

途中定着された引張主鉄筋を有する RC ばかりのせん断耐力評価と 設計への適用に関する研究

EVALUATION OF SHEAR STRENGTH FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH
BARS TERMINATED IN TENSION ZONES AND ITS APPLICATION TO DESIGN

尾坂芳夫*・鈴木基行**・宮本幹***・小林茂敏****

By Yoshio OZAKA, Motoyuki SUZUKI, Miki MIYAMOTO and Shigetoshi KOBAYASHI

The objectives of this study are to evaluate the shear forces at occurrence of diagonal crack and at shear failure based on experimental data on cut-off members and to examine the appropriateness of the method of calculating the load-displacement relationship by the cross-section division method for the bending moment considering moment-shift.

The principal conclusions obtained are as listed below.

(1) For evaluation of shear capacity, it will suffice to make corrections for shear-span ratio (a/d), tensile reinforcement ratio and cut-off location in design equation by CEB.

(2) In computation of deflection, the calculated values would coincide with experimental values until yielding of member considerably.

Keywords : RC beam, cut off, shear strength, design

1. まえがき

現行コンクリート標準示方書¹⁾においては、引張主鉄筋をコンクリート引張部に途中定着（以後、これをcut offとよび、このような配筋が施された部材をcut off部材とよぶことがある。）させる場合には、所定の定着長の他に、いわゆるモーメント・シフトを考慮することにより安全性を確保しようとしている。この規定は「コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）」²⁾にも採用されており、近く改訂が予定されているコンクリート標準示方書でも採用されるものと思われる。

引張主鉄筋がcut offされたRCはりの基本的挙動は、Ferguson³⁾や著者ら⁴⁾により行われた実験的研究により明らかにされてきている。しかし、上記規定においては、部材降伏や破壊型態の違いにより、cut off部材の挙動や強度は異なること、部材せん断強度はcut off位置の影響を受けること、などcut off部材の重要な特性が考

慮されておらず、この規定により設計されたRC部材が、せん断の作用に対してつり合いのとれた安全性を有しているかどうかは疑問である。

このような観点から、本研究では著者らにより行われたcut off部材に関する実験データをもとに、cut off部材において設計上重要な限界状態となる斜めひびわれ発生時およびせん断破壊時のせん断力について、簡便で実用性のある算定式を提案することを目的とする。この際基本とした式は、実験的裏付けも十分あると思われるCEBで採用されている設計式とした。さらに、断面分割法を用いて挙動解析を行い、実験値との比較を行うことによりこの方法の妥当性についても検討した。解析にあたっては、断面の曲げモーメントはモーメント・シフトを考慮して求め、断面の曲率は引張主鉄筋に生じるひずみをもとに求めるものとした。

なお、本研究で用いたデータは、著者らにより行われた「RCはりのせん断耐力に及ぼす引張主鉄筋途中定着の影響に関する研究」⁴⁾に基づいており、実験の詳細についてはこの文献を参照されたい。

2. 既往の研究とその問題点

cut offという配筋法は橋脚や擁壁等に幅広く用いられているにもかかわらず、cut off部材の挙動に関する

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 工修 地域振興整備公団産炭地域振興事業部
(〒100 千代田区霞が関3-8-1)

**** 正会員 建設省土木研究所コンクリート研究室長
(〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭)

研究は、P. M. Ferguson ら³⁾を始め、数名^{4)~7)}により行われたにすぎない。これは cut off 点近傍はひびわれが発生しやすく、地震時に構造物の弱点となりやすい領域である、との危険性があまり認識されていなかったこと、および、ごく最近まで cut off が原因とみられる震害例がほとんどみられなかつたこと、などによるものと思われる。ここでは、既往の研究の中で cut off 部材のせん断耐力評価を試みているものを取り上げ検討を加えることとする。

(1) P. M. Ferguson らの研究³⁾

Ferguson らは、引張主鉄筋量、鉄筋の定着方法等を変動要因とし、RC はりの載荷実験（単調漸増載荷）を行った。そして cut off 部材においてせん断耐力の低下に大きな影響を及ぼす要因は、支点から cut off 点までの距離 (L_{cut}) と引張鉄筋の cut off 比 $\rho_{cut} = A_{scut}/A_s$ (A_s : 全引張主鉄筋量, A_{scut} : cut off された引張主鉄筋量) であるとした。さらに、cut off の悪影響は引張主鉄筋が cut off されずに連続していた場合に伝達していく応力に比例する、としてせん断耐力評価式を提案している。すなわち、cut off 部材のせん断強度は、通常のはり (cut off が施されていないはり) のせん断強度 v_u に比べ、次式で表わされる Δv_i だけ低下するとした。

K は実験により決まる定数であるが、この値については実験データのばらつきが大きいため評価されていない。通常のはりのせん断耐力を $V_u (= v_u \cdot b \cdot d)$, b は断面幅, d は有効高さ) とすると、cut off 部材のせん断耐力 V_{call} は次のようになる。

