

論文

[2031] 鉄筋コンクリートコーベルの性状に及ぼす水平荷重の影響

正会員○原 忠勝（日本大学土木工学科）

中上和仁（日本大学大学院）

1. はじめに

コーベルは、橋台、橋脚頭部などによく見られる構造形式であり、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、鉛直方向の荷重（すなわちせん断力）の影響が大きく、せん断破壊先行型の破壊や、トラスあるいはアーチ的な耐荷機構となる。またコーベルには、鉛直荷重ばかりでなく、地震力やコーベルが支える部材の温度応力、乾燥収縮、およびクリープ変形などによって水平力が生じることも知られている。

コーベルのような2軸の応力状態の影響を受ける部材では、鉛直荷重を受けるだけでも破壊様相や耐力性状に及ぼす要因が複雑になるため、水平力の影響までを検討している研究はごくわずかである。また設計規準では、鉛直荷重だけの場合でも、それぞれが異なった設計法を採用しているため、より詳細な構造細目を規定することで、そこで採用した設計概念を満足するようにしているのが現状で、水平力の影響を考慮しているものは少ない状況にある。

したがって本研究の目的は、鉛直荷重 V と水平力 H の組み合わせ荷重下におけるコーベルの性状について検討することである。ここでは、水平荷重と鉛直荷重の比 (H/V)、鉄筋量 (A_s)、およびせん断スパンと有効高さの比 (a/d) を実験条件として実験を行い、これらの結果を比較検討したものである。

2. 実験の概要

実験条件は、水平力の影響を検討するために① H/V を、またせん断耐力に及ぼす要因として、② 鉄筋量と③ a/d を取り上げた。このうち、 H/V は、道路橋示方書・耐震設計編[1] に基づいて計算した設計水平震度の範囲 (0.1~0.33) を目安として実験範囲を決定した。なお各条件の組み合わせは、以下の通りである。

① $H/V = 0.0, 0.2, 0.4$ (3条件)

② $A_s = 3.871 \text{ cm}^2$ (D22),
 7.742 cm^2 (2D22) (2条件)

③ $a/d = 0.25, 0.50, 0.75$ (3条件)

本実験では、これらの条件を組み合わせた18体の試験体を作製し、載荷試験を行った。試験体は、図-1に示すような形状寸法のもので、有効高さ $d = 43.9 \text{ cm}$ (高さ $h = 50 \text{ cm}$)、幅 $b_w = 15.0 \text{ cm}$ の台形コーベルを柱部材 (15cm×30cm×90cm) の左右に取り付けたものである。また載荷部には、水平力を加える治具を取り付けるために、幅 $W_b = 10.0 \text{ cm}$ の凹型チャンネルを主鉄筋に溶接した。なお載荷部の外側には、定着のための横方向筋と

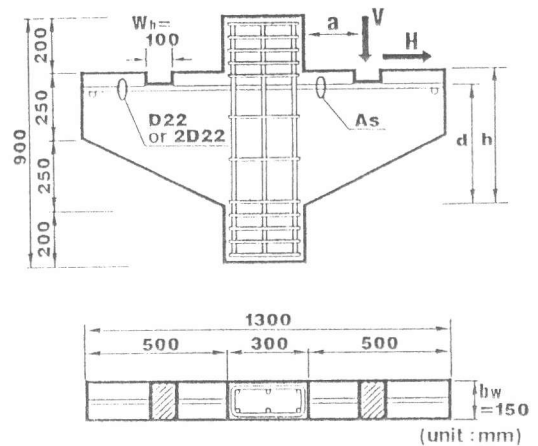


図-1 試験体の形状寸法

して、主鉄筋と同径の鉄筋を溶接し、さらに閉鎖型の帯鉄筋 (D10) を配置した。

コンクリートは $G_{max}=20\text{mm}$ のレデーミクストコンクリートで、鉄筋には横ふし型異形鉄筋 (SD30) を用いた。コンクリートの圧縮強度は載荷試験後の各試験体より採取したコア供試体より求め、平均値は、D22シリーズが $f'_{cc}=242.0\text{kgf/cm}^2$ 、2D22シリーズが 261.3kgf/cm^2 である。また鉄筋は、降伏強度が $f_y=3435.8\text{kgf/cm}^2$ である。

