

論文

[2008] トラス型ジベル付合成床版の耐力に関する研究

正会員 浜田純夫 (山口大学工学部)

正会員 兼行啓治 (山口大学工学部)

正会員○半田剛也 (住友建設)

正会員 米田俊一 (宇部興産)

1. まえがき

近年の交通荷重の量的増加により、わが国の道路橋は過酷な供用下におかれている。この為、既設橋梁の破損、特に鉄筋コンクリート床版の損傷が増えてきており、その補修、架替えにはできる限りの急速施工が要求されている。またその一方で、既設の主桁の力学条件、取付道路との関係、架設地点の自然条件などの面から死荷重や桁高が大幅に制限される場合が多く、なおかつ拡幅によるきびしい力学条件が課せられる場合も少なくない。

こうした実状から、軽量で力学特性に優れ、工期の短縮化、省力化が可能でかつ経済性に富む橋梁や床版構造の開発、実用化が強く望まれている。型枠を兼用した鋼板上にコンクリートを打設一体化した、いわゆる鋼・コンクリート合成版構造は、上記の諸条件を満たす合理的な構造形式として着目されており、現在いくつかの合成床版や床版橋が、各メーカーにおいて開発され、実用に供されている。また、合成版には鋼板を埋殺し型枠として用いる被覆型合成版と、鋼板を鋼断面とする鋼製型枠合成版とがあり、トラス型ジベルを用いたものには後者が多い。

本研究に於ける立体トラス型ジベルを有する合成版¹⁾²⁾とは、図-1に示されるように、強度部材と型枠を兼用する鋼板の上面にジベルを構成するフラットバーまたは丸鋼と圧縮鉄筋をワーレントラス状に組んで溶接し、その上にコンクリートを打設し合成、一体化したものである。また、トラス模様を鋼板をくり抜き、底板に溶接してトラス型ジベルとして使用することもできる。鋼材の加工および溶接作業はすべて工場で行い、架設現場では、この立体トラス構造の剛性を利用して型枠、支保工を省略してコンクリートを打設することができる。又、新設プレキャスト床版としてもトラス型ジベル付き合成版はかなり有効な部材であると考えられる。本研究は、種々の力学特性と施工性(短縮化、省力化)に優れ、かつ多様な構造への適用性に富む立体トラス型ジベル付き合成版構造の開発とその実用化を目的とし、合成床版橋への適用を想定して、コンクリート打設後の主にプレキャスト部材としての力学特性について、はり供試体による曲げ載荷試験を実施し、検討するものである。

また、床版自重のさらなる軽量化を計り、石炭灰系人工軽量骨材³⁾を粗骨材として用いたものも実験対象とした。本研究に使用した石炭灰系人工軽量骨材は、産業廃棄物の石炭灰を原料とし、石炭灰中に含まれている残存未燃焼炭分の自己燃焼を利用したもので、コスト的にはかなり安価なものである。本研究では、この石炭灰系人工軽量骨材の基本的な材料試験等を行い、その性質を把握した上ではりの試験に使用した

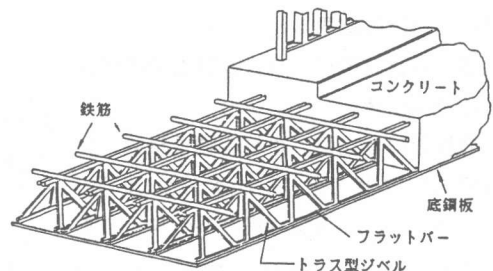


図-1 トラス型ジベル付合成版

ものである。前述の立体トラス型ジベル付き鋼板が構造的な軽量化であるのに対し、材料的な軽量化を目的とするものであるが、普通コンクリートに比べて若干引張強度、せん断強度が劣る⁴⁾のも事実である。このことから、合成版においても軽量コンクリート使用の場合にはせん断耐力が低下する⁵⁾ことが考えられる。さらに、合成版のせん断耐力についてはその研究も少ないことから、本研究では主に合成版としたときのせん断耐力について実験・研究を行ったものである。

