



鉄筋コンクリートはりの終局せん断強度に関する2・3の考察

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山田, 昌昭 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00008030

鉄筋コンクリートはりの終局せん断強度に関する 2・3 の考察*

Preliminary Studies on Ultimate Shear Strength of Reinforced Concrete Beams

山田 昌昭**
Masaaki YAMADA**

(昭和57年 4月15日受理)

ABSTRACT

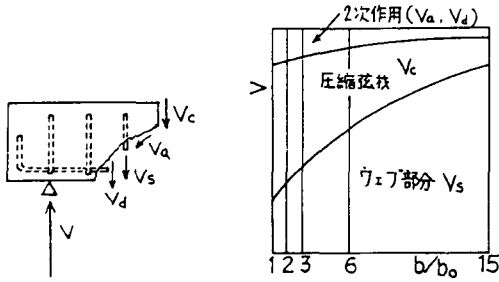
The total shear force after the formation of diagonal tension cracks in a reinforced concrete beam is considered to be the sum of the individual shear carrying components, $V-c$, $V-s$, $V-a$, $V-d$, as shown in Fig.-1. The behavior of these components and the shear carrying mechanism of RC-beam were investigated. The test specimens consisted of four rectangular RC-beams, A, B, C, D, three T-beams, TB, TC, TD, and two artificially cracked beams, A-cr, B-cr, as shown in Fig.-4. A summary of the properties of the test specimens and the test results is presented in Table-1. It shows that about 20-30% of the total shear is carried by web-reinforcements in the most beams, and the influence of the aggregate interlock, $V-a$, shown in Fig.-6 is about 7% to the total shear force. It is also recognized that the increase of compressive area in RC beams enables the shear resistance to grow as shown in Fig.-7, which gives comparisons between T-beams and rectangular beams. The typical FEM models were compared with the test results in order to study the shear carrying mechanism of RC beam. These comparisons suggest that the combined structure formed by a tied-arch and a truss might be a good model of the shear carrying mechanism of RC beam.

1. まえがき

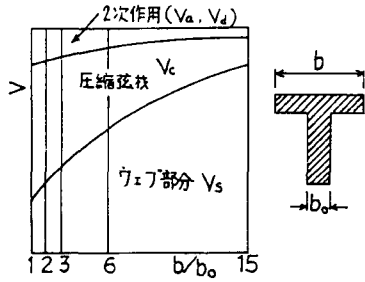
「コンクリート構造の限界状態設計法試案」が昨年、土木学会より出版されたことにより、わが国のコンクリート構造物の設計方法が従来の弾性理論に基づく許容応力度設計法から塑性理論に基づく限界状態設計法へと大きく変わろうとしていることは衆知の事実である。限界状態設計法においては鉄筋コンクリート（以下RCと略す）部材の終局強度が当然問題となるわけであるが、せん断終局強度についてはまだ十分にその挙動が明らかとされていない。RCはりに曲げモーメントおよびせん断力が作用し、やがてはりに斜ひびわれ（せん断クラック）が生じるとせん断力の分担機構が大きく変化する。それまで主としてRCはりの腹部コンクリートで受け持たれていたせん断力は図-1に示すような4つの要因、 V_c , V_s , V_a , V_d によって分担される。ここで、 V_c はコンクリート圧縮部のせん断耐力であり、 V_s は腹鉄筋の引張力、 V_a はひびわれに沿う骨材のかみ合せ作用、 V_d は引張鉄筋のダウエル作用である。これ

* 本論文は第36回セメント技術大会（昭和57年 5月20日）において講演したものである。

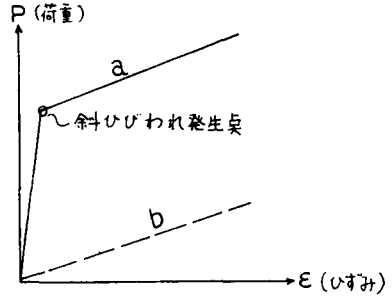
**土木工学科 (Department of Civil Engineering)



