

V—31 相対する 2 辺が自由な RC スラブのせん断耐力に関する研究

北海学園大学 正員 高橋 義裕

北海道大学 正員 角田 与史雄

北海道大学 正員 能 町 純 雄

1. まえがき

鉄筋コンクリートスラブやフーチングのせん断に対する設計においては、一般にはりのせん断破壊と同様な破壊形態を想定した設計（はりせん断）と、局所的な破壊形態を想定した設計（押抜きせん断）とを併用する方法が用いられている。これは、極限設計における言葉を用いれば、いわゆる上界設計の考えに基づくものである。しかし実際には、はりせん断と押抜きせん断の中間とみなしうることが存在すると考えられる。

本研究は、スラブの自由縁附近に集中荷重が作用するときの耐力は、通常押抜きせん断耐力から予測される値よりもかなり低いことを実験的に明らかにするとともに、その場合の、はりせん断と押抜きせん断との中間的強度を用いる設計法を提供するものである。

2. 現行の設計法

鉄筋コンクリートスラブのせん断に対する設計法は各国で異なるがそれぞれの方法が各国の示方書に与えられている。その際、わが国の示方書にはないが、スラブの自由縁附近に集中荷重が作用するときの押抜きせん断耐力の算定法も合わせて与えているものもある。例えば米国の A C I 318¹⁾ では、通常は図-1 の (a) に示すように荷重の周縁からスラブ有効厚の $1/2$ だけ離れた位置を臨界面にとり、その長さに有効厚を乗じた値を抵抗面積として耐力を計算する方法を採用しているが、スラブ自由縁の近くに荷重が作用する場合には (b) に示すように自由縁に直結する線を引き、この線の方が (a) よりも短かければこれを臨界面の長さにとることになっている。一方、図-2 は欧州コンクリート委員会 (C E B) と国際プレストレストコンクリート協会 (F I P) の国際指針²⁾ における臨界面のとり方を示したもので、(a) および (b) は、隅角部をまるくとり点を除けば A C I と基本的に同じものである。ただし荷重とスラブ自由縁との間の最短距離が有効厚の 5 倍以内のときは、(c) のような線を臨界面にとることになっている。

3. 実験方法

本研究で用いた供試体は図-3 に示すように相対する 2 辺支持、他の 2 辺が自由の長方形スラブである。実験は、スラブの厚さとスパンの組合せにより 3 つのシリーズに分けられる。

シリーズ I のスラブは 厚さ $H=10\text{cm}$ 、スパン長 $L=50\text{cm}$ である。スラブの幅 B は変数で、30、50、70 および 100cm とした。鉄筋は SD35 の D10 を使い、スパン方向および横方向ともに 5cm 間隔に配置した。コンクリートは単位セメント量 $320\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 50% で、早強ポルトランドセメントおよび天然骨材を使用した。実験日の材令は 7 日で、そのときのコンクリート強度は平均 $308\text{N}/\text{mm}^2$ であった。荷重は $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の鋼板を通してかけた。載荷位置はスパンの中心線上とし、スラブの自由縁からの距離 e は最小 10cm から、スラブ中心点載荷までの間で変化させた。結局、変数は B と e との組合せにより 13 種類を選んだ。

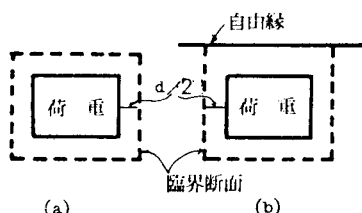


図-1 A C I による臨界面

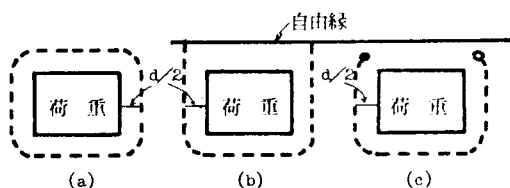


図-2 C E B・F I P による臨界面

なを、スラブの支承は鋼丸棒を幅 10 cm、厚さ 1 cm の鋼板ではさんだもので、スラブ隅角部の浮き上がりは自由とした。

シリーズⅡのスラブはスパン $L = 100\text{ cm}$ 、幅 $B = 50, 70, 100$ および 140 cm とした以外はシリーズⅠのスラブと同様である。ただしコンクリートの強度は平均 314 ㎫であった。変数は B と e との組合せにより 11 種類を選んで実験した。

シリーズⅢのスラブは厚さ $H = 20\text{ cm}$ 、スパン $L = 100\text{ cm}$ で、幅 $B = 30, 60, 90, 120$ および 140 cm とした。鉄筋は SD 35 の D13 を用い、スパン方向および横方向の間隔はともに 6 cm である。また、コンクリートは単位セメント量 327 kg/m^3 、水セメント比 49 % で、実験材令 7 日における平均強度は 325 ㎫であった。以上のほかは前述のシリーズと同様であり、変数は B と e との組合せにより 18 種類を選んだ。