2. 実験概要

軽量骨材の性質の把握を目的として、吸水率試験など各骨材試験、硬化コンクリートとして各強度試験を行った。

合成版としては、表-1に示されるような各立体トラス型ジベル付き鋼板の上にコンクリート(表-2の配合)を打設し、合成を行ったものを供試体とした。供試体の一例を図-2に示す。尚、供試体No.1~No.19については鉄筋を折り曲げてトラス型ジベルを作製したものであり、No.20~No.31は鋼板をくり抜いてトラス型ジベルを作製したものである。また、供試体No.23~No.25、No.29~No.31はそのトラス形式をブラットトラスにしたものである。また、供試体上面から軸方向へのひび割れを防ぐため、横方向に補強鉄筋を一部供試体に用いた。

載荷方法としては、30t試験機を用いて荷重点間距離15cmの中央2点載荷(No.13~No.16については中央一点載荷)とし、0.5t刻みで載荷した。

なお、使用鋼材は板としてSS41、トラス材及び補強材としてSD30を用いた。

表-2 コンクリート配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	
60	41	190	317	737	砕石	軽骨
					1111	553

3. 結果及び考察

3.1 軽量コンクリート

(1) 骨材試験結果

表-3に石炭灰系軽骨と砕石の物理試験結果を示す。

軽量骨材は比重、単位容積重量共に砕石の約1/2の値であり、吸水率は1.50%で

あった。この吸水率は造粒系骨材としてもかなり小さなものであり、天然砕石の約2倍程度を示している。また、吸水率が小さいということは、従来の軽量骨材の難点であるプレウェッチングや水量補正の面で極めて有利である。また、本実験に用いた軽量骨材は、従来品に比べて加圧吸水量が著しく少ないという報告²⁾もあり、従来の軽量骨材の大きな欠点であるコンクリートのポ

表-1 実験供試体

No	床版厚 (cm)	スパン (m)	斜材 本数	種類	鉄筋径 (mm)
1	20	0.8	4	軽量	9
2	20	0.8	4	軽量	9
3	20	0.8	4	普通	9
4	20	0.8	6	軽量	9
5	20	0.8	6	軽量	9
6	20	0.8	6	普通	9
7	20	1.2	6	軽量	9
8	20	1.2	6	軽量	9
9	20	1.2	6	普通	9
10	20	1.2	8	軽量	9
11	20	1.2	8	軽量	9
12	20	1.2	8	普通	9
13	16	1.3	10	軽量	13
14	16	1.3	10	普通	13
15	16	1.3	10	軽量	13
16	16	1.3	10	普通	13
17	16	2.0	16	軽量	13
18	16	2.0	16	普通	13
19	16	2.0	16	軽量	13
20	16	1.2	12	軽量	20×4.5
21	16	1.2	12	普通	20×4.5
22	16	1.2	12	軽量	20×4.5
23	16	1.2	10	軽量	20×4.5
24	16	1.2	10	普通	20×4.5
25	16	1.2	10	軽量	20×4.5
26	16	2.0	20	軽量	20×4.5
27	16	2.0	20	普通	20×4.5
28	16	2.0	20	軽量	20×4.5
29	16	2.0	18	軽量	20×4.5
30	16	2.0	18	普通	20×4.5
31	16	2.0	18	軽量	20×4.5

* No.20~No.31の鉄筋径はトラス材断面寸法。

* 斜材本数はスパン中の数とする。

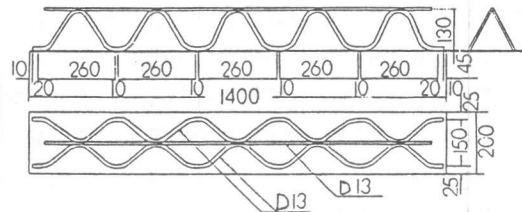


図-2 供試体例(No.10)

表-3 骨材試験結果

骨材の種類	表乾比重	24時間 吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率 (%)	単位容積 重量 (kg/m ³)
石炭灰系軽骨	1.34	1.50	64	6.42	848
砕石	2.70	0.62	65	6.25	1650

