。この図より、負曲げ部分の引張側鉄筋に発生する応力振幅は耐久限度の半分以下であり、これ以上の繰返し載荷を受けても、負曲げモーメントを受ける部分の鉄筋は、疲労破壊に至らないものと判断される。

(3) ひび割れの発生状況、および、ひび割れ幅と載荷繰返し数との関係

400万回終了時のひび割れの発生状況を、図17に示す。供試体の中間支点近傍については、繰返し数10万回までに、コンクリートにひび割れが発生した。しかし、その後、400万回に至るまで、ひび割れの進行

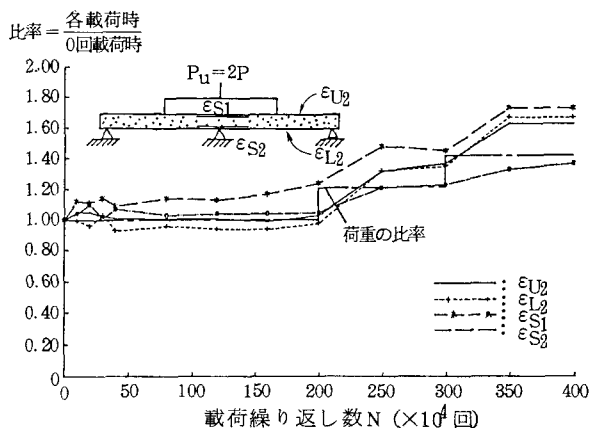


図15 供試体各部のひずみと
載荷繰返し数との関係

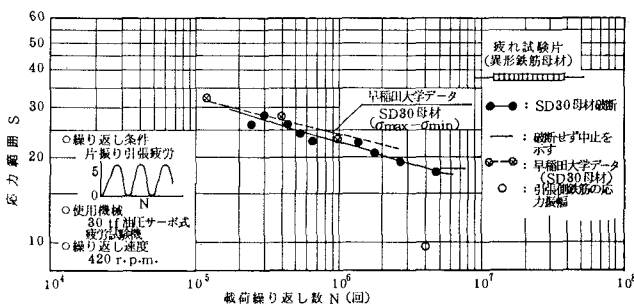


図16 鉄筋コンクリートの異形鉄筋のS-N曲線

が見られるものの、新しいひび割れは、あまり発生しなかった。一方、正曲げモーメントを受ける部分については、鉄筋コンクリート構造部分の剛性の低下に伴って、モーメントが正曲げモーメントを受ける部分に分配され、コンクリートのひび割れの発生が徐々に増加した。以上のことより、合成床版構造部（正曲げモーメントを受ける部分）は、ひび割れ損傷に強く、ほとんど、ひび割れを発生しないことがわかった。

つぎに、コンクリートのひび割れ幅は最終的に最大で0.1mmまで増加した。しかし、このひび割れ幅は、設計上許容され得るひび割れ幅0.2mmの半分である。さらに、底鋼板とコンクリートとの残留ずれの最大値も、0.04mm（許容残留ずれ0.08mm）であった。このことより、本実験供試体は繰り返し載荷回数が400万回終了後も疲労状態に至っていないものと判断される。

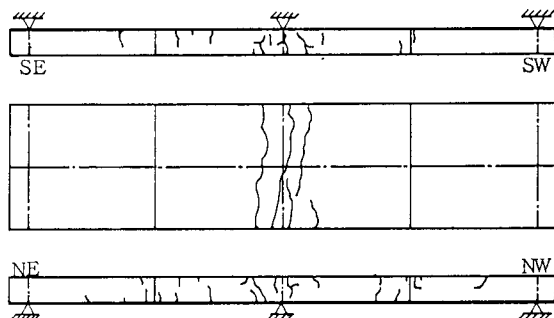


図17 ひび割れ発生状況の一例（400万回時）

4. まとめ

本研究は、トラス型ジベルを用いた合成床版が道路橋の床版として採用できるか否かを、実験的研究を通じて検討したものである。そのため、トラス部材がずれ止めとして機能し、充填コンクリートと底鋼板とが一体となって外力に抵抗するかどうかを確認することを目的として実験を行った。そして、最適なジベルの板厚、および溶接長、ならびに底鋼板の板厚を決定した。さらに、それらの部材を使用した床版に輪荷重を想定した定点繰り返し荷重のもとで、弾性体としての健全性がどのように低下するか、すなわち疲労損傷がトラス型ジベルを用いた合成床版の全体の挙動にどのように影響をおよぼすかを調べた。この載荷条件でもトラス型ジベルを用いた合成床版は、疲労損傷に対して問題がないことがわかった。

具体的にこれらの研究で得られた結論を項目別にまとめると、以下のとおりである。

(1) 押し抜きせん断試験

- ① 耐力は、ジベル厚さに比例し、ジベルの溶接長は流入する応力を平均化するのに役立ち、50mm以上で有効である。
- ② まわし溶接は、応力集中を緩和し、応力をよりスムーズにジベルに伝えるために耐力を高める。
- ③ ジベル板厚 $t=4.5\text{mm}$ のとき、ジベルおよび溶接部の破壊が混在している。したがって、この板厚が、最も経済的である。

(2) 曲げ耐力実験

- ① 合成床版の曲げ耐力は、複鉄筋長方形断面を有するRC梁に置き換えて計算できる。
- ② 排水桝の影響は、無視することができる。
- ③ トラス型ジベルのジベル板厚は、静的曲げ耐力に影響しない。
- ④ たわみは、ヤング係数比 $n=15$ とした方が実験値より大きくなるため、安全側の評価となる。
- ⑤ 底鋼板の板厚を4.5mmとすれば、所要の曲げ耐力が得られる。

(3) 定点疲労実験

- ① 合成床版は、過酷な疲労実験終了後も弾性体としての機能を維持している。
- ② R C構造部分には、疲労の進行が見られる。しかし、発生している応力振幅から判断すれば、耐久限度の半分以下であった。
- ③ 合成床版は、コンクリートのひび割れ損傷に対して特に問題を有していない。

5. あとがき

本研究により、最適なトラス型ジベル形状および所要の静的な曲げ耐荷力を有する底鋼板の板厚が設定できた。さらに、静的実験で決定された部材を用いて製作した供試体に輪荷重を想定した定点繰り返し載荷を行っても、疲労損傷に対して問題がないことがわかった。今後、さらに検討すべき項目として、より実際的な交通荷重を再現するための輪荷重走行疲労実験を実施し、各部材の疲労や耐久性についてより深く検討を行う予定である。

なお、耐荷力実験には、大阪市立大学工学部元4回生の谷沢徹也氏（現 松尾橋梁橋）に、また疲労実験には同大学院修士1回生の矢野直樹氏に御協力をいただいた。ここに、記して深謝する。

参考文献

- 1) 赤尾, 他: トラス型ジベルを用いた橋梁用合成床版の開発, 川崎重工技報第91号, 1986年2月
- 2) 災害科学研究所: トラス型ジベルを用いた合成床版の実験的研究, 1990年3月
- 3) 土木学会: 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 1989年3月
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II, 鋼橋編, 丸善, 1990年2月
- 5) 岡田 清: 鉄筋コンクリート工学, 朝倉書店, 1987年3月
- 6) 佐藤浩一, 渡辺昇, 他: 不完全合成桁と合成板の解析理論の相似性について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第45号, pp55-60, 1989年
- 7) 日本材料学会: 金属材料疲労データ集, Vol.1, 1982年

(1990年10月12日受付)