

# 論文 鉄筋コンクリート有孔梁の付着・せん断破壊

藤井 栄<sup>\*1</sup>・細川 隆<sup>\*2</sup>・前田 剛<sup>\*3</sup>・近藤吾郎<sup>\*4</sup>

**要旨:** 中央部に開孔を有する鉄筋コンクリート梁に関して、補強方法、斜め補強筋の定着長さをパラメータとして実験、解析を行ない、以下の知見が得られた。(1)斜め補強のない有孔梁は開孔から生じるひび割れが顕著になりせん断破壊した。(2)斜め補強を施したものは、定着長さの相違による最大耐力の差はほとんどなかったものの、斜め定着長の短いものは最大耐力以後の劣化が大きく、斜め筋のせん断抵抗への寄与が小さい。(3)斜め補強筋は等価なあばら筋より有効である。(4)斜め補強筋のせん断伝達機構モデルの問題点を指摘した。

**キーワード:** 有孔梁、斜め補強筋、せん断破壊、付着破壊

## 1. はじめに

RC造の梁に開孔を設けた場合、その断面欠損により孔周囲に応力が集中し、部材強度や変形性能が著しく低下することが知られている。施工の容易な補強金物や慣用的補強方法は数多くあるが補強理論は必ずしも明確になっていない。また従

来の設計法ではせん断破壊と付着割裂破壊との関係について必ずしもその機構に基づいた説明はなされていない。本研究では開孔部を介したせん断力伝達特性、斜め補強筋の定着位置がせん断破壊、付着破壊に及ぼす影響について実験的、解析的に検討を行なったものである。

表 1 鉄筋の材料特性

|          | ヤング係数<br>( $10^6 \text{kgf/cm}^2$ ) | 降伏強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 主筋(D19)  | 2.06                                | 4430                          | 6090                          |
| フープ筋(D6) | 1.98                                | 3030                          | 5220                          |
| 斜め筋(D10) | 2.02                                | 4110                          | 5810                          |

表 2 コンクリートの材料特性

| 強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ ) |      | ヤング係数<br>( $10^6 \text{kgf/cm}^2$ ) |
|--------------------------|------|-------------------------------------|
| 圧縮                       | 引張   |                                     |
| 293                      | 24.6 | 2.16                                |

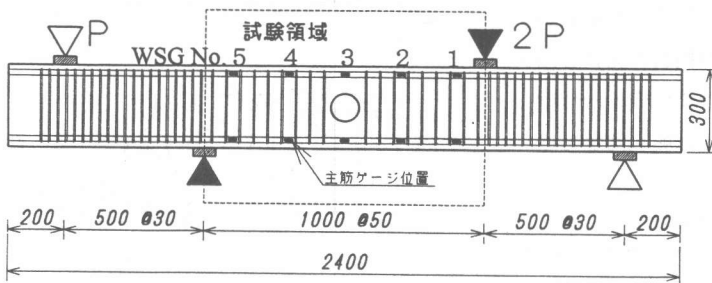


図 1 試験体全体図 (B-1)

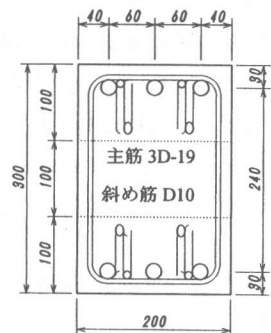


図 2 試験領域断面図

<sup>\*1</sup> 京都大学助教授 工学研究科環境地球工学専攻 工博 (正会員)

<sup>\*2</sup> 京都大学大学院生 工学研究科環境地球工学専攻

<sup>\*3</sup> 京都大学学生 工学部建築学科

<sup>\*4</sup> 千葉大学助教授 工学部建築工学科 工博 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2. 1 試験体共通要因