ンプ圧送性及び凍結融解抵抗性の面のほか、強度の面においても優れた性能が期待できるものである。

本研究の軽量骨材の粒度分布は土木学会基準の示す範囲内にあり、最大寸法は15mmであった。また、粗粒率は6.42であり、最大骨材寸法が15mmであることを考えれば、標準的である。骨材自体の強度を表す40トン破碎値は49%であり、10%破碎荷重は6.3tonであった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度とセメント水比の関係を図-3に示す。この図中の実線は普通コンクリートに対するセメント技術協会の実験公式である。全体的にはほぼこの実線と一致しており、軽量コンクリートと云えども、高強度が発現されることがわかる。今回の実験の範囲であるセメント水比3.5までは、前述のようにセメント協会の式を満足するものであり、普通コンクリートと同様のセメント水比～圧縮強度の関係をを用いることができる。

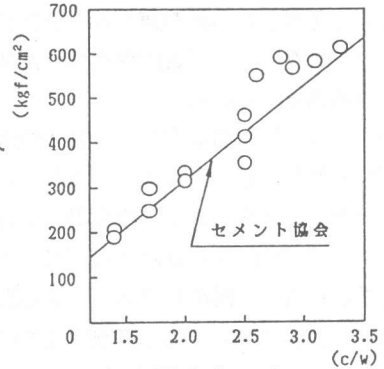


図-3 圧縮強度～C/W

(3) 曲げ・引張強度

本実験に用いた軽量コンクリートは、曲げ強度は圧縮強度350kg/cm²に対し、25.1kg/cm²であり圧縮強度の約1/7程度、割裂引張強度は26.3kg/cm²であり圧縮強度の約1/16程度である。この値は普通コンクリートに比較して10～20%程度低く、軽量骨材自体が引張に対して若干弱いということを示唆するものである。また、割裂試験後の破断面では、軽量骨材自体が割れており、このことから、破断面中の軽量骨材の占める面積分が有効な断面として十分に働いていないということが考えられる。

3.2 トラス型ジベル付プレキャスト

ト合成版の静的曲げ載荷試験結果

本実験に用いたコンクリートの平均圧縮強度 $f'c$ および弾性係数 Ec は普通コンクリートで $f'c=346\text{kg/cm}^2$ 、 $Ec=3.41\text{kg/cm}^2$ 、軽量コンクリートで $f'c=350\text{kg/cm}^2$ 、 $Ec=2.04\text{kg/cm}^2$ であった。また鋼材はSS41で降伏応力は 26kg/cm^2 であった。

表-4に破壊荷重及び計算値を示す。尚、この計算値はコンクリート標準示方書に基づくものであり、そのせん断耐力においてはトラス材をせん断補強筋として考えたものである。また、材料係数、部材係数は1を用いている。

(1) 曲げ耐力

曲げ耐力に関しては、折り曲げ鉄筋型 (No.13～No.19) が計算値の1.03～1.32倍、くり抜き鋼板型 (No.26～No.

表-4 破壊荷重及び各計算値

No	実験値 (荷重) (t)	計算値 (荷重) (t)						破壊形状
		曲げ示方書	示方書	θ_1, θ_2 を考慮	せん断圧縮材を無視	軽量を考慮	βp を操作	
1	12.0	29.1	15.1	14.5	14.0	12.1	9.1	せん断
2	10.3	29.1	15.1	14.5	14.0	12.1	9.1	せん断
3	13.9	29.1	15.1	14.5	14.0	14.0	10.3	せん断
4	14.9	29.1	17.2	16.1	15.9	13.9	11.0	せん断
5	13.2	29.1	17.2	16.1	15.9	13.9	11.0	せん断
6	15.1	29.1	17.2	16.1	15.9	15.9	12.2	せん断
7	9.4	18.0	14.7	14.2	13.8	11.9	8.9	せん断
8	9.6	18.0	14.7	14.2	13.8	11.9	8.9	せん断
9	10.7	18.0	14.7	14.2	13.8	13.8	10.1	せん断
10	11.1	18.0	16.1	15.2	15.0	13.0	10.0	せん断
11	11.3	18.0	16.1	15.2	15.0	13.0	10.0	せん断
12	12.4	18.0	16.1	15.2	15.0	15.0	11.3	せん断
13	11.9	11.2	24.0	21.5	18.4	16.5	13.3	曲げ
14	12.0	11.2	24.0	21.5	18.4	18.4	14.3	曲げ
15	13.4	12.3	21.6	19.3	16.5	14.8	11.6	曲げ
16	16.2	12.3	21.6	19.3	16.5	16.5	13.3	曲げ
17	7.6	7.4	21.6	19.1	17.1	15.8	12.8	曲げ
18	8.1	7.4	21.6	19.1	17.1	17.1	14.3	曲げ
19	7.8	7.4	23.5	21.0	19.0	17.4	14.6	曲げ
20	17.6	13.0	18.7	17.6	16.5	15.0	12.2	せん断
21	19.1	13.0	18.7	17.6	16.5	18.5	13.7	せん断
22	17.6	13.0	21.0	19.8	18.7	17.2	14.4	せん断
23	15.4	13.0	24.4	21.2	16.7	15.2	12.4	せん断
24	17.5	13.0	24.4	21.2	16.7	16.7	13.9	せん断
25	17.5	13.0	26.7	23.5	19.0	17.4	14.6	せん断
26	11.3	7.4	18.7	17.6	16.5	15.0	12.2	曲げ
27	11.3	7.4	18.7	17.6	16.5	16.5	13.7	曲げ
28	10.6	7.4	21.0	19.8	18.7	17.2	14.4	曲げ
29	11.4	7.4	24.4	21.2	16.7	15.2	12.4	曲げ
30	11.5	7.4	24.4	21.2	16.7	16.7	13.9	曲げ
31	10.8	7.4	26.7	23.5	19.0	17.4	14.6	曲げ

