

論文

[2061] コーベルの破壊様相やせん断耐力に及ぼす載荷幅の影響

正会員○原 忠勝（日本大学工学部）

富内俊介（日本大学大学院）

1. はじめに

コーベルは、部材の高さ（あるいは有効高さ d ）に比べてスパン a が短く、 $a/d \leq 1.0$ の部材がほとんどであることから、斜めひびわれが発生しても、さらに大きな荷重に耐えることができる。そして、トラスやタイドアーチ的な耐荷機構となり、斜めひびわれ発生によって形成されるストラット上のせん断破壊以外に、載荷点のめり込みや定着部の破壊などの二次的な破壊を生じることがある。これら定着破壊や支圧破壊を生じた部材は、ストラット上のせん断破壊耐力や、主鉄筋の降伏による曲げ・せん断破壊耐力以下で生じることが多く、安全で合理的なコーベルの設計という観点からは、避けなければならない破壊モードである。

したがって、本研究の主な目的は、コーベルの破壊がストラット上のせん断破壊や、タイ材としての軸方向鉄筋コンクリートの降伏による曲げ・せん断破壊となり、設計規準で採用された破壊モードになるように、支圧板の設計法について検討することである。ここでは、コーベルの破壊モードや破壊耐力に及ぼす載荷幅の影響を知るために、鉄筋量、せん断スパンと有効高さの比 a/d 、および載荷幅を実験条件とした試験体について実験を行い、比較検討を行ったものである。

2. 実験の概要

実験条件は、図-1に示すように、コーベルのせん断破壊耐力に及ぼす要因として、① a/d 、②軸方向鉄筋量 A_s を取り上げ、さらに、斜めひびわれ発生後のストラットの形成に影響を及ぼすと考えられる③載荷板の幅 W_b とし、各条件の組合せは、以下の通りである。

- ① $a/d = 0.2, 0.4, 0.6$ (3条件)
- ② $A_s = 5.067 \text{ cm}^2$ (D25), 10.134 cm^2 (2D25) (2条件)
- ③ $W_b = 2.25, 7.5, 15.0$ (cm) (3条件)

本実験においては、これらを組合せた計18体の試験体について載荷試験を行った。試験体は、図-2に示すように、同一の形状寸法のもので、幅 $b_w = 15\text{cm}$ 、高さ $h = 60\text{cm}$ （有効高さ $d = 52.7\text{cm}$ ）の台形のコーベルを $15\text{cm} \times 30\text{cm}$ の柱部材の左右に取り付けたものである。

載荷試験では、実験上の安全を考え、試験体を逆に設置し、コーベル上面を下にした。また、実験は変形制御が可能な高剛性載荷装置を用い、載荷重は、2台のロードセル（容量 100tf）によって、測定

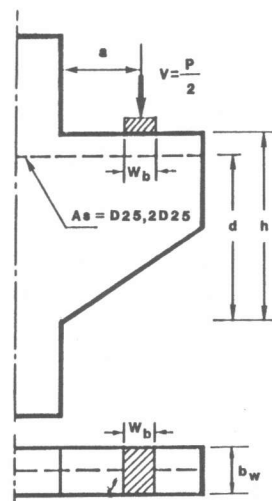


図-1 実験条件の概要

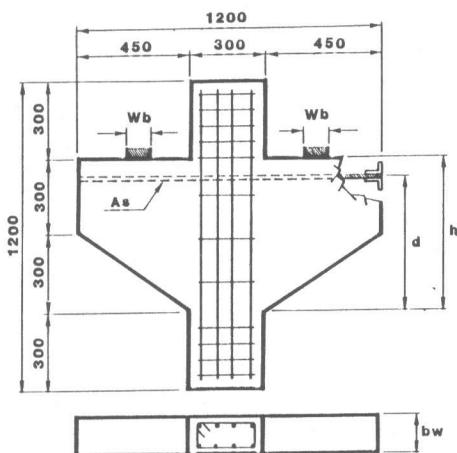


図-2 試験体の形状寸法

を行った。なお載荷は、破壊までの漸次増加荷重である。試験体のひずみ、たわみ、変位およびひびわれの伸展状況の測定は、荷重増加の目標を約 2tfとしたが、ひびわれの伸展状況を見て、適宜、測定を行った。

