

(36) 頭付きスタッドを連結継手に用いたプレキャスト床版の静的挙動

STATIC BEHAVIORS OF PRECAST SLABS WITH SHEAR TRANSMISSION JOINT BY USING HEADED STUDS

梶川靖治* 松川治雄** 児島啓太郎*** 渡部寛文*** 大石 昇**

By Yasuharu KAJIKAWA, Haruo MATSUKAWA, Keitarou KOJIMA, Hirofumi WATANABE and Noboru OOSHII

The precast prestressed concrete deck slabs with a new unique jointing system named as "ST-slabs", have been developed for steel girder bridges. The precast panels are jointed by using headed studs and cement mortar to transmit only shearing forces between each panel without longitudinal prestressing. Consequently, the jointed panels will behave as an integrated deck slab under traffic loadings with good load distribution and without any difference in level.

The fundamental principle of this jointing system has been certified by a finite element analysis and a static loading test on model slabs. The basic concept of the jointing system and the results of the analytical and experimental studies on ST-slabs are presented in this paper.

1. まえがき

近年、鋼道路橋の新設用あるいは補修用のプレハブ床版の一つとして、プレキャストRCまたはPC床版が注目されており、この床版パネル相互間の連結に対し各種の工法が提案されている。この橋軸方向の連結工法は、基本的に、プレストレスを与える方法と与えない方法の2種類に大別できる。前者については最も合理的かつ一般的な工法であることから、すでに数多くの実績があり、設計基準類も整備されつつある^{1), 2)}。しかし、プレストレスを与えるのにPC鋼材を用いていわゆる縦締めを行うことになるため、この作業自体が工程上の大きなネックとなり、また、工費の増加も避けられないと指摘されている。これに対し、現場施工のさらなる省力化と急速施工(工期短縮)および経済性向上のために、縦締めを必要としない方法について各種のもの³⁾も提案されているが、それぞれ一長一短がありいまだ決定的なものはないようである。

そこで、プレキャストPC床版を主たる対象として、コストアップをできるだけ抑え、現場での施工性や床版性能のより一層の向上を図るために、継手間詰め部間隔を狭小化し、縦締めすることなく全体としてほぼ1枚のPC版として挙動するような床版連結工法の開発を目指すことにした。すなわち、プレキャスト床版パネルそのものが本質的に有限幅の不連続板であることを明確に再認識した上で、パネル相互の段差解消と荷重分配のためだけに、せん断力のみを確実に伝達できるような継手構造(例えば、ピン連結)とするいわゆる「せん断連結工法」なるものを考案した。

この工法による床版を「せん断連結床版」(Precast PC-Slabs with Shear Transmission Joint, 以下、STスラブという)と名付け、実用化を目指す第1段階としてSTスラブの基本原理の確認に主眼を置いて、解析的および実験的に種々の検討を加えた。

* 工博 川田建設㈱大阪支店

** 川田建設㈱大阪支店技術部

*** 川田建設㈱開発部

本文では、S Tスラブの概要について紹介するとともに、F E M解析による基本板性状の把握、ならびに、実物大供試体を用いた静的荷重試験によるスタッドせん断継手の力学特性、全体的な弾塑性版挙動および耐力の確認結果などについて報告する。

2. S Tスラブの概要

S Tスラブのおおその構造は、図-1に示すように、床版の支点部すなわち鋼桁上ではパネル相互の離間防止のためにループ鉄筋継手により連結し、床版支間部では現場形成のせん断連結構造によりパネル相互間のせん断伝達のみを期待して一体化を図るようになっており、これまでに類のない極めてユニークなプレキャスト床版構造である。

この床版構造を実現するためには、当然のことながらパネル相互間のせん断連結継手部の構造が重要であり、少なくとも以下の要件を満足する必要がある。

- ① 確実なせん断伝達要素の選定、 ② パネル相互の離間防止、 ③ 継手部間隔の狭小化、
- ④ 製作誤差や不陸の吸収のために自由度の大きい現場形成の継手であること。