31) が計算値の1.43~1.55倍を示している。このことから、本合成版の曲げ耐力に関しては、示方書の式で十分であると考えられる。

(2) せん断耐力

表-4から分かるように、せん断耐力に関しては示方書の計算値よりも低い耐力となった。この原因として第一に考えられることは、トラス材のせん断補強効果が計算値ほどではないということである。この計算値ではトラス材をせん断補強筋として考えているが、ジベルとしてのトラス材がスターラップと同程度のせん断耐力を有するのかが疑問である。このトラス材とスターラップの構造上の違いは、

- ① トラス材が断面内および軸方向水平面内で特定の角度を有している(図-4, 5参照)。
- ② トラス構造上圧縮側となるトラス材が存在する。

ということである。このうち①については、そのトラス材が受け持つせん断力に、補正係数

$$\{(\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_2) / 2\}^{1/2} \quad (\text{せん断ひび割れ角度} 45^\circ \text{の時}) \quad \text{--- (1)}$$

を乗じれば、一般のスターラップと計算上同程度となる。②については、実験値におけるプラットトラスのトラス構造上圧縮側のトラス材のひずみが、せん断補強筋としての引張ひずみを示しておらず、僅かに圧縮側か、ほとんどひずみ増加がみられない程度であったことから、トラス構造上圧縮側のトラス材は、プラットトラスのような鉛直材であってもせん断耐力の計算に用いるべきではない。

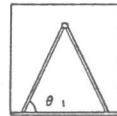


図-4 角度 θ_1

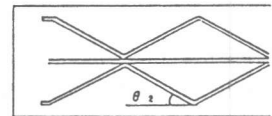


図-5 角度 θ_2

また、軽量コンクリートの影響については、本研究に用いた軽量コンクリートのせん断強度が、せん断強度推定式⁶⁾、

$$\tau_b = \sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t} / 2 \quad (\sigma_c: \text{圧縮強度}, \sigma_t: \text{引張強度}) \quad \text{--- (2)}$$

によると、普通コンクリートに比べて20%程度せん断強度が低いことから、その合成版のせん断耐力 V_{yd} ⁷⁾ については、コンクリート部(及び主筋)が受け持つせん断耐力 V_{cd} に0.8を乗じて、

$$V_{yd} = 0.8V_{cd} + V_{sd} \quad (\text{但し、軽量コンクリート使用の場合}) \quad \text{--- (3)}$$