3. 実験結果および考察

本実験における試験体の断面寸法、実験条件、使用材料の性質、斜めひびわれ発生時のせん断力 V_s 、最大せん断耐力 V_{max} 、および破壊モード、についてまとめたものを表-1に示した。また、表に示すように、当初計画した載荷板の幅 W_b と異なっている試験体や、最大せん断耐力を表示していないものもある。これは、コンクリートの圧縮強度が呼び強度の 1.5倍程度となり、載荷装置の容量の範囲内では、破壊させることができなかったため、その後、載荷能力の範囲を越える恐れのある試験体については、載荷板の幅を変更したことによる。

(1) ひびわれおよび破壊様相

全ての試験体の初期ひびわれの発生は、柱部材とコーベルの境界部断面に発生した鉛直な曲げひびわれである。このひびわれは、柱部材の少し内側を鉛直方向に、有効高さの約 1/2~2/3 程度まで伸展する。その後、このひびわれの伸展は見られず、コーベルウェブの約 1/3 付近の高さより、斜めひびわれが発生し、載荷重の増加に伴って、斜め上下方向に伸展した(写真-1)。

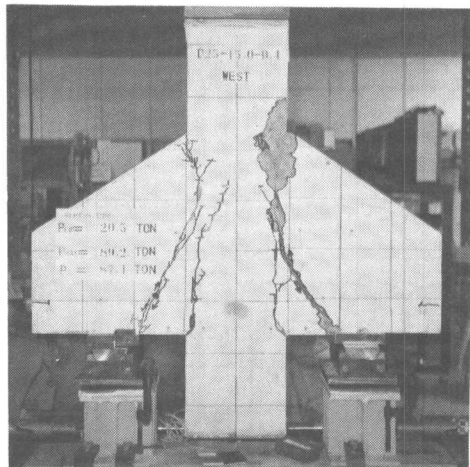


写真-1 破壊後のひびわれ様相

($A_s=D24, W_b=15cm, a/d=0.4$)

表-1 実験結果の一覧表

No.	W_b (cm)	b_w (cm)	h (cm)	d (cm)	a (cm)	a/d	A_s (cm^2)	P_w (%)	V_{cr} (tonf)	$V_s(S)$ (tonf)	$V_s(N)$ (tonf)	V_{max} (tonf)	f_y (kgf/mm^2)	f'_c (kgf/cm^2)	Failure Mode
1-1	2.25	15.2	59.7	52.3	10.5	0.2	5.067	0.64	14.2	27.4	24.8	35.3	37.00	277.4	S, BE
2	5.00	15.2	59.6	51.7	10.5	0.2	5.067	0.64	11.9	31.0	31.0	45.7	37.00	277.4	S
3	7.50	15.1	59.4	51.5	10.5	0.2	5.067	0.65	11.0	45.0	49.5	49.8	37.00	277.4	S
4	2.25	15.1	59.4	52.1	21.0	0.4	5.067	0.64	7.0	14.4	17.6	27.2	37.00	277.4	S, BE
5	7.50	15.0	59.3	52.2	21.0	0.4	5.067	0.65	7.0	17.3	22.0	30.0	37.00	277.4	S, CE
6	15.0	15.4	59.9	52.8	21.0	0.4	5.067	0.62	10.3	41.6	—	44.7	37.00	277.4	S
7	2.25	15.3	60.0	52.6	31.6	0.6	5.067	0.63	6.0	—	16.1	26.9	37.00	277.4	S, BE
8	7.50	15.2	59.9	53.0	31.6	0.6	5.067	0.63	6.7	16.1	13.4	32.1	37.00	277.4	S
9	15.0	15.3	59.8	52.7	31.6	0.6	5.067	0.63	6.7	17.2	14.6	27.1	37.00	277.4	CE
2-1	2.25	15.3	58.8	51.1	10.5	0.2	10.134	1.30	8.7	21.2	21.8	42.2	34.37	292.8	BE
2	7.50	15.4	59.2	51.6	10.5	0.2	10.134	1.28	7.8	62.7	—	78.8	34.37	292.8	S
3	15.0	15.5	58.8	51.2	10.5	0.2	10.134	1.28	10.3	49.2	71.5	—	34.37	292.8	—
4	2.25	15.4	58.9	52.1	21.0	0.4	10.134	1.26	3.5	21.1	16.7	39.2	37.00	292.8	BE
5	5.00	15.3	59.2	52.2	21.0	0.4	10.134	1.27	5.9	27.0	23.0	54.4	37.00	326.7	S
6	7.50	15.4	59.0	51.7	21.0	0.4	10.134	1.27	6.5	30.2	28.8	50.2	37.00	292.8	CE
7	2.25	15.2	58.8	51.4	31.6	0.6	10.134	1.30	5.4	20.9	17.2	38.6	37.00	327.2	S
8	5.00	15.2	58.0	51.0	31.6	0.6	10.134	1.31	4.8	15.5	15.5	42.2	37.00	292.8	S
9	7.50	15.4	60.0	52.7	31.6	0.6	10.134	1.25	4.7	—	33.3	62.9	37.00	375.7	S