図1に示すスパン中央に偏心のない1個の孔を持つ有孔梁を実験の対象とした。荷重方法は逆対称曲げ方式の一方単調荷重である。試験体スパン長は1000mm、断面 $b \times D = 200 \times 300$ (mm)、シアスパン比=1.85、孔径は100mmで梁せいの1/3である。図2に断面配筋詳細を示す。主筋は3-D19 ( $p_t = 1.59\%$ )、あばら筋は2-D6 ( $p_w = 0.63\%$ )、斜め補強筋にはD10を用いた。鉄筋、コンクリートの材料特性を表1、表2に示す。

### 2. 2 開孔補強方法

各試験体の特徴を表3、図3に示す。無開孔の試験体A、これに開孔を設けたB-1を基本に、B-2は孔位置に本来配筋されるべき2組のあばら筋を孔際に束ねて配したものである。C-1、C-2、C-3は斜め補強筋を施したものでそれぞれ斜め補強筋の長さ(定着位置)を変化させた。開孔補強筋を孔の両側のフープ筋より外側に定着するとその性能を十分に発揮できるという研究成果<sup>1)</sup>をもとに、傾斜角を $30^\circ$ とした。折り曲げ余長は100mm共通としている。

## 3. 実験結果

### 3. 1 破壊状況

図3に試験領域のひび割れ図を示す。Aを除く他の5体は $P \approx 5.0\text{tf}$ で開孔部に斜めひび割れが生じた。Aは非開孔部せん断ひび割れの開口と主筋に沿うひびわれが卓越し、曲げ降伏後の変形増大に伴って付着破壊した。B-1は開孔部からの

斜めひび割れが卓越してせん断破壊した。B-2も同様の斜めひび割れが卓越してせん断破壊した。C-1は開孔部からの斜めひび割れの進展と共に、非開孔部から続く上端筋側付着ひび割れが進展し付着破壊した。また、斜め筋に沿ったひび割れも他のCグループのものより多い。C-2は曲げ降伏が確認できたものの、開孔部からのせん断ひび

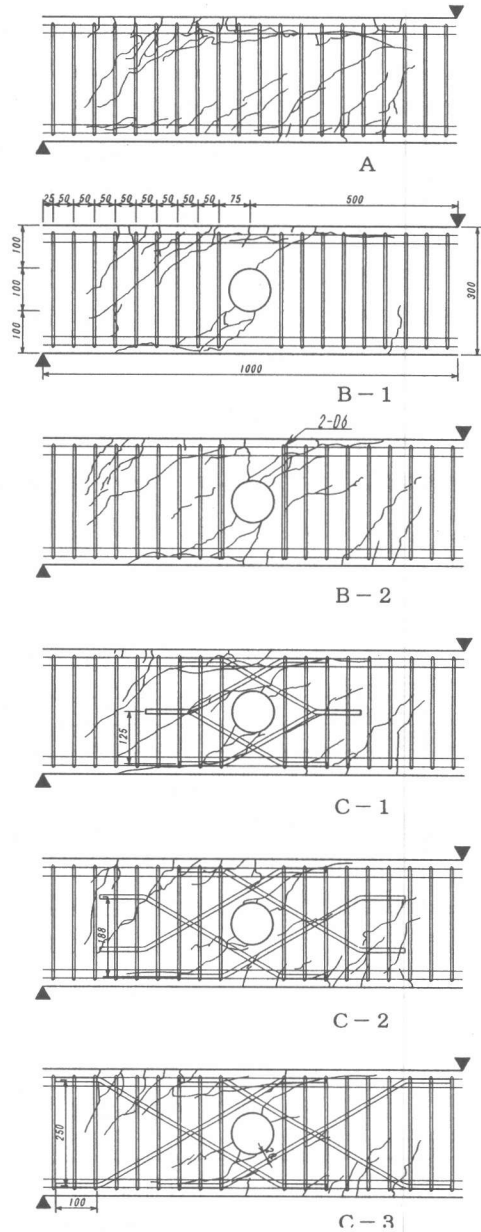


図3 試験領域詳細図・ひび割れ図

表3 試験体開孔部周囲の特徴

| 試験体名 | 特徴                                |
|------|-----------------------------------|
| A    | 孔なし                               |
| B-1  | 有孔・無補強                            |
| B-2  | 有孔・最近接せん断補強筋2倍                    |
| C-1  | 有孔・斜め補強・斜め筋高さ：<br>せん断補強筋長手内法の1/2倍 |
| C-2  | 有孔・斜め補強・斜め筋高さ：<br>せん断補強筋長手内法の3/4倍 |
| C-3  | 有孔・斜め補強・斜め筋高さ：<br>せん断補強筋長手内法の1倍   |

