

東京大学 学 前川 宏一
東京大学 学 二羽 淳一郎

1 はじめに 複雑な形状を持つ鉄筋コンクリート構造物の設計や空間的広がりを持つRC部材の挙動の研究に有限要素法は有力な手段となり得るが、一方鉄筋コンクリート特有の特性の完全なモデル化はなされておらず、確立された段階には到っていない。そこでコンクリートの非線形挙動、付着およびひびわれのモデル化を行ない、シミュレーションにパラメータを変えた Deep Beam の解析を行ない、適用性について検討を加えた。

2 解析対象 Fig.1, Table 1 に対象とする Deep Beam の諸元を示す。

Beam	a (mm)	d (mm)	a/d	r (mm)	h (mm)	p (%)	Fy (MPa)	Fc' (MPa)
T1	200	228	0.88	140	300	6.0	364	13.1
T2	200	507	0.39	100	600	3.0	389	54.7
T3	200	228	0.88	100	300	3.0	364	13.1
T4	150	507	0.30	140	600	3.0	389	13.1
T5	200	507	0.39	140	600	6.0	389	54.7
T6	150	507	0.30	100	600	6.0	389	12.2
T7	150	228	0.66	100	300	6.0	364	58.8
T8	150	228	0.66	140	300	3.0	364	58.8

Table 1 Characteristics of Deep Beam Specimens

$$S = S(s_{ij}) = S(s_1, s_2) = \sqrt{\left(\frac{s_1 + s_2}{2.32 F_c}\right)^2 + \left(\frac{s_1 - s_2}{1.108 F_c}\right)^2} \quad (1)$$

$$E = E(e_{ij}) = E(e_1, e_2) = \sqrt{\left(\frac{e_1 + e_2}{4.8}\right)^2 + \left(\frac{e_1 - e_2}{3.12}\right)^2} \times 10^3 \quad (2)$$

$$S = F(E) = 1.042 E^4 - 2.083 E^3 + 0.042 E^2 + 2.0 E \quad E \leq E_2 \\ = -0.25 E + 1.25 \quad E_2 < E \quad (3)$$

一方、主応力に対応する歪には変形が小さい等方性挙動の仮定が成立する時(4)が成立する。 $S_{1/2} = (P + Y_0)/(1 + P \cdot Y_0)$ $P = E/E_2$ $Y_0 = 0.2$, $E < E_1 - 0.6$ (4)

$E \geq E_1$ に対して(4)を拡張し体積変化と異方性を取り入れ定式化を行なった。

4 ひびわれの取扱い (5)で C_2 を定義し $C_2 > 0$ の under compression-tension under biaxial tension

$$C_i = (s_1/F_t) - \sqrt{1 + s_2/F_c} \quad C_i = (s_1/F_t) - 1 \quad (5)$$

ゼロとした直交異方性材料に置換し、ひびわれ直交方向の応力を解放することによりひびわれを表現した。ただし、 $C_1 < C_2$ ときひびわれ時の引張応力が残存するとし、無筋コンクリートの曲げ試験の解析にあうように $C_1 = 1$ とした。

なおひびわれ面でのせん断伝達は無視しひびわれ後は一軸状態とした。

5 付着とダウエル作用 Fig.2に鉄筋要素とコンクリート要素の結合方法を示す⁽⁴⁾。共通節点はほぼ曲げひびわれ間隔に等しく配置し、部分的完全付着とすることにより鉄筋に交差するひびわれとダウエル作用を間接的に表現した。

6 有限要素法解析 内部応力状態より、すべりのシリーズにFig.3に

示す48変節点タイプのパラメトリック要素を使った要素分割を用い、外力の強制変位で与えた。斜線区引いた要素内では、破壊近くで応力が大きく変化することがあり、ガウス積分次数を5とし、3軸圧縮応力の影響を考慮し、強度を80%割増した。Newton-Raphson法による増分法を用い、くり返し計算中の修正バクトル dF_i を(6)で与え、収束の安定性を確かめた。⁽³⁾

$$dF_i = K_i \times V_i \quad K_i = 1.0 \quad \text{when } 0.8 < V_i/V_i^* < 1.0 \\ \text{otherwise, } K_i = 0.5$$

$$V = F - \iiint B^T \sigma dv \quad V_i, V_i^*: V \text{ の成分 } V_i^*: \text{ 以前の収束計算での節点の値} \quad (6)$$

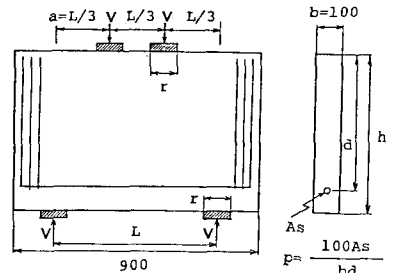


Fig. 1 Deep Beam Specimen Tested

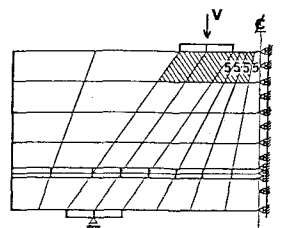


Fig. 3 Idealization of Finite Elements

7 解析結果及び考察

7-1 破壊モードと耐力 8 ケースの解析より

予測される破壊モードとして (a) 斜め圧縮破壊 (b) 曲げ圧縮破壊 (c) 引張り破壊があげられ Table 2 に実験データと解析結果を示す。(a) は Fig 4 に示すとおり、支点上のコンクリート要素