〔 S:せん断破壊 BE:支圧破壊 CE:定着破壊 〕

斜めひびわれの形成が十分になると、載荷幅が小さい場合、写真-2(a)に示すような載荷板のめり込みを生じ、荷重の増加が見られなくなった（支圧破壊、BE）。また、載荷板のめり込みが生じて、せん断破壊を生じたものもある（S,BE）。

載荷幅が $W_b = 5.0$ や 7.5 cmの試験体では、斜めひびわれの方向が載荷点中央に向かっているが、さらに荷重を加えると、載荷板の前面にひびわれが発生する。そして、終局時には、斜めひびわれ全体がずれるようにして、急激に破壊に至った（せん断破壊、S）。せん断破壊の場合、斜めひびわれ面が急激にずれるため、写真-2(b)に示すように、主鉄筋に沿った水平なひびわれが発生する場合がある。このため、ひびわれ様相だけでは、せん断破壊と定着破壊（CE）とを区別するのが困難である。しかし、定着破壊の場合、ストラット幅が大きいことを予想できても、破壊耐力が載荷幅の小さい試験体とほぼ同様な、あるいはそれ以下であるので、ここでは、定着破壊とした。

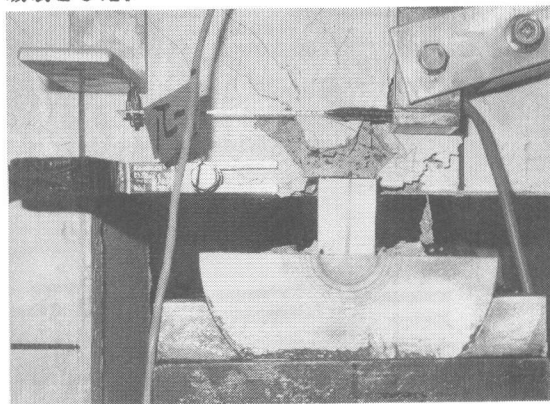


写真-2(a) 支圧破壊における
載荷板のめり込み ($W_b = 2.25$ cm)

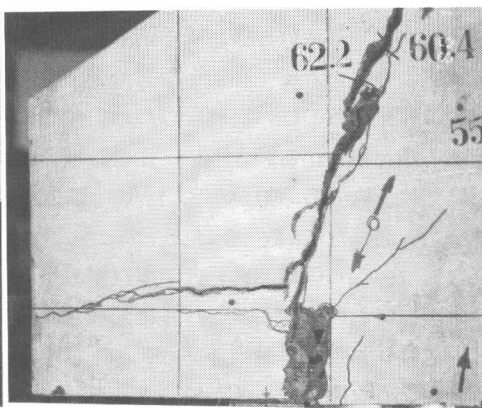


写真-2(b) せん断破壊した試験体の
載荷点付近のひびわれ様相

(2) 主鉄筋のひずみ

コーベルがひびわれの発生や伸展によって、内力のつり合いがどのように変化するかを検討するために、主鉄筋のひずみを測定した。ここでは、ひびわれ発生、特に斜めひびわれ発生によって、コーベルがトラス[1]と2ヒンジのタイドアーチ[2]に変化すると、作用せん断力 V と主鉄筋ひずみ ϵ_s の関係を求め、実験結果と比較してみた。これらの結果を図-3、4に示した。

主鉄筋のひずみ性状は、図に示すように、初期ひびわれの発生によって、ひずみの増加率が大きくなるが、斜めひびわれ発生によって、さらに大きく増加する。また、柱とコーベル境界部断面のひずみは、載荷板の幅が小さい場合や、 a/d が大きい場合に、載荷点のひずみと同じになる傾向を示した。さ

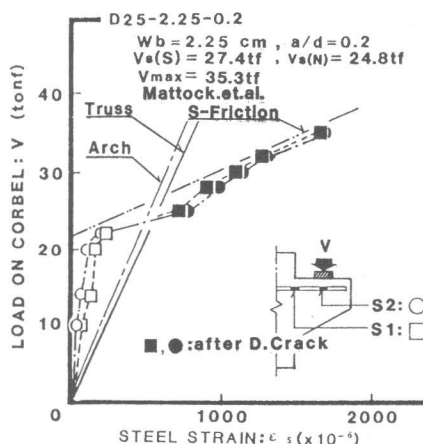


図-3 作用せん断力と主鉄筋ひずみ
($W_b = 2.25$ cm, $a/d=0.2$)

