

[2090] 立体トラス型ジベルを有する鋼板-コンクリートはりの構造特性

正会員 太田 俊昭 (九州大学工学部)
 正会員 日野 伸一 (九州大学工学部)
 正会員 ○興石 正巳 (清水建設技術部)
 正会員 北之園 宏 (建設省九地建)

1. まえがき

型枠兼用の鋼板上にコンクリートを打設し、一体化した鋼・コンクリート合成床版は、すぐれた力学特性をもち、工期短縮、省力化施工を可能とする経済的、合理的な構造形式として着目されている。立体トラス型ジベルを有する合成版もその一つであり、特に立体トラスが、架設系においては型枠、支保工が不要となるような高い剛性をもつ主構造部材として働き、またコンクリート打設後においては、ずれ止め機能と共にコンクリートのせん断補強機能をも有する合理的な構造といえる [1] [2]。

本研究は、このような立体トラス型ジベルを有する鋼・コンクリート合成版構造の基本的力学特性を把握し、設計上必要となる基礎資料を得ることを目的として行ったものである。まず、ジベルの傾斜角を変化させた立体トラス型ジベルおよび比較用のスタッドについて、二面押抜きせん断試験を行い、ずれ止めとしてのせん断性状について検討した。続いて、このトラス型ジベルを有する合成はり（以下、TSC合成はりと呼ぶ）およびそれと同等諸元をもつRCはりに対して、静的曲げ破壊試験を実施し、両者の曲げ性状の比較、ジベルのせん断力負担などについても検討した。

2. 立体トラス型ジベルの押抜きせん断挙動

2.1 実験概要

立体トラス型ジベルの傾斜角の違いによる押抜きせん断挙動について検討するため、図-1に示すような比較用のスタッドを含む4種類のジベル供試体について、二面押抜き試験を行った。スタッドおよびトラス型ジベルは、いずれもジベル材の断面直径を13mm、高さをほぼ10cmとして統一した。トラス型ジベルは鉄筋棒鋼φ13 (SR24)を曲げ加工して用い、その押し抜き方向の傾斜角はおよそ45° (Bタイプ)、60° (Cタイプ)、85° (Dタイプ)の3種類とした。押抜き供試体は、図-2に示す形状寸法とし、供試体数は各タイプ3体、合計12体である。一面あたりのジベル量は立体トラス1組 (スタッド4本相当)であり、使用したコンクリートの圧縮強度は300 kg/cm²である。

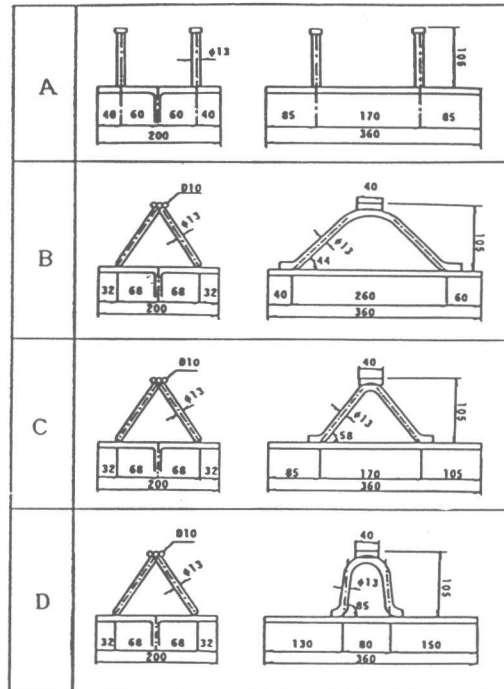


図-1 トラス型ジベルの形状寸法

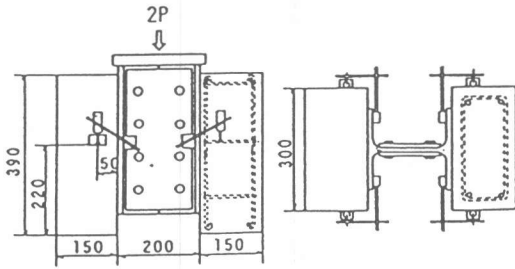


図-2 押抜き試験供試体

表-1 ジベルの各耐力の比較

供試体	許容耐力 $Q_a(t)$	限界耐力 $Q_c(t)$	終局耐力 $Q_u(t)$	Q_c/Q_a	Q_u/Q_a	Q_u/Q_c	ずれ常数 $\times 100(t/mm)$
A	3.5	10.6	25.8	3.1	7.4	2.5	0.90
B	4.8	20.1	31.8	4.2	6.6	1.6	1.41
C	3.5	18.9	38.4	5.4	11.0	2.1	2.15
D	0.5 (3.5)	17.0	37.7	33.9 (4.9)	75.4 (10.8)	2.3	1.43

