

論文

[2012] 埋込みアンカー部引抜きによるコンクリートひびわれの進展解析

正会員○寺島善宏(首都高速道路公団)

正会員 矢澤英治(鉄道総合技術研究所)

長嶋文雄(東京都立大学土木工学科)

正会員 山崎 淳(日本大学理工学部土木工学科)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物(RC構造物)では、ひびわれの発生及び進展が、構造物の力学的挙動に対し支配的な影響を及ぼす場合は少なくない。例えば、せん断補強のないRC梁では、斜めひびわれの進展によって、脆性的な破壊が起こり得ることはよく知られている。このように、RC構造物の力学的挙動に対する影響要因として、ひびわれの進展を考慮することは重要である。

ひびわれの進展を取扱う場合には、ひびわれ先端近傍の力学的挙動に着目するのが合理的であると思われる。したがって、RC構造物の力学的挙動を把握しようとするとき、ひびわれ先端近傍の力学的挙動を考察することが重要になってくる。

本研究では、ひびわれの進展を連続的に追跡する。このとき、ひびわれ先端近傍の変形挙動に着目し、ひびわれ先端近傍の変形挙動と構造物の力学的挙動とを関連づけて考察することを目的とする。

2. ひびわれの進展モデル

2.1 ひびわれ進展理論

ひびわれの進展を論じる理論は、幾つか提案されているが、本研究では、一般に $\sigma(\theta)_{max}$ 理論[1]と呼ばれる考えを用いる。この理論は(1)~(3)の仮定から成り立ち、式(1)、式(2)に示すように定式化されている(図-1参照)。(1)ひびわれの進展は、ひびわれ先端から開始する。(2)ひびわれは、 $\tau(r, \theta) = 0$ となるような主応力方向と直角方向 θ に進展する。(3)ひびわれ進展は、 $\sigma(\theta)_{max}$ が限界応力拡大係数 K_{IC} に達したときに θ 方向へ開始する。仮定(2)から、新たにひびわれの進展する方向 θ は、式(1)を満足する。また、ひびわれの進展は式(2)を満足するときに開始する。

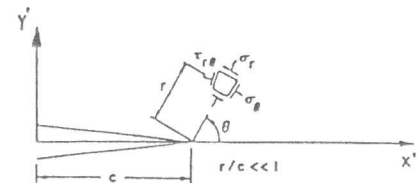


図-1 ひびわれ先端近傍の座標系と応力成分[5]

$$K_{I} \sin(\theta) + K_{II} [3 \cos(\theta) - 1] = 0 \tag{1}$$

$$K^* = 1, \quad K^* = \cos(\theta/2) (K_{I}^* \cos^2(\theta/2) - 1.5 K_{II}^* \sin \theta) \tag{2}$$

ここで、 K_I 、 K_{II} はそれぞれ開口型、剪断型の応力拡大係数である。 K_I^* 、 K_{II}^* は、 K_I 、 K_{II} をそれぞれ K_{IC} で除して無次元化した値である。 K_{IC} は開口型の応力拡大係数の限界値であり、一般に限界応力拡大係数と呼ばれる。

ひびわれは、常に K^* が1である状態を保ちながら進展する。式(2)で記述される、ひびわれ進展基準線を図-2に示す。

2.2 ひびわれの変形様式

厚さ方向に一定の2次元のひびわれを問題とすると、ひびわれの変形は、図-3に示すように、開口型の変形と剪断型の変形の和として考えることができる[2]。開口型変形の程度の強さを表すパラメータが K_I であり、剪断型変形の程度の強さを表すのが K_{II} であると考えられることができる。

図-2に於いて、領域Aではひびわれは主に引張力によって進展し、その変形様式は開口型中心であると言える。同様に、領域Cに於いてひびわれは、剪断力によって進展し、剪断型中心の変形様式である。領域Bの変形様式は、開口型と剪断型の混合様式である。

