

## 論文

## [2094] 鉄筋コンクリートはりの斜引張破壊に対する解析的研究

真田 修<sup>\*1</sup>・古内 仁<sup>\*2</sup>・上田 多門<sup>\*3</sup>・角田 與史雄<sup>\*4</sup>

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートはりの斜引張破壊は、ぜい性的であり、終局に至るまでの耐荷挙動は非常に複雑である。特にせん断スパン比の大きいはり（約2.5以上）の破壊は、しばしば斜めひびわれが軸方向鉄筋を横切る位置から、支点に向かって水平方向に進展するひびわれを伴うことがある。終局時には、斜めひびわれが、この水平ひびわれの発生とともに大きく開口し、載荷点付近のコンクリートの圧縮域を貫通して急激に耐力を失う。斜めひびわれ発生後から終局時までの過程では、作用せん断力は、ひびわれていないコンクリートの圧縮域、斜めひびわれ面での骨材のかみ合わせ作用、そして軸方向鉄筋のダウエル作用によって伝達されることが明らかにされている。しかし、それらの抵抗機構において各々が負担する作用せん断力の変化や開口変位、すべり変位の変化が斜引張破壊に及ぼす影響については未だに明らかにされていない。本研究は、破壊を誘発する斜めひびわれおよび軸方向鉄筋に沿った水平ひびわれの伸展を実験と解析の両面から調査し、斜引張破壊の挙動を明らかにしようとするものである。

## 2. 実験概要

実験は、図-1に示すせん断スパン比  $a/d = 3.0$  の単純ばりの供試体を用いた。供試体の試験区間は左側半分とし、右側は破壊が生じないようにスターラップによりせん断補強を行った。本実験では、ひびわれの挙動に着目し、コンクリート側面でコンタクトゲージにより斜めひびわれ変位の測定を行い（図-2参照）、その裏側面では水平ひびわれの開口変位を測定するために3箇所の位置に亀裂変位計を取り付けた（図-3参照）。また、ひびわれ発生の影響による鉄筋のひずみの増加を調べるため、図-1に示すア～エの4箇所の位置（15cm間隔）で測定を行った。

使用した鉄筋は、横フシ型異形棒鋼で主鉄筋にSD345のD25を2本、スターラップにはSD295A

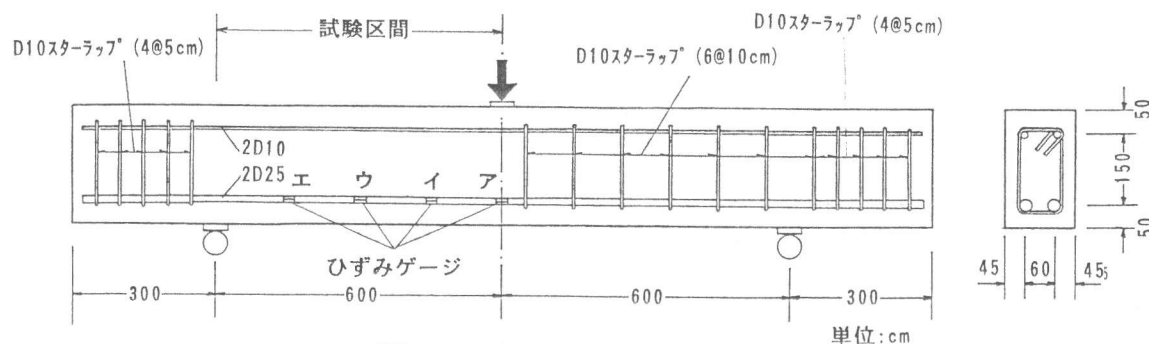


図-1 実験供試体

\*1 日本道路公団、工修（正会員）

\*2 北海道大学助手 工学部土木工学科、（正会員）

\*3 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

\*4 北海道大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

ゲージ間隔 60mm

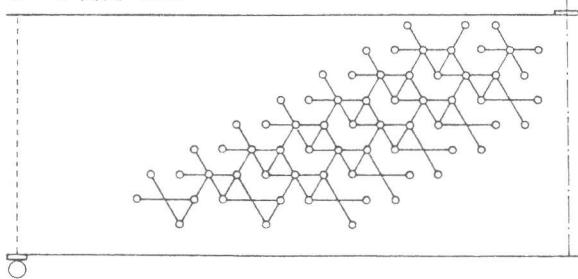


図-2 コンタクトゲージ貼り付け位置

(供試体裏側面)