この評価式によれば、cut off 部材のせん断耐力には、 L_{cut} と ρ_{cut} とがそれぞれ 1 次の項で影響を及ぼすことになる。しかし、定数 K の次元は式(2)より $1/[L]$ (L は長さを示す) となるが、この物理的意味が不明であるばかりでなく、 L_{cut} が部材せん断耐力に与える影響は本来部材のせん断スパンや有効高さ等との割合で関係してくるべきものであろう。また、cut off 位置が同一の場合、cut off 比 ρ_{cut} が 2 倍になると耐力の低下も 2 倍になるとは一般には考えられない。さらに、cut off 部材の挙動は 4 種に分類できることが著者らの研究により明らかとなっているが、Ferguson はさまざまな挙動に対し、1 つの式で評価しようとした。このような理由から、実験値から K の値を評価することができなかつたものと思われる。しかし、cut off 点近傍は部材の弱点となりやすく、部材の耐力低下を引き起こすことを実証したこと、および L_{cut} と ρ_{cut} とがせん断耐力に与え

る影響が大きいことを指摘したことは高く評価できる。

(2) M. J. Baron の研究⁵

Baron は、図-1 のように cut off 点近傍を考えて、引張主鉄筋が途中定着された断面に曲げモーメント M_{cop} が働く場合、A-A' 断面での腕の長さ $j_1 \cdot d$ は、B-B' 断面での腕の長さ $j_2 \cdot d$ より短く、cut off 点では、この差 $(j_2 - j_1) \cdot d$ に相当するせん断応力度 Δv_2 だけ、作用せん断応力度が増大するとした。このせん断応力度 Δv_2 は、cut off 点近傍において応力再分配の生じる領域の長さ x にわたって作用しているとし、次式で表わされるとした。

$$\Delta v_2 = \frac{M_{cop}}{b \cdot d \cdot x} \left(\frac{j_2 - j_1}{i_1 \cdot i_2} \right) \div \frac{M_{cop}}{b \cdot d \cdot x} \left(\frac{j_2 - j_1}{i} \right) \dots \dots \quad (3)$$

これを用いたせん断耐力評価は次のようになる。

$$V_{calz} = (v_u - \Delta v_z) b \cdot d = V_u - \frac{M_u}{r} \left(\frac{j_2 - j_1}{i} \right) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 M_u は終局時の cut off 点における曲げモーメントである。

応力再分配の領域 x の評価はなされていないが、文献 4) で測定された引張鉄筋ひずみ分布から判断して、 x は部材有効高さの $1/2$ 以上になることが推定される。また、 $(j_2 - j_1)$ の値は実際には非常に小さく、算定される Δv_2 は通常のはりのせん断強度の高々 1% 程度にしかならないと考えられる。しかし、実際には cut off 部材のせん断耐力は cut off していない部材耐力に比べ 30% 程度低下することもあり、式 (4) では cut off 部材のせん断耐力を精度よく評価できないと考えられる。ただし、せん断応力度 Δv_2 の作用する領域を考え、断面に作用する応力度は cut off 点で極大となり、その両側で減少するという Baron の知見は重要であろう。

(3) A.M.Kaoらの研究⁶⁾

Kao らは、cut off されたばかりのせん断耐力 V_{cals} を、引張主鉄筋とスターラップの降伏によって決まる断面の抵抗モーメント M_{ext} と、外力による斜めひびわれ先端

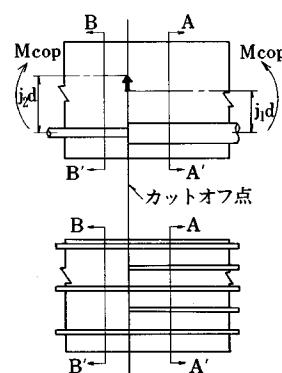


図-1 cut off 点近傍での腕の長さの変化

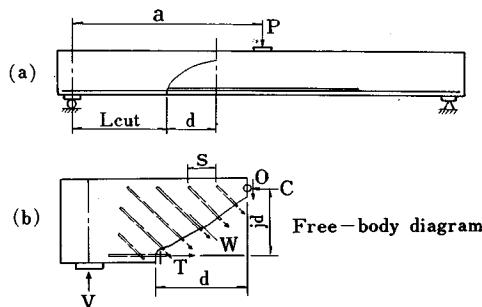


図-2 斜めひびわれ面での力のつり合い

断面に作用するモーメント M_{ext} とのつり合い条件から求めている。すなわち、スターラップを部材軸線に対し直角に配筋した場合には、

$$M_{int} = \rho_i \cdot f_{yt} \cdot j \cdot b \cdot d^2 + 1/2 \cdot \rho_w \cdot f_{yw} \cdot b \cdot d^2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

となり、単純ばかりで中央集中載荷の場合には、

$$M_{ext} = V_{cal3}(L_{cut} + d) \quad \dots \dots \dots (6)$$

となる。したがって、 V_{cal3} は次式で求めることができ（図-2 参照）。

$$V_{cal3} = \frac{d}{L_{cut} + d} \left(f_{yt} \cdot \rho_i \cdot j + \frac{1}{2} f_{yw} \cdot \rho_w \right) b \cdot d \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 ρ_i : 引張主鉄筋比、 f_{yt} : 引張鉄筋降伏強度、 ρ_w : スターラップ比、 f_{yw} : スターラップ降伏強度、である。