らに、全ての試験体における主鉄筋ひずみは、最大耐力付近で、ほとんど降伏ひずみに達している。

$a/d=0.2$ の場合の主鉄筋のひずみは、図-3 に示すように、Mattock らによるコーベルの耐力算定式を修正して求めた計算結果と良く一致する傾向を示した。これに対して、単純トラスとタイドアーチモデルの場合は、実験値の方が大きくなり、この領域になれば、せん断摩擦的な性状を示すことが認められる。

また、 $a/d=0.4$ や 0.6 の試験体における主鉄筋ひずみは、図-4 に示すように、ほぼトラスまたはアーチのつり合いを満足する結果が得られた。図に示すように、コーベルがトラスやアーチ的なつり合いに変化するのは、斜めひびわれの発生によってであることがわかる。さらに、この領域の a/d においては、載荷板の幅が小さい $W_b=2.25\text{cm}$ の試験体でも、同様な傾向であった。

(3) コーベル圧縮部における主ひずみ

本実験においては、コーベルに形成されるストラットの性状が主鉄筋量や a/d 、および載荷板の幅とどのような関係にあるかを調べるために、試験体表面にロゼットゲージを貼布して、測定を行った。

図-5、6は、これらロゼットゲージの測定結果のうち、柱部材との境界部断面におけるコーベルの圧縮部での作用せん断力と主圧縮ひずみの関係を示したものである。図は、 $A_s=D25$ のシリーズのうち、図-5は $a/d=0.2$ を、図-6は $a/d=0.6$ の結果を示したものである。

図に示すように、主圧縮ひずみは、作用荷重が小さい場合、載荷幅に係わらず、ほぼ同様な増加傾向が見られた。これに対して、載荷幅 W_b が 5cm 以上の試験体では、最大耐力付近になると、若干ではあるが、載荷幅が小さい場合、同一荷重レベルに対する主圧縮ひずみが大きくなる傾向を示した。また、最大荷重付近における主圧縮ひずみの大きさは、図に示すように、ほとんどが 2000μ 以上のひずみ量を示し、試験体によっては、 3000μ 付近のひずみ量となっている。

(4) 斜めひびわれ面での変位

破壊様相に対して、斜めひびわれ面での変位の挙

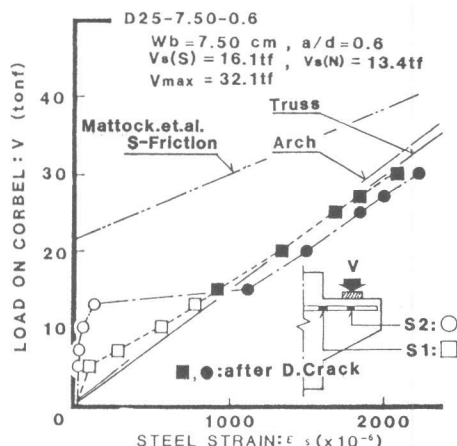


図-4 作用せん断力と主鉄筋ひずみ

($W_b=7.5\text{cm}$, $a/d=0.6$)

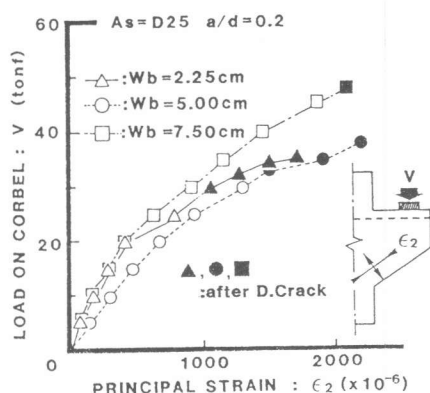


図-5 作用せん断力と主圧縮ひずみ

($A_s=D25$, $a/d=0.2$)

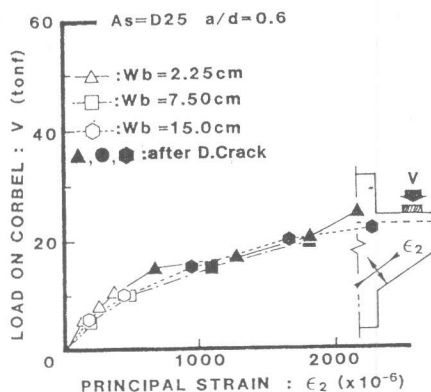


図-6 作用せん断力と主圧縮ひずみ

($A_s=D25$, $a/d=0.6$)

