

# [91] 付着応力による割裂ひびわれに関する研究

正会員 ○ 西 堀 忠 信 (大阪市立大学)

和 木 晴 彦 (京阪コンクリート)

## 1 ま え が き

鉄筋コンクリート構造物の設計は、部材の終局強度を基準とした設計方法の妥当性が認められ、既に諸外国においては設計基準に採用されている。しかしながら、なお多くの検討が加えられるべき問題が残されているものと考えられる。終局強度を基準にした設計においては、設計上想定した破壊、例えば曲げ破壊等が起こるようその他の破壊がそれ以前に起らないことが保障されなければならない。鉄筋コンクリート構造物においては、突発的に起る破壊として、挫屈等の不安定現象のほか付着による定着部の破壊がある。引き抜き試験においてみられるように鉄筋軸に沿ってコンクリートに割裂ひびわれが発生すると付着応力が急激に低下し、大きなずれが生じ破壊に至る。定着部の破壊は特に大きな付着応力が生じる高強度で太径の鉄筋を用いる場合において起こる可能性が大きく、最近のように大型の鉄筋コンクリート構造物が建設され、そのためこれらの高強度・太径の異形鉄筋が用いられている現状にあっては、付着応力による割裂破壊の機構を解明し、有効な補強方法を検討することは重要なことと考えられる。先きに著者らは、コンクリート板内に作用する面内集中力によって割裂ひびわれが生ずることおよびこの発生は鏡像理論による弾性解によって予知しうることを明らかにした。

本研究においては、先きの研究結果を発展させ、コンクリート板に埋め込んだ鉄筋の引き抜きによる付着応力と割裂ひびわれとの関連を検討し、板厚の異なる3枚のコンクリート板に埋め込んだ異形鉄筋の引き抜き試験結果より、荷重の増加に伴う付着応力度の分布形状の変化と板の鉄筋埋め込み位置の水平方向引張応力度との関連、および付着応力度を低下させる割裂ひびわれの予測のため板の面内に作用する分布荷重による面内の水平方向の応力を求める弾性解を誘導しこの解と実測値との関連などを明らかにした。

## 2 実 験 概 要

実験に用いたコンクリート板の引き抜き試験供試体は、板厚の異なる3種で、その形状寸法は図-1に示すような90×90cmの正方形で、板厚は、No1が10cm、No2が15cm、No3が20cmである。

供試体を使用したコンクリートは、最大骨材寸法25mm、スランプ8cm、単位セメント量360Kg/m<sup>3</sup>水セメント比53%、材令28日における平均の圧縮強度38.4MPa、引張強度3.55MPaである。板供試体は実験室内で水平にして打設し、気乾養生した。実験は材令21~28日で行なった。実験時の平均の圧縮強度は29.7MPa、引張強度は2.44MPaであった。

実験用鉄筋は、D35のSD35横フシ型の異形鉄筋の半断面を削り落し、中心部に5×2.5mmの溝を設けたもの2本を貼り合せたものである。鉄筋の中心部の溝には鉄筋のフシとフシの間に約3.2mm間隔でワイヤーステンゲージを貼付した。貼付したゲージによるひずみと荷重の関係はコンクリートの打設前に行なった鉄筋の引張試験によってキャリブレーションした。

荷重は、100t万能試験機により、実験用鉄筋をつかみ引き抜くように載荷した。荷重の反力はコンクリート板中に埋め込んだ2本のアンカー用鉄筋(D28SD35)、反力梁、反力棒を介して試験機の固定端に伝達させた。荷重は0.1tづつ上昇させ各測定を行なった。

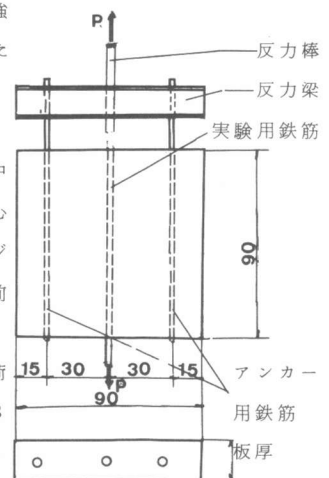


図-1 供試体の形状・寸法

リート板の水平方向のひずみの測定は、図-1に示すように鉄筋軸に沿って75mm間隔に貼付したワイヤーストレングージによった。また、ひびわれは、ストレングージのひずみからの推定したほかに、目視観察によった。