この評価法では、斜めひびわれと軸線とのなす角度をスターラップ量によらず 45° と仮定していること、cut off 点での曲げモーメントを考えるとき、いわゆるモーメント・シフトを考慮しているが、スターラップ量によらずモーメント・シフト量を一定としていること、引張主鉄筋のダウエル作用を無視していること、さらにコンクリート、スターラップの抵抗力の不足による破壊をACI のせん断耐力式⁸⁾によって求めるとしているが、その際の cut off による耐力低下に対する考慮の方法は示されていない、などの問題点を有する。また、スターラップ補強が十分でないはりでよくみられる、引張主鉄筋降伏以前に起こるせん断破壊については式（7）では評価できない、などの問題点も有している。しかし cut off 部材では、cut off 点から発生した曲げひびわれが斜めひびわれへと進展して破壊に至るという挙動⁴⁾を考慮し、耐力評価を試みていることは価値のあることである。

本研究は、これら既往の研究を踏まえ、cut off 部材に対する実用的せん断耐力算定式を提案すること、および断面分割法によるたわみ算定方法の妥当性について検討すること、を主な目的として行われたものである。

3. cut off 部材のせん断耐力評価

著者らにより行われた実験⁴⁾の供試体諸元および実験結果を表-1 に示す。

(1) 実験結果のまとめ

実験の主な結果は、以下の 3 点であった。

a) cut off 部材の挙動は部材降伏と終局とをもたらす原因の相違により次の 4 種に分類できる。

I類 一部材降伏せずにせん断破壊するタイプ

IIa 類一引張主鉄筋が cut off 点で降伏した後、せん断破壊するタイプ

IIb 類一引張主鉄筋が部材の最大曲げモーメント点で降伏した後、せん断破壊するタイプ

III類 一引張主鉄筋が部材の最大曲げモーメント点で降伏し、コンクリートが圧壊するタイプ

b) III類を除き cut off 部材では、cut off 点から曲げひびわれが発生し、それが斜めひびわれへと進展し終局を迎える。

c) cut off 部材のせん断耐力は、 L_{cut}/a (a はせん断スパン長) の増加とともにほぼ直線的に低下する。

(2) 斜めひびわれ発生時のせん断力 V_a の評価

cut off 部材、特にスターラップのないはりにおいては、cut off 点から発生した曲げひびわれは、荷重の増加もほとんどないまま即座に斜めひびわれへと進展しきわめて脆的な破壊を起こす。このようなことからも、cut off 部材においては斜めひびわれの発生は設計上重要な限界状態の 1 つであるといえる。

図-3 は、縦軸に斜めひびわれ発生時のせん断力 V_a 、

表-1 供試体諸元および実験結果

供試体 No.	セグメント a(cm)	引張主 鉄筋比 ρ_i (%)	スターラップ比 ρ_w (%)	Lcut (cm)	引張主鉄筋降伏時 位置	最大耐力 せん断力 V_a (ton)	挙動 形態	斜めひびわれ発生 せん断力 V_a (ton)	角度 (度)	
L-1	100	0.83	-	-	-	23.4	I	22.5	40	
L-2	100	0.83	-	10	-	21.9	I	22.0	30	
L-3	100	0.83	0.151	15	COP	24.5	25.6	IIa	23.7	40
L-4	100	0.83	-	25	-	18.1	I	18.1	40	
L-5	100	0.83	0.057	25	-	19.6	I	19.6	42	
L-6	100	0.83	0.151	25	COP	22.4	25.1	IIa	17.2	50
L-7	100	0.83	-	35	-	14.2	I	14.3	42	
L-8	100	0.83	0.151	35	COP	19.7	21.3	IIa	15.7	55
L-9	100	0.83	-	50	COP	13.2	14.7	IIa	11.9	48
J-1	100	0.49	-	-	CL	15.4	16.6	IIb	16.5	35
J-3	100	0.49	-	25	-	17.4	I	17.4	30	
J-4	100	0.49	0.057	25	CL	16.1	17.0	IIb	17.0	35
J-5	100	0.49	0.151	25	CL	16.0	18.9	IIb	18.3	52
J-6	100	0.49	0.151	35	CL	16.0	17.8	IIb	16.5	53
J-7	100	0.49	-	45	-	12.5	I	12.5	50	
J-8	100	0.49	0.057	45	-	13.3	I	13.3	53	
J-9	100	0.49	0.151	45	COP	13.4	14.8	IIa	13.3	60
M-1	140	0.83	-	-	CL	18.7	19.9	IIb	19.1	36
M-2	140	0.83	-	-	CL	18.0	20.2	IIb	16.5	45
M-3	140	0.83	-	25	CL	18.1	19.1	IIb	19.1	54
M-4	140	0.83	-	35	-	17.0	I	16.0	52	
M-5	140	0.83	0.057	35	CL	17.9	19.4	IIb	17.1	56
M-6	140	0.83	0.151	35	CL	18.7	21.2	III	18.5	55
M-7	140	0.83	-	46.5	-	14.8	I	13.3	44	
M-8	140	0.83	0.151	46.5	CL	17.9	20.4	III	-	-
M-9	140	0.83	0.151	50	COP	17.9	18.9	IIa	12.8	62
M-10	140	0.83	-	60	-	12.6	I	10.3	42	
M-11	140	0.83	0.151	60	COP	15.3	16.5	IIa	12.2	58
M-12	140	0.83	-	70	COP	11.0	13.2	IIa	10.8	49
M-13	140	0.83	0.151	70	COP	14.7	16.7	IIa	11.0	58
M-14	140	0.83	-	80	-	10.4	IIa	10.4	50	
K-1	140	0.49	-	-	CL	11.4	13.3	III	-	-
K-2	140	0.49	-	35	CL	10.8	13.4	III	-	-
K-3	140	0.49	0.057	35	CL	11.3	13.6	III	-	-