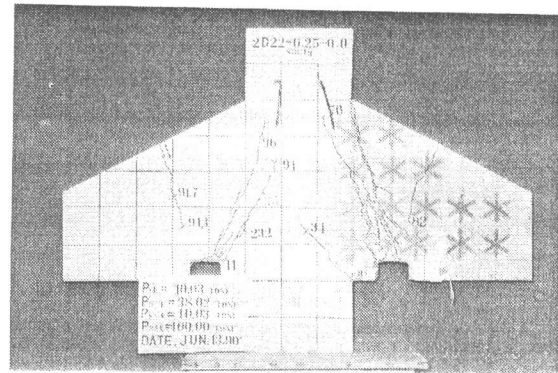
載荷は、実験上の安全を考慮して、試験体を逆に設置して行った。載荷重の測定は、コーベルに作用させた鉛直荷重を2台のロードセル (容量 100tf) で、水平荷重をセンターホールジャッキ (容量20tf) に取り付けたオイルセンサーで行い、載荷中は、常に H/V が設定値を保つように調節した。

実験中は、鉄筋とコンクリートのひずみ、たわみ、斜めひびわれ予想面での水平およびズレ変位を計測し、同時に、ひびわれ発生の状況を記録した。なお載荷は、破壊までの漸次増加荷重で、約 2 tf を常時の増加目標としたが、ひびわれの伸展状況を見て、適宜測定を行った。

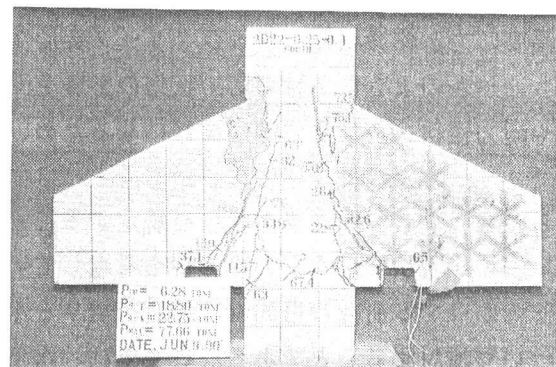
3. 実験結果および考察

全ての試験体は、写真-1 に示すように主として斜めひびわれ面での破壊であったが、 H/V と a/d の組合せによって、これらを2つの様相に大別できる。1つは、 $a/d=0.25$ の鉛直荷重だけを受ける試験体の場合で、巨視的に見て、斜めひびわれだけが発生したり、曲げひびわれの発生に先立って斜めひびわれが発生して、破壊に至るものである (写真-1 (a))。

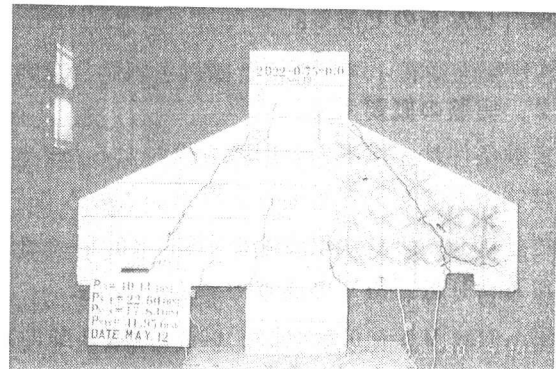
他の様相は、まず、試験体隅角部付近より鉛直方向にひびわれが発生 (曲げひびわれ) し、その伸展が止まりかけた頃、載荷点の内側または載荷点上方の有効高さの約 $1/3$ 付近より斜めひびわれが発生する。この斜めひび