これらの要件を満たすものとして、鋼・コンクリート合成桁のずれ止めとして多用されている頭付きスタッドを利用する図-1中に示すような構造案を考えた。具体的には、頭付きスタッドを千鳥状に溶植した鋼板を連結継手部に埋め込んだプレキャストパネルを工場製作し、現地ではこれらが互いに噛み合うように設置して、その間詰め部（間隔約6cm）に無収縮モルタルを流し込んで一体化しようとするものである。これは一種の複合構造であり、かなり確実なせん断伝達が期待できるものと考えられる。

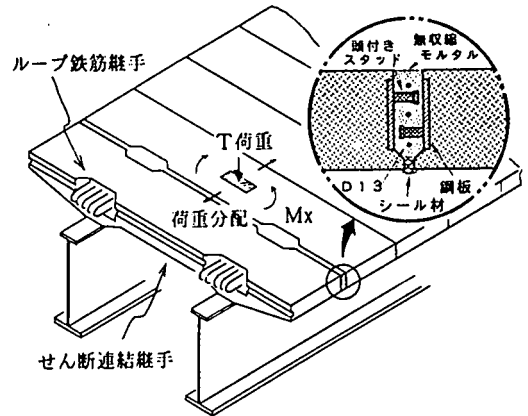


図-1 S Tスラブの概念図

3. 連結板の基本板性状

道路橋示方書⁴⁾に示される床版の設計曲げモーメント式は、周知のように、相対2辺単純支持の等方性無限版を対象として解析・誘導されたものがベースとなっている。これに対し、プレキャスト床版のような有限幅の板（パネル）を連続的に並べ、パネル相互間をピン結合により一体化して相対2辺を単純支持したいわゆる「連結板」の曲げ性状について調べた研究は、解析的にも実験的にもこれまで皆無のようである。

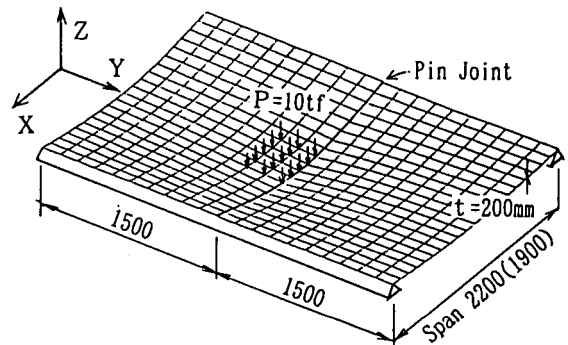


図-2 解析モデル

そこで、連結板の基本板性状を把握するために、2枚のパネルを連結したモデルについて3次元F E M解析を実施した。解析モデルは、図-2に示すように、スパン2.2mのパネル（幅1.5m、厚さ20cm一定）を2枚並べて2辺で単純支持したものとし、四角形アイソパラメトリック1次板曲げ要素を用いて要素分割（支間方向、支間直角方向とも20分割）の上、二つのパネルを上下にわずかにずらし、両パネルの隣接節点どうしを立体トラス要素で連結しピン結合を表現した。板は等方性で、そのヤング係数は $3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、ひびわれは考慮しないものとした。また、荷重は、1枚のパネルの連結エッジ部または中央部とし、それぞれ輪荷重を想定した $P = 10 \text{ tf}$ の面荷重（載荷面積 $440 \times 300 \text{ mm}$ ）を与えた。なお、比較のために、1枚のパネル（ $2.2 \times 1.5 \times 0.2 \text{ m}$ ）の単体板とパネル2枚分の大きさ（ $2.2 \times 3.0 \times 0.2 \text{ m}$ ）の1枚板についても同じ要素分割および載荷状態について計算を行った。