(注) COP: cut off point, CL: スパン中央 有効高さ $d = 40\text{cm}$ 全て同一

横軸に L_{cut} をとり、実験値をプロットしたものである。この V_a について式(8)で表わされるCEBのスターラップのないはりのせん断耐力式⁹⁾をもとに評価を行う。

$$V_{u1}=0.25 \cdot f_{ct} \cdot \chi(1+50 \rho_t) b \cdot d \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 f_{ct} ：コンクリート引張強度、 χ ： $1.6-d \geq 1$ (d の単位:m)、 $\rho_t \leq 0.02$ 。

cut offにより斜めひびわれ発生時のせん断力低下の程度を表わす係数を K_c によって表わすと、実験データより K_c は次のように与えられる⁹⁾。

$$K_c=100/(L_{cut}+d) \quad \dots \dots \dots (9)$$

ただし、 L_{cut} 、 d の単位はcm。cut offしない場合、すなわち $L_{cut}=0$ ならば $K_c=1$ とする。

軸方向主鉄筋比については次式で与えられる ρ_{ls} を用いるものとする。

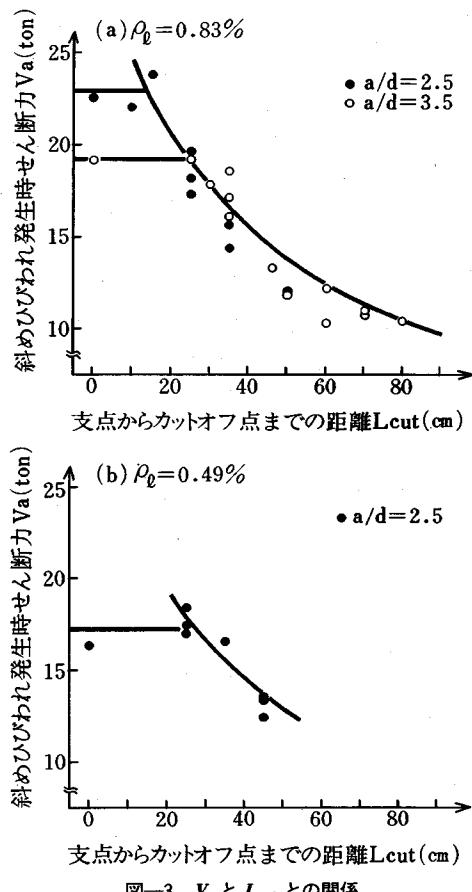


図-3 V_a と L_{cut} との関係

注) 式(8)では、有効高さ d に対する補正是 $\chi=1.6-d$ (d :m単位)で行っており、これと式(9)の K_c との積を考えると

$$\chi \cdot K_c = \frac{160-d}{L_{cut}+d} \quad (d, L_{cut} : \text{cm 単位})$$

となり、これは無次元量である。

$$\rho_{ls}=(A_s-A_{scut})/b \cdot d \quad \dots \dots \dots (10)$$

これらをまとめると、 V_a の評価式 V_{acal} は次式で与えられる。

$$V_{acal}=0.25 \cdot K_c \cdot f_{ct} \cdot \chi(1+50 \rho_{ls}) b \cdot d \quad \dots \dots \dots (11)$$

なお、式(9)、(11)の適用範囲は文献4)の実験範囲内である。

これによつて得られる曲線を、図-3(a), (b)に実線で示す。図において、水平線の部分はcut offしても耐力の低下が生じないことを示す。これらの図から、式(11)によりcut off部材における斜めひびわれ発生時のせん断力算定が精度よく行われることがわかる。これは、cut off部材においては、破壊につながる曲げ(斜め)ひびわれは、必ずcut off点から発生するためと思われる。

(3) せん断耐力 V_{ucut} の評価

CEBでは、スターラップの降伏によって終局を迎えるRC部材のせん断耐力 V_{u2} を次式で与えている⁹⁾。

$$V_{u2}=0.6 \cdot f_{ct} \cdot b \cdot d + 0.9 \cdot f_{yw} \cdot d(\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot A_{sw} / s \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 A_{sw} ：スターラップ断面積、 s ：スターラップ間隔、 α ：スターラップと部材軸線とのなす角度、 θ ：斜めひびわれと部材軸線とのなす角度、である。