動が影響すると考え、斜めひびわれ発生が想定される面でのひびわれ幅、およびズレ変位の測定を行った。これら変位の測定位置は、荷重点中央とコーベルと柱部材の境界部断面を結んだ直線上の3箇所に設置した変位計によって行ったものである。

このうち、斜めひびわれ発生直後と、斜めひびわれが十分発達した後の荷重ステップを選び、荷重幅2.25cm, $a/d = 0.4$ の試験体についてまとめたものを図-7に示した。図中(a)は、主鉄筋量 $A_s = D25$ の試験体のもので、荷重板のめり込みも生じたが、終局時にはせん断破壊をした試験体のものである。また、同図(b)は、 $A_s = 2D25$ のもので、斜めひびわれ面でのせん断破壊が起こらず、荷重板のめり込みによって、耐力低下を生じた試験体のものである。

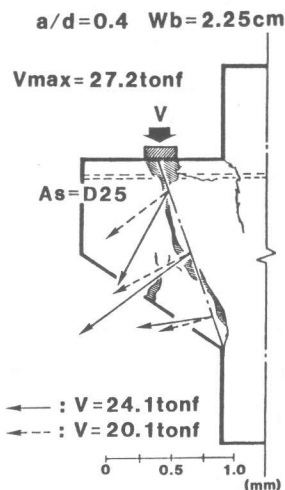
図に示すように、荷重幅が小さい場合、斜めひびわれ発生直前の変位の大きさは、割裂応力の影響のためか、ウェブ中央が大きくなっている。しかし、斜めひびわれ発生後からは、荷重板のめり込みが大きくなると、荷重点付近の変位が大きく、上方に行くに従って小さくなる傾向を示している。このことは、荷重板のめり込みによる支圧破壊の様相は、斜めひびわれ発生時の変位の挙動に大きく影響されることを示していると思われる。したがって、これら変位をより厳密に測定できれば、コーベルのせん断破壊に対する有益な情報となるように思われる。

(5) 最大せん断耐力

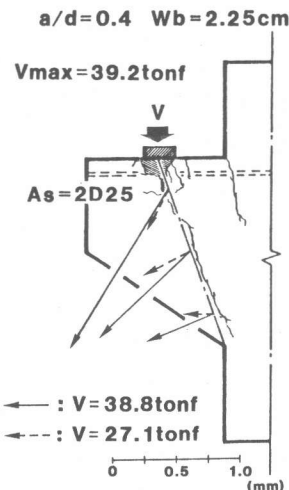
最大せん断耐力 V_{max} について、 a/d の関係としてまとめたものを図-8に示した。また、同図には、土木学会・コンクリート標準示方書[3]のディーブビームおよびコーベルの設計せん断耐力 V_{dd} の算定式による計算結果も記した。なお、計算に際しては、部材係数 γ_b および材料係数 γ_c を1.0とした。

図に示すように、コーベルの最大せん断耐力は、巨視的には、 a/d の増加に伴って減少する傾向を示している。また、鉄筋量が多い場合、 V_{max} は大きくなる。しかし、荷重幅が2.25cmの試験体や、定着破壊を生じたと思われる試験体の V_{max} は全体的に小さい。また、示方書による算定式では、二羽らによるコーベルの算定式[4]のように、荷重幅の影響を考慮していないので、次に、示方書による算定式に基づいて、荷重幅の影響について検討を行った。

ここでは、最大せん断耐力 V_{max} を土木学会式 V_{dd} で除して、荷重板の幅と有効高さの



(a) $A_s = D25, W_b = 2.25\text{cm}$



(b) $A_s = 2D25, W_b = 2.25\text{cm}$
図-7 斜めひびわれ面での変位

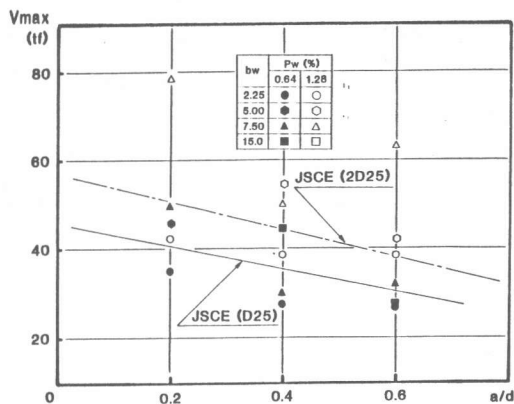


図-8 最大せん断耐力 V_{max} と a/d

比 (Wb/d) の関係で表してみた。このうち、図-9は、通常の a/d を用いて計算した結果を示したものである。また、図-10は、せん断スパンを柱前面から載荷板前面までの距離 a_v とした a_v/d を用いて、計算した結果を示したものである。