2.3 剪断力によるひびわれの進展

ある幅を有するひびわれに対して、ひびわれ面に沿って卓越した剪断力が作用する場合には、ひびわれ先端近傍が圧縮応力場であっても、ひびわれ面に相対的な“ずれ”が生じることにより、ひびわれが進展する場合が考えられる。このときのひびわれの進展基準として、Ditomasoらは式(3)の基準を提案している[3]。 $K_{II} = \tau(\pi a)^{1/2}$ 、 $K_I = \sigma(\pi a)^{1/2}$ であるから、これらを用いて、式(4)のように変形できる。

$$|K_{II}| - \tan \phi |K_I| = K_{IIC} \quad (K_I < 0) \quad (3)$$

$$\tau = \tan \phi \sigma + K_{IIC}(\pi a)^{-1/2} \quad (4)$$

ここで、 ϕ は内部摩擦角、 K_{IIC} は剪断型の限界応力拡大係数である。 σ 、 τ は、それぞれひびわれ面に垂直、平行な応力である。また、 $K_{IIC}(\pi a)^{-1/2}$ は応力の次元をもち、これを粘着力 c と考えると式(4)はMohr-Coulombの基準と同じ意味を持つ。

無次元化した場合の、拡張された $\sigma(\theta)_{max}$ 理論による進展基準を図-2に示す。したがって、拡張された $\sigma(\theta)_{max}$ 理論による進展基準は、引張側を切断したMohr-Coulombの基準に等しい[4]。 $\sigma(\theta)_{max}$ 理論では、 $K_I=0$ のときの K_{II} 値が約0.87であることから K_{IIC} は K_{IC} の約0.87倍ということになる。また、多くの実験によって、コンクリートの内部摩擦角 ϕ はほぼ37度となることが分かっている[4]。この場合、 $\tan \phi$ は約0.75になる。式(3)で記述される基準は、図-2に於いて領域Dの

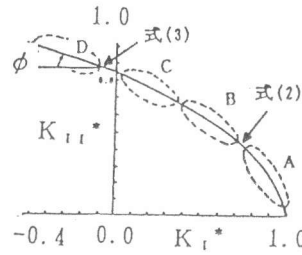
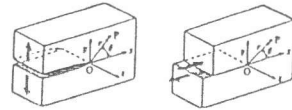


図-2 拡張されたひびわれ進展理論[3]



開口型： K_I 剪断型： K_{II}

図-3 ひびわれ先端近傍の変形様式[2]

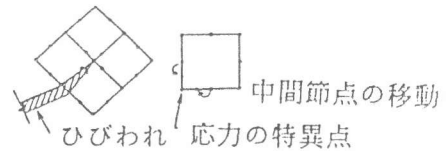


図-4 ひびわれ先端の要素の配置

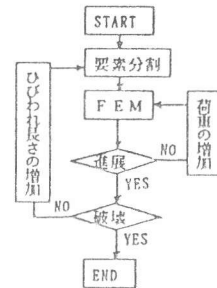


図-5 ひびわれ進展解析の流れ

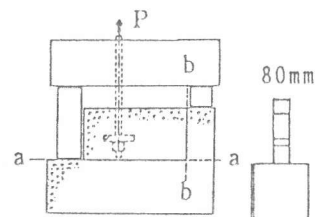


図-6 コンクリートへの埋込板の引抜き実験の概要[9]

部分である。以下、ひびわれの変形様式の特徴を便宜的にA、B、C、Dの記号で表す。

2.4 応力拡大係数の計算

構造物全体を2次元8節点要素に要素分割し、特に、ひびわれ先端近傍の要素は、図-4に示すように中間節点をひびわれ先端寄りの1/4点に移動させる方法[6]を用いた。応力拡大係数は、節点の変位から求める方法[5]を用いた。これらの方法は、既報[7]と同様である。

2.5 限界応力拡大係数

材料特性値としての限界応力拡大係数は、試験方法によって多様に異なることが知られており、一定値には確立されていない。今回の計算では、ひびわれの進展を判断する基準の目安として、 $65 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ 程度[8]を想定している。