実験の結果、板厚10cmの供試体No.1は荷重4tで最初に割裂ひびわれが観察され、荷重10.7tで鉄筋軸に沿ったひびわれが自由端付近まで発達し破壊した。板厚15cmのNo.2および板厚20cmのNo.3はそれぞれ初期ひびわれが5tおよび10tで観察され、14.5tおよび20.5tで破壊した。

### 3 鉄筋応力度分布と付着応力度分布

鉄筋の応力度は、鉄筋の中心部に約32mm間隔に貼付したワイヤーストレングージによるひずみ測定結果より求めた。鉄筋とコンクリートの付着応力度は、鉄筋応力度の変化率から計算によって求められるが、鉄筋の応力度 $\sigma_s$ の隣接する2測定点の差 $\Delta\sigma_s$ と測定点間隔 $\Delta x$ から付着応力度 $\tau$ を $\tau = A_s \Delta\sigma_s / U \Delta x$ として求めると、 $\Delta x$ を小さくすることには限度があり、また、 $\sigma_s$ には多少のばらつきがあるので、引き抜き力が小さく、付着応力度が戴荷端の近傍で著く変化する場合、信頼度の高い付着応力度を求めることは困難である。本研究においては著しい変化を示さない鉄筋応力度分布を一つの曲線に近似させることを試みた。使用した曲線は、

$$\sigma_s = A (B - x)^3 \cdot (x^2 + Cx + D) \dots \dots \dots (1)$$

で、係数A, B, CおよびDは実験値より最小自乗法によって求めた。ただし、鉄筋の応力度は埋め込み長さxの増加に対して一様減少するので(1)式は $d\sigma_s / dx < 0$ の範囲でのみ定義され、 $x = 0$ と $d\sigma_s / dx > 0$ の区間は $\sigma_{smax}$ の値をとるものとする。ひずみの実測結果より求めた鉄筋応力度と(1)式による推定曲線の関係の1例を図-2に示す。

鉄筋応力度が(1)式であらわされると、鉄筋の断面積を $A_s$ 、周長をUとすると

$$\begin{aligned} \tau &= -d\sigma_s \cdot A_s / U dx \\ &= A_s \cdot A (B - x)^2 \{ 5x^2 - 2(B - 2C)x - (BC - 3D) \} / U \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

となる。上式は $\tau > 0$ の範囲で定義され、 $\tau < 0$ となる範囲は全て $\tau = 0$ とする。(2)式より求めた付着応力度の分布曲線を図-3に示す。

図-4は、(2)式より求めた各供試体の各荷重における最大付着応力度を示したものである。また図-5は、最大付着応力度の生ずる位置を示したものである。この2つの図より最大付着応力度が戴荷端の近傍に生じる範囲では、付着応力度の最大値は荷重の増加とともに増大する傾向を示しているが、荷重5~8tから付着応力度の最大値を示す位置が自由端の方向に移動し、最大付着応力度も急激に低下する。その後、板厚の大きい場合には最大値が上昇-降下をし、その後ほぼ一定を示し、また、最大値を示す位置も停留-移動-停留している。最大付着応力度は板厚が大きい程大きくなる傾向を示している。