図一 RC はりのせん断力
分担要因図



図二 せん断力分担割合



図三 スターラップの荷重－
ひずみ関係図

らの各要因の挙動ならびにせん断力分担割合についてはまだ十分に明らかにされていないが、例えば F. Leonhardt は(図一2¹⁾)に示すように各要因の概略の分担率と b/b_o との関係を実験により求めている。この図からも分るように、せん断力を分担する要因としては V_c と V_s の影響が支配的であり、 V_a および V_d の影響は二次的である。とくに V_d の影響ははり構造の場合それほど支配的な要因ではない。²⁾ 著者もすでに指適したように³⁾ V_s の影響が20—35%、 V_c の影響が60—70%程度で、 V_a 、 V_d の影響は10%程度と思われる。しかし、これらの要因は互いに影響し合うと共に多くの設計施工上の要因(例えば、鉄筋量、はり断面形状、はり長と荷重位置、コンクリート強度等)によって影響をうけるので今後とも研究が続けられねばならない分野であろう。とくに、RCはりの斜ひびわれ発生後のせん断力分担機構、換言すれば斜ひびわれ発生から終局破壊状態に至るまでのRCはりのせん断伝達機構について理論的に究明することが必要であろう。この点については多くの研究者により研究が行なわれ、トラス理論、アーチ理論、修正トラス理論、終局強度理論等の仮説が提案されて来たが、いずれの理論も十分にせん断破壊機構を説明し得ていない。「コンクリート構造の限界状態設計法試案」にも見られるように、⁴⁾ 現在の世界各国におけるRCはりの終局せん断耐力の算定式は $V_u = V_{cr} + V_{su}$ が用いられている。ここで V_{cr} は腹鉄筋のないRCはりの斜ひびわれ発生荷重であり、 V_{su} はスターラップの降状荷重である。これはRCはりの載荷試験を行なえば分ることであるが、一般的にいてスターラップの荷重(P)－ひずみ(ϵ)曲線は(図一3)の(a)曲線のようになる。斜ひびわれが生ずるまではスターラップにはほとんど荷重はかからない。しかし、ひとたび斜ひびわれが生じ、それがスターラップを横切るとそれまでコンクリート腹部で受け持たれていたせん断力の一部がスターラップに伝達されスターラップのひずみが増大する。このひずみの増大する割合は、スターラップのみでせん断力を受け持つと仮定した場合の $p \sim \epsilon$ 曲線(b)とほぼ平行となる。このことから終局せん断荷重は V_{cr} と V_{su} を加算することにより求まると考えるわけである。実用上はこの算定式で終局せん断力を計算しても一応妥当な値を得ることができるであろう。しかし、斜ひびわれ発生後はせん断力の分担機構がそれまでのものと全く異なるため、 $V_u = V_{cr} + V_{su}$ を用いることは実用上は妥当であっても本質的には正しいとはいえない。当然 $V_u = V_c + V_s + V_a + V_d$ を使用すべきであり、そのためには各要因の挙動を明らかにすると同時に、適切なRCはりのせん断破壊モデルを考えることが今後の研究の基本的方向であろう。著者はRCはりのせん断破壊機構としてタイドアーチとトラスの複合体を提案してきた。⁵⁾ 本研究においてはRCはりのせん断力分担要因の挙動およびRCはりのせん断力分担機構としてのアーチとトラスの複合体の挙動について2・3の実験を行うととも

に、有限要素法（以下FEMと略す）を用いてRCはりの解析を行なったのでその結果について以下に述べる。

2. 実験について

本研究ではまず要因 Va の挙動を調べるためにあらかじめ人工的に設けたひびわれをもつはり A-cr, B-cr（図-4）を作成した。人工ひびわれはビニールシートを二重にしたもので作成し、シートの間には油を塗布して完全に摩擦を除去した。人工ひびわれは曲げせん断ひびわれの発生予想位置にスターラップ中央部を横切るようにはりの片側に設け、他方の側は通常の状態コンクリートを打設した。はりの載荷試験を行ない両側のスターラップのひずみを測定することによりひびわれに設く骨材のかみ合作用（aggregate interlock）の影響を調べようとしたものである。つぎに Vc の挙動を調べるために、まず圧縮鉄筋の有無がせん断耐力 Vc に与える影響を考察する目的で A はり、B はり（図-4）を作成した。またコンクリート圧縮部の断面積が大きくなれば当然 Vc の影響も大きくなるのが予想されるので圧縮部断面を増大させた T 形はり T-B, T-C, T-D（図-4）を作成して長方形断面のはり B, C, D との比較を行なった。なお、D はりは引張部コンクリートを除去した特殊はりで、これによりアーチとトラスの複合体としての RC はりの挙動について考察を行なえると同時に、Va, Vd の影響を除いた RC はりの挙動についても考察できる利点をもっている。実験供試体の寸法は図-4 に示す通りである。T 形はりのフランジ部の寸法は長方形はりのコンクリート圧縮部の断面積の 2 倍になるように決定したものである。また D はりのコンクリート引張部の除去高さは

