

論文

[1121] 鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード

松島 学*1, 堤 知明*2, 関 博*3, 松井邦人*4

1. はじめに

コンクリート表面からの塩分浸透により鉄筋は腐食し、かぶりコンクリートにひびわれを発生させ、はく離・剥落へと進展する。実際のひびわれを観察すると、かぶり厚さがある程度あると、鉄筋に沿ったひびわれを生じるが、鉄筋のかぶりコンクリート厚さが薄い場合は、鉄筋に沿ったひびわれが発生する前に、はく離する現象が見られる。Browne [1] によると、この違いは鉄筋のかぶりコンクリート厚さ t_p と鉄筋径 ϕ の比 t_p/ϕ で表され、 $t_p/\phi > 1.5$ 以上の時はひびわれを、以下の時ははく離が発生することを示している。図-1. a, bに鉄筋が浅い場合と深い場合を比較して図示する。また、塩害によりかぶりコンクリートがはく離およびひびわれが生じた場合の実際の現象を写真-1. a, bに示す。

本研究は、これらの物理現象を説明する力学モデルを提案し、実構造物でのひびわれモードを評価でき得るかを調べたものである。

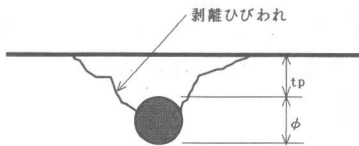


図-1. a かぶりの薄い場合

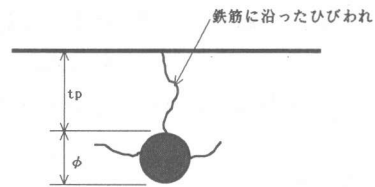


図-1. b かぶりの厚い場合

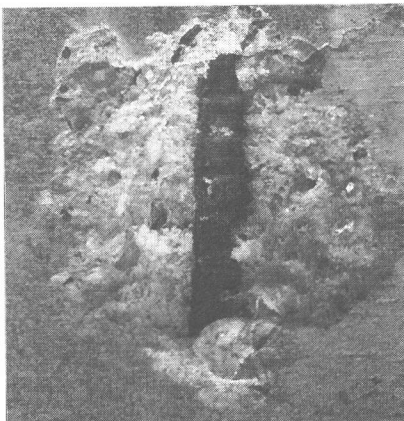


写真-1. a かぶりの薄い場合

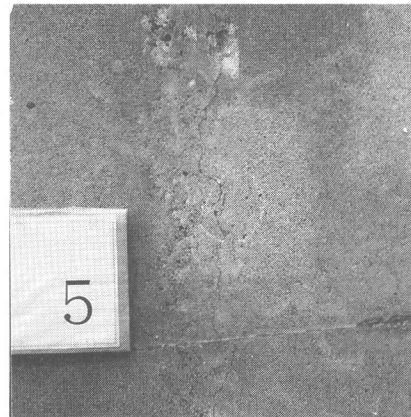


写真-1. b かぶりの厚い場合

- *1 東電設計(株)技術開発本部研究開発部課長 工修 (正会員)
- *2 東京電力(株)技術開発本部技術研究所構造研究室主任研究員 工修 (正会員)
- *3 早稲田大学理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)
- *4 東京電機大学理工学部建設工学科教授 Ph.D. (正会員)

2. ひびわれのモデル

2.1 円筒モデルによるひびわれ発生 [2], [3]

一般に、所定のかぶり厚さを取れば、鉄筋腐食によるひびわれ発生は腐食膨張により発生する内圧を受ける圧肉円筒モデルにより表される。この内圧によりコンクリート表面にひびわれが発生し、実際の塩害で見られるひびわれとなる。このような現象は、内圧を受ける円筒シェルとして取り扱うことができる。この円筒モデルでは、円筒を弾性体として取り扱っている厚肉円筒シェルと円筒の応力の塑性を考慮した（平均応力説 [4]）薄肉円筒シェルの仮定がある。