注) () は、式(1)を用いた算定値

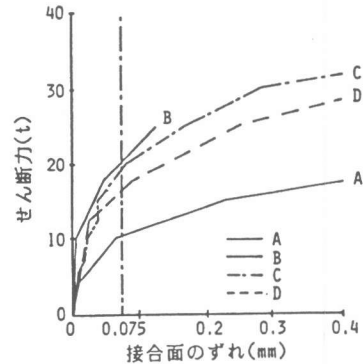


図-3 せん断力-残留ずれ曲線

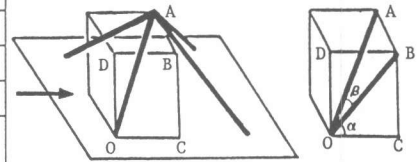


図-4 トラス型ジベルの傾斜角

押抜き試験の荷重方法は、静的に繰返ししながら徐々に最大荷重を増加させていく反復増加法を用い、測定項目は、接合面のずれ量、ジベル材およびH型鋼接合面のひずみである。そして、残留ずれ量が0.075 mmとなる繰返し最大荷重時の作用せん断力を限界せん断耐力とした〔3〕。また接合面のずれ量が0.5 mmを越えると荷重が安定しにくくなるので、それ以降は除荷をせず、最大荷重に至るまで漸増荷重した。

2.2 実験結果と考察

(1) 接合面のずれ

繰返し荷重における各ステップごとの最大荷重と接合面の残留ずれの関係について、ジベルの種類による比較を図-3に示す。図より、低荷重レベルにおいては、接合面の自然付着あるいは摩擦力によってずれはほとんど生じず、それが消滅した後、荷重の増加と共にずれも次第に増大することがわかる。これを種類別に比較すると、スタッド(Aタイプ)に比べてトラス型ジベルのずれ剛性はかなり大きいことが明らかである。また、せん断力-総ずれ曲線の限界せん断力における割線係数を、ジベルのずれ常数として求めたものを表-1に示す。このずれ常数は、不完全合成桁などの挙動追跡に必要なものであり、スタッドでは約90 t/mm、立体トラス型ジベルでは約140~215 t/mmの値が得られた。

(2) ずれ止め耐力

一般に、スタッドの一本あたりの許容せん断耐力は、道路橋示方書〔4〕によって次式のとおりに規定されている。

$$Q_a = 30 d^2 \sigma_{ck}^{1/2} \quad (H/d > 5.5) \quad (1)$$

ここに、 H 、 d はスタッドの高さおよび軸部の直径、 σ_{ck} はコンクリートの設計基準強度である。また、立体トラス型ジベルの許容せん断耐力は、馬蹄形ジベルの輪形筋を参考にしてここでは次式によってその許容せん断耐力を定義する〔1〕。

$$Q_a = \sigma_{sa} A_s \cos \alpha \cos \beta \quad (2)$$

ここに、 σ_{sa} 、 A_s はトラス型ジベルの許容引張応力度および断面積、 α 、 β はそれぞれ図-4に

示すようなトラス材の傾斜角である。なお、本実験供試体における一面あたりの許容せん断耐力 Q_c は、トラス型ジベルまたはスタッドが4本分であるため、式(1)、(2)で算定される値の4倍である。以上の設計せん断力、また限界および終局せん断耐力についてジベル種類による比較を表-1に示す。なお、表中Dタイプの()内の値は、スタッドの式(1)を用いた結果である。これより、トラス型ジベルの限界耐力、終局耐力はスタッドに対してそれぞれ1.6~1.9倍、1.2~1.5倍の値を示すのがわかる。また、トラス型ジベルの傾斜角による耐力の比較をすると、限界耐力では $85^\circ < 60^\circ < 45^\circ$ 、また終局耐力では $45^\circ < 85^\circ < 60^\circ$ の順となっている。傾斜角 45° の場合に限界耐力が最大であるのに対し、終局耐力が最小となるのは注目すべきことである。これは、傾斜角が小さくなるにつれて作用せん断力に対するトラス型ジベルの抵抗メカニズムが、せん断型から軸力型に移行し、ジベル材とコンクリートの相対すべり(抜け出し)が顕著となるためと考えられる。