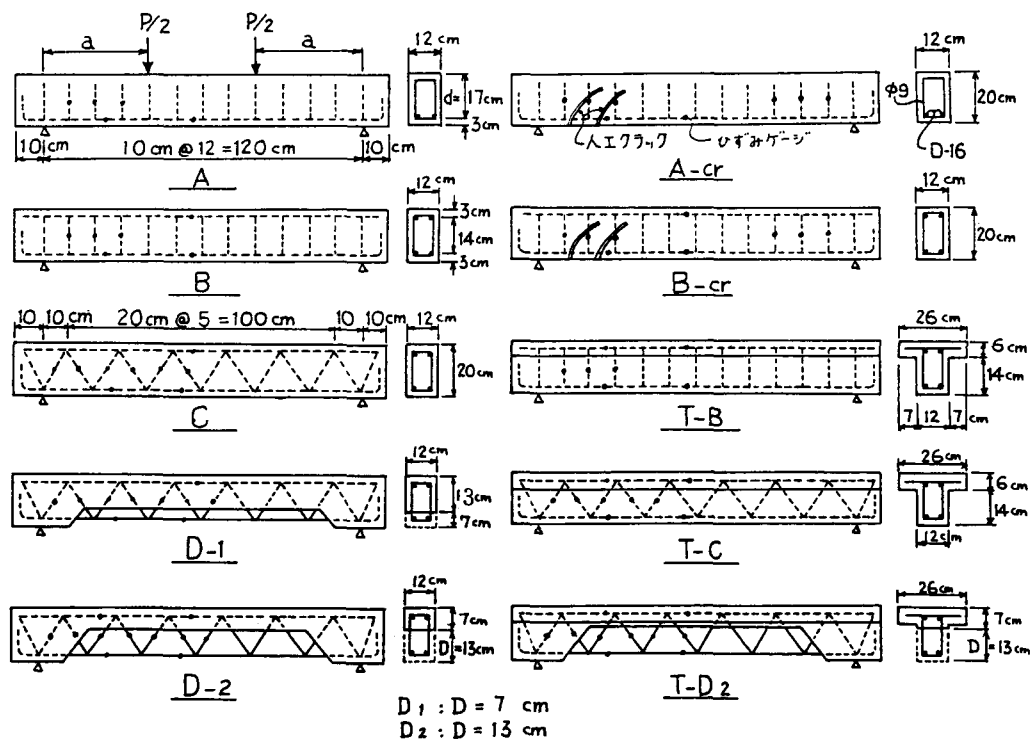


図-4 実験供試体

$D_1=7\text{ cm}$, $D_2=13\text{ cm}$ の2種類とした。とくに $D_2=13\text{ cm}$ の場合は長方形断面RCはりにおける圧縮縁から中立軸までの距離 ($kd \approx 7\text{ cm}$) 以下の引張部のコンクリートを完全に除去したものである。供試体に使用した材料のうち、鉄筋は引張および圧縮鉄筋ともに材質SD30、公称直径16mmの異形棒鋼 (降伏点=3700kgf/cm², 引張強さ=5650kgf/cm²) であり、腹鉄筋は材質SR24、直径9mmの普通丸鋼 (降伏点=2800kgf/cm², 引張強さ=5030kgf/cm²) である。一方、使用したコンクリートは目標圧縮強度を $\delta_{28}=280\text{ kgf/cm}^2$ とし、セメントは徳山遭達製の普通ポルランドセメント、骨材は山砂利 (最大径25mm) および山砂を使用した。供試体には図-4に示すように鉄筋の主要箇所およびコンクリート圧縮縁 (圧縮端部から1cmの所) にワイヤーストレインゲージを貼りつけ、はり試験時のひずみを測定した。鉄筋に設置したひずみゲージは長さ約5cmにわたり周辺にグリースを塗りさらにビニールシートをまきつけてコンクリートの付着をカットするようにした。これにより、この附近をひびわれが横切った際、鉄筋のひずみがコンクリートの付着力の影響をうけないで測定できるようにするためである。使用したストレインゲージはコンクリートに対しては長さ3cmのもの (東京測器製PL-30) を、鉄筋に対しては長さ5mmのもの (同社製FLA-5L) を使用した。供試体はコンクリート打設後2週間水でしめらせた布でおおって養生し、その後2週間は空中養生を行ない、コンクリート打設後4週目に載荷試験を行なった。載荷試験は200tの油圧式万能試験機により行なった。載荷重は0より1tおきに増加させ、はりが完全に破壊するまで載荷した。載荷速度は約1t/分であり、各荷重段階で鉄筋およびコンクリートのひずみを自動デジタルひずみ測定器で測定し、はりのたわみをダイヤルゲージで測定した。はりに生じるひびわれは目視により観察し、クラック発生位置と荷重をはり側面に鉛筆で記録した。一方、はり供試体と同時に打設したコンクリート円柱供試体 ($\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$) により、載荷試験時のコンクリートの圧縮強度および弾性係数を測定した。