この θ については、スターラップ比 ρ_w との相関が大きく、本実験では表-2のようになつた。

式(12)には、せん断耐力に及ぼす引張主鉄筋比 ρ_t およびせん断スパン比 a/d の影響が考慮されていない。そこで、日本建築学会で用いられている方法¹⁰⁾を上式に採用することにする。日本建築学会の方法は多くの実験データを統計的にまとめ、設計に反映させたものである。まず、 a/d に対する補正係数 α_u については、 ρ_t が0.8%の場合には以下のとおりとする。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha_u=2 & : (a/d < 1) \\ \alpha_u=4/(a/d+1) & : (1 < a/d < 3) \\ \alpha_u=1 & : (a/d > 3) \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots (13)$$

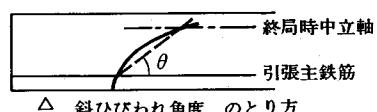
次に ρ_t については、次式¹⁰⁾により補正する。

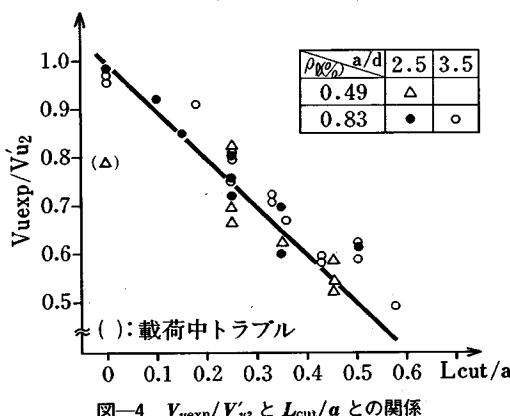
$$\alpha_\rho=0.82 \cdot (\rho_t)^{0.23} \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 α_u と α_ρ を併用する際には、明らかに $\rho_t=0.8$ %

表-2 スターラップ比と斜めひびわれ角度との関係

スターラップ比 ρ_w (%)	斜めひびわれ角度 θ (度)		データ個数
	平均 値(度)	変動係数(%)	
0.	43	16	16
0.057	46	18	4
0.151	54	10	9





%を基準とした引張主鉄筋比による補正係数 K_{α_i} を考える必要がある。したがって、

$$K_{\alpha_i} = \frac{0.82(\rho_i)^{0.23}}{0.82(0.8)^{0.23}} = (\rho_i/0.8)^{0.23} \quad \dots \dots \dots (15)$$

となり、この K_{α_i} と α_u を式(12)に代入すると、次式が得られる。

$$V'_{u2} = 0.6 \cdot \alpha_u \cdot K_{\alpha_i} \cdot f_{ct} \cdot b \cdot d + 0.9 \cdot f_{yw} \cdot d (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot A_{sw} / s \quad \dots \dots \dots (16)$$

さて、実験で得られたせん断耐力値 V_{uexp} をこの V'_{u2} で除した値を縦軸に、横軸には L_{cut}/a をとり実験値をプロットすると、図-4 が得られる。この図から明らかなように、cut off 部材のせん断耐力の実験値と計算値との比 V_{uexp}/V'_{u2} は、挙動の分類にほとんど関係なく直線的に低下していることがわかる。同図中の実線は、直線 $V_{uexp}/V'_{u2} = 1 - L_{cut}/a$ を表わしており、式(16)をもとにすると、cut off されたばかりのせん断耐力 V_{ucut} の評価式は次のようにになる。

$$V_{ucut} = (1 - L_{cut}/a) V'_{u2} \quad \dots \dots \dots (17)$$

ただし、式(17)では、引張主鉄筋が cut off された割合 ρ_{cut} による補正が行われていないため、実際には V_{ucut} は、

$$V_{ucut} = (1 - K_{\rho_{cut}} \cdot L_{cut}/a) \cdot V'_{u2} \quad \dots \dots \dots (18)$$

と表示すべきであろう。ここで $K_{\rho_{cut}}$ は ρ_{cut} によるせん断耐力低下係数である。本実験ではすべて $\rho_{cut} = 0.5$ であり、 $K_{\rho_{cut}} = 1$ である。他の ρ_{cut} の値に対する補正係数 $K_{\rho_{cut}}$ の決定は今後の課題である。

以上のように、cut off が部材せん断耐力に及ぼす要因のうち、cut off 位置の影響は $(1 - L_{cut}/a)$ で設計に反映されることが明らかとなった。

4. 変形の解析

(1) 解析方法

耐力の評価法とともに変形量の評価法について検討しておることは、cut off 部材の設計法を確立するために、

意義深いことである。ここでは、実用性と簡便性の観点から断面分割法¹¹⁾によって、断面のモーメント-曲率関係 ($M-\varphi$ 関係) を求め、これをもとにてたわみを算定する。

a) 断面のモーメント-曲率関係の算定

断面の平面保持を仮定し、断面を図-5 のようにモデル化し、コンクリートおよび鉄筋の材料特性を各材料試験結果に基づき定めた。コンクリートの応力-ひずみ関係は、図-6 に示すように梅村のモデル¹²⁾を用い、鉄筋については、図-7 に示した応力-ひずみ関係とした。 $M-\varphi$ 関係は cut off が施されていない部分の断面の $M-\varphi_I$ と、cut off が施された部分の断面の $M-\varphi_{II}$ とに分けて算出した。また、cut off されていない断面では、 $M-\varphi$ 関係を求める際に引張主鉄筋ひずみ ϵ_s を算出し、 $\epsilon_s-\varphi$ 関係を求めておく。