図-3は、二つの荷重ケースにおける床版支間中央に沿う支間方向曲げモーメント（主筋方向モーメント） M_x と橋軸方向曲げモーメント（配筋筋方向モーメント） M_y について、それぞれのモデルの橋軸方向分布を比較したものである。まず、図-(a)の連結エッジ部に荷重した場合の M_x に注目すると、連結板のモーメントは、全体的に単体板の50～60％であり、1枚板の分布曲線とほぼ一致しているが、荷重点直下では1枚板よりも約10％程度上回っている。また、 M_y については、連結板と1枚板の差が明瞭に現れ、荷重点直下では1枚板の半分以下となり、ピン位置でゼロ、非荷重パネルではわずかながら負の曲げモーメントが発生している。次に、図-(b)のパネル中央部に荷重した場合の M_x に注目すると連結板は単体板の55～85％程度となり、全長にわたり1枚板の分布曲線とほぼ完全に一致している。 M_y については、連結板と1枚板との差は明瞭でなく両者の分布曲線はほぼ一致しており、また、単体板と比べてもわずかに上回る程度である。

図-4には、連結エッジ部に荷重した場合の支間中央に沿うたわみの橋軸方向と床版支間方向の分布曲線を示す。図-(a)において、単体板（1点鎖線）に比べれば連結板（実線）の最大たわみは約半分となるが、1枚板の滑らかな曲線（点線）と比較して、連結板ではピン結合部で明らかな角折れ現象が見られ、最大値も1枚板の約1.3倍となっている。一方、パネル中央部に荷重した場合には、連結板と1枚板との分布曲線