(1) 薄肉円筒モデル [5]

コンクリートにひびわれが発生する条件は、円筒断面で均等になるので、断面引張応力度 σ_t 、内圧 q とすると式(1)で表される。

$$\frac{\sigma_t}{q} = \frac{1.0}{k - 1.0}, \quad k = \frac{D}{\phi} \quad (1)$$

ここで、 D は鉄筋中心からコンクリート表面までの距離の2倍（ $=2t_p + \phi$ ）で、 ϕ は鉄筋径である。

この算定式からひびわれは、どの方向に対しても同等に発生する確率を持っている。しかしながら、実際の鉄筋の腐食膨張は、算定式の仮定とは異なり、鉄筋は表面コンクリートに一番近い面が特に腐食することからひびわれは水平に発生し、その後、モードが変化してコンクリート表面に向かってひびわれが卓越するものと想定される [6]。

(2) 厚肉円筒モデル

コンクリートは脆性材料であり、内空のひびわれ発生が即ひびわれの進展につながるとしている。厚肉円筒モデルを図-3に示す。この解は、断面引張応力 σ_t 、内圧 q とすると式(2)で表せる。

$$\frac{\sigma_t}{q} = \frac{k^2 + 1.0}{k^2 - 1.0}, \quad k = \frac{D}{\phi} \quad (2)$$

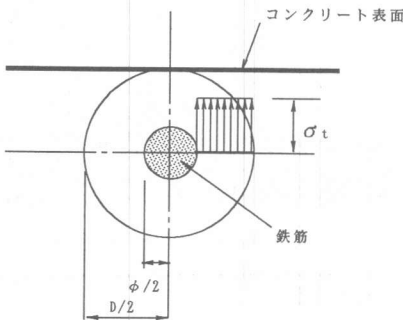


図-2 薄肉円筒モデル

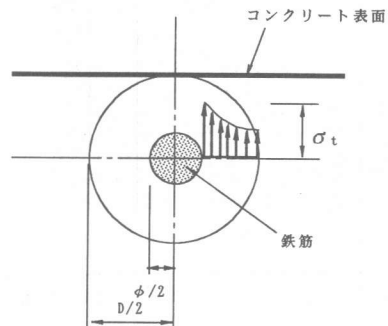


図-3 厚肉円筒モデル

2.2 円孔を持つ半無限板のひびわれモデル

施工のばらつきなどにより鉄筋のかぶり厚さが小さくなることが実際の施工では良くみられる。このようなかぶり厚さの場合、鉄筋腐食の膨張圧によりはく離を生じている。一方、理論的にもかぶり厚さがあまりない場合は、前に示した円筒モデルで求められないことが弾性解 [7] から得られる。内圧を受けるかぶり厚さが薄い場合の円孔周方向およびコンクリート表面の応力の分布の例を図-4に示す。この図にみられるように、卓越する引張応力は図-2,3で仮定されたひびわれと異なり、鉄筋からある角度をもってコンクリート表面にひびわれが進展することが見られる。これが、かぶりが薄い場合にはく離となる現象を説明するものと考えられる。

上述の弾性論 [7] から、円孔内の応力分布を検討する。図-5のような半無限平板中の円孔に内圧が加えられた場合の円孔縁表面の接線方向応力 σ_θ は、弾性論から式(3)のように表される。

$$\sigma_\theta = q \left\{ -1 + \frac{2(\cosh^2 \alpha - \cos^2 \beta)}{\sinh^2 \alpha} \right\} \quad (3)$$