2.6 ひびわれ進展解析の流れ

ひびわれ進展解析の流れを図-5に示す。

3. ひびわれ進展解析の適用例その1. 埋込み板の引抜きによるひびわれの進展解析

マッシュなコンクリート中に埋込まれた埋込板を引抜くことによって、ひびわれが発生・進展し、耐力を失う場合がある。山崎らによって行われた「コンクリートへの埋込板の引抜き実験」[9]で用いられた供試体を対象として、ひびわれの進展解析を行う。

3.1 実験の概要

実験に用いられた供試体を図-6に示す。埋込板はナットによって鋼棒と接続されている。鋼棒を引くことによって、埋込板が引抜かれ、図-7に示すようなひびわれが発生・進展し、耐力を失った。実験では鋼材表面の全面に油脂を塗り、鋼材とコンクリートとの付着ができるだけない状態にしている。最大到達荷重は、NO.1供試体、NO.2供試体でそれぞれ、約2.4(t)、約1.7(t)であった。コンクリートの引張強度は、 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試体の割裂試験の3個の平均から求められている。引張強度は、 23.0 kg/cm^2 である。

3.2 数値計算モデル

図-8に示す長方形領域を解析領域とする。図-6のa-a面及びb-b面の境界は、固定端として解析する。ひびわれ面及び、埋込板の側面及び底面とコンクリートとの間には、剛性の低い要素を用い、自由端としてモデル化している。

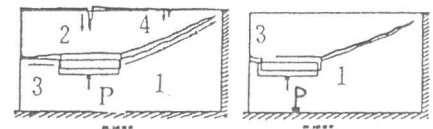


図-7 ひびわれの発生および進展状況[9]

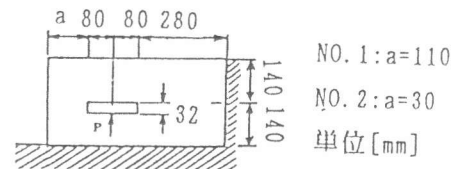


図-8 実験供試体の断面寸法[9]

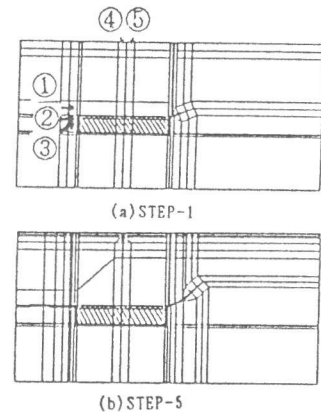


図-9 要素分割図(NO.1供試体)

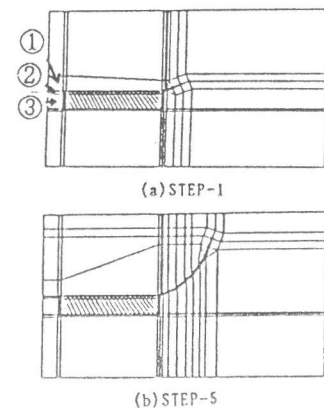


図-10 要素分割図(NO.2供試体)

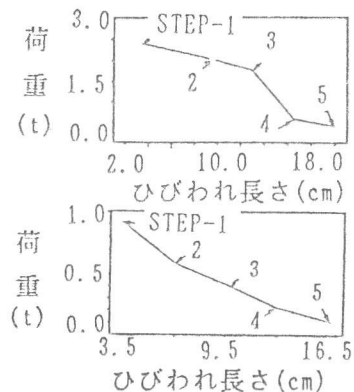


図-11 荷重とひびわれ長さとの関係

実験に鑑み、ひびわれ(1)が発生した状態から解析を開始する。ひびわれ(1)よりも後に発生が予想されるひびわれ(2), (3)については、主応力がコンクリートの引張強度を越えるとき、ひびわれが発生すると考える。主応力の計算は、図-9(a)及び図-10(a)に示す各要素の平均値から求める。なお、NO.1供試体では、ひびわれ(4)の発生および進展は考慮していない。

3.3 解析結果と考察

ひびわれ進展に関する諸値を表-1に記す。有限要素法に用いた要素分割図の一部を図-9, 10に示す。荷重とひびわれ長さとの関係、荷重と荷重点に於ける荷重方向変位との関係をそれぞれ、図-11と図-12に示す。図-13を用いて、ひびわれの変形様式を示す。