3. 実験結果とその考察

実験結果をまとめたものが表-1である。また、供試体のひびわれおよび破壊状況を示した

表-1 実験結果一覽表

	供試体	σ_{28} (kgf/cm ²)		Ec (kgf/cm ²)	終局曲げ荷重(t)		斜ひびわれ荷重(t)		スターラップせん断力分担率(%)	終局時中央たわみ(mm)	
		標準養生	現場養生		計算	実験	計算	実験			
a = 40 cm	A-cr	285	278	2.0×10^5	9.1	10.5	8.3	6.0	27	3.5	
	B-cr	308	285	2.4	〃	9.3	〃	5.0	29	〃	
	T-B	288	288	〃	9.3	10.6	〃	6.0	23	2.7	
	T-C	305	281	—	〃	9.4	〃	6.0	28	〃	
	T-D ₂	〃	281	—	〃	8.6	—	—	36	3.7	
	A	276	288	2.6	〃	9.1	9.8	8.3	7.0	23	3.4
	B	278	290	2.5	〃	〃	11.7	〃	10.2	32	3.5
	C	250	244	—	〃	〃	10.3	〃	8.4	33	4.1
	D- ₁	289	283	—	〃	〃	10.1	—	—	29	4.0
	D- ₂	325	285	—	〃	—	—	—	—	34	(4.2)
a = 60 cm	A	285	278	2.0	〃	6.0	7.1	5.6	6.0	24	2.6
	B	275	274	—	〃	〃	6.7	〃	7.0	18	2.5
	C	262	264	—	〃	〃	7.0	〃	4.0	36	2.6
	D- ₁	296	288	2.4	〃	〃	7.2	—	—	78	4.1
	D- ₂	288	272	〃	〃	—	—	—	—	100	—