次に、式(1)、(2)による許容耐力と限界、終局の各耐力を比較すると、スタッドの場合限界に対して3破壊に対して7程度の安全率を確保している。一方、トラス型ジベルについては、傾斜角 45° の場合はそれぞれ5、11 また 60° の場合は4、7となり、式(2)による許容耐力式はスタッドと同等程度の安全率を保証でき、妥当なものといえる。しかし、傾斜角が 85° とほとんど直立に近くなった場合には、式(2)による許容せん断力は極端に過小評価することになり、むしろスタッドの式(1)を適用する方が妥当な結果を与えることが判明した。

3. TSC合成はりの曲げ挙動

3.1 実験概要

次にトラス型ジベルの傾斜角の違いによる曲げ特性を把握するために、図-5に示すような3

種類のTSC合成はりおよびそれと同等断面を有するRCはり、合計15体に対して静的曲げ破壊試験を行った。トラス型ジベルは鉄筋鋼棒φ9(SR30)を曲げ加工して用い、そのスパン方向の傾斜角は、 55° (Eタイプ)、 65° (Fタイプ)、 80° (Gタイプ)の3種類とした。ここで各供試体におけるジベルの設計にあたっては、2.の押し抜き試験結果より得られたジベルの限界せん断応力度(ジベル単位面積あたりの限界せん断耐力)が、はりの曲げ破壊時に接合面に作用するせん断応力を上回るように配慮した。またEタイプFタイプについては、トラス型ジベル以外にコンクリートのせん断補強材を配置しないものと、スターラップでせん断補強したもの(即ち、従来の斜引張鉄筋の設計法に基づきト