Beam	Failure Mode		Failure Load (KN)		
	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	
T1	SL	FC	267	250	DC: Diagonal Compression
T2	DC	DC	1028	1373	
T3	SL	FC	228	235	
T4	DC	DC	425	484	SL: Slip
T5	DC	DC	1270	1471	
T6	DC	DC	417	368	FC: Flexural Compression
T7	SL	FC	884	1153	
T8	FT	FT	941	888	

Table 2 Failure Mode and Failure Load of Deep Beams

の主圧縮応力が卓越・塑性化し、隣接要素への応力配分により、力状態が平均化され (STEP 6-9), さらに変形が進むと支点上の要素が複数軟化し、支点反力が低下するプロセスとなった。このモードは実際の破壊性状と耐力と、大変良く一致している。(b) はより中央の上縁要素が塑性軟化するプロセスであり、支点上部の応力レベルは一軸圧縮強度の 70% 前後であった。しかし実験では上部載荷板の外側と斜めひびわれ部を結びひびわれが入り、すべて破壊した (Fig 5)。ひびわれ面でのせん断伝達を無視していることで、すでにひびかれたコンクリートに鋭角に交わる第 2 ひびわれのモデル化ができていないこと、要素の破壊と実際の破壊現象との対応が必ずしも明確でない事が計算と実験との不一致の原因として考えられる。(c) は引張り鉄筋の降伏により耐力が決定され、実験データとほぼ、耐力モードは一致した。

7-2 ひびわれパターン 8 ケースの解析より

(A), (B) のひびわれタイプが認められた。

(A) γ/d が小さく、曲げひびわれの進展が少なく少数の大きな斜めひびわれの卓越する場合。

(B) γ/d が大きく、曲げひびわれの進展が卓越し、斜めひびわれが多数均等に入るケース。

Fig 6 に 2 つのタイプの計算ひびわれパターンと実際のひびわれ状態 (写真) を示す。共にひびわれの方向、位置は実際の中間挙動と良く表わしているといえる。

8 まとめ 以上より以下の事がいえる。

(1) 強制変位による非線形計算はコンクリートの軟化する部材の耐力計算に有効である。しかし軟化現象の解析には、解の収束、局所的な材料定数の問題がありなお慎重な検討が必要である。

(2) Deep Beam の挙動のうち、支点上のコンクリートの圧縮破壊は曲げ引張り破壊は以上の手法で予測可能である。

(3) Deep Beam の第 2 斜めひびわれの発生とすべて破壊の予測は上記の手法では完全に追跡できず、ひびわれ面でのせん断伝達のモデル化とひびわれ後のコンクリートの破壊のモデル化がますます必要となっている。

参考文献

- 1) 前川 二羽: 全断面コンクリート構造の定式化 第 35 回年次講演会。
- 2) 前川 二羽: コンクリート破壊標準に対する考察 第 35 回年次講演会。
- 3) Nawa, Mabeawa, Okamura: Nonlinear Finite Element Analysis of Deep Beams. IABSE Colloquium Delft.
- 4) Scordelis: Finite Element Study of Reinforced Concrete Beams with Diagonal Tension Cracks. ACI SP-42

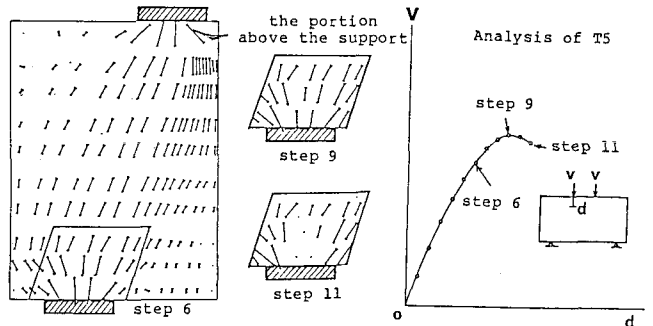
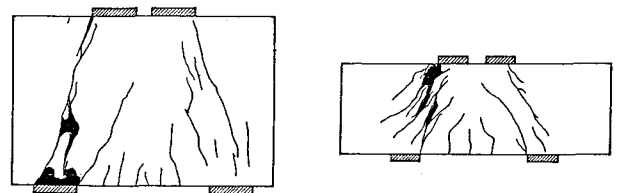
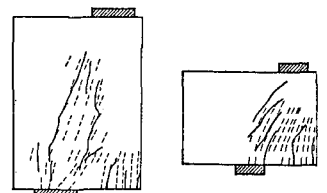


Fig. 4 The Change of Compression Stress Distribution of T5



(a) T5, predicted to be failed in diagonal compression (b) T7, predicted to be failed in flexural compression

Fig. 5 Crack Formation and Failed Portions



(a) T5 (b) T7

Fig. 6 Predicted and Observed Crack Pattern