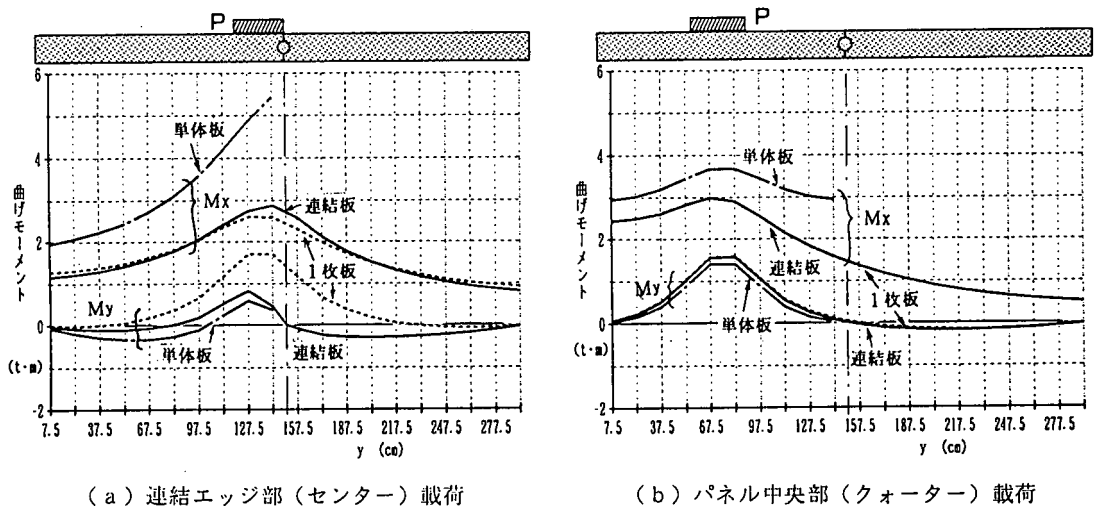


図-3 M_x と M_y の橋軸方向分布

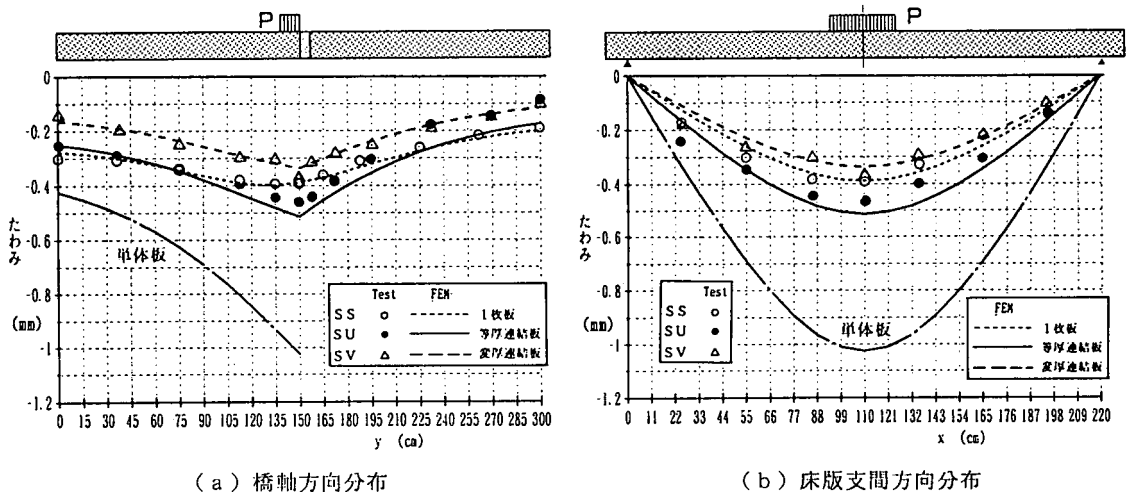
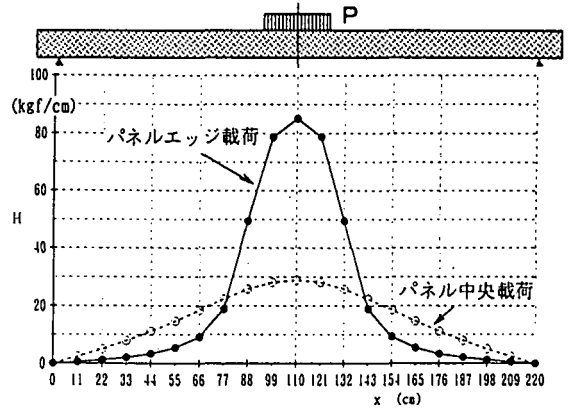


図-4 センター荷重におけるたわみ分布

はほとんど差がなく、また、このように明瞭な角折れ現象も認められなかった（図－7 参照）。

変形性状の面からは、連結部における角折れ現象を実際の輪荷重の走行性に対しいかにクリアするかが大きな課題となりそうである。これを改善する一つの方策として、パネルの橋軸方向両端部にハンチを設けて増厚補強し変厚パネルとして解析してみたところ、図－4 中の破線で示すように、最大たわみが等厚の場合の約65%程度となり、角折れの緩和にも効果のあることがわかった。

二つのパネル間で伝達されるせん断力Hの、連結線に沿った分布をそれぞれの載荷状態について示したものが図－5である。ただし、せん断力は要素分割の影響を無くすために単位長さあたりの値で表示している。パネル中央部に荷重がある場合は、比較的ならかな分布曲線であるのに対し、パネルエッジ部に載荷した場合には、約3 倍程度のピーク値となり、ほぼ荷重点付近のみで大部分のせん断力が伝達されることがわかる。なお、載荷パネルから非載荷パネルへの荷重分配率は、中央載荷の場合で約33 %、エッジ載荷の場合で約47%であった。