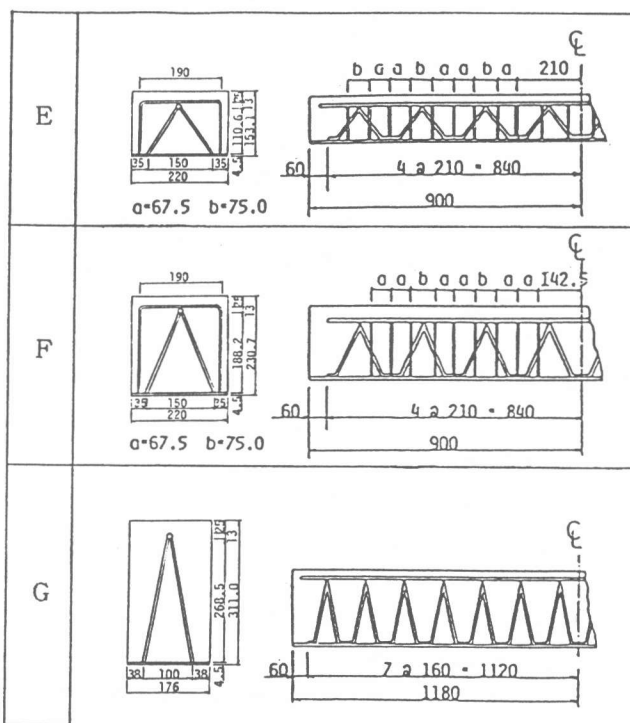


図-5 TSC合成はり供試体の形状寸法

表-2 TSC合成はりの諸元および試験結果

供試体	有効高さ/幅 (d/b)	載荷幅 (c cm)	コンクリートの 圧縮強度 (kg/cm^2)	引張部材の降伏 応力 (kg/cm^2)	スターラップ の有無	破壊形式	破壊荷重 (t)	設計破壊荷重 (t)	実験値 理論値
TSC NO.1 80° NO.2	1.75 1.75	26 26	477 477	3381 3381	無し 無し	曲げ引張破壊 曲げ引張破壊	18.24 18.00	16.20 16.20	1.13 1.11
TSC NO.1 65° NO.2 NO.3 NO.4	1.04 1.04 1.04 1.04	16 16 21 21	500 441 500 441	3381 3621 3381 3621	無し 有り 無し 有り	せん断圧縮破壊 曲げ引張破壊 せん断圧縮破壊 曲げ引張破壊	20.00 22.10 21.00 22.15	19.07 20.12 19.73 20.82	(1.05) 1.10 (1.06) 1.06
TSC NO.1 55° NO.2 NO.3	0.69 0.69 0.69	16 36 36	514 481 422	3381 3381 3621	無し 無し 有り	曲げ引張破壊 斜引張破壊 曲げ引張破壊	13.33 14.02 14.97	12.25 14.09 14.71	1.09 (1.00) 1.02
RC NO.1 NO.2	1.75 1.75	26 26	477 481	3833 3833	有り 有り	曲げ引張破壊 曲げ引張破壊	19.32 19.31	18.29 18.30	1.06 1.06
RC NO.1 NO.2	1.04 1.04	16 21	490 490	3833 3833	有り 有り	曲げ引張破壊 曲げ引張破壊	23.45 24.20	21.44 22.19	1.09 1.09
RC NO.1 NO.2	0.69 0.69	16 36	514 514	3833 3833	有り 有り	曲げ引張破壊 曲げ引張破壊	14.76 17.00	13.71 15.90	1.08 1.07

ラス型ジベルの斜材とスターラップ量を合わせて、RCはりのスターラップ量とほぼ等価にしたもの)の両供試体を製作し、同等の試験を行った。載荷方法は、曲げを対象とした試験であるので供試体中央部に2点線載荷し、鋼板が降伏した状態で荷重を一度下げ、その後破壊するまで漸増載荷する方法を用いた。測定項目は、①コ

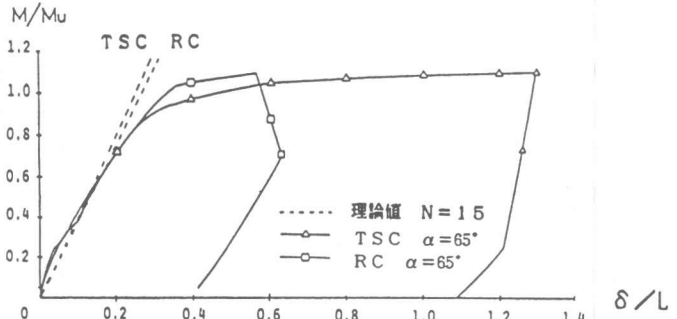


図-6 曲げモーメント-たわみ曲線 ($\times 10^{-2}$)

ンクリート上面のひずみ ②トラス型ジベルのひずみ ③中央点および 1/4 地点のたわみ ④水平方向の鋼板とコンクリートのずれ量 ⑤ 各荷重段階におけるひびわれ幅等である。使用したコンクリートは呼び強度 $400 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、スランブ 8.0 cm 、粗骨材の最大寸法 20 mm のレディミックスコンクリートであり、鋼板は SS41 RCはりの引張鉄筋は SD30 規格のものである。全供試体の実験諸元ならびに材料強度は、表-2に示すとおりである。

3.2 実験結果と考察

(1) 破壊状況

表-2に各種供試体の破壊形式および破壊荷重を示す。TSC合成はりの破壊形式は、載荷幅スターラップの有無により3形式に分類される。曲げ引張破壊したTSC合成はりについて、その破壊荷重の実験値と設計値の比はRCはりと同様以上の値を示しており、桁高が高くなるほど若干大きくなる傾向が見られた。以上のことより、TSC合成はりの曲げ耐力は、底部鋼板と圧縮鉄筋を考慮したRC断面として算定できることが確認された。

(2) 変形状

図-6は傾斜角が 65° のTSC合成はりのたわみ性状を示したものである。ここに、 M :作用モーメント、 M_u :設計破壊モーメント、 δ :たわみ、 L :スパン長である。この図において、RCはりでは、初期ひびわれ発生時に剛性が低下した後、破壊荷重近傍において急激にたわみが増加しているのに対して、TSC合成はりでは底部鋼板が降伏した M/M_u の値が、 0.8 付近から非線形となり緩やかにたわみが増加し、急激に耐力を失う様子は見られない。また、TSC合成はり