図-6は、戴荷端側の付着応力度が0となった区間を示したものであり、図-7は自由端側で引き

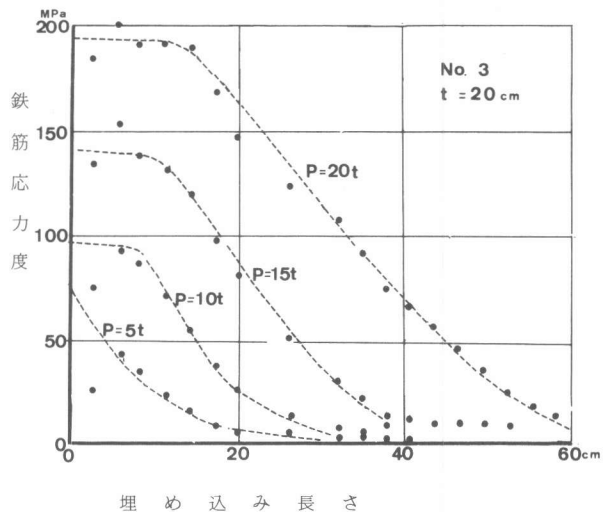


図-2 鉄筋応力度分布曲線

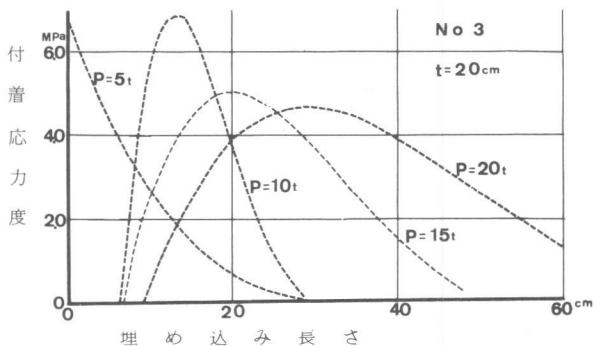


図-3 付着応力度分布曲線

抜き力に対して関与しない範囲を示したものである。図-6より最大付着応力度位置が自由端側へ移動するとすぐに戴荷付近の付着が切れることを示し、最大付着応力度の生ずる位置の自由端への移動とともに付着の切れる範囲が拡大している。また図-7より、最大付着応力度の位置の移動とともに付着応力度の生ずる範囲が急速に拡大している。なお、No1、No2およびNo3の平均付着応力度は1.08、1.47および2.08 MPaで最大付着応力度の1/3以下となっている。

#### 4 コンクリート板の水平方向ひずみ

図-8~10は、コンクリート板に貼付したワイヤーストレングージによるひずみの測定値を示したものである。図中の2は戴荷端を基準にした鉄筋軸方向の距離を示したものである。また図中の1点鎖線で示したひずみはコンクリートの引張強度をもとにして推定した<sup>2)</sup>コンクリートの終局引張ひずみである。荷重-ひずみ曲線はひずみが0.003%付近から勾配がゆるやかになり、ひずみが急激に増加していることを示している。終局引張ひずみの推定値と荷重-ひずみ曲線の交点は、そのゲージ位置におけるひびわれ発生荷重を示すものと考えられる。図-8~10より求めたひびわれ長さを図-11に示す。図より3種の供試体のひびわれ荷重は2.1t、4.8および6.8tであり、目視観察したひびわれ荷重(図中でBで示す)とはNo2でほぼ一致しているがNo1およびNo2では1.9および3.2t小さく、目視観察によるひびわれの発見が遅れることを示している。また、図中にAで示した荷重は最大付着応力度がピーク値を示した荷重であり、付着応力度はコンクリートの割裂ひびわれと密接な関係があり、戴荷端付近にひびわれが発生してから約1tで最大付着応力度が低下し、ひびわれの進行とともに付着の切れる区間が進行する。図-5および図-11より初期ひびわれの段階を除くと最大付着応力度の生ずる位置とひびわれの先端位置がほぼ一致することが明らかである。