図-11から、ひびわれが進展するにつれて荷重が単調に減少していることが分かる。ひびわれは、進展するのに荷重の増加を必要とせず、不安定的に進展している。また、図-12から、ひびわれが進展するにしたがって変位量が増加するのが分かる。ひびわれが進展するにつれて構造物が変形しやすくなっていることが分かる。特に、NO.1供試体ではSTEP-4に於いて荷重の急激な減少が起こっている。STEP-4に於いて、ひびわれ(3)がコンクリート自由端に達するために、ひびわれ(1)に応力集中が起こり、ひびわれ(1)が非常に進展しやすくなっているためである。また、図-12に於いても、STEP-4に於いて急激な変位の増加が見られる。STEP-4に於いて、構造物が非常に変形しやすくなっていることが分かる。解析による最大到達荷重は、NO.1供試体、NO.2供試体でそれぞれ、約2.4(t)、約0.9(t)である。NO.2供試体で、実験値に対して解析値がかなり低い値を示している点については、ひびわれ面のモデル化の方法、 K_{ic} 値の設定等の様々な要因が考えられる。図-13より、ひびわれの変形様式は開口型が中心であり、主に引張力によって進展していることが分かる。

4. ひびわれ進展解析の適用例その2. RC梁の斜めひびわれの進展解析

剪断補強のないRC梁では、剪断スパン比(a/d)によって破壊形態が異なることが知られている[10]。例えば、(a/d)比が3~6程度の場合には、斜めひびわれの進展によって脆性的な斜め引張破壊が起こること、2程度の場合には、斜めひびわれの進展が直接破壊を引き起こすことは

表-1 ひびわれ進展に関する諸値 (NO.2供試体) K_{Ic} , K_{IIc} [kgf/cm^{3/2}], P [kg]

STEP	ϕ	K_{Ic}	K_{IIc}	θ	P
1	22.6	64.4	8.5	-14.6	2422
2	22.6	63.3	-11.0	18.6	592
3	41.3	64.7	-7.6	13.0	417
4	54.2	64.1	-9.2	15.7	220
5	69.9	65.0	-6.7	11.6	103

STEP-1に於て、P=919のとき水平方向ひびわれ(C)が発生する。 ϕ は水平軸からひびわれ軸まで反時計回りに計った角[度]。 θ はひびわれ軸から次にひびわれが進展する方向までの角[度]

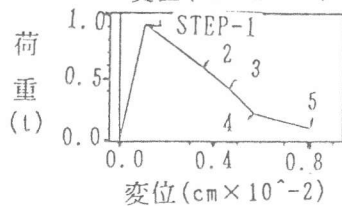
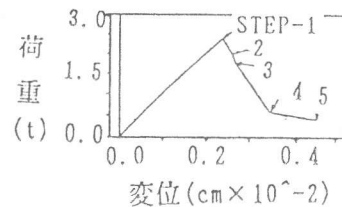


図-12 荷重と変位との関係

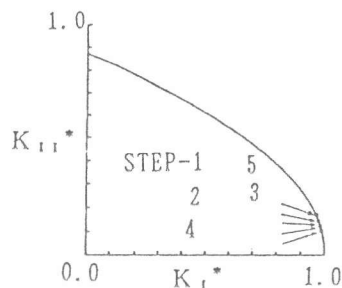


図-13 ひびわれの変形様式

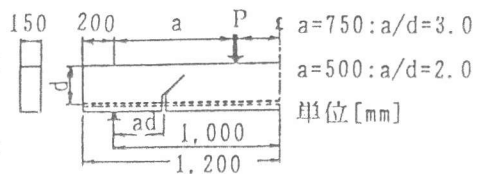


図-14 RC梁の断面寸法

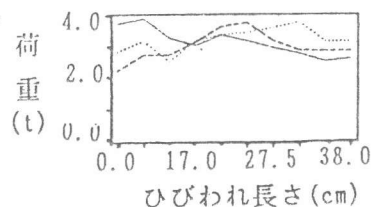


図-15 荷重とひびわれ長さとの関係

表-2 各ケース毎の変形様式及び荷重

CASE	a/d	ad/a	MODE	P_u (t)	P_m (t)
1	3.0	0.28	B	3.7	3.9
2	3.0	0.37	D	2.8	3.8
3	3.0	0.47	D	2.3	3.7
4	2.0	0.36	D	4.5	4.5
5	2.0	0.56	D	2.8	3.2