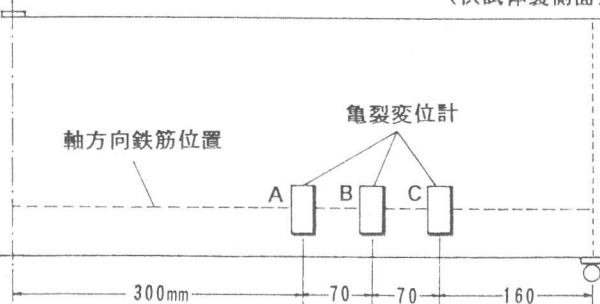


図-3 亀裂変位計取り付け位置

のD10を使用した。コンクリートの配合は、早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比 $W/C = 55.0\%$ 、細骨材率 $s/a = 42.0\%$ 、および単位水量 $W = 176\text{kg/m}^3$ とした。供試体は、打設後1日で脱型し湿布養生を行い、材令7日で試験を実施した。

### 3. 実験結果

実験結果を表-1に示す。破壊状況は、図-4に示すように斜め引張破壊によって終局に至った。ひびわれの伸展は、約3 tonfで載荷点直下の曲げひびわれⅠが生じ、約6 tonfでⅡの曲げ-せん断ひびわれが生じた。その後、約9 tonf付近でⅡのひびわれは斜ひびわれに発達し、おおよそ $40^\circ$ 程度の傾きで上下方向に伸展した。9.6 tonf付近では軸方向鉄筋に沿った水平のひびわれⅢが現れ、16.5 tonfの破壊時まで水平ひびわれが伸展しながら斜ひびわれ幅が増加していく状態が観察された。

表-1 材料強度および破壊荷重

| コンクリート<br>圧縮強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 鉄筋降伏強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) |      | 破壊荷重<br>(tonf) |
|-----------------------------------------|---------------------------------|------|----------------|
|                                         | D10                             | D25  |                |
| 358                                     | 3868                            | 3818 | 16.5           |

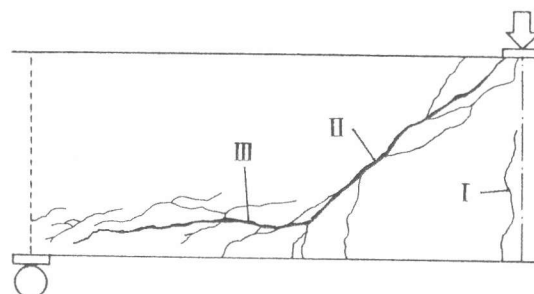


図-4 破壊状況

### 4. 解析概要

本研究では、前川らが開発した鉄筋コンクリート構造物用有限要素プログラム「COMM2」<sup>1)</sup>を用いて解析を行った。このプログラムによる計算は、コンクリートの弾塑性モデルに基づいた平面応力状態で有限要素法を用いて行われている。また、プログラムには図-5に示すリンク要素が用意されており、鉄筋とコンクリートの付着およびひびわれ面での力の伝達を表すために用いた。鉄筋要素をコンクリート要素に接合するリンク要素は、鉄筋軸方向に対して島らの付着モデル<sup>2)</sup>を用い、鉛直方向は、剛性の高いものを用いた。

斜ひびわれや曲げひびわれの挙動を表すためのひびわれ面での力の伝達モデルは、すべり変位のない状態(すべり変位が $0.001\text{mm}$ 以下かつすべり変位/ひびわれ幅の比が $0.01$ 以下のとき)ではReinherdtらの引張軟化モデル<sup>3)</sup>、すべり変位のある状態では李らの骨材のかみ合わせモデル<sup>4)</sup>を離散ひびわれでのリンク要素に適用した。なお、ひびわれの発生基準は、2軸引張領域に対しては、青柳-山田モデル<sup>5)</sup>、引張-圧縮領域に対しては二羽モデル<sup>6)</sup>とした。