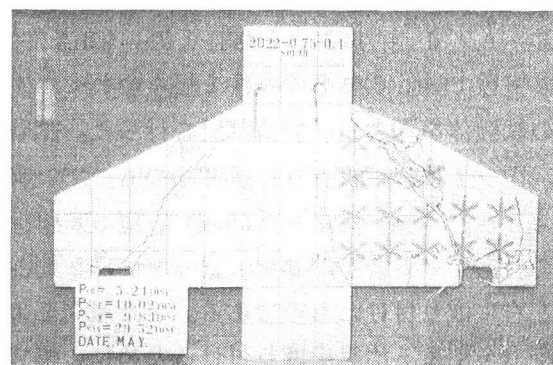
(a) 2D22-0.25-0.0



(b) 2D22-0.25-0.4



(c) 2D22-0.75-0.0



(d) 2D22-0.75-0.4

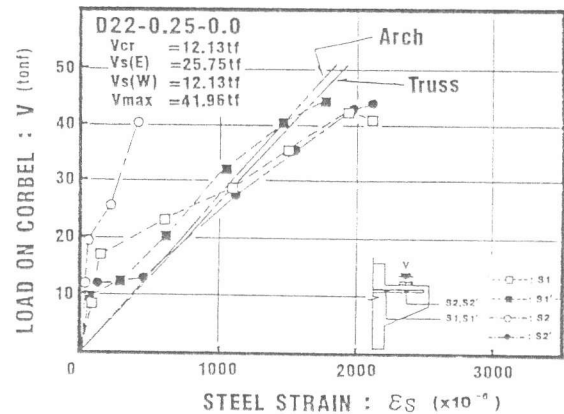
写真-1 破壊様相

われは、写真-1 (b), (c), (d) に示すように、載荷重の増加に伴い、コーベルの付け根方向に伸展した後、斜めひびわれ面がズレるようにして破壊する場合である。さらにこの破壊様相の場合、水平力が大きくなると、 $a/d=0.25$ の試験体では、圧壊する領域が広くなり、 $a/d \geq 0.50$ の試験体では、この領域が小さくなる傾向を示した。また斜めひびわれの形状は、 a/d が大きくなるのに従って曲線的となり、この傾向は H/V が大きくなるにつれて顕著であった。

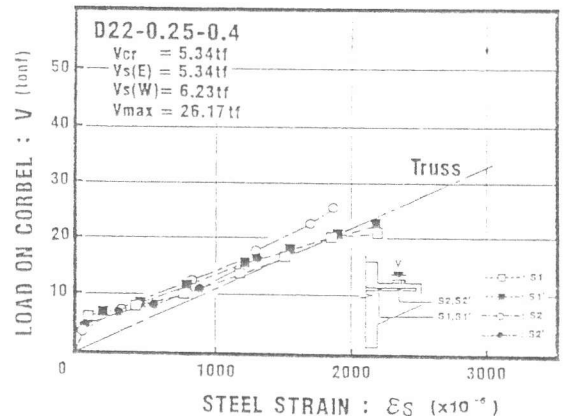
コーベルのつり合い機構が曲げひびわれや、斜めひびわれの発生によって変化する様子を検討するために、主鉄筋のひずみ性状を調べた。

これらの結果は、図-2 に示すように、斜めひびわれの発生によって、ひずみの増加率が大きくなり、その後直線的な変化を示した。この傾向は、水平力の影響が大きな試験体でも、ほぼ同様であった。また本実験の場合、 a/d が大きく、 H/V が大きい試験体で、主鉄筋が降伏ひずみに達する前に破壊したものがあつた。しかし斜めひびわれ発生後の主鉄筋のひずみは、水平力が作用してもほとんど同じで、トラス[2] やアーチのタイ材[3] としての性状を示すようである。特に本実験の場合、アーム長を約 $0.88d$ とした単純なトラスモデル[2] でも、主鉄筋のひずみ変化を比較的良く表現できることが示された。