b) 断面における曲率の算定

部材を材軸方向に微少有限長さ Δx に n 分割（ここでは 200 分割）し、各断面における曲率を以下の方法により求めた。

図-8 は、cut off 点の両側において引張主鉄筋に生じるひずみ（文献 4 参照）を模式的に描いたものである。

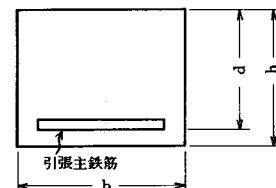


図-5 断面のモデル化

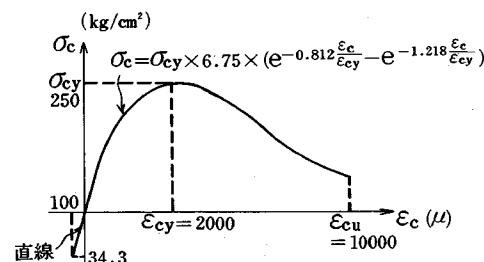


図-6 コンクリートの応力-ひずみ関係

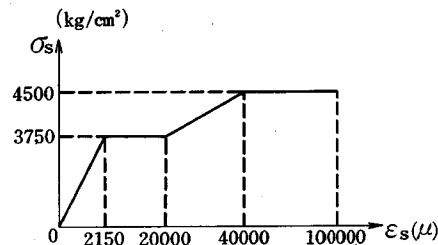


図-7 鉄筋の応力-ひずみ関係

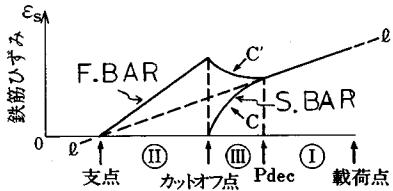


図-8 S. Bar と F. Bar のひずみ分布図

領域(Ⅰ)は、S. Bar (cut offされた引張主鉄筋)とF. Bar (cut offせず支点まで延ばした引張主鉄筋)とのひずみが同一の領域、領域(Ⅲ)は、(Ⅰ)の領域の端部 P_{dec} と cut off 点までの領域、領域(Ⅱ)は cut off 点と支点までの領域である。各断面の曲率 ϕ_i を求めるにあたって、図-8の領域(Ⅰ)および領域(Ⅱ)では、それぞれ $M - \phi_i$, $M - \phi_{ii}$ により、各断面の作用曲げモーメントに相当する曲率を算出した。領域(Ⅲ)では、S. Bar のひずみは、点 P_{dec} より減少が始まり、cut off 点で零になる。このひずみ分布を2次曲線C'により近似する。一方、領域(Ⅲ)でのF. Bar のひずみは、S. Bar のひずみの低下分だけ増大すると考えられる。したがって、先に求めた2次曲線C'を、cut off されていない場合のひずみ分布を表わす直線lと曲線C'で囲まれる面積が等しくなるようにして得られる2次曲線C'で、領域(Ⅲ)のF. Bar のひずみ分布が表わされる。そして、この曲線C'を用いて各断面の引張主鉄筋ひずみ ϵ_{si} を求め、 ϵ_{si} に対応する曲率を $\epsilon_s - \phi_i$ から算出する。

c) たわみの算定

はり中央から m 番目の断面位置における曲げによるたわみ δ_m は前項 b) で求められた曲率 ϕ_i を用いると次式で与えられる。

$$\delta_m = \sum_{i=1}^m \frac{\phi_i}{2} (\Delta x)^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=1}^i \phi_k \cdot (\Delta x)^2 \dots \dots \dots \quad (19)$$

断面分割法は、平面保持を仮定しているため、厳密には曲げひびわれ発生以前にしか適用できない。しかし、降伏時および曲げ圧壊時の荷重の算定にはこのような仮定を用いても実用上十分な解が得られた。

一般に、はり部材の変形は、曲げによるものとせん断によるものの和で表わすことができる。さらに、スターラップ量が十分でない部材のたわみの算定の場合には柱部材と同様、大きなひびわれ発生断面における引張主鉄筋の局部的伸びも考慮しなければならない。しかし、現状では斜めひびわれの進展に伴うせん断剛性の変化が明確でないこと、付着特性が明確でないこと、などの理由から本研究では全変形を曲げによる変形に置き換えたわみの算定を行った。ただし、ある断面における斜めひびわれ発生後の曲げモーメントの算定には、いわゆるモーメント・シフトを考慮し、本研究では曲げモーメントが

支点側に $d \cdot \cot \theta$ (θ は斜めひびわれ角度)だけシフトされたとした。斜めひびわれ発生時のせん断力 V_a は式(11)、斜めひびわれ角度 θ は表-2によるものとした。

d) 最大耐力の算定

部材の最大耐力は、せん断耐力と曲げ耐力に相当するせん断力との比較を行い、いずれか小さい方の値とした。せん断耐力 V_{ucut} は式(18)により算定し、曲げ耐力は、仮定した材料の応力-ひずみ関係を用いて算定した断面の抵抗モーメントが最大に達したときの荷重とした。