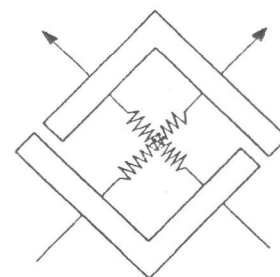


図-5 リンケージ要素

実験結果で示された水平ひびわれの挙動については、斜ひびわれおよび曲げひびわれの挙動と異なることが予想される。なぜならば、この水平ひびわれの発生は斜ひびわれを横切る軸方向鉄筋のダウエル作用が主な原因となっているからである。そのため、はり供試体を側面からの平面応力状態で解析を行う際には、断面内の鉄筋およびその周囲のコンクリートの局部的変形を表すことができないのである。本研究では、この水平ひびわれの発生メカニズムをあらわすために、ひびわれ発生が鉄筋の相対変位によるものと仮定し、予めその関係を導き出すことを試みた。図-6は、供試体の断面内（奥行き1cm）で直接鉄筋を変位させたときの周囲のコンクリートの劣化状況を追跡するために解析を行ったものである。この解析により、鉄筋の変位と作用力の関係が得られたが、初期の段階では線形的に挙動し、その後は鉄筋と接する位置よりコンクリートの劣化が生じ側面に向かって進行する性状が得られた。この関係を図-7に示す。なお、はり供試体において、この関係をリンク要素に取り入れて、鉄筋要素を接合したリンク要素と重ね合わせて用いたが、鉄筋要素はかぶり側のコンクリートに接合した。

解析を行った供試体の要素分割は、ひびわれ状況（図-4）を参考にして図-8のように行った。曲げおよび斜ひびわれ、水平ひびわれは、上記のひびわれモデルを導入した離散ひびわれとして表した（図中太線）。コンクリート要素は適切な大きさに分割し、鉄筋要素は鉄筋断面積と曲げ剛性が同一となる平板として作成した。なお、ひびわれに隣接するコンクリート要素はひびわれの生じない要素とした（図中\*印）。それ以外のコンクリート要素は、分散ひびわれモデルを取り入れた要素としている。なお、本研究では斜引張破壊に対して2次的に生ずる鉄筋に沿った水平ひびわれの影響に着目し、水平ひびわれを取り入れた「解析1」と水平ひびわれの無い「解析2」を行うことにした。

## 5. 考察

### 5. 1 破壊性状およびたわみ性状（解析結果）

2つの解析によって得られた荷重-載荷点変位を図-9に示す。本解析において、破壊荷重は、荷重-変位関係で得られる曲線のピーク値と定義することにした。この結果から、水平ひびわれ

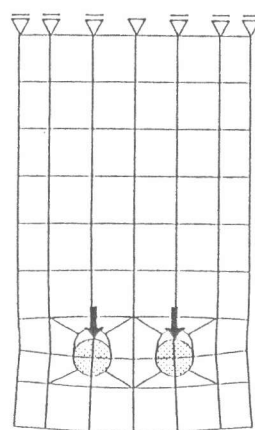


図-6 軸方向鉄筋の変位による変形

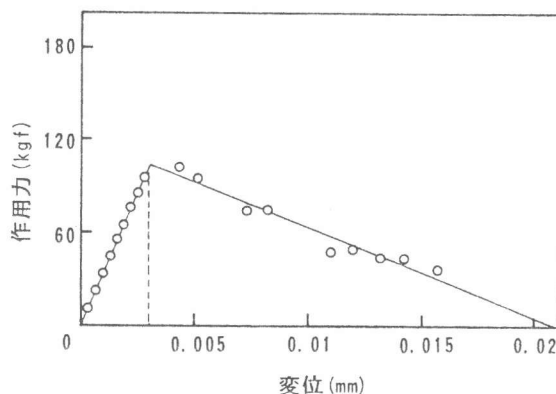


図-7 鉄筋の作用力-変位関係

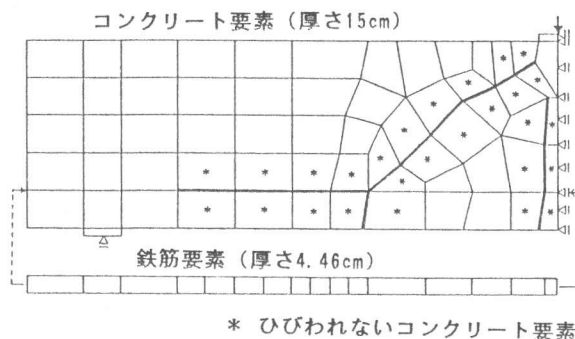


図-8 供試体の要素分割図

を導入した「解析1」では、破壊荷重が16.0tonfとなり、実験値の16.5tonfにはほぼ一致することになった。一方、水平ひびわれを導入していない「解析2」では破壊荷重が21.8tonfであり、これは、終局曲げ耐力で得られる破壊荷重20.4tonfに近い値を示す結果となった。2つの解析結果から、たわみ性状は荷重の小さな段階では、ほぼ一致しているが、斜めひびわれ発生後にたわみ量が大きく異なる結果となった。