ここで、 q は内圧を、 α 、 β は式(4)、(5)のように表される。

$$D/\phi = \cosh \alpha \quad (4)$$

$$\pi - \theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sinh \alpha \cdot \sin \beta}{\cosh \alpha - \cos \beta} \right) \quad (5)$$

$$\alpha = \cosh^{-1}(D/\phi) \quad (6)$$

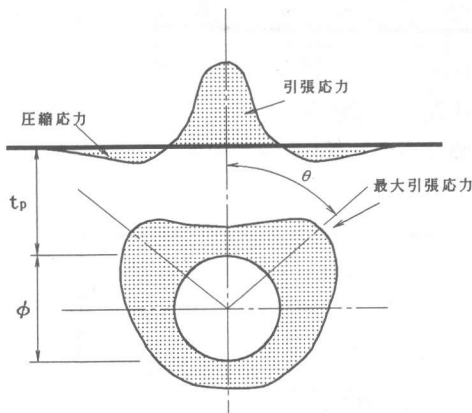


図-4 円孔を持つ半無限板の場合
(かぶり厚さが薄い場合)

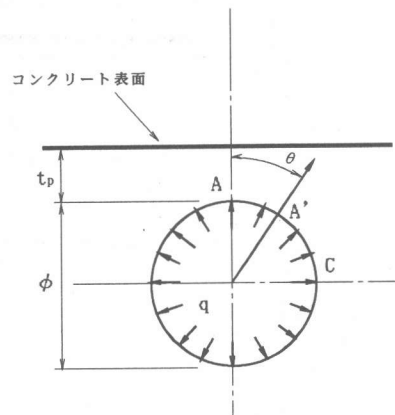


図-5 円孔をもつ半無限板の場合

円孔のへりでは、 σ_θ は直線へりへの最近点Aでかえって低く、常に圧力 q の絶対値に等しい引張応力しか示さず、 σ_θ の最大値はむしろその両側の範囲にあるA'点で生じる。すなわち、円孔へりでの σ_θ は、A'点で最大値、最近値A点で極小値 $-q$ をとる。図-6に円孔円周の引張応力の分布と D/ϕ の関係を示す。同図にみられるように、 D/ϕ の値が小さな時(<3.0)は、円孔円周には最大値が卓越するが、それ以上の値になると円周方向の引張応力はほとんど等しくなり、円筒モデルが適用できるものと思われる。また、応力の最大値の発生する位置は D/ϕ の関数となる。

次に、応力が最大となる位置を求める。式(3)より σ_θ が最大値となるのは $\cos^2 \beta = 0$ ($\beta = 90^\circ$)

となる位置であることがわかる。このときの円孔縁の位置 (θ_{max}) は式(7)のように求められる。

$$\pi - \theta_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{\sinh \alpha}{\cosh \alpha} \right) \quad (7)$$

最大引張応力の発生位置と D/ϕ の関係を図-7に示す。図にみられるように、かぶり厚さが小さくなるにつれて、はく離のひびわれ角度は小さくなる傾向がある。発生位置は D/ϕ が2.0以下である時は60度となる。しかしながら、4.0では80度前後となっている。この図だけからみると、 D/ϕ が大きくなるとひびわれ角度は80度となるために、はく離をするように見える。しかしながら、図-5に見られるように D/ϕ が大きくなる ($D/\phi > 3.0$) と最大値はあまり卓越しなくなり、コンクリート強度のばらつきを考えると、ほぼ円周上に均等の応力となり、最大値の意味はなくなる。従