なく、アーチ的な耐荷機構を形成して剪断耐力が増加することなどが知られている。これら2つの破壊形式を代表する剪断スパン比2種類について解析する。剪断スパン比による破壊形態の相違を、ひびわれ先端近傍の変形挙動に着目し、斜めひびわれの進展と関連づけて考察する。

4.1 対象とするRC梁の断面寸法および剪断耐力

対象とするRC梁の断面寸法を図-14に示す。曲げひびわれが10cm(梁の高さの1/3)の状態からの進展を追跡する。剪断スパン比および a/d の値によって、5種類のケースについて計算する(表-2参照)。設定した位置に、曲げひびわれを発生させるのに必要な荷重を表-2、 P_{h} 欄に示す。曲げモーメントによる曲げ応力度がコンクリートの曲げ強度を越えた場合に、梁下端に曲げひびわれが発生すると考える。ただし、コンクリートの曲げ強度を 45.5kg/cm^2 とする。梁の剪断耐力を土木学会標準示方書[11]から求めると、約4.6(t)である。

4.2 計算の継続条件

次のいずれかの状態になるまで計算を継続する。1) ひびわれによって梁が高さ方向に90%以上分段される。2) ひびわれの変形様式がD様式になる。

4.3 解析結果と考察

荷重とひびわれ長さとの関係、荷重と変位との関係をそれぞれ、図-15、図-16に示す。有限要素法に用いた要素分割の一部を図-17に示す。ひびわれの変形様式を図-18を用いて示す。

経験的に知られているようなひびわれ進展状況が示された。 $a/d=2$ の場合には、 $a/d=3$ の場合よりも、ひびわれ先端がかなり載荷点に近い位置まで進展している。

最終進展段階に於けるひびわれの変形様式、および最大到達荷重をそれぞれ、表-2のMODE欄、 P_m 欄にまとめた。ここで、斜めひびわれによる梁の高さ方向の分断に対して、90%を一つの目安とした。その結果、斜めひびわれによって、梁の高さ方向に90%以上の分断が予想されるのは、CASE-1の場合だけである。また、このときの最終的な変形様式はB様式である。これに対して、他の4ケースでは、高さ方向に90%以上分断される前に、変形様式はD様式になっている。D様式では、載荷後、ひびわれ先端近傍の開口量は載荷前よりも相対的に減少することを示している。ひびわれは、卓越した剪断力による”ずれ”作用によって進展する可能性があることを示す。