また、参考のために両解析によって得られた破壊時（ピーク）の変形を図-10および11に示す。いずれの場合においても、斜めひびわれの上端付近のコンクリートの局部的圧壊が生じており、斜引張破壊においても最終的な破壊を決定づける大きな要因となっているようである。

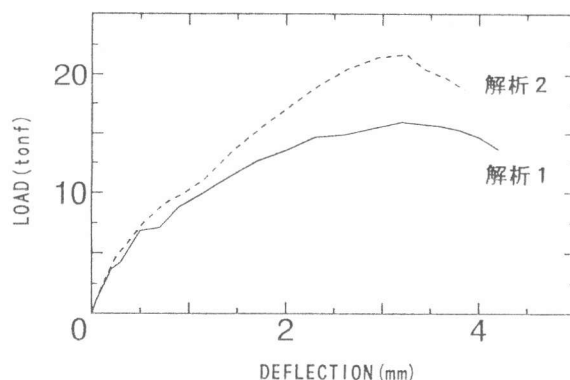


図-9 荷重-載荷点変位（解析）

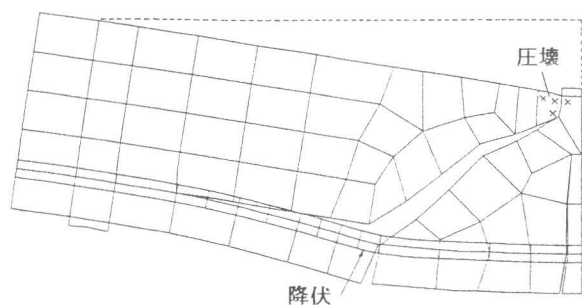


図-10 解析1による供試体の変形

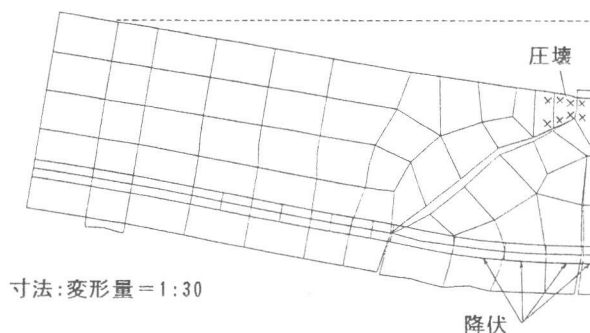


図-11 解析2による供試体の変形

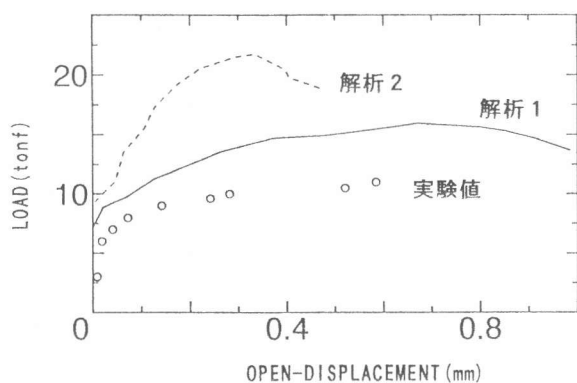


図-12 斜めひびわれの開口変位

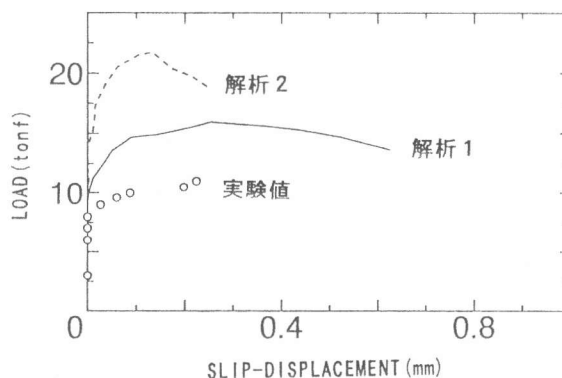


図-13 斜めひびわれのすべり変位

## 5. 2 斜めひびわれ面のすべり変位および開口変位

斜めひびわれの開口変位とすべり変位について、実験結果と解析結果の比較を行った。なお、実験および解析の両者において、ひびわれの開口変位をひびわれ面に対して直角方向、すべり変位を水平方向の相対的移動量と定義した。