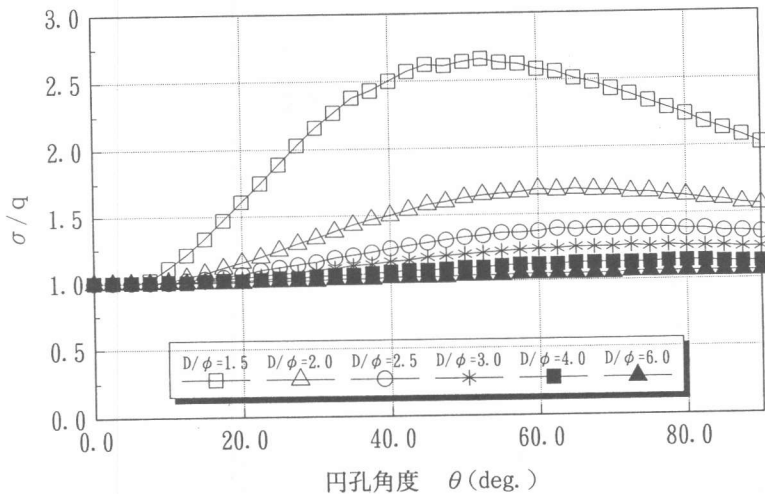


図-6 円孔円周の引張応力の分布と D/ϕ の関係

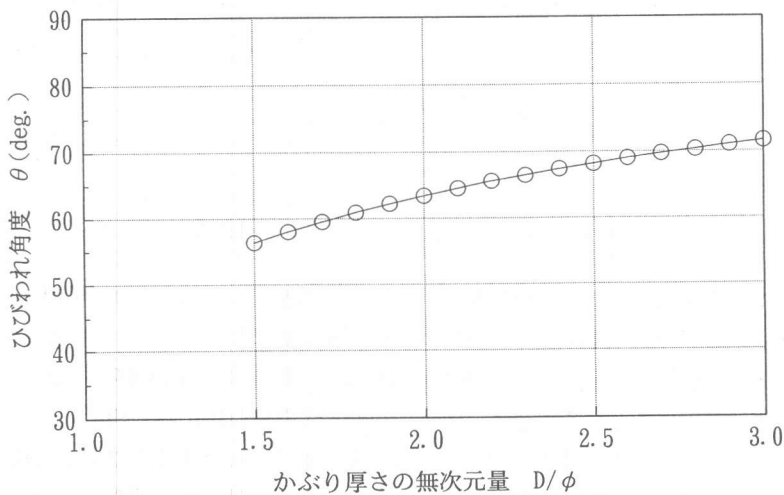


図-7 最大引張応力の発生位置と D/ϕ の関係

って、この図のひびわれ発生は、 $D/\phi < 3.0$ 前後の時に成り立つものと考えられ、はく離時のひびわれ角度は60~70度前後であることがわかる。

3. 現場調査との比較

2. で求めた理論の妥当性を検証するために、実構造物の劣化調査を行った。実構造物は東京湾に面した岸壁の腐食した鉄筋である。対象とした鉄筋は、鉄筋相互の影響を受けない程度の鉄筋間隔があるものを選んだ。はく離・ひびわれの発生からその鉄筋でのかぶり厚さ t_p 、鉄筋径 ϕ およびひびわれ角度 θ を調査した。実際のひびわれ角度は、鉄筋からおおぎ型に広がっており、その接線から角度を求めることは難しい。本研究では図-8に示すように最大はく離箇所のはく離幅 B とかぶり厚さからひびわれ角度を定義した。ひびわれは直線ではなく、放物線形状であること、特にコンクリート表面に達すると、表面に平行になることが観察される。この現象は、かぶり厚さが、薄い場合は特に顕著であった。従って、はく離ひびわれの先端は、コンクリート表面になると表面モルタルに沿ってひびわれが進展するので、ひびわれの曲率が一番大きな箇所をはく離幅とした(図-8参照)。