割れが進展してせん断破壊した。C-3はC-1と同様に、斜めひび割れの進展と共に最終的に上端筋付着ひび割れが顕著に進展し付着破壊したと判断できる。

### 3.2 最大耐力・荷重-変形曲線

表4に実験の最大耐力と終局強度指針式<sup>2)</sup>・広沢式<sup>3)</sup>により算定したせん断耐力計算値、付着割裂耐力計算値(靱性保証型設計指針式<sup>4)</sup>・広沢式<sup>3)</sup>、曲げ降伏時せん断強度計算値および破壊モードを示す。本実験範囲ではいずれの耐力式もかなりの安全側の評価となっている。図4に荷重-変形関係を示す。開孔試験体は剛性が低い。実験では、ほぼ同程度の最大耐力を示したCグループの内C-1が最大耐力以後の耐力劣化が大きく、C-2、C-3は、ほぼ同一曲線をたどる。

表4 せん断耐力一覧

| 試験体名 | 実験値 (tf) | 計算値        |          |             |          |
|------|----------|------------|----------|-------------|----------|
|      |          | せん断力       |          | 付着          |          |
|      |          | 終局強度式 (tf) | 広沢式 (tf) | 靱性型指針式 (tf) | 広沢式 (tf) |
| A    | 18.5     | 21.4       | 15.6     | 22          | 11.6     |
| B-1  | 11.5     | 8.1        | 7.1      | —           | 11.6     |
| B-2  | 15.3     | 8.1        | 8.7      | —           | 11.6     |
| C-1  | 17.1     | 13.9       | 11.8     | —           | 11.6     |
| C-2  | 17.8     | 13.9       | 11.8     | —           | 11.6     |
| C-3  | 17.2     | 13.9       | 11.8     | —           | 11.6     |

| 試験体名 | 計算値         |       | 注) 破壊モード  |
|------|-------------|-------|---|
|      | 曲げ降伏強度 (tf) | 破壊モード |   |
| A    | 17.9        | FB    | F...曲げ降伏<br>B...付着破壊<br>S...せん断破壊<br>FB...曲げ降伏後付着破壊<br>(B)...付着破壊を伴う<br>FS...曲げ降伏後せん断破壊 |
| B-1  | 17.9        | S     |   |
| B-2  | 17.9        | S(B)  |   |
| C-1  | 17.9        | B     |   |
| C-2  | 17.9        | FS    |   |
| C-3  | 17.9        | B     |   |

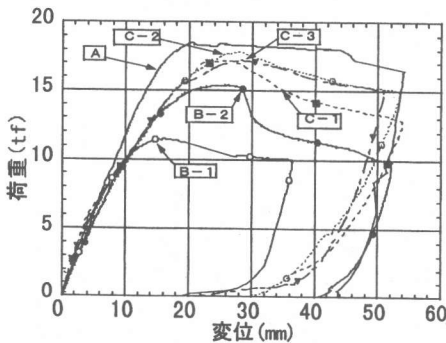


図4 荷重-変形曲線

### 3.3 主筋ひずみ分布

図5に主筋(上端筋)のひずみ分布を示す(ひずみ計測位置は図1参照)。試験体Aでは全域で大きな引張応力に転化し、付着破壊したことがわかる。同程度の荷重段階(約9tf×印)で各試験体を比較すると、開孔上部に位置するひずみの値(ゲージ位置 No.3)がCグループではBグループのおよそ半分の値であり開孔部のせん断ひびわれの進展に起因した主筋引張応力の増大が抑制され、斜め補強筋を施すことで見かけ上の付着劣化を低減していることがわかる。試験体AとCグループの中央領域(区間2-4)の応力勾配を比較すると顕著な差は見られず、主筋に沿って斜め補強筋を定着したことの付着性能への影響は明瞭でない。