4. 実験結果および考察

図-4 は、シリーズⅠの実験で得られた破壊荷重 P_u を、自由縁の影響がないと考えた場合の抵抗値 P_0 で除した値を示したものである。なお P_0 の計算には著者らが以前に提案している式³⁾を用いている。図-5 および図-6 は上記と同様な関係をシリーズⅡおよびⅢに対して描いたものである。これらの図によれば、自由縁から荷重までの距離がある値以下の範囲では、明らかに P_u/P_0 が 1 以下となり、自由縁の影響低下が起ることが明確に示されている。その場合、耐力低下が起る限界の e の値は、図-4 では約 3.5 cm、図-5 および図-6 では約 6.5 cm となっている。

ところで、はりのせん断強度を論ずる場合の重要な因子にせん断スパン比がある。いま、これに相当するものとして、本実験において荷重中心から支承までの距離を a とおけば、シリーズⅠのスラブでは $a = 25\text{ cm}$ 、シリーズⅡおよびⅢのスラブでは $a = 50\text{ cm}$ であり、上記の e の限界値を a に対する比で表わせば、シリーズⅠ～Ⅲの区別なく、 e/a が約 1/3 以下の範囲で自由縁の影響が現れていることになる。

次に、自由縁の影響による耐力の低下率について見れば、シリーズⅠ～Ⅲのいずれについても e が減少するにつれて P_u/P_0 の値が減少しているが、荷重が自由縁のごく近傍に載荷したときの耐力低下がとくに著しくなっており、 P_u/P_0 の最少値は約 0.5 またはそれ以下になりうることを示されている。