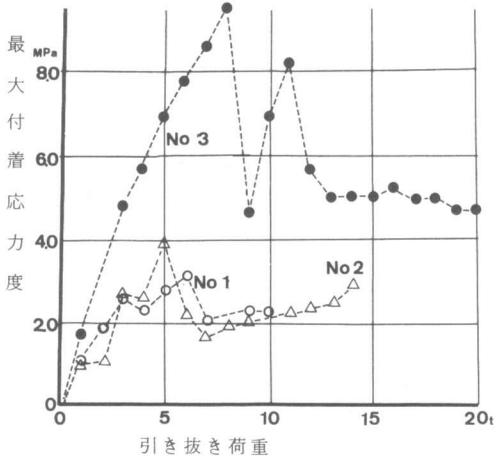


図-4 荷重-最大付着応力度

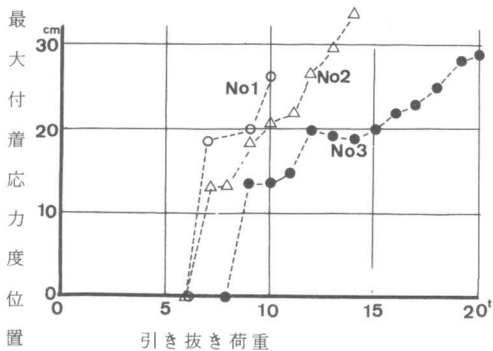


図-5 荷重-最大付着応力度の位置

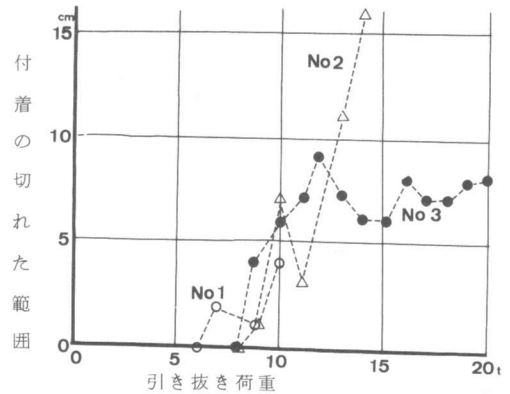


図-6 荷重-付着の切れた範囲

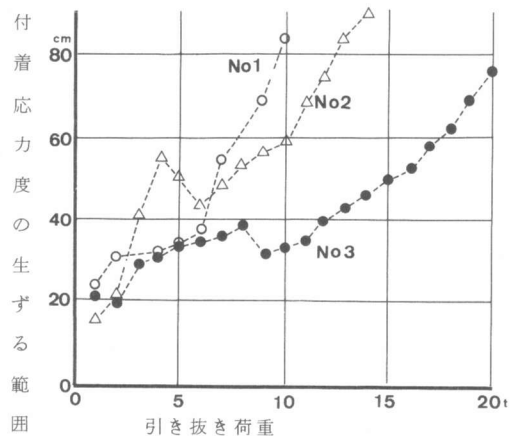


図-7 荷重-付着応力度の生ずる範囲

5 割裂ひびわれと付着応力度との関係

半無限板の面内の1点に集中荷重Pが作用する場合、荷重点を含む鉛直軸上の水平方向の応力度 $\sigma_x$ は自由線からの距離を $z$ 、荷重作用位置を $\ell$ 、ポアソン数を $m$ とすると、

$$\sigma_x = \frac{P}{\Pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \frac{2\ell^2}{(\ell+z)^3} + \frac{m-1}{4m} \left( \frac{1}{\ell-z} + \frac{z+3\ell}{(\ell+z)^2} \right) \right\} \dots \dots \dots (3)$$

で表わされる。付着応力度による鉛直方向の荷重が板に作用する場合、荷重は集中荷重ではなく、分布荷重の形をとる。今 $m=5$ とし付着応力の始点を $z_1$ 、終点を $z_2$ とすると

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{0.2}{\Pi} \int_{z_2}^{z_1} \left\{ \frac{6\ell^2}{(\ell+z)} + \frac{1}{\ell-z} + \frac{z+3\ell}{(\ell+z)^2} \right\} \tau U d \ell \\ &= A_s \cdot A \left\{ 1.5 (z_2^4 - z_1^4) - 1.6 (3B-C) (z_2^3 - z_1^3) + 1.8 (3B-3BC+D) (z_2^2 - z_1^2) - 2.4B (B^2 - 3BC + 3D) (z_2 - z_1) - 1.2B^2 (BC - 3D) \log (z_2/z_1) \right\} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