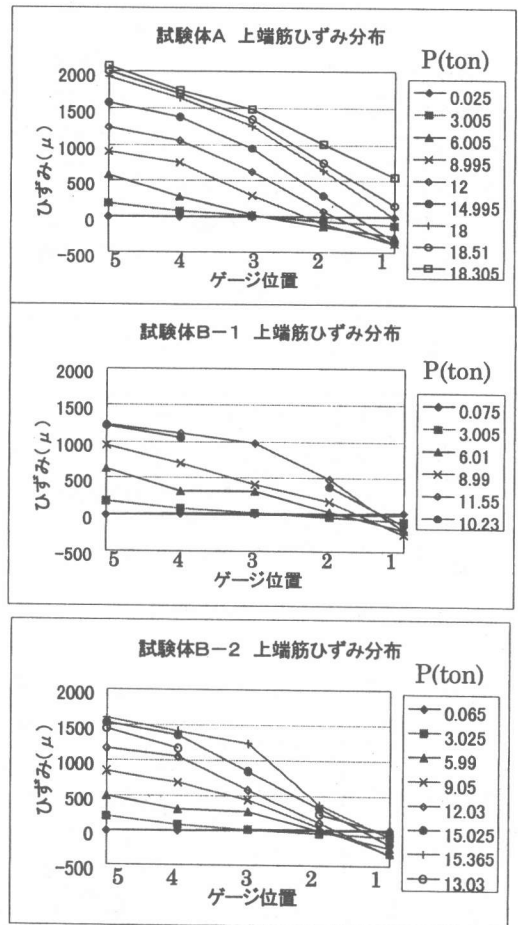


図5 主筋ひずみ分布(その1)

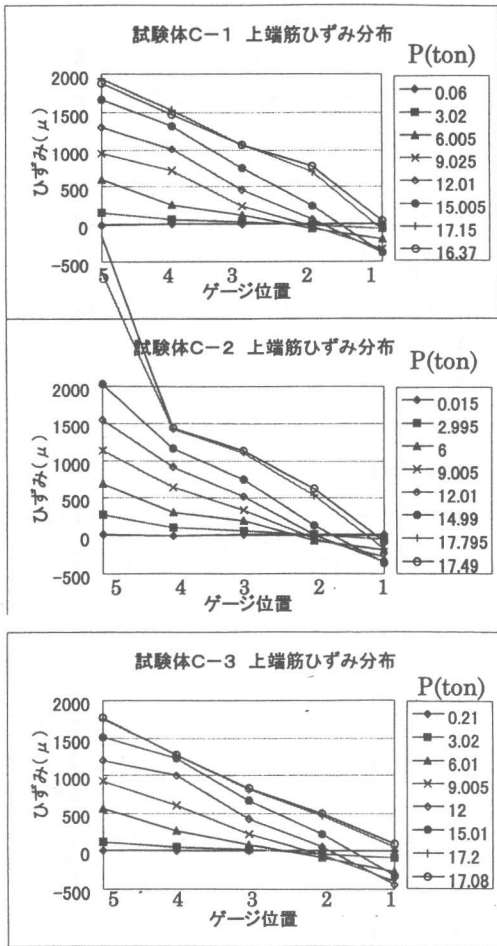


図 5 主筋ひずみ分布 (その2)