試験体表面に貼付したロゼットゲージによるコーベルウェブでの主ひずみは、 $a/d \geq 0.50$ の場合、図-3 に示すように、低荷重レベルでは曲線的な主圧縮ひずみの流れとなり、斜めひびわれ発生から最大耐力に近づくにつれて直線的になり、ストラットの形成を窺わせるような性状を示した。一方 $a/d=0.25$ の場合、水平力の有無にかかわらず、低荷重レベルより最大耐力付近まで、ほぼ直線的であった。また図-4 は、コーベルと柱部材との境界部の圧縮部に貼付したロゼットゲージの主圧縮ひずみの変化を示したものである。図-4 に示したように、同一荷重に対する主圧縮ひずみは、 H/V が大きくなるほど、最大荷重に近づくにつれて大きくなる傾向を示した。これは、水平力の影響によって、強制的な曲げ応力が加えられたようになったためと考えられる。このことは、斜めひびわれ面での変位の性状でも同様な傾向が示された。



(a) $a/d = 0.25, H/V = 0.0$



(b) $a/d = 0.25, H/V = 0.4$

図-2 作用せん断力と主鉄筋ひずみ

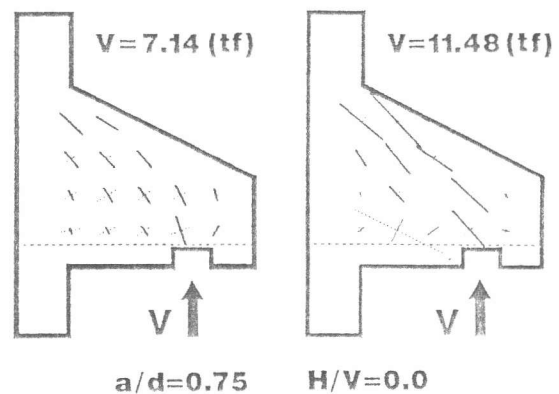
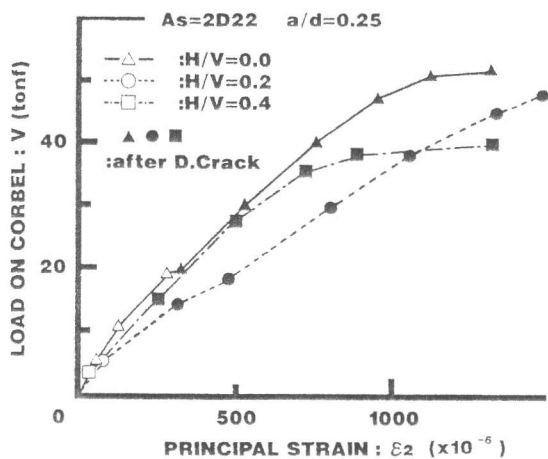
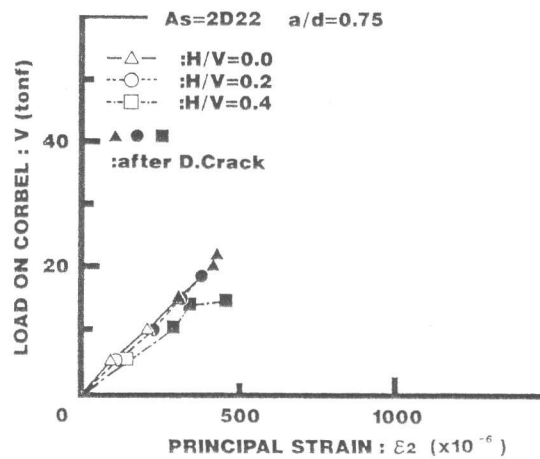


図-3 主ひずみの性状 ($A_s = D22$)