図-12および13は、はり高さの中央位置におけるひびわれ面での両解析の変位を実験値と比較したものである。ただし、実験値は、破壊時（16.5tonf）まで測定することはできなかった。各

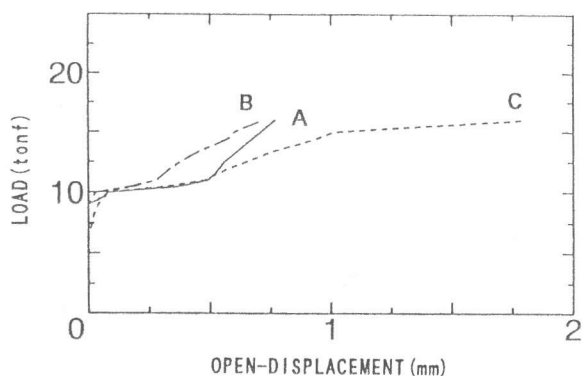


図-14 水平ひびわれの開口変位（実験）

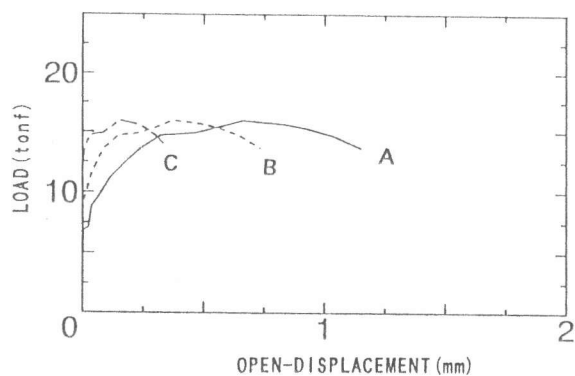


図-15 水平ひびわれの開口変位（解析1）

々の図から、「解析1」と「解析2」の結果は、いずれも実験値とは一致していない。しかしながら、「解析1」による手法の方が比較的实验値に近い値を示しており、その増加傾向も類似していることがわかる。

また、すべり変位に着目すると、「解析2」による手法では、すべりの発生がやや遅く、斜ひびわれでのすべりは、水平ひびわれの発生が大きな要因となっていることが考えられる。

水平ひびわれの開口変位の実験結果を図-14に、「解析1」による結果を図-15に示す。実験で得られた結果によると、水平ひびわれは約9.6tonf付近で支点に向かって急激に発達しているようである。それに対して、「解析1」による水平ひびわれの開口変位は、進行のし方が緩やかであり、変位量も実験値に比べると小さい値となった。これは、水平ひびわれの発生メカニズムが、鉄筋の付着作用による周囲のコンクリートの劣化も複雑に影響していることが考えられ、本解析に導入した水平ひびわれのモデル（鉄筋に作用するせん断力だけを考慮）では不十分であると思われる。上記の斜ひびわれの挙動は、「解析1」と「解析2」の比較から、水平ひびわれの発生に大きく影響されていることが示されており、また、その挙動を正確にとらえるためには、精度の良い水平ひびわれのモデルの導入が必要である。

### 5. 3 鉄筋のひずみ

斜ひびわれおよび水平ひびわれの影響による鉄筋のひずみの増加傾向を調べるため、実験で測定された4箇所の位置で解析による結果とあわせて比較を行った。4箇所の測定点のうち、中央点位置（載荷点直下）アと斜ひびわれより外側の位置（支点から15cm）エの2箇所のひずみを例