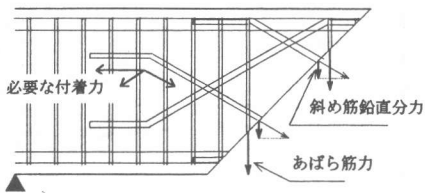


図 6 せん断力負担図

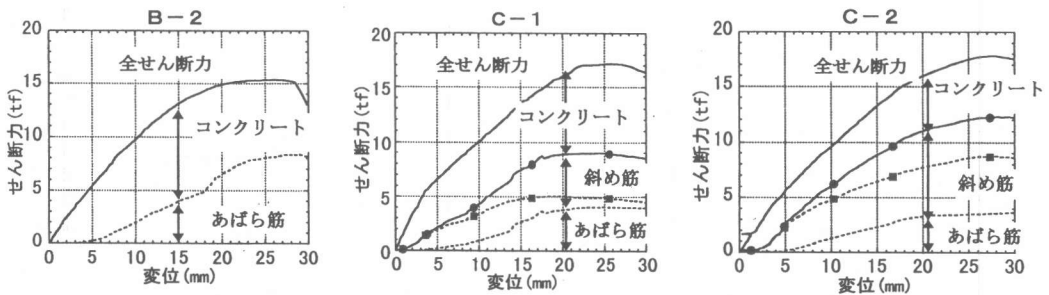


図 7 せん断力分担推移図 (B-2、C-1、C-2)

### 3. 4 開孔補強筋の効果

開孔中心を通る 45° 破壊面 (図 6) について、計測値より開孔補強筋が負担するせん断力の推移を図 7 に示す。B-1、B-2 の推移はほぼ等しく、あばら筋量が 2 倍の B-2 はあばら筋負担せん断力も 2 倍 (約 4tf と 8tf) となっており最大耐力の差とほぼ等しい。C-1 の斜め補強筋の負担せん断力は、ほぼ等しい性状を示した C-2、C-3 に比べて小さい。図 3 のひびわれ状況からも、C-1 では折り曲げ位置にせん断ひびわれが生じて定着性能が低下し伝達せん断力が頭打ちになったことが考えられ、斜め補強筋の効果を発揮させるためには C-2 程度の位置まで延長して定着させることが必要であるといえる。

トラス機構の考え方によれば折り曲げ部で伝達されたせん断力を材端まで伝えるためには折り曲げ位置ではかなりの付着力 (図 6 参照) が必要となる。既往のモデルではこの点を不問としているが、折り曲げ定着位置までの直線部の付着による応力伝達によるコンクリート圧縮側の傾斜角の変化やコンクリートの引張抵抗によるせん断伝達 (定着能力) の限界について考慮する必要があると思われる。

### 4. 有限要素法解析

#### 4. 1 解析概要

開孔部を有する梁のせん断伝達機構を検討するため、試験体 A、B-2、および図 6 の破壊面で B-2 のせん断補強筋量と等価となるように斜め補強筋断面積を  $\phi 8$  に変更し C-2 の配筋形態

表 5 材料モデル・特性値

|         | 要素モデル  | 構成関係   |
|---------|--|--|
| コンクリート  | 3 節点定ひずみ三角形要素  | Darwinらの等価一軸ひずみモデル、kupferの破壊条件                                   |
| 鉄筋      | 2 節点トラス要素  | バイリニア型応力-ひずみ関係   |
| クラックリンク | 4 節点接合要素   | 引張軟化モデル: CEB-FIPモデルコード <sup>5)</sup> せん断伝達モデル: Liらの接触密度関数モデル     |
| ボンドリンク  | 4 節点接合要素   | 島らの付着すべりを考慮した非線形モデル <sup>6)</sup> にひび割れ面でのだぼ作用によるせん断伝達を表す弾性バネを付加 |
| 特性値     |  |  |
| コンクリート  | 初期ポアソン比: 0.2、圧縮強度: 293、引張強度: 43.2kgf/cm <sup>2</sup><br>(クラックリンク位置ひびわれ先行のために割り増し)  |  |
| 鉄筋      | Es=2100000、ひずみ硬化域剛性: 50000kgf/cm <sup>2</sup>  |  |
| クラックリンク | コンクリート引張強度: 25kgf/cm <sup>2</sup><br>初期ひび割れ幅: 0.0001cm<br>引張応力が引張強度の1/4になる時のひび割れ幅: 0.0016cm<br>引張応力が0になる時のひび割れ幅: 0.016cm<br>骨材径: 1.5cm |  |
| ボンドリンク  | だぼせん断剛性: 200kgf/cm <sup>3</sup>  |  |