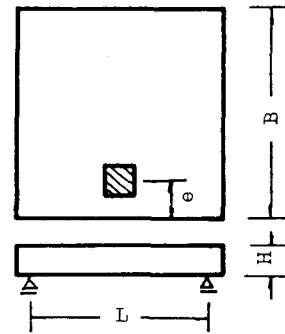


図-3 供試体

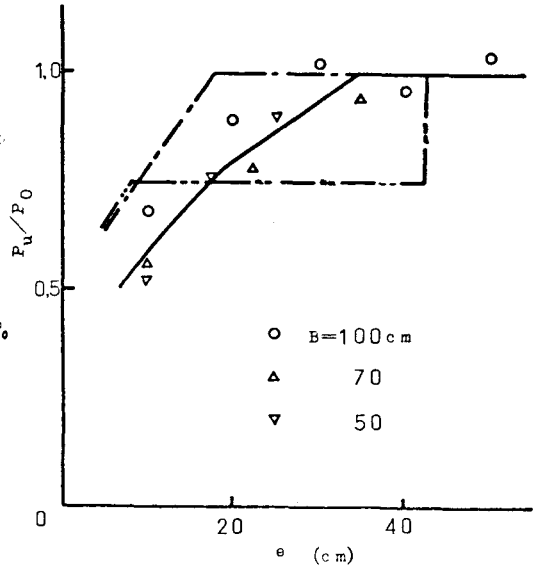


図-4 シリーズⅠの実験結果

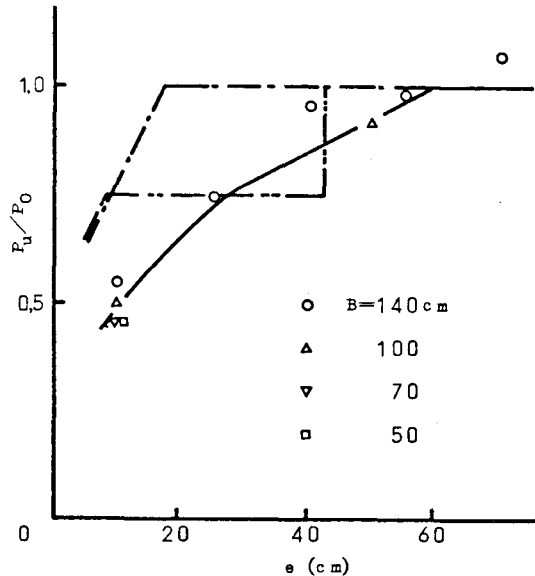


図-5 シリーズⅡの実験結果

以上の結果を前述のACIおよびCEB・FIPの臨界面の長さの減少率と比較すれば、図-5～6の一点鎖線がCEB・FIPによる値を示しており、これによれば、ACIではシリーズIの場合に e が17.5 cm以下、IIおよびIIIの場合に e が27.5 cm以下の範囲で耐力低下が起るとされるのに対し、実際には前述のように約35 cm以下および約65 cm以下であって、自由縁の影響範囲を過小に見積っていることがわかる。また、耐力の低下率についても同様にかたり過小に評価していることもわかる。一方、CEB・FIPによれば、シリーズIでは e が42.5 cm以下、シリーズIIおよびIIIでは e が92.5 cm以下の場合に図-2(c)の臨界面が適用されるため、本実験を行ったほとんどの範囲で P_u/P_0 が0.75の一定値となってしまう。しかし実測値はそれとは定性的にも定量的にも全く異なった性質を示している。このように、ACIおよびCEB・FIPの方法はともに満足すべき値を与えないことがわかる。このことは、自由縁の影響を臨界面の長さの減少のみによって考慮するのは全く不十分であることを意味している。

いま臨界面として図-2の(a)または(b)のうち短い方をとることにし、実験で得られた破壊荷重を臨界面の長さおよびスラブ有効厚で除することによりせん断強度 τ として表わし、これを e/a との関係として示したのが図-7～図-9である。これによれば各シリーズで値は異なるが、それぞれがほぼ直線的な関係を示している。このことは、スラブの押抜きせん断耐力に対する自由縁の影響は、臨界面の長さの減少と、せん断強度 τ の減少の両者によって起ることを意味する。すなわち、荷重が自由縁から十分に離れていれば通常の押抜きせん断耐力が得られるのに対し、荷重が自由縁に近づけば、 τ の減少が起って耐力の低減が起る。さらに荷重が自由縁のごく近傍に作用すれば、 τ の減少と臨界面の減少とが重なって耐力の著しい低下が起ることになる。

ところで上記のような τ の減少は、荷重がスラブ内のどのような経路を通して支承へ伝達されるか、といういわゆる作用せん断力の問題としてとらえることができよう。その場合前述の e/a はそのような性質を表わすのに便利なパラメータと言えよう。また一方、このような性質を作用せん断力に対してではなく、見かけ上のせん断強度の問題としてとらえることもできよ