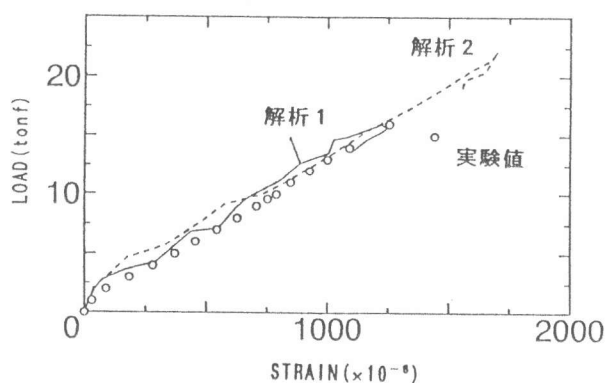


図-16 軸方向鉄筋のひずみ（中央点）

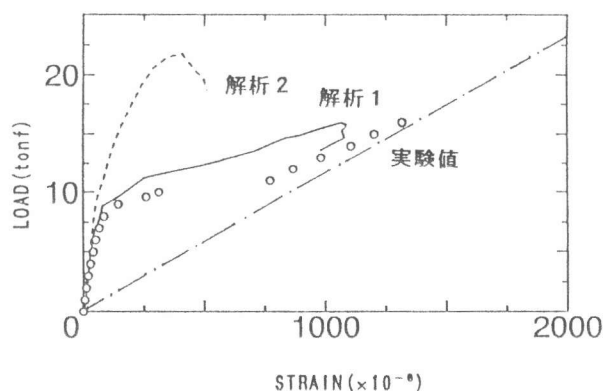


図-17 軸方向鉄筋のひずみ（支点付近）

として、図-16および図-17に示す。ア点における鉄筋のひずみは、実験結果が示すようにほぼ線形に増加しており、「解析1」および「解析2」は妥当な値を示している。一方、エ点において、ひずみは9 tonf付近までは剛性が大きく線形で増加しているが、その後は急激に増加している。図に示す直線（1点波線）は、斜ひびわれを跨ぐ位置（支点から約34cm）での鉄筋のひずみを計算（引張側コンクリートを無視した断面）したもので、斜ひびわれの影響によるモーメントシフト（移動量d）を考慮している。実験で測定されたエ点のひずみは、最終的にこのひずみの計算値に近づいている。これは、鉄筋が水平ひびわれの発生によって付着の劣化が生じ、コンクリートとの一体性が失われるためと思われる。「解析1」による結果は、ほぼこの増加の傾向をとらえているが、数値がやや異なるのは、解析において鉄筋要素をかぶりコンクリートに接合しているためであると考えられる。

## 6. まとめ

本研究において、斜引張破壊したはりについて、解析を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 解析において、軸方向鉄筋に沿って発生する水平ひびわれを考慮したものとししないものの比較によって、はりのたわみ性状が異なることが示された。
- (2) はりの終局耐力は、水平ひびわれを考慮することによって実験値に近い値を示した。また、終局時の破壊を決定する要因は、斜ひびわれと水平ひびわれの大きく開口した後、斜ひびわれ上端付近のコンクリートの圧壊となることが示された。
- (3) 斜ひびわれの開口変位及びすべり変位の増加は、水平ひびわれの発生が大きく影響していることが示された。
- (4) 斜ひびわれの外側の鉄筋（支点方向）は、水平ひびわれの発生によってひずみが急激に増大することが示された。

今回行った解析では、供試体1体（せん断スパン比=3.0）だけについて検討を行ったものであり、種々の要因が複雑に影響する斜引張破壊を言及するには、不十分である。今後、水平ひびわれ発生のメカニズムを正確にとらえるモデルの導出すること、また、断面やせん断スパン比の異なるはりや様々な載荷状態におけるはり等の解析を進めることによって、斜引張破壊の変形挙動及び耐荷性状を表すことを試みる予定である。

## 参考文献

- 1) 前川 宏一、二羽 淳一郎、岡村 甫：鉄筋コンクリート用解析プログラム「COMM2」、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp. 79-86、1983. 10
- 2) 島 弘、周 礼良、岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着－すべり－ひずみ関係、土木学会論文集、No. 378/V-6、pp. 165-174、1987. 2
- 3) H. Reinhardt, H. A. W. Cornelissen and D. A. Hordijk: Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE Vol. 112, pp. 2462-2477, 1986. 11
- 4) 李 宝禄、前川 宏一：接触密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式、コンクリート工学、Vol. 26, No. 1 pp. 123-137、1988. 1
- 5) 二羽淳一郎：鉄筋コンクリート板要素の力学的性状、東京大学修士論文、1980
- 6) 青柳 征夫、山田 一字：面内力を受ける鉄筋コンクリートシェル要素の耐力変形特性、土木学会論文集、No. 331、pp. 167-180、1983. 3