の靱性は、RCはりの約 2.6倍となっており、設計荷重時におけたわみは、 $L/1300 \sim L/750$ 程度であることが判明した。なお、設計荷重は最大曲げモーメント部のはり上面におけるコンクリートの圧縮応力が、圧縮試験における破壊応力の $1/3$ に達する荷重とした。

図-7は、傾斜角が 80° の TSC 合成はりのコンクリート上面におけるひずみ性状を RC はりと比較したものである。この図から、RC はりに比べて TSC 合成はりでは底部鋼板が降伏した後、緩やかにひずみが増加しているのがわかる。また、ひびわれは、ジベル材に沿って載荷点方向に進展する傾向が見られ、ひびわれ幅は、RC はりに比べて若干大きくなるが、許容ひびわれ幅を満足していることが判明した。さらに、曲げひびわれ発生後は、接合面のずれの実測値にひびわれの影響も含まれているものと推測されるが、このときのずれ量は、設計荷重時において $0.01 \sim 0.10 \text{ mm}$ とかなり小さな値を示した。これらは、トラス型ジベルの接合面のずれやアップリフトに対する機械的拘束効果により、降伏後も良好な一体性が保持されるためと考えられる。

(3) トラス型ジベルのせん断補強効果

図-8は、傾斜角が、 65° の TSC 合成はりにおいて、スターラップの有無によるトラス型ジベルの応力分布を比較したものである。まず、設計荷重 ($P = 7 \text{ t}$) においては、圧縮トラス斜材の応力は、スターラップの有無による差がほとんど見られないのに対し、引張トラス斜材にはその影響が顕著に認められる。次に、破壊近傍では圧縮側のトラス型ジベルには、⑤のように

クラックの発達により引張力をうけているものも見られるが、その他の位置では、圧縮側、引張側ともスターラップを用いた場合には約 $2/3 \sim 1/2$ に応力が低減している。次にスターラップに発生する応力分布を図-9に示す。図より、引張トラス斜材の位置のスターラップ応力は、破壊近傍に至るまで小さいのに対し、トラス型ジベルの間に配置したスターラップ応力が、大きくな