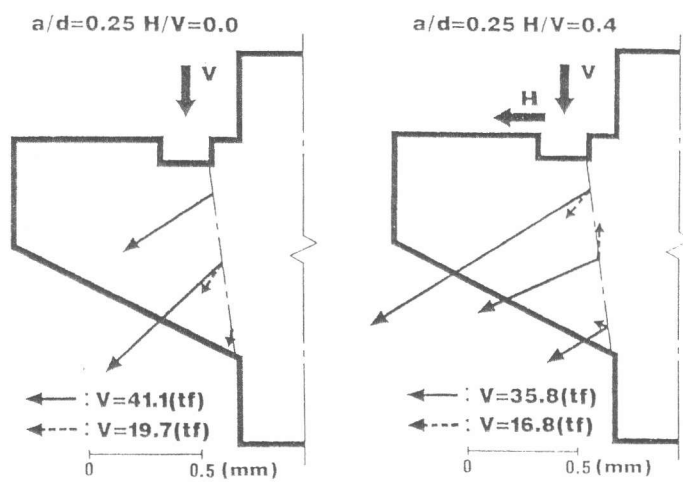
(a) $As = 2D22, a/d = 0.25$



(b) $As = 2D22, a/d = 0.75$

図-4 作用せん断力と主圧縮ひずみ

図-5は、予め予想した斜めひびわれ面の3箇所測定した水平およびズレ変位の測定結果である。ここでは、 H/V が大きくなるに従って、耐力の低下が比較的大きかった $a/d = 0.25$ シリーズの試験体の結果を示したものである。図に示すように、相対変位は、鉛直荷重だけの場合 ($H/V = 0.0$)、割裂的な挙動のためウェブ中央が他の位置に比べ大きくなっている。一方、水平力が大きくなると ($H/V = 0.4$)、主鉄筋付近の相対変位が大きくなり、曲げ成分も大きくなる傾向を示した。



(a) $As = 2D22$

(b) $As = 2D22$

図-5 斜めひびわれ面での変位

図-6は、最大せん断耐力を有効断面積と、ストラットの強度がコンクリートの圧縮強度の成分として評価できるものと仮定して、コア強度の平方根で除して、 H/V との関係を示したものである。水平力の影響は、図に示すように、 $a/d = 0.25$ の場合が比較的顕著で、 a/d が大きくなるにつれて少なくなる傾向を示した。また巨視的に見て最大せん断耐力は、主鉄筋量が多く、同時に、 a/d が小さくなるに従って大きくなる、という既往の結果[4]と同様の傾向を示している。しかし本実験の場合、 $a/d = 0.50$ の試験体では

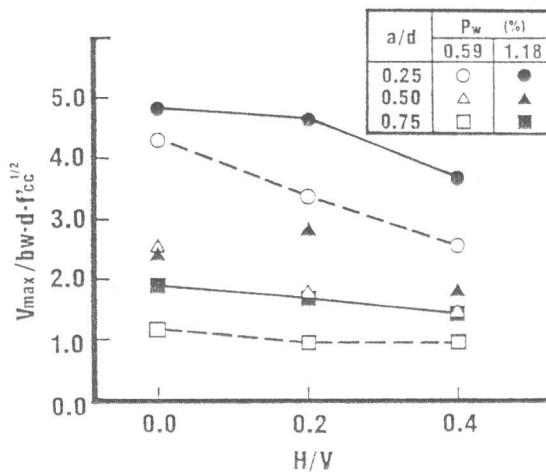


図-6 せん断耐力に及ぼす水平力の影響

鉄筋量による違いがほとんど見られなかった。これは図-6に示したように、 $a/d=0.5$ シリーズと、 $a/d=0.75$ の鉄筋量が多い試験体では、 $V_{max}/b_w d f'_{cc}{}^{1/2}$ が主鉄筋量に関係なく、ほぼ同程度の値であることから、最大せん断耐力がストラットの耐荷力の影響、即ちコンクリート強度に依存する割合が多くなったものと思われる。言い換えれば、これら最大せん断耐力の違いは、表-1に示すように、 a/d が小さい場合に純せん断的あるいはせん断摩擦的（ H/V が大きくなると圧縮せん断的）な破壊をし、 a/d が順次大きくなるのに従って、ストラットの破壊、さらに曲げせん断的（あるいはせん断圧縮的）な破壊様相に変化することを示した結果と考えられる。