図-9,10に示すように、 $Wb/d < 0.15$ の範囲では、 Wb/d と、最大せん断耐力と土木学会による算定式の比 (V_{max}/V_{dd}) の間には、せん断破壊した試験体に限れば、ほぼ直線的な関係があるように思われる。既往の研究では、本実験で用いた Wb/d での実験データは少ないが、KrizとRaths[5]の2体の結果を併せて、せん断破壊した試験体の実験結果を整理してみた。この結果は、図に示すような関係となり、鉄筋量が多くなる設計の場合、載荷幅の影響が比較的明確なので、 Wb/d も大きくするのが良いように思われる。

以上のように、本実験の場合、ストラットの形成に及ぼす Wb/d の影響は、二羽の場合[4]より、若干大きい結果が得られた。これは、本実験で用いた Wb/d の範囲がこれまでの実験結果より小さい領域であったことと、主圧縮ひずみの測定結果に示されるように、最大耐力付近でコーベル圧縮部が受ける圧縮応力レベルが比較的大きく、応力の分布幅が小さくなったため[4]、と考えられる。

4. まとめ

以上、ここで得られた結果を要約すれば、次のようである。

- (1) 本実験では、斜めひびわれ面でのせん断破壊ばかりでなく、載荷板のめり込みによる支圧破壊や、定着破壊の様相が見られ、載荷幅の影響が顕著であった。
- (2) 主鉄筋のひずみ性状は、主として、 a/d の影響を受けるが、本実験の範囲では、載荷幅の違いはほとんど見られず、 $a/d \geq 0.4$ の試験体では、トラスまたはアーチ的な挙動を示した。
- (3) コーベルがせん断破壊を生じる場合、圧縮部では比較的大きな圧縮応力を受けるため、本実験のような Wb/d の範囲では、応力の分布幅が小さくなるように思われる。
- (4) 土木学会による算定式を用いる場合、 $Wb/d \geq 0.15$ とすれば、載荷幅の影響を考慮しなくても済むように思われる。

参考文献：[1] Franz, G. & Niedenhoff, H., C & CA, Pub. 61.114, 1964., [2] 北田・原, 土木学会年講, V, 1977., [3] 土木学会：コンクリート標準示方書, 昭和61年版, 1986., [4] 二羽, 東京大学学位論文, 1982., [5] Kriz, L.B. & Raths, C.H, PCI Jour., V.10, No.1, 1965.

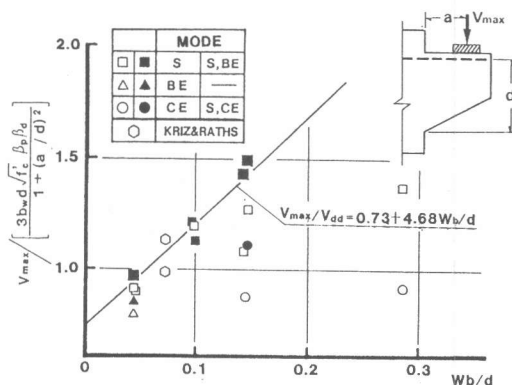


図-9 V_{max}/V_{dd} と Wb/d の関係
(a/d の場合)

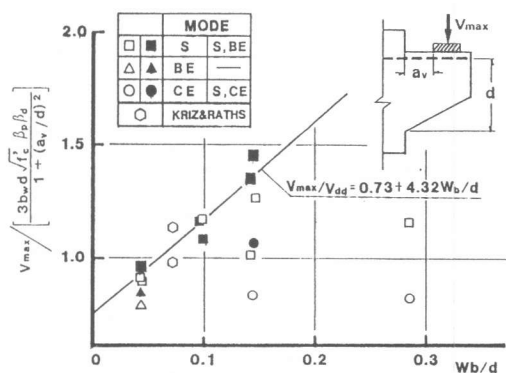


図-10 V_{max}/V_{dd} と Wb/d の関係
(a_v/d の場合)