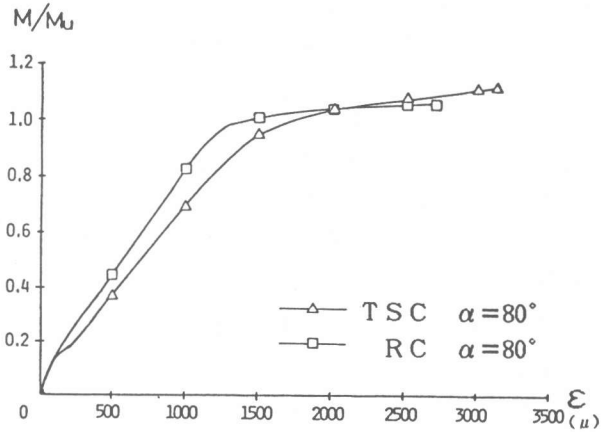


図-7 コンクリート圧縮縁のモーメント-ひずみ曲線

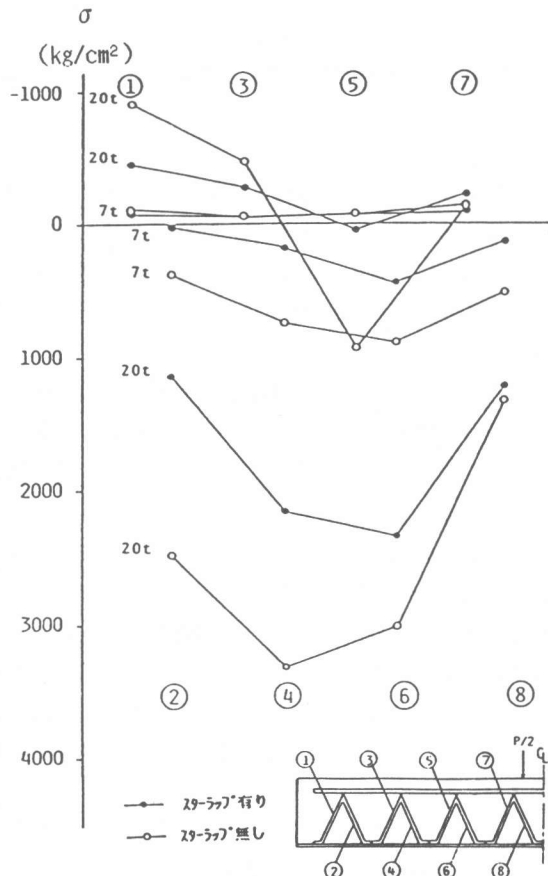


図-8 トラス型ジベルの応力分布

る傾向が認められ、トラス型ジベルがずれ止めと共に、コンクリートのせん断補強材としても機能していることが明らかにされた。なお本試験におけるトラス型ジベル量の算定にあたっては、水平接合面のずれ抵抗とコンクリート断面の斜引張抵抗の両方に対して、それぞれトラス型ジベル材の効果を評価した形で、押し抜き試験の結果や斜引張鉄筋の従来の設計法に準じた設計を行った。その結果、上述のように曲げ部材としてRCはりと同様以上の諸性状を示したことは、トラス型ジベルに対する設計方針が基本的に妥当であることを示唆するものと思われる。しかし、最適な設計式を確立するには、今後さらに検討する必要がある。

4. まとめ

本研究によって得られた結果を要約すれば、次のとおりである。

1) 立体トラス型ジベルのずれ剛性は、スタッドに比べてかなり大きく、限界せん断耐力に対するずれ常数はスタッドが約 90 t/mm に対して、トラス型ジベルが約 $140 \sim 215 \text{ t/mm}$ の値を示した。

2) トラス型ジベルの限界、終局耐力は、それぞれスタッドの $1.6 \sim 1.9$ 倍、 $1.2 \sim 1.5$ 倍の高い値を示した。

3) 式(2)による設計せん断力の評価式は、傾斜角が 45° 、 60° の場合には限界に対して $4 \sim 5$ 、破壊に対して $7 \sim 11$ 、の安全率を保証し、妥当なものといえる。しかし、傾斜角が大きく直立に近いジベルに対しては、スタッドの設計せん断力式(2)を適用する方が適切な結果を与えることが明らかにされた。

4) 押し抜き試験および従来の設計法に基づき、ずれ止めかつ斜引張補強材としてトラス型ジベルを配置したTSC合成はりとは、RCはりと同様以上の曲げ耐力を有し、かつ底部鋼板が降伏した後もトラス型ジベルによって鋼板とコンクリートの一体性が保持されるために、RCはりに比べて高い靱性を有することが確認された。このことは、トラス型ジベルに対する設計方針の妥当性を示唆するものといえる。しかし、それらの設計式の定式化については、さらに検討の必要があり、トラス型ジベルの溶接部をはじめとする疲労安全性の検討と合わせて今後の課題である。

参考文献

- [1] 太田俊昭、日野伸一ほか：トラス型ジベルの押し抜きせん断挙動、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1986. 9.
- [2] 太田俊昭、輿石正巳ほか：立体トラス型ジベルを有する合成床版の解析、土木学会第39回年次講演会講演概要集、1984.
- [3] I.M.Viest : Investigation of Stud Shear Connectors for Composite Concrete and Steel T-Beams, Journal of the ACI ,pp 875~891, April, 1957.
- [4] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(鋼橋編)、1980.

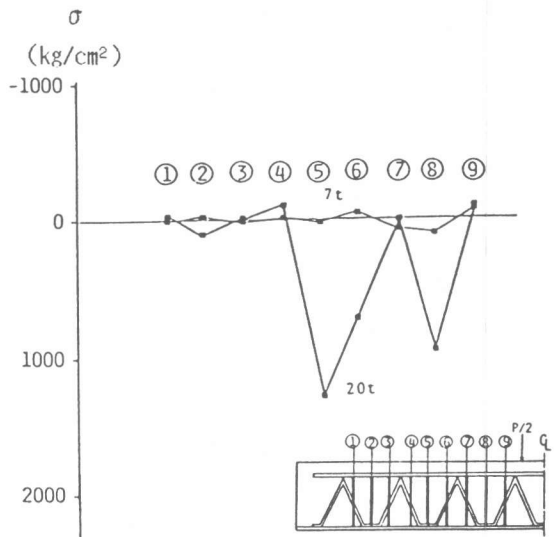


図-9 スターラップの応力分布