注) 解析モデルの詳細は近藤吾郎: 京都大学学位論文「コンクリート構造の非線形要素解析に関する研究」, 1996を参照されたい。

にしたがって配したC-2\*について非線形有限要素法による二次元解析を行なった。開孔中心点に関する変形、応力の対称条件を利用して試験領域のせん断スパンの半分を解析領域とし実験の載荷点位置をローラー支持とした。(図9参照)。加力は材端断面節点に実験応力条件と等価な曲げ圧縮、引張力、せん断力を作用させて、荷重増分型の解析を行っている。実験結果をもとにあらかじめ曲げ、せん断、付着ひびわれ位置を設定するdiscreteクラックモデルとした。鉄筋とコンクリートの共有節点にはすべてボンドリンク要素を配

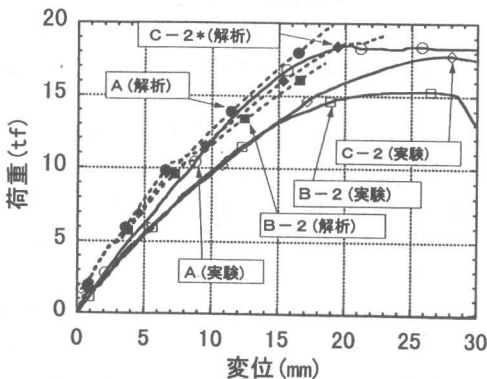


図 8 荷重-変形曲線 (解析と実験の比較)

している。表5に使用した材料モデルと特性値を一括して示す。

#### 4. 2 解析結果

解析による荷重-変形関係を図8に示す。計算は収束不能となった時点で打ち切っている。計算曲線が実験曲線に比して剛性が大きくなっている。また、開孔の存在による剛性、耐力の低下も実験の方が差の大きい結果となった。これらの性状は discrete クラックモデルとしたことや付着割裂を考慮した付着すべり特性モデルを用いなかったこと等に起因していると思われる。図9はB-2の解析上で終局状態に至ったP=17.2tf時のひびわれ・変形状況と、同一荷重時のC-2\*のひびわれ・変形状況を示す。

B-2では開孔からの斜めひび割れが卓越しているが、C-2\*では斜め補筋筋を施すことでひび割れの拡幅を抑えていることがわかる。

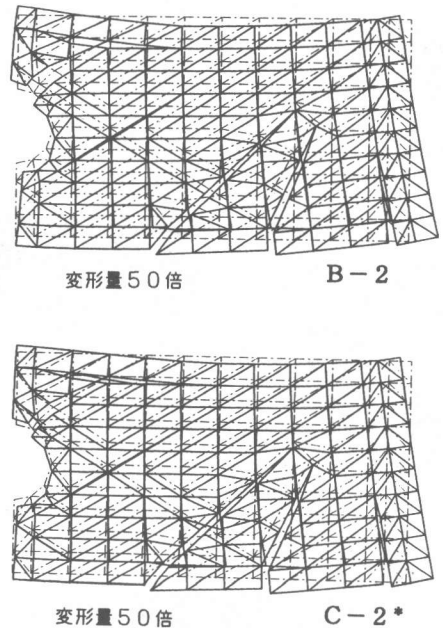


図 9 ひびわれ、変形状況解析結果

図10は各試験体の  $P=17.2\text{tf}$  時のコンクリート圧縮主応力分布図を示す。有孔梁は開孔部近傍で局所的に大きい圧縮応力が生じておりB-2、C-2\*の開孔右下部分の最大圧縮応力値はそれぞれ  $306\text{kgf/cm}^2$ 、 $254\text{kgf/cm}^2$  であった。斜め補強筋は開孔近傍のコンクリート圧縮応力成分を必要としないせん断伝達経路を形成することから開孔近傍のコンクリート圧縮応力を軽減する効果が現れている。一方、開孔のない試験体Aでは同じ位