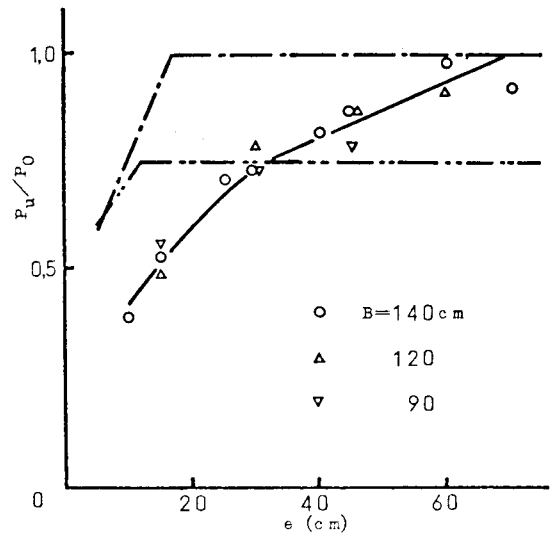


図-6 シリーズIIIの実験結果

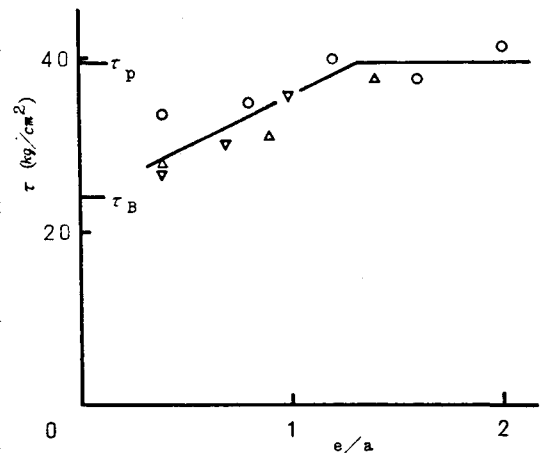


図-7 シリーズIのせん断応力

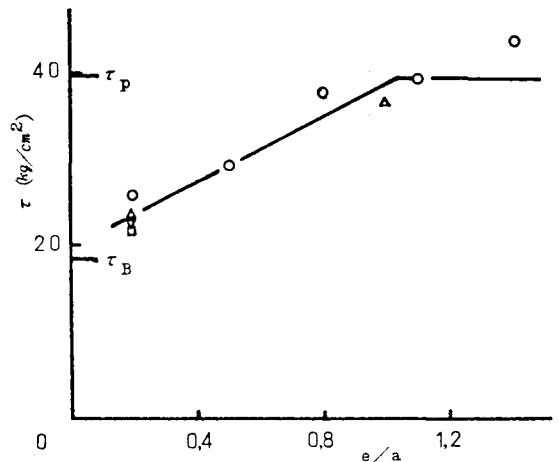


図-8 シリーズIIのせん断応力

う。ここでは以下に後者の方法を用いることにする。

いま、各シリーズにおける幅の小さい供試体の破壊荷重の測定値あるいは岡村・楢貝のはりせん断強度式⁴⁾その他をもとに、はりとしてのせん断強度 τ_B を推定すれば、シリーズⅠに対して $\tau_B = 24.9\%$ 、シリーズⅡに対して $\tau_B = 18.4\%$ 、シリーズⅢに対して $\tau_B = 13.0\%$ である。一方、著者の式による押抜きせん断耐力の計算を前述の臨界面におけるせん断強度 τ_p によって置きかえればシリーズⅠおよびⅡに対して $\tau_p = 39.4\%$ 、シリーズⅢに対して $\tau_p = 31.2\%$ である。これらの数値を図-7～9の τ と見比べれば、各シリーズとも τ の測定値は τ_B と τ_p の中間に属しており、スラブの自由縁の影響がないときの τ の上限値が押抜きせん断強度 τ_p に等しくなるのは当然として、自由縁の影響が最も強いときの τ の下限値を、実用上、はりせん断強度 τ_B に等しく仮定できるのではないかと考えられる。

すなわち $\tau = \beta \tau_p + (1 - \beta) \tau_B \text{ --- (1)}$

ここに β は、実際のせん断強度がはりせん断 ($\beta = 0$) と押抜きせん断 ($\beta = 1$) の強度のいずれに近いかを表す係数である。すでに図-7～9より類推されるように、 β は e/a に大きな関係があるが、その場合の e は、荷重から近い方の自由縁までの距離 (以下では e_1 とおく) としていたのに対し、実際にはさらに e_1 より影響がかなり小さいが、荷重から遠い方の自由縁までの距離 e_2 も β に関係する。前述の3つのシリーズの実験結果より総合的に分析した結果、実用的な β の推定式として次式を得ることができた。

$$\beta = 0.6 (\alpha_1 + \alpha_2 / 4) \text{ --- (2)} \quad \text{ここに} \quad \alpha_1 = e_1 / a \leq 4/3, \quad \alpha_2 = e_2 / a \leq 4/3 \text{ --- (3)}$$

上式を用いてシリーズⅠ～Ⅲの各スラブのうち、はり型の曲げまたはせん断破壊したものを除く35枚について破壊荷重の計算値を求め、測定値/計算値を求めた結果は、0.86～1.15、平均0.99で変動係数は6.6%であり、計算値は測定値に非常に良い一致を示した。図-10は、測定値/計算値の度数分布を示したものである。

5. まとめ

本研究は、スラブの自由縁附近に集中荷重が作用する場合のせん断耐力の問題をとり上げ、その設計においてはACIやCEB・FIPによるように、臨界面の減少のみによって自由縁の影響を考慮するのは十分でないことを示すとともに、新たに、臨界面の単位長さ当りのせん断強度として、はりせん断強度と押抜きせん断強度との中間値を用いて設計する方法が有用であることを示したものである。

おわりに、本研究は文部省科学研究費によって行ったものであることを附記するとともに、実験を担当していただいた北海道大学工学部の木村 勉技官に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) ACI 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1977
- 2) CEB・FIP Model Code for Concrete Structures, 1978
- 3) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第229号, 1974, 9
- 4) Okamura, H. and T. Higai: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, 土木学会論文報告集, 第300号, 1980, 8

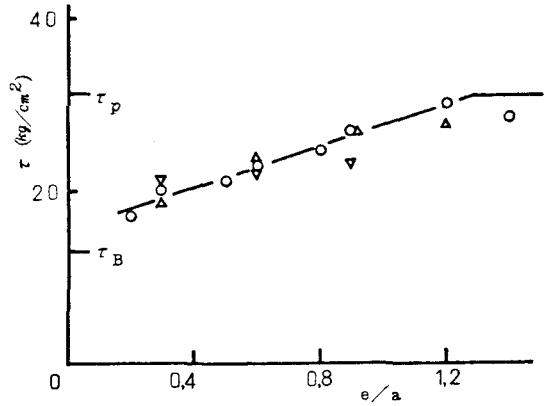


図-9 シリーズⅢのせん断応力

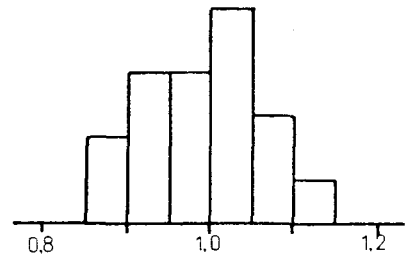


図-10 測定値と計算値の比の度数分布