$$\tan^{-1}(\theta) = \frac{B - \phi}{2 \cdot t_p} \quad (8)$$

ここで、 B :最大はく離幅(cm), t_p :かぶり深さ(cm), ϕ :鉄筋径(cm)である。

得られたデータは全14ケースである。図-9にひびわれ角度 θ と D/ϕ の関係を示す。同図には理論

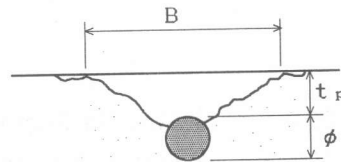


図-8 ひびわれ角度の定義

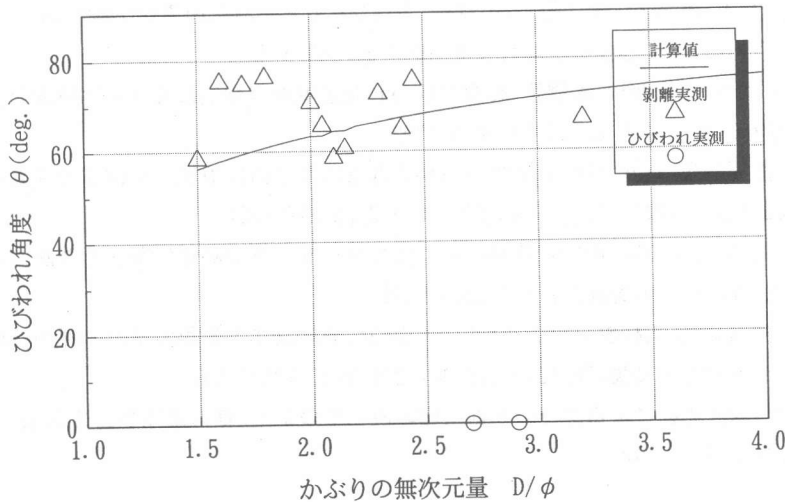


図-9 ひびわれ角度とかぶり厚さの関係

解による値も示す。図にみられるように、ばらつきが大きいもののひびわれ角度は60～80度の値となっており、本提案理論値と傾向が似ている。また、同図にはひびわれが発生し、はく離を生じなかった場合も示す。ひびわれの生じた場合は、 D/ϕ がほぼ3.0程度であり、ひびわれとはく離の限界値上であることが想定される。しかしながら、ひびわれのデータは数少なく定量的に判断するには至っていない。このように、本理論解はばらつきがあるものの、現場のひびわれモードと同程度の傾向があることがわかる。

4.まとめ

本研究は、弾性論からひびわれ発生モデルを作成し、その妥当性を既往のひびわれ調査結果から検証した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

(1)鉄筋腐食によるひびわれは、かぶり厚さが厚い場合はひびわれとなり、薄い場合ははく離となる式を弾性論から導いた。その結果から、 D/ϕ が3.0以下の時ははく離を生じ、3.0以上の時はひびわれとなることを示した。また、はく離をする場合の角度は60～70度である。

(2)既設の海岸構造物の岸壁のひびわれ調査比較から、求められた理論値のひびわれの発生角度はばらつきはあるものの、現場の実測値とほぼ同程度の傾向が見られた。

今後、数多くのデータを収集し、これらのひびわれモードの現象を明らかにすると共に、腐食膨張によるひびわれの力学モデルを作製する予定である。

謝辞:本研究を遂行するにあたり、奥村敏恵 東京大学名誉教授から常に適切な助言をいただきました。ここに深く感謝致します。

(参考文献)

- [1] R. D. Browne: Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP-65, pp. 169～204, 1980. 8.
- [2] 関 博, 松井邦人, 松島 学, 金子雄一, 田畑裕, 「コンクリート構造の寿命予測に関する一考察」, 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 1990, pp. 569-574.
- [3] 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋賢: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, NO. 1, 1992.
- [4] 佐藤和郎, 茂村達也, 永井文雄: ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性の影響, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 45, No. 391, 1979. 3, pp. 220～226.
- [5] 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, PP. 61～70. 第360号/V-3, 1985年8月.
- [6] 角本 周, 梶川泰男, 川村密紀: コンクリート中の鉄筋腐食による膨張挙動の弾塑性解析とその適用性, 土木学会論文集, PP. 151～159, 第402号/V-10, 1989年2月.
- [7] 鶴戸口英善: 双曲座標による二三の平面問題の解(その1), 日本機械学会論文集, 13巻44号, 昭和22年5月, p. 17～p. 40.