となる。(4)式から求めたコンクリート板の水平方向応力度と実測ひずみから $E_c = 30000 \text{ MPa}$ として求めた応力度の関係を図-12に示す。

図によるとNo.3は計算値の1/2程度の応力しか示していないが、No.1およびNo.2は計算値と非常によい相関を示している。実験荷端以外の点においても上記の同様な方法で計算応力度と実測応力度の比較を行なったが、(4)式に曲げの影響を加えすと非常によく一致することが確かめられた。

6 まとめ

実験および計算結果をまとめると、(1)鉄筋応力度分布は(1)式でかなりよい精度で近似できること、(2)付着応力度の最大M値は板厚が厚い程大きく、その位置が載荷端近くにあるときピークP値を示し、計算上のコンクリートの水平方向応力度も最大となること、(3)付着応力度が低下し始める荷重と割裂ひびわれ荷重とはほぼ一致すること、(4)付着応力の分布形状がわかると割裂ひびわれ荷重は計算によって推定できること、などである。

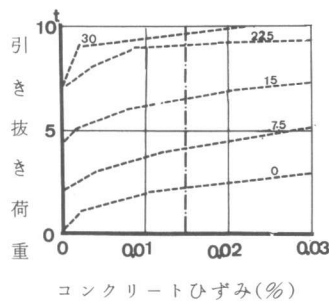


図-8 荷重-ひずみ

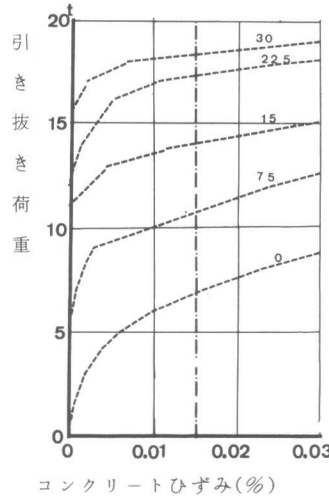


図-10 荷重-ひずみ

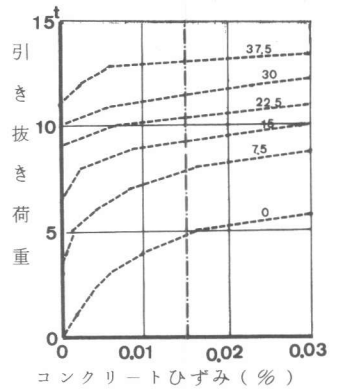


図-9 荷重-ひずみ

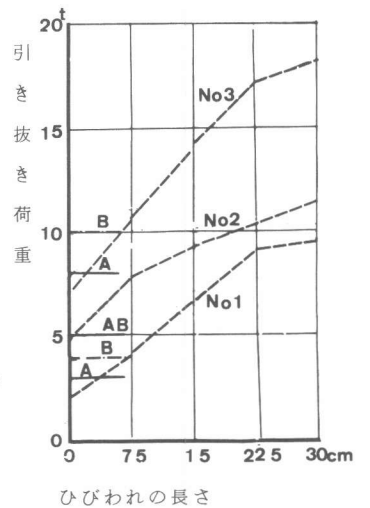


図-11 荷重-ひびわれ長さ

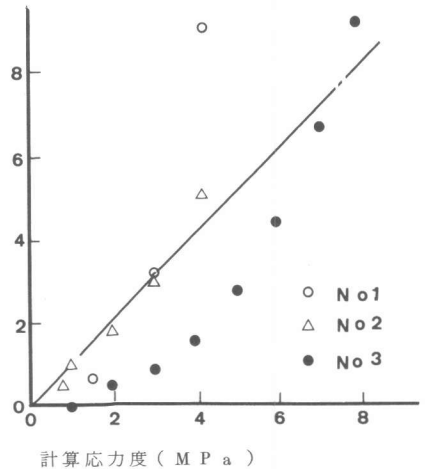


図-12 コンクリート板水平方向応力度

参考文献1. 薄板の付着ひびわれについて 西堀忠信 第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集

2. コンクリート橋 横道英雄著 技報堂