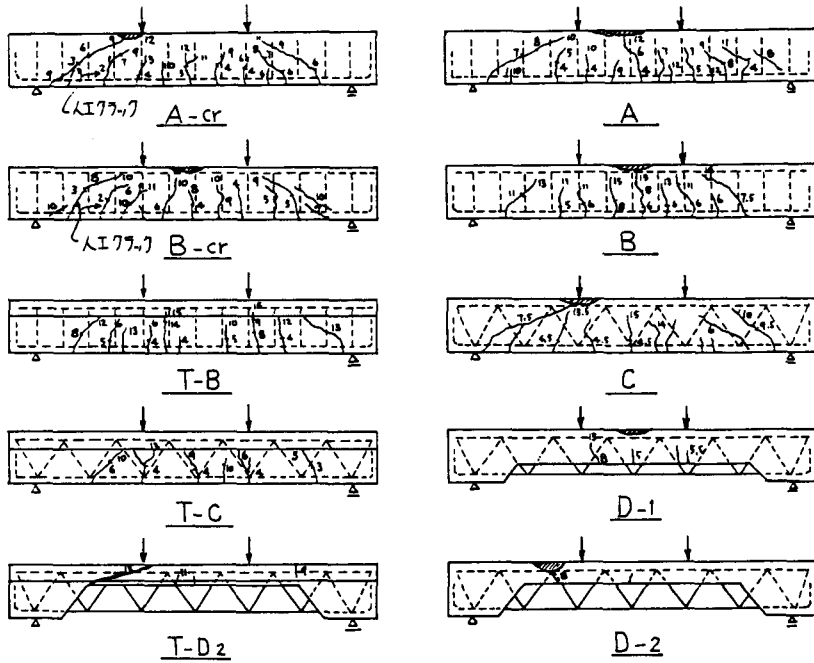


図-5 ひびわれ状況図

ものが図-5 (a=40cmの場合のみを表示)である。図-5の数値はひびわれ発生荷重(単位=t)を表す。表-1の終局曲げ荷重は引張鉄筋が降伏点に達したときの値であり、その計算値はACIの方法によった。表の結果からわかるように計算値と実験値はよい一致を示している。一方せん断の影響による斜ひびわれ発生荷重については、曲げによるひびわれが斜ひびわれへと伸長する点を正確にとらえることはやゝ困難であるが、大体は6~8t程度であり、過去に実施したスターラップのないRCはりの斜ひびわれ荷重⁶⁾と等しい値を示した。表-1に示した計算値はせん断モーメント理論といわれるLaupaの式⁷⁾によって計算したもので、実験値よりやゝ大きめの値を示している。土木学会の限界状態設計法試案においては、斜ひびわれ発生荷重 V_{cr} は下式によって与えられている。

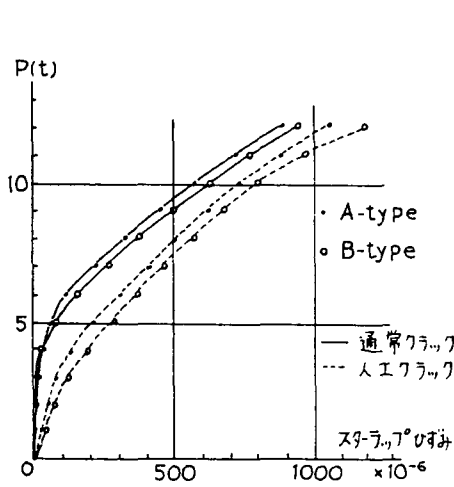
$$V_{cr} = f_{vd} (1 + \beta_d + \beta_p) b \omega d$$

$$\text{ここに、} f_{vd} = f_{vk} / \gamma_{mc}, \quad f_{vk} = 0.8 f_{ck}^{\frac{1}{3}}, \quad \beta_d = 4\sqrt{100/d} - 1, \quad \beta_p = \sqrt{100p\omega} - 1$$

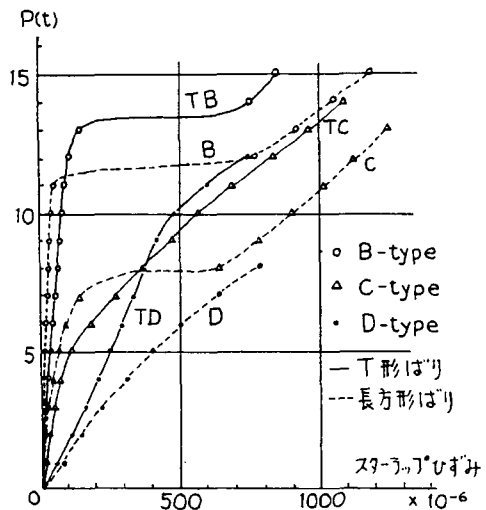
γ_{mc} = 安全係数, f_{ck} = 圧縮強度, $b\omega$ = はり巾, d = はり有効高さ, $p\omega$ = 鉄筋比

ここで実験に用いた数値 ($f_{ck} = 280 \text{ kg/cm}^2$, $d = 17 \text{ cm}$, $b\omega = 12 \text{ cm}$, $p\omega = 0.0196$, $\gamma_{mc} = 1$) を用いて上式を計算すると $V_{cr} = 2068 \text{ kg} \approx 2.1 \text{ t}$ となる。従って $P = 2 \times V_{cr} = 4.1 \text{ t}$ となり、今回の実験値よりやや安全側の値を示す。しかし実用上は妥当な値と思われる。斜ひびわれがスターラップを横断するとそれまでコンクリートで受け持たれていたせん断力はスターラップに伝達されるわけであるが表-1のスターラップせん断力分担率はRCはりが終局状態に近づくときのスターラップで受け持たれているせん断力の全せん断力に対する割合を示したものである。この結果からわかるように30%程度のせん断力がスターラップで分担されていることがわかる。