また図-7と8は、KrizとRathsによる経験式[4]と、せん断摩擦の概念に基づいたMattockら[5]の算定式を選び、実験結果と比較したものである。KrizとRathsの場合、図-7に示すように、 a/d が小さいと実験値を過小に評価し、そして a/d が大きくなるに従って過大に評価する傾向を示している。しかしKrizとRathsのせん断耐力算定式は、約200体近くの実験データに基づいた実験式であるため、実験値/計算値の全平均が1.07と平均的には比較的満足する結果を与えるようであるが、変動係数は27.1%と大きい。また図-8に示すように、Mattockら[5]の算定式は、ACI規準[6]に規定されているように、 $a/d \leq 0.50$ の領域で適用するのが良いようである。ちなみにMattockら[5]の場合、平均は0.85（変動係数43.0%）であった。

図-9は、土木学会示方書[7]のディープビームと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とを比較したものである。なお計算では、部材係数 γ_b などの係数を1.0としている。土木学会式の場合、水平力の影響を考慮していないので直接的な比較はできないが、 a/d の小さい領域では水平力の影響があっても、土木学会式をそのまま適用しても良いように思われる。しかし、 a/d が大きい領域では、水平力の影響がある場合、耐力を過大に評価する傾向にあることを認識する必要がある。本実験の範囲では、水平力の影響を受けるコーベルに土木学会式をそのまま適用する場合、わが国における設計水平震度の最大付近で、設計せん断耐力を約50%程度低減すれば良いように思われる。