図－5 連結部に作用するせん断力の支間方向分布

4. STスラブの静的載荷実験

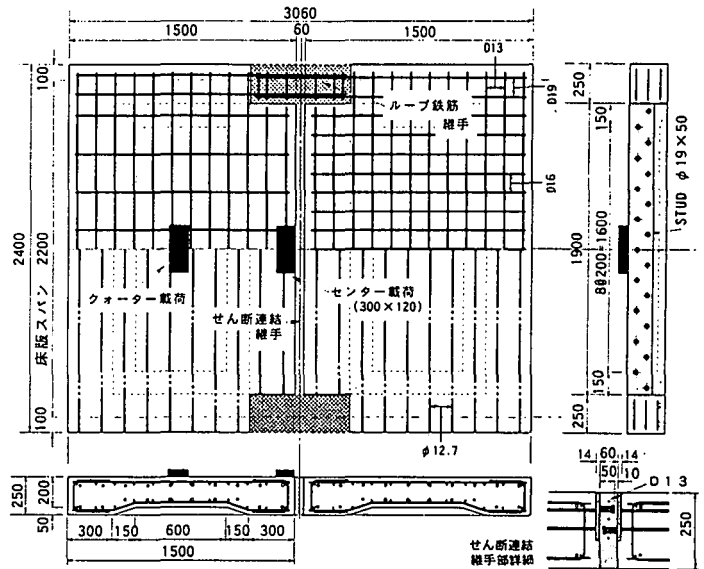
4. 1 供試体と実験目的

スタッドを用いたせん断連結継手の力学特性や耐荷力を調べるとともに、せん断連結した版の弾塑性版挙動や耐荷力などを明らかにするために、2 枚のプレテンPCパネルを連結した実物大の版供試体について静的載荷実験を実施した。

供試体の種類を表－1 に示す。また、ハンチを設けてパネル周縁部の板厚を大きく（25cm）した変厚版の供試体SVについての形状寸法を図－6 に示す。SUとSUSは周縁部のハンチが無く一定の板厚（20cm等厚）であり、外形寸法やPC鋼線および鉄筋の配置はSVと全く同じである。継手部の寸法も、板厚が20cmとなるだけで間詰め間隔、スタッドのサイズやピッチおよび鋼板の大きさなどはやはりSVと同じである。また、SSは継手部の無い一定板厚（20cm）の1 枚版であるが、PC鋼線および鉄筋の配置は他の供試体と全く同じである。

表－1 供試体の種類

記号	連結方法	版厚	支間長	実験目的	数量
SU	スタッド	等厚	220cm	・スタッドによるせん断伝達性能の確認 ・弾塑性版挙動の把握 ・耐荷力と破壊性状の確認	1 体
SUS		等厚	190		1
SV	スタッド	変厚	220	・版端増厚による補強効果の確認	1
SS	1 枚版	等厚	220	・連結版に対する比較の基準	1



図－6 供試体の形状・寸法

供試体のパネルは道路橋示方書⁴⁾のB活荷重に対し床版支間方向にはP C、橋軸方向にはR Cとして設計し、コンクリートの設計基準強度は500 kgf/cm²とした。また、せん断連結継手部のスタッドは、輪荷重10 tfに衝撃を考慮した14tfを設計荷重として、図-5のせん断力分布と示方書規定の許容せん断力値に基づきそのピッチを決定した。

連結前の単体パネルの様子を写真-1に示す。このパネル2枚を連結継手間隔60mm離して定盤上にセットし、ループ鉄筋継手部に膨張コンクリート(強度536 kgf/cm²)を打設した後、せん断継手部に無収縮モルタル(強度530kgf/cm²)を流し込んで一体化した。

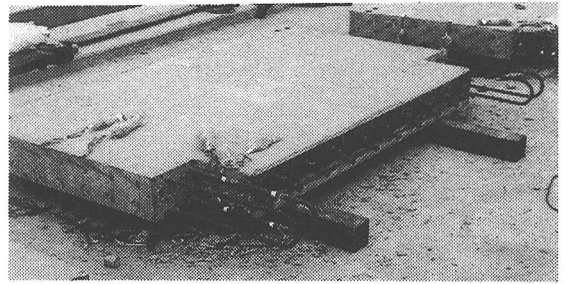


写真-1 単体パネル

4. 2 実験方法

載荷位置は、相対2辺を単純支持した片側パネルの真ん中(以下、クォーター載荷という)と版中央の継手境界(以下、センター載荷という)との2箇所とし、その面積は載荷装置の関係等より300×120mmとした。まず、クォーター位置においてほぼ弾性範囲内で2～3回漸増繰返し載荷を行った後、荷重点をセンターに移し、継手部に作用するせん断力が卓越する状態のもとで最終破壊荷重に至るまで漸増繰返し載荷を行った。