このことは残りの70%程度のせん断力が V_c , V_a , V_d の要因で分担されていることを意味している。 V_a , V_d の影響が無視できる D_1, D_2 の実験結果 ($a = 40\text{cm}$ の場合) においても V_s は30%程度であり V_c が残りのせん断耐力の大部分を負担していることがこれによっても明らかである。 $a = 60\text{cm}$ の場合の D_1, D_2 供試体においては $V_s = 78 \sim 100\%$ を示しているが、これは荷重が支点より離れていたためと引張部コンクリートの除去を支点近くまで行なったためコンクリートのアーチ作用が十分に発揮されなかったためである。換言すれば V_c の効果はRCはりのアーチ作用により生ずるものであり、アーチ作用が十分に発揮できない場合、すなわち a/d が大きい場合には、せん断力はスターラップにより分担される。本実験でももしコンクリートの形状をもっとアーチ状に成形していたならば $a = 60\text{cm}$ の場合 D_1, D_2 供試体の V_s の値をもっと小さくなっていったものと思われる。つぎに表一の最大たわみを見ると、T型ばりの方が長方形ばりより小さい値を示している。これもアーチ効果がより大きく現れた結果と思われる。一方Dタイプのはりではコンクリート除去のためたわみも大きくなっており、とくにアーチ効果の発揮できなかった $a = 60\text{cm}$ の場合においてその影響は顕著である。一方、図一6は斜ひびわれ沿う骨材のかみ合せ作用 V_a の影響を表わした結果である。骨材のかみ合せ作用の無視できる人工クラック部分のスターラップのひずみ測定値と、 V_a の影響を含む通常のクラック部のスターラップのひずみ測定値を比較すると図のように明らかに通常のひびわれを持つ部分の方がひずみが小さく出ている。これは骨材のかみ合せ作用がそれだけせん断力を分担したことを示しており、これら2つの曲線(実線と点線)の差が V_a の影響であると考えてよい。Aタイプ、Bタイプの供試体ともにほぼ同じ差を示しており、約 200×10^{-6} のひずみの差が測定された。これをせん断力に換算して全せん断力に対する割合を計算すると終局荷重時で約7%の値となる。 V_a の影響は荷重の大きさに関係なく斜ひびわれ発生後は大体同じ値を示しており、スターラップが降伏してひびわれ巾が拡大しないかぎりほぼ同程度の効果が期待できそうである。つぎに、圧縮鉄筋の有無の影響を同じ図一6から比較するとA, B供試体ともに顕著な差はなく、圧縮鉄筋の有無はRCはりのせん断耐力にはほとんど影響を与えないと言ってよい。一方、



図一6 骨材のかみ合せ作用の影響



図一7 T形ばりと長方形ばりの比較

図-7はコンクリート圧縮部の断面積の大ききの違いがRCはりのせん断耐力に与える影響を比較したものである。すなわち、T形ばりではコンクリート圧縮部の断面積が長方形ばりのその2倍になっており、当然T形ばりでは V_c の影響も大きいものと予想される。図-7からわかるように、T形ばりと長方形ばりとではスターラップのひずみに明らかに差が認められる。T形ばりの方がスターラップに伝えられる荷重が小さく、それだけT形ばりでは V_c がせん断力を負担していることを表わしている。終局時におけるT形ばりと長方形ばりのせん断耐力の差を全せん断力に対する割合で表すと約8—10%となる。この結果のみをみると断面積を2倍にした割には V_c の効果が増加しないように思われるが、これは全ての供試体が鉄筋の降伏により曲げ破壊したためにその差が顕著に表れなかったためで、もし引張鉄筋の断面積をT形フランジの断面積に合せて増加させておれば、せん断耐力もさらに増大したものと思われる。これについては今後さらに実験を行なう必要がある。

以上の実験結果と対比するためにFEMによりRCはりを解析した。解析に使用したRCはりモデルは図-8に示すような3種類のものである。モデル-1は通常の鉛直スターラップを有するRCはりで、はり中央に曲げひびわれを有するものである。モデル-2は本実験のD-1供試体に相当するはりで、ワレントラス型スターラップを有し、引張部コンクリートを除去したはりである。モデル-3は引張部コンクリートをさらに大きく除去したはりである。荷重は図のように $a=40\text{cm}$ の位置を選び、 $p=6\text{t}$ のケースについて計算した。計算は平面応力状態の仮定で弾性解析を行なったものである。RCはりはコンクリート部分を三角形要素に分割し、鉄筋は線要素として取扱った。計算結果と実験結果を対比したものが表-2である。この表か