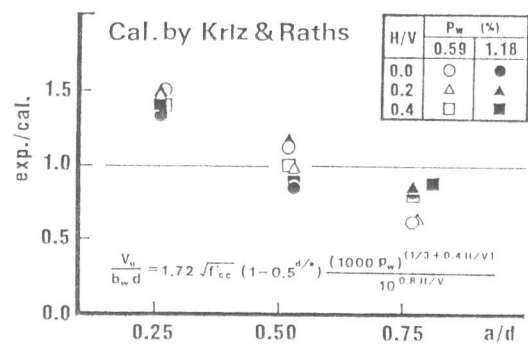


図-7 KrizとRathsによる算定式と本実験結果との比較

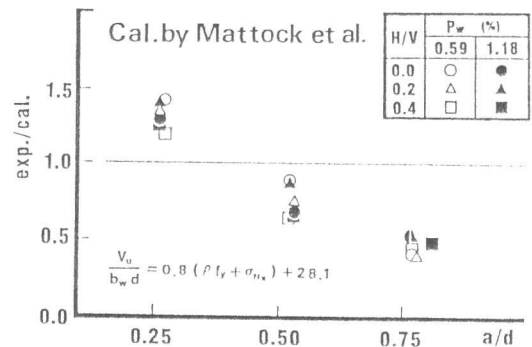


図-8 Mattockらによる算定式と本実験結果との比較

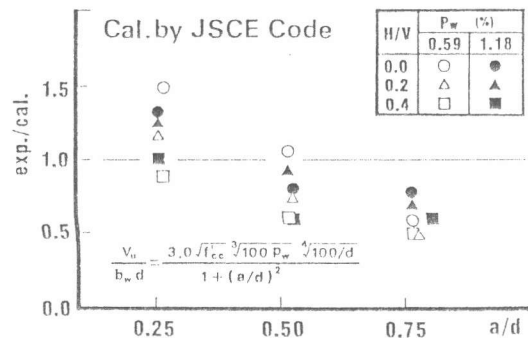


図-9 土木学会による算定式と本実験結果との比較

4. まとめ

以上、ここで得られた結果より、水平荷重下のコーベルの性状は、概ねトラス的な耐荷機構が成立することが認められた。しかし、これらタイ材としての主鉄筋は、全ての試験体で降伏に至ったわけではなく、主鉄筋量が多く ($p_w \approx 1.2\%$)、 a/d が大きい試験体 ($a/d \geq 0.5$) では、主鉄筋が降伏に至る以前に、コーベル下方の柱部材との境界部付近でストラットの断破壊と思われる比較的急激な破壊を生じ、これらの試験体は耐力を失った。また最大せん断耐力は、鉄筋量や a/d が同じ場合、水平力が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示した。

これらコーベルの最大せん断耐力は、基本的にはトラス的な耐荷機構に依存するものと考えられる。しかし、水平荷重が加えられたために、その力はタイ材としての主鉄筋に流れ、タイ材の降伏によって最大耐力が支配されるとは限らないようである。その結果がストラット上の破壊であるが、この場合でも単一のストラットの破壊ではなく、ストラット圧縮部の応力状態によって、曲げせん断破壊、あるいは圧縮せん断破壊などの複数の破壊様相を示すようである。

また水平力の影響を考慮していない土木学会式の場合は、 H/V が大きくなった場合、部材耐力を過大に評価する傾向がある。したがって設計水平震度の最大値付近の水平力が作用するような場合、現状では、設計せん断耐力を約50%程度低く評価しておくほうが良いように思われる。

表-1 斜めひびわれ発生荷重 V_s 、最大せん断耐力 V_{max} 、破壊モードの実験結果一覧

H/V	D 2 2 シリーズ				2 D 2 2 シリーズ			
	a/d	V_s (tf)	V_{max} (tf)	破壊モード	a/d	V_s (tf)	V_{max} (tf)	破壊モード
0.0	0.27	25.8	42.0	せん断	0.26	19.7	51.8	せん断
0.2	0.26	12.5	34.2	圧縮せん断	0.26	14.3	48.0	圧縮せん断
0.4	0.27	5.3	26.2	圧縮せん断	0.26	11.4	37.7	圧縮せん断
0.0	0.52	16.9	26.0	ストラット	0.53	12.4	27.1	ストラット
0.2	0.53	11.4	19.0	曲げせん断	0.52	7.0	30.4	圧縮せん断
0.4	0.52	9.2	14.2	曲げせん断	0.53	4.1	19.7	ストラット
0.0	0.77	9.6	12.0	曲げせん断	0.77	11.3	21.1	曲げせん断
0.2	0.78	7.9	10.1	曲げせん断	0.77	7.2	18.2	ストラット
0.4	0.77	6.1	9.7	曲げせん断	0.81	5.2	14.5	ストラット

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、1990
- 2) Franz, G. and Niedenhoff, H. : The Reinforcement of Brackets and Short Beam, C & CA, Pub. 61.114, 17p, 1964
- 3) 北田・原：鉄筋コンクリート梁のつり合い機構の変化に関する考察、土木学会第32回年次講演会、第V部門、pp.142-143、1977.10
- 4) Kriz, L. B. and Raths, C. H. : Connections in Precast Concrete Structures - Strength of Corbel, PCI Journal, Vol.10, No.1, pp.16-61, Feb. 1965
- 5) Mattock, A. H., Chen, K. C. and Soongswang, K. : The Behavior of Reinforced Concrete Corbel, PCI Journal, Vol.21, No.2, pp.52-77, March/April 1976
- 6) ACI : Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-83), 1983
- 7) 土木学会：昭和61年制定 コンクリート標準示方書、設計編、1986