とするべきである。尚、0.8という係数は本研究における軽量コンクリートと普通コンクリートのせん断強度の比であるから、軽量コンクリートの種類、配合等により再検討の必要がある。また、この式を用いた軽量コンクリートの場合と普通コンクリートの場合との合成版のせん断耐力の差は、実験値における差とほぼ一致するものである。以上のような点を考慮に入れることにより、くり抜き鋼板を用いたトラス型ジベル付合成版に於ける計算上のせん断耐力は、全て実験値に対して安全側の評価を与えるものである(表-4参照)。しかし、本研究における折り曲げ鉄筋使用のトラス型ジベル付合成版(No.1~No.12)に関しては、前述のような計算値を用いても、依然としてそのせん断耐力は計算値以下である。この折り曲げ鉄筋型がくり抜き鋼板型と異なる点は、図-6に示すようにその溶接長の違いから、折り曲げ鉄筋型には鋼板にコンクリートが付着していないfreeの部分が存在するということと、図-7

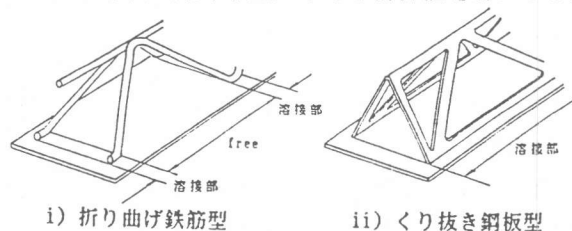


図-6 溶接部の違い

に示すように鉄筋の曲げ半径からそのトラス材軸が鋼板上で交わらないということである。前者の付着のない鋼板部分については、RC（鉄筋コンクリート）における主筋の受け持つべきコンクリート部のひび割れの分散性、ひび割れの進展抑制効果に欠けるものと考えられる。コンクリート標準示方書におけるせん断耐力は、この主筋の影響としVcd中に βp を含む形で表わされている。ここで βp は、

$$\beta p = \sqrt[3]{100 p w} \quad (p w = A_s / b d) \quad \text{--- (4)}$$

であり、主筋の断面積をその式中に含むものであるが、この折り曲げ鉄筋型の付着のない鋼板部分はせん断耐力に寄与するものが少ないという点で、RCと同等の βp を用いるのには問題がある。そこで、本研究における実験結果を対象として βp を求めた結果、

$$\beta p = \sqrt[3]{25 p w} \quad (p w = A_s / b d) \quad \text{--- (5)}$$

とすることにより、実験結果を安全側に評価するせん断耐力が得られた（表-4参照）。この式はさらに検討の必要があるが、現時点では実験式としてこの式を提示できるものと考えられる。

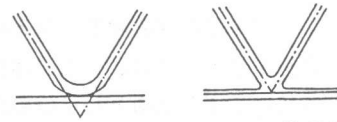
後者のトラス材軸が鋼板上で交わらないということからは、鋼板上の溶接部にトラス材軸力によるモーメントが生じるということが起きる。このことは鋼板に不均一な力が作用するという点であり、コンクリートに局部的なひび割れを生じさせ、せん断耐力を低下させる要因となり得る。また、このことは曲げ耐力においても同様であり、さらに完全なトラス構造を成していないということから、トラス構造による補剛効果もくり抜き鋼板型に比べ劣るものである。

(3) 各特性

図-8に曲げ破壊を生じたNo.18の供試体とせん断破壊を生じたNo.23の供試体の荷重-たわみ曲線を示す。RC部材と同様に曲げ破壊とせん断破壊の延性の差を示している。鋼板およびコンクリート圧縮縁のひずみについては、くり抜き鋼板型は比較的弾性理論値に近い挙動を示すが、折り曲げ鉄筋型においては、前述のような意味で合成効果が小さく、コンクリートの負担が大きくなる傾向がある（図-9参照）。

合成版におけるコンクリートと鋼板のずれに関しては、そのひび割れ幅の大きさが関与しており、ひび割れ分散性やひび割れ進展抑制効果の小さな折り曲げ鉄筋型はずれが大きくなる傾向がある。さらに、せん断破壊の供試体については、その斜めひび割れ面にそってコンクリートを押し抜こうとする力が働くので、ずれは大きくなる。