4. 3 実験結果と考察

(1) 荷重とたわみの関係

図-7には、クォーター位置でP=10tf載荷時の弾性たわみの橋軸方向分布を示す。1枚版のSSの測定値は解析値に良く一致しているが、連結版のSUとSVは解析値よりも全体的に若干大きくなっている。しかし、両者ともたわみの分布傾向はかなり良く一致しているようである。なお、SUとSVにおいて、その連結継手位置でのたわみの段差や角折れなどは明らかでない。

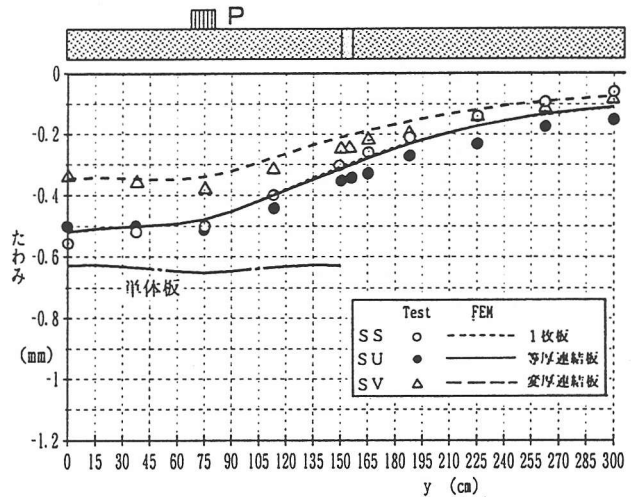


図-7 クォーター載荷におけるたわみの橋軸方向分布

センター載荷における載荷点直下のたわみと荷重の関係を図-8に示す。各供試体とも比較的大きな変形能を有していることがわかる。図-4には、センター位置でP=10tf載荷時の弾性たわみの分布をプロットしている。図-(a)および-(b)とも、各供試体の測定値には多少ばらつきがあるものの解析値と比較的良好な一致をみていることがわかる。

(2) 破壊状況

図-9に供試体SUSの最終ひびわれ状況を示す。いずれの供試体においても、ほぼ25～30 tfを超えるあたりから荷重直下の床版コンクリ

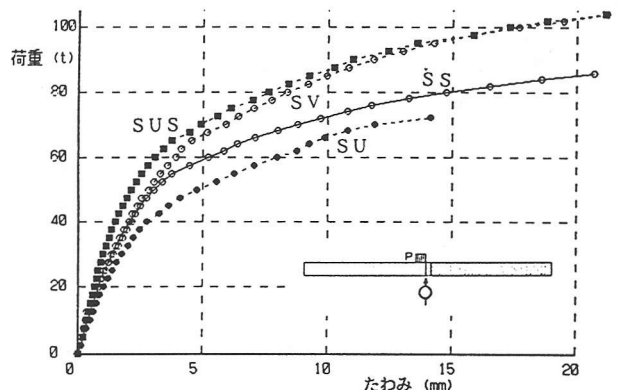


図-8 センター載荷における荷重とたわみの関係

ート下面にひびわれが生じはじめ、荷重の増加とともに放射状のひびわれパターンを形成した。連結版供試体では、間詰めモルタルにもほぼ15～20cm間隔で橋軸方向のひびわれが生じたが、最終的なひびわれ分布は、1枚版のS Sとほぼ同様であった。