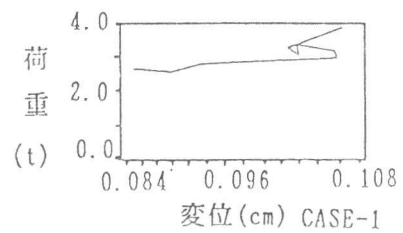


図-16 荷重と変位との関係

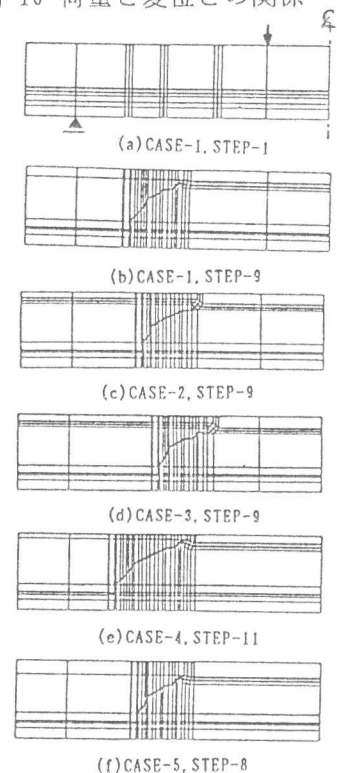


図-17 要素分割図

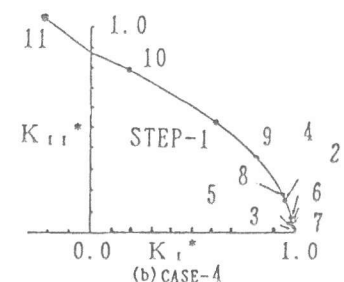
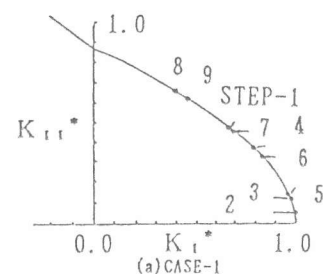


図-18 ひびわれの変形様式

表-2から、CASE-1の最大到達荷重は、約3.9(t)である。これに対して、CASE-4では、約4.5(t)である。剪断スパン比による耐力増加の一例が示された。

5. まとめ

本研究では、ひびわれの進展を考慮した解析方法の一例を示し、これを「埋込板の引抜きによるひびわれの進展解析」と「RC梁の斜めひびわれの進展解析」に適用した。特に、ひびわれ先端近傍の変形挙動に着目し、構造物の力学的挙動と関連づけて考察した。

埋込板の引抜きによって発生するひびわれの進展解析を行った。その結果、ひびわれの進展が構造物の力学的挙動に及ぼす影響として、荷重とひびわれ長さとの関係、荷重と変位との関係等が分かった。今回対象とした、埋込板に対して左右非対称の構造形式の場合には、埋込板からコンクリート自由端までのひびわれの進展が、構造物の最大荷重および変形量に対して大きく影響することが分かった。また、ひびわれは主に引張力によって進展し、その変形様式は開口型が支配的であることが分かった。

剪断補強のないRC梁の斜めひびわれの進展解析を、剪断スパン比が3.0, 2.0の場合について行った。その結果、経験的に知られているようなひびわれ状況となることが示された。

剪断スパン比が3.0の場合には、斜めひびわれが混合型の変形様式を保ったまま、梁の高さ方向に90%以上分断するケースが示された。斜めひびわれによる斜め引張破壊が解析によって示されたと思われる。

剪断スパン比が2.0の場合には、剪断スパン比が3.0の場合よりも高い剪断耐力が示された。剪断スパン比による耐力増加の一例が示されたと思われる。

謝辞

この研究は、平成2年度文部省科学研究一般研究C(NO.02650336)によって行った。

参考文献

- 1) Erdogan, F. and Sih, G. C.: On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 519-527
- 2) 岡村弘之著: 破壊力学と材料強度講座①線形破壊力学入門, pp. 19-25
- 3) A. DiTommaso: Evaluation of Concrete Fracture, Edited by A. Carpinteri and A. R. Ingraffea: Fracture Mechanics of Concrete, pp. 31-65
- 4) W. F. Chen: コンクリート構造物の塑性解析、色部, 河角, 安達: 監訳, pp. 253-254
- 5) A. R. Ingraffea and V. Saouma: Numerical Modeling of Discrete Crack Propagation in Reinforced and Plain Concrete, G. C. Sih and A. DiTommaso, Fracture Mechanics of Concrete Martinus Nijhoff Publishers, 1985, pp. 171-225
- 6) 鷲津、宮本、山田、山本、川井 共編: 有限要素法ハンドブック I 基礎編, PP. 419-421
- 7) 寺島他: 梁の剪断ひびわれ、コンクリート工学年次論文報告集 11-2, 1989, pp. 423-428
- 8) 丹羽、大津: アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版、1988, pp. 100-101
- 9) 山崎淳: コンクリートへの埋込板の引抜き実験の結果とその解釈、1987(資料)
- 10) 塩谷: 大型鉄筋コンクリート部材のせん断特性に関する研究、清水建設研究報告別冊第25号, PP. 83
- 11) 土木学会コンクリート標準示方書61年版、設計編