

V-25

自由縁付近に載荷された一方向RCスラブのせん断耐力について

北海道大学工学部 正員 古内 仁  
 北海学園大学工学部 正員 高橋 義裕  
 北海道大学工学部 正員 上田 多門  
 北海道大学工学部 正員 角田與史雄

1. はじめに

鉄筋コンクリートスラブに柱から伝達される荷重あるいは直接部分的に荷重が作用する場合、荷重直下のコンクリートがコーン状に押抜ける”押抜きせん断破壊”と呼ばれる局所的な破壊が生じることが多い。その際、スラブに作用する荷重の領域(面積)の大きさや形状あるいは位置によっては、押抜きせん断耐力が大きく異なる傾向にある。特に荷重の作用位置が自由縁に近い場合には、押抜ける破壊面が自由縁で断ち切られることによって耐力が減少することが知られている<sup>1)</sup>。これらの破壊に対する安全性の検討については、各国の示方書にも自由縁付近載荷の影響を含めてその照査方法が与えられている。

本研究は、過去に行われた一方向スラブの押抜きせん断実験の結果を基に、各国の示方書による照査方法を紹介しながら安全性に対する照査を行い、設計に対する合理的な方法を検討するものである。

2. 実験結果の概要

本研究で検討を行った供試体<sup>2)3)4)5)6)</sup>は、図1に示すような相対する二辺が支持、他の二辺が自由の長方形スラブである。なお、載荷中においては支持端部でのスラブの浮き上がりは自由としている。供試体総数は82体で、変数は、スラブ幅(15, 30, 45, 50, 60, 70, 90, 100, 140mm)、有効厚さ(二方向の平均で75, 125, 175mm)、鉄筋比(二方向の平均で1.08~1.82%)、載荷面積の大きさ(長方形板100×100mm, 70×140mm, 75×75mm, 150×150mm)、載荷位置(自由縁から荷重中心まで60~700mm)としている。なお、コンクリート圧縮強度は21.8~37.3 MPa、鉄筋の降伏点は399~418 MPaである。

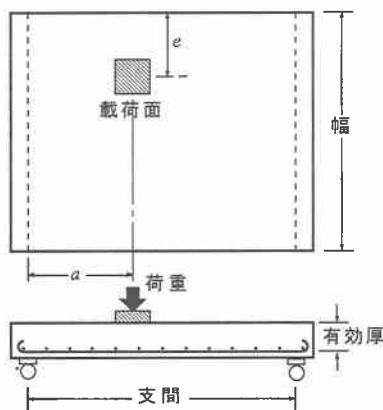


図1 供試体外観

実験で得られた破壊形式の概要を図2に示す。これらのスラブは、全てせん断破壊により終局をむかえたが、次の3つのケースに大別することができる。(a)完全押抜きせん断破壊は、載荷面に対して相対的にスラブの幅および支間が十分に大きく、載荷位置が比較的中間領域にある場合に多くみられる形式である。この場合、押抜けるコアコンクリートは完全なコーン状の形状をしており、スラブは脆性的に破壊する。(b)不完全押抜きせん断破壊は、載荷位置が自由縁に近づくにつれて多くみられる。この場合、押抜けるコアコンクリートは自由縁に達しており破壊面が完全押抜きせん断破壊に比べて減少することとなる。また、この破壊形式においては上縁で降伏線が現れる場合もあるが、破壊は脆性的なものである。(c)はり型せん断破壊は、載荷幅に対して比較的小さいスラブ幅の小さなものに多くみられる。この場合の破壊は、はりのせん断破壊と同様にせん断スパン比の大きさによっては斜め引張破壊とせん断圧縮破壊に区別されることが考えられる。

Shear Strength of One-way RC Slabs loaded near Free Edge

by Hitoshi FURUUCHI, Yoshihiro TAKAHASHI, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

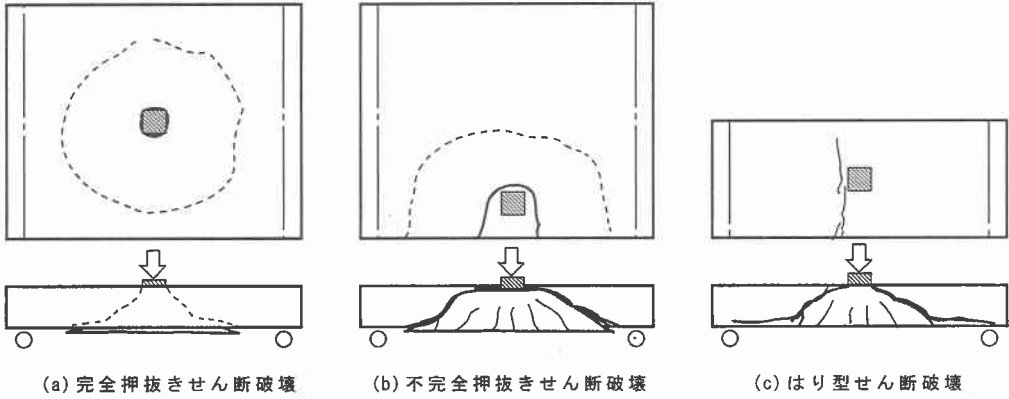


図3 破壊形式

### 3. 各国の示方書による押抜きせん断に対する照査

自由縁付近載荷の影響を取り入れている押抜きせん断に対する照査について代表的なものを以下に示す。我が国における土木学会のコンクリート標準示方書「設計編」(平成3年版)<sup>7)</sup>では、照査式として次式を与えている。

$$V_{pcd} = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pcd} u_p d / \gamma_b \quad (1)$$

ここに

$V_{pcd}$  : 設計押抜きせん断耐力

$$f_{pcd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \quad (\text{MPa})$$

$$\beta_d = (100/d)^{1/4} \quad (d : \text{cm}) \quad \text{ただし, } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする.}$$

$$\beta_p = (100/p)^{1/3} \quad \text{ただし, } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする.}$$

$$\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u/d)$$

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度で、単位は MPa である。

$u$  : 載荷面の周長

$u_p$  : 設計断面の周長で、載荷面から  $d/2$  離れた位置で算定するものとする。

$d$  および  $p$  : 有効高さおよび鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする。

$\gamma_b$  : 一般に 1.3 としてよい。

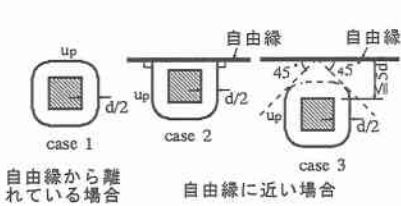


図2 土