合成版のたわみは、コンクリートと鋼板のずれを許すという点からRCに比べて付加的なたわみ加わる。これにより、ずれの大きなものがたわみも当然大きくなる。



i) 折り曲げ鉄筋型 ii) くり抜き鋼板型
図-7 トラス材軸の交差

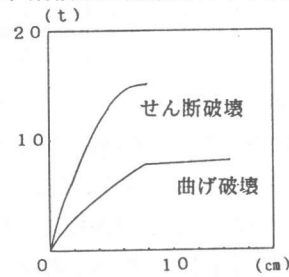
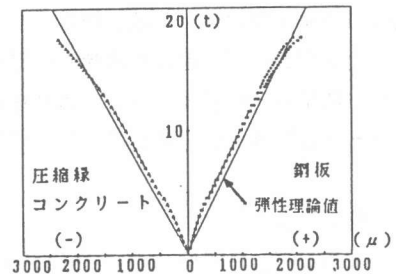
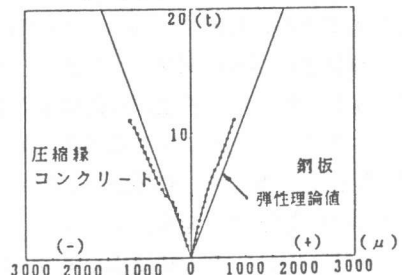


図-8 荷重-たわみ曲線



i) くり抜き鋼板型



ii) 折り曲げ鉄筋型

図-9 コンクリート・鋼板ひずみ

トラス材のひずみについては、その初期においてはほとんど力を受けていないが、ひび割れが発生することによりひずみ増加が始まる。このことから、合成版におけるジベルはひび割れ（又はずれ）が発生することによって、初めてその力を発揮するということが伺える。また、そのひずみに関しては、ずれ止めとしてのものと、せん断補強筋としてのものを合成したものとなる。

クラックパターンについては、図-10に示すように折り曲げ鉄筋型はひび割れの分散性が悪く、溶接部付近にひび割れが入ることが多い。くり抜き鋼板型においてはワーレントラス（図-11参照）、プラットトラス（図-12参照）共にひび割れの分散性は向上しており、ひび割れの進展も効果的にトラス材が抑制している。

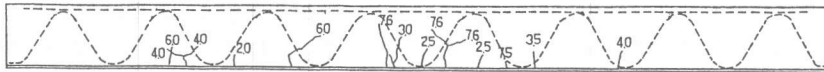


図-10 ひび割れ図 折り曲げ鉄筋型

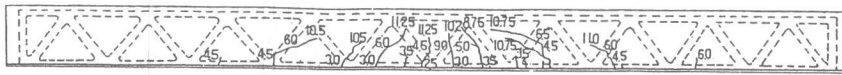


図-11 ひび割れ図 くり抜き鋼板型（ワーレントラス）



図-12 ひび割れ図 くり抜き鋼板型（プラットトラス）

4. まとめ

本研究に用いた人工軽量骨材は、従来のものに比べかなりの低吸水率となっており、品質的にも安定しているものである。また、コンクリート圧縮強度に関しては、普通コンクリートと同様にC/W比より算定でき、高強度にも十分耐え得る。ただし、引張強度に関しては、普通コンクリートより10~20%低くなる傾向がある。

トラス型ジベル付合成板の曲げ耐力に関しては、コンクリート標準示方書の式で十分である。くり抜き鋼板型においては、軽量コンクリートの場合でも示方書の1.5倍程度の曲げ耐力を得た。

トラス型ジベル付合成板のせん断耐力に関しては、示方書の耐力以下であったため、既述の様なせん断耐力式が提案できる。これらを用いると、軽量コンクリートを用いた合成版も普通コンクリートと同様に適用することが可能である。

参考文献

- (1) 太田俊昭、日野伸一 他：立体トラス型ジベルの力学特性と道路橋床版への適用、土木構造・材料論文集 第23号 1987.1 PP.67~76
- (2) 太田俊昭、日野伸一 他：トラス型ジベルを有する鋼板-コンクリート合成桁の力学特性、合成構造の活用に関するシンポジウム論文集 1986.9 PP.239~245
- (3) 南条 毅一 他：石炭灰系低吸水性軽量骨材とこれを用いたコンクリートの基礎的性質について、コンクリート工学年次報告論文集 1987 PP.19~24
- (4) 岡田 清 他：人工軽量コンクリート、朝倉書店
- (5) 浜田 純夫 他：軽量コンクリート合成床版の開発に関する研究、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集 1989.9 PP.7~13
- (6) 西村 昭、藤井 学：土木材料、森北出版
- (7) 土木学会：コンクリート標準示方書