(2) 解析結果と考察

解析値と実験値との比較を表-3に示す。また、載荷荷重 P と載荷点たわみ δ および cut off 点たわみ δ_{cut} との関係を図-9に示す。これらから、斜めひびわれ発生後は $d \cdot \cot \theta$ だけモーメント・シフトをさせ、これをもとにたわみを算定しても、比較的よい精度ではりの降伏までの挙動を追うことができることがわかった。表-3や図-9において荷重-変位関係の実験値と解析値とに相違がみられるが、その原因として解析に用いた鉄筋の応力-ひずみ関係は、鉄筋母材の引張試験値に基づいており、解析にあたっては鉄筋とコンクリートとの付着作用を考慮していないこと、コンクリートの材料特性も

表-3 解析値と実験値との比較

供試体 No.	スチーラップ 比 $\rho_w(\%)$	Lcut (cm)	解 析 値				実験値との比較			
			部材降伏時		最大耐力時		部材降伏時 適合 Vycal	最大耐力時 適合 Vycal	部材降伏時 最大耐力時 Vvexp Vcal	最大耐力時 Vvexp Vcal
			せん断力 Vycal (ton)	変位 δ_{vcal} (mm)	せん断力 Vcal (ton)	変位 δ_{cal} (mm)				
L-1	-	-	CL 22.0	3.54	23.8	20.61	×	-	-	0.980.24
L-2	-	10.0	-	-	21.4	2.53	○	-	-	1.021.57
L-3	0.151	15.0	CL 22.0	2.59	26.3	33.43	×	1.11	2.05	0.970.18
L-4	-	25.0	-	-	17.7	2.13	○	-	-	1.011.33
L-5	0.057	25.0	-	-	20.3	3.29	○	-	-	0.970.77
L-6	0.151	25.0	CL 22.0	3.49	23.2	10.25	×	1.02	1.74	1.080.39
L-7	-	35.0	-	-	15.5	1.85	○	-	-	0.921.55
L-8	0.151	35.0	COP 19.2	3.14	20.1	3.40	○	1.03	1.18	1.061.69
L-9	-	50.0	-	-	11.9	1.41	×	-	-	1.242.94
J-1	-	-	CL 26.6	3.09	33.4	40.79	○	1.16	1.39	0.991.21
J-3	-	25.0	CL 26.6	2.27	31.6	14.83	×	-	-	0.960.20
J-4	0.057	25.0	CL 26.6	2.26	33.4	14.73	○	1.21	1.16	0.990.40
J-5	0.151	25.0	CL 26.6	2.34	33.4	14.73	○	1.19	1.96	1.122.97
J-6	0.151	35.0	CL 26.6	2.24	30.9	9.01	○	1.19	1.26	1.111.66
J-7	-	45.0	-	-	23.2	2.20	○	-	-	1.060.79
J-8	0.057	45.0	CL 26.6	2.54	26.7	2.54	×	-	-	0.980.81
J-9	0.151	45.0	CL 26.6	2.53	27.3	2.66	○	1.07	0.94	1.072.55
M-1	-	-	CL 15.7	6.63	18.6	60.91	○	1.19	0.91	1.080.32
M-2	-	-	CL 15.7	6.63	18.6	60.91	○	1.14	1.16	1.090.68
M-3	-	-	CL 15.7	5.11	17.1	9.84	○	1.16	1.83	1.122.01
M-4	-	35.0	-	-	15.6	5.13	○	-	-	1.061.12
M-5	0.057	35.0	CL 15.7	5.16	18.0	45.15	○	1.14	1.15	1.070.32
M-6	0.151	35.0	CL 15.7	5.15	18.9	55.14	○	1.16	1.37	1.120.79
M-7	-	46.5	-	-	13.9	4.55	○	-	-	1.061.19
M-8	0.151	46.5	CL 15.7	6.56	18.7	51.37	○	1.14	0.99	1.130.80
M-9	0.151	50.0	COP 15.3	6.40	18.0	41.55	○	1.17	1.39	1.050.31
M-10	-	60.0	-	-	11.9	3.84	○	-	-	1.061.03
M-11	0.151	60.0	COP 13.5	5.78	16.0	10.18	○	1.12	0.89	1.031.72
M-12	-	70.0	-	-	10.4	3.29	×	-	-	1.271.38
M-13	0.151	70.0	COP 12.1	5.29	14.0	9.07	○	1.21	1.09	1.191.77
M-14	-	80.0	-	-	8.9	2.74	○	-	-	1.161.83
K-1	-	-	CL 19.0	4.52	23.9	28.87	○	1.19	1.15	1.122.94
K-2	-	35.0	CL 19.0	4.52	23.9	28.97	○	1.13	1.04	1.103.19
K-3	0.057	35.0	CL 19.0	4.52	23.9	28.87	○	1.14	1.00	1.173.02