表-2 FEM解析と実験結果の比較

	単 位	F E M			実 験 値
		model-1	model-2	model-3	
はり中央たわみ	mm	1.1	1.3	1.8	1.5—1.8
圧縮縁応力	kgf/cm ²	137	141	192	100—140
引張鉄筋応力	〃	1790	1460	1800	1500—2000
スターラップ応力	〃	80	880	1430	740

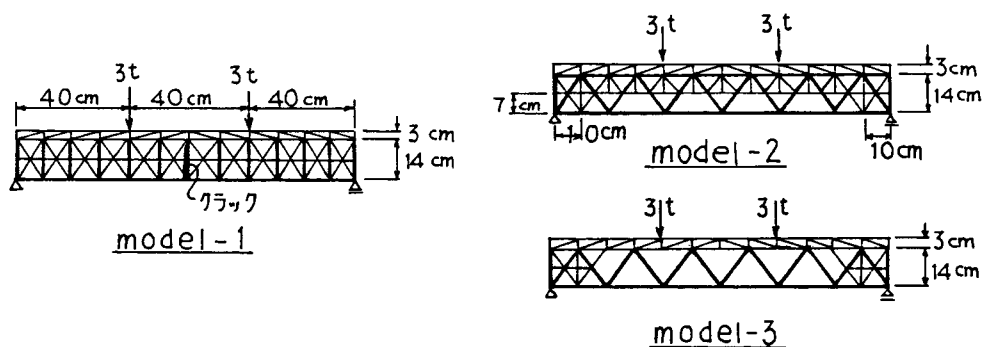


図-8 FEM解析に使用したRCはりモデル

らも分るようにFEMの計算値と実験値は比較的よい一致を示している。とくにモデル—2は本実験供試体の実験値とよい一致を示しており、適当なモデルを選定することによりRCはりの挙動をFEM解析によって追跡することが可能であることを示唆している。またモデル—2はRCはりをトラスとアーチからなる複合体と考えることの妥当性を示している。

4. むすび

以上の結果をまとめると下記のようなのである。

- 1) RCはりのせん断破壊モデルとしてはトラスとアーチの複合体を考えるのがよい。
- 2) RCはりの終局せん断耐力を支配する要因としてコンクリート圧縮部のせん断耐力 V_c 、スターラップの張力 V_s 、骨材のかみ合せ作用 V_a 、主鉄筋のダウエル作用 V_d が考えられるが、せん断破壊の最も生じやすい $a/d=2\sim 2.5$ の場合 (本実験では $a=40\text{cm}$ のケース。この際 $a/d=2.35$ となる)、各要因のせん断分担率は $V_s\cong 30\%$ 、 $V_a\cong 7\%$ 、 $V_c\cong 60\%$ である。 V_d の影響は本研究では測定されていないので、今後の研究課題として残る。
- 3) 上記の要因のうち V_c は主としてRCはりのアーチ効果によって生ずるものであり、アーチ効果が十分に発揮できない a/d の大きいはりにおいてはせん断力はスターラップによって分担される。
- 4) 適当な破壊モデルを選定することによりRCはりの終局せん断耐力の算定に電算機を利用したFEM解析が実験的手法と同程度に大きな手段となり得る。

最後に本研究を行うに当たり、実験および解析に助力を頂いた本校卒業生、倉雅美君、倉津義貴君、鈴木俊雄君に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) F. Leonhardt : コンクリート構造物におけるせん断に関する問題、橋梁と基礎、1977年4月、P・7
- 2) ASCE・ACI, Committee 426 : 鉄筋コンクリート部材のせん断強度 (その1～3)、コンクリート工学、1976年7月、P・32
- 3) 山田昌昭 : 鉄筋コンクリートはりのせん断破壊機構に関する2・3の考察、大阪府立工業高等専門学校研究紀要第15巻、1981年9月、P・134
- 4) 土木学会 : コンクリート構造の限界状態設計法試案、コンクリート・ライブラリー第48号、昭和56年4月、P・36
- 5) 3)に同じ。
- 6) 3) P・129
- 7) 檜貝 勇 : 鉄筋コンクリート部材の諸性状 (その5) —アメリカにおけるせん断の研究一、コンクリート・ライブラリー第34号、土木学会、1972、P・34