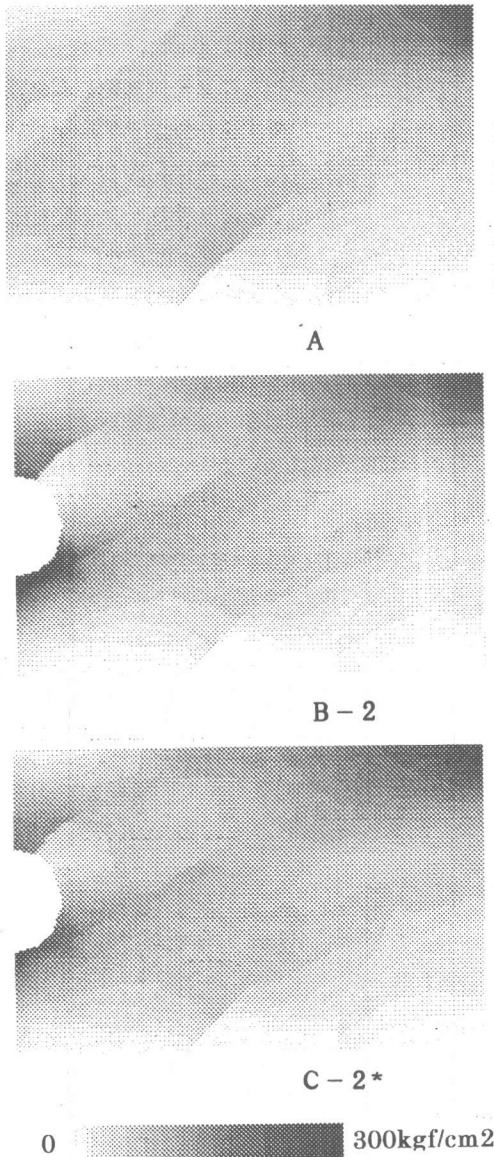


図 10 コンクリート圧縮応力分布解析結果

置のコンクリート圧縮応力は  $57\text{kgf/cm}^2$  であり一様な圧縮場が形成されている。

## 5. まとめ

本研究範囲で以下の知見を得ることができた。

- ・斜め筋による開孔部補強は開孔部からの斜めひびわれの拡幅を直接抑制し、開孔部のコンクリートの圧縮応力の低減、見かけ上の主筋の付着劣化低減に寄与する。
- ・斜め補強筋の定着長さの相違が最大強度に与える影響は小さいものであったが、定着長さの小さい場合にはピーク以後の耐力劣化が大きく、補強筋の効果を十分発揮させるためには梁せいの  $3/4$  程度まで延長して折り曲げることが必要といえる。
- ・斜め筋によるせん断伝達は、開孔部上下のコンクリート圧縮応力の増大を伴わない（軽減する）機構であり、あばら筋より有効である。
- ・斜め筋のせん断伝達機構を検討する上で、折り曲げ部以降の伝達経路、直線部分の付着作用、コンクリート引張抵抗を考慮する必要がある。

[付記] 本研究は文部省科学研究費（基盤研究（A）（1）「鉄筋コンクリート梁の開孔補強方法の開発」（代表市之瀬 敏勝）による研究である。

## 〔参考文献〕

- 1) 神谷典良、市之瀬敏勝ほか：RC有孔梁の開孔補強方法に関する実験，日本建築学会東海支部研究報告，1997年2月
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990年11月
- 3) 広沢雅也ほか：鉄筋コンクリート造有孔梁の設計方法に関する総合的な検討，財団法人日本建築センター，1994年5月
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説，1997
- 5) Committee Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'information, No.203, 1991
- 6) Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., Micro and Macro Models for Bond in Reinforced Concrete Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol.39, No.2, 1987