S U SおよびS Vにおける最終状態は、床版上面ではほぼ載荷板の大きさだけが鋼板とともに陥没し、床版下面では図-9中の破線で示すような破壊線を形成して押し抜きせん断破壊した。これは、1枚版で通常観察される破壊形式と若干異なっており、耐荷力の評価と密接に関係するため、今後さらなる検討を要する点と考えられる。なお、試験終了後スタッド付き鋼板をハツリ出したところ、写真-2に示すように、載荷側では鋼板が大きく曲がり、また、スタッドも大きくせん断変形していた。

(3) 終局耐荷力

各供試体の終局耐荷力の実験値、およびコンクリート標準示方書⁵⁾による計算値を表-2に示す。なお、計算値は、コンクリートの実際の圧縮強度(650kgf/cm²)を用いて算出した。

S U Sにおける最終の破壊形式がS Sと同じ押し抜きせん断であったことから、両者の支間長の違いを考慮しても、連結版の耐荷力が1枚版のそれを下回ることはないものと推定される。

5. まとめ

新しく考案したS Tスラブは、縦締めによる床版の軸方向短縮やクリープが生じない、連結構造がシンプルで現場での施工性が良好であるなどの大きな特徴を有し、その基本原理を確認するための解析的・実験的研究の結果、継手部および版の力学性状や耐荷力特性などの一部が明らかとなり、実用化の端緒が開けた。しかし、根本的に角折れ現象や継手部の防水対策などの問題を解決しなければならず、現在、定点載荷および交互載荷の疲労試験を実施中であり、さらには追加の静的載荷試験やF E M解析、および輪荷重走行試験などの実施を計画中である。

参 考 文 献

- 1)中井 博編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工，森北出版，1988年5月。
- 2)プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャスト床版設計施工マニュアル，1994年3月。
- 3)中井 博・川口昌宏・柿沼善明・阪野雅則・鍵和田 功：プレキャストR C床版ループ鉄筋重ね継手の強度、および疲労に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 1069～1076，1995年3月。
- 4)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I・II・III，丸善，1994年2月。
- 5)土木学会：平成3年度版コンクリート標準示方書〔設計編〕，1991年7月。

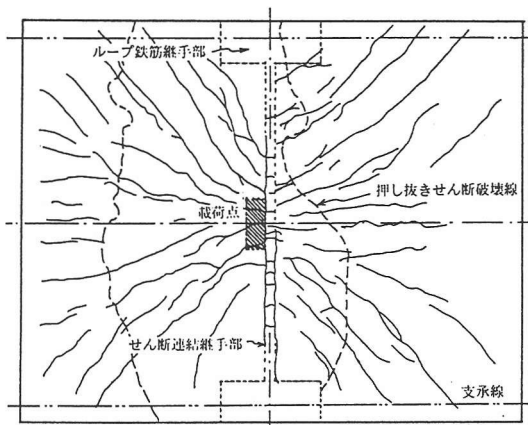
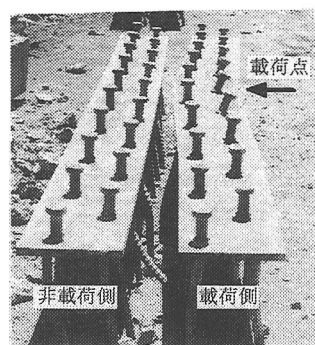


図-9 供試体S U Sの最終ひびわれ状況

表-2 終局耐荷力

供試体	床版 支間長 (cm)	実験値 (tf)	計算値 ⁵⁾ (tf)	実験値 と計算 値の比	破 壊 形 式
S U	220	73.3	70.1	1.05	ループ鉄筋継手切り 欠き部のせん断破壊
S U S	190	107.8	70.1	1.54	押し抜きせん断破壊
S V	220	107.8	107.7	1.0	押し抜きせん断破壊
S S	220	87.7	70.1	1.25	押し抜きせん断破壊



スタッド