(注) CL: スパン中央, COP: cut off 点, 適合: 撃動型態の分類に対する適合

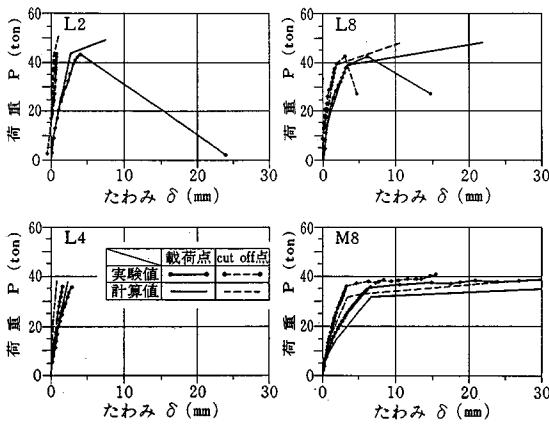


図-9 荷重-変位関係（解析値と実験値との比較）

一軸のシリングー試験によっていること、その結果、部材の挙動の分類も合致していないものがみられること、などによるものと思われる。この点は今後の課題といえる。

支点から cut off 点までの距離が大きくなると部材の平均剛性が小さくなるにもかかわらず、部材降伏後の変形性能が小さくなることが実験あるいは解析からわからり、cut off 位置は部材耐力のみならず、変形性能にも影響を及ぼすことが明らかとなった。この原因として、cut off 点が支点より離れると、斜めひびわれ発生荷重も小さくなり、応力集中により、ひびわれの進展も急激になるため部材の変形性能が劣るものと思われる。

5. 結 言

著者らにより行われた実験データをもとに cut off 部材のせん断耐力評価を試み、実用的設計式の提案を行い、以下のような結果を得た。

(1) cut off 部材の設計の際、重要な限界状態となる斜めひびわれ発生時および終局時のせん断力 V_a および V_{acut} を、CEBにおいて採用されているスター・ラップのないはりのせん断耐力式およびスター・ラップの降伏により終局を迎えるせん断耐力式をもとに種々の補正を行い評価した。すなわち、 V_a に対しては支点から cut off 点までの距離 L_{cut} を含む補正係数を、 V_{acut} に対しては a/d による補正係数、 ρ_t に対する補正係数、さらに cut off 位置により耐力が直線的に低下することを表わす補正係数 $(1 - (L_{cut}/a))$ を導入した。なお、これらの係数の適用範囲は、文献 4) の実験の変動要因の範囲である。

(2) cut off の悪影響として従来指摘されていた“せん断および付着の応力集中”を評価せず、モーメント・シフトを考慮すれば、cut off された部材の挙動をマクロ的に解析できることがわかった。しかし、今後は、鉄

筋とコンクリートとの付着の劣化による抜け出しやせん断変形を考慮した解析が必要と思われる。

(3) 現行の示方書における cut off に対する規定では、定着長を有効高さ分だけ割り増すことにより安全性を確保しようとしているが、この方法により設計された部材の各部分は、せん断の作用に対しつり合いのとれた安全性を有しているかどうかは疑問である。cut off 位置が部材せん断耐力に及ぼす影響が大きいことを考慮しなければならないと思われる。

(4) 支点から cut off 点までの距離が大きくなると部材の平均剛性が小さくなるにもかかわらず、塑性変形能が小さくなり耐震性能が悪くなる。よって cut off 位置は部材の変形性能にも影響を与えることも考慮すべきである。

今回提案したせん断耐力評価式のもととなった実験は、 a/d 、引張鉄筋比、スターラップ比等ごく限られた範囲のものであり、しかも載荷は一方向単調増漸載荷である。よって、本研究の結果は地震荷重のような交番繰り返し載荷を受ける RC 部材に、直接適用できるかどうかは疑問である。今後、この分野の実験や解析を行い、耐力評価のみならず変形性能の評価にも努める必要がある。

謝 辞：本研究を行うにあたり、文部省科学研究費補助金 (No. 58850104) を受けました。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 昭和 55 年版。
- 2) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)，コンクリートライブラー第 52 号，昭和 58 年 11 月。
- 3) Ferguson, P. M. and Matloob, F. N. : Effect of bar cut-off on bond and shear strength of reinforced concrete beams, ACI Journal, Vol. 56, No. 4, pp. 5~23, July 1959.
- 4) 尾坂芳夫・鈴木基行・寺澤正人・小林茂敏：RC はりのせん断耐力に及ぼす引張主鉄筋途中定着の影響に関する研究、土木学会論文集、第 366 号／V-4, pp. 133~142, 1986 年 2 月。
- 5) Baron, M. J. : Shear strength of reinforced concrete beams at points of bar cutoff, ACI Journal, Vol. 63, No. 6, pp. 127~134, Jan. 1966.
- 6) Kao, A. M. and Untrauer, R. E. : Shear strength of reinforced concrete beams with bars terminated in tension zones, ACI Journal, Vol. 72, No. 49, pp. 720~722, Dec. 1975.
- 7) 山本 強・石橋忠良・大坪正行・小林晋爾：鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性能に関する実験的研究、土木学会論文集、第 348 号／V-1, pp. 61~70, 1984 年 8 月。
- 8) ACI：鉄筋コンクリート構造設計基準 (318-71)。

- 9) CEB BULLETIN D'INFORMATION No. 124/125-E,
Avril 1978.
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,
1982年。
- 11) 武藤 清：鉄筋コンクリート構造物の塑性設計, 丸善
(株).
- 12) 梅村 魁：鉄筋コンクリート梁の塑性変形及び終局強度,
日本建築学会論文報告集, 第42号, 昭和26年2月.
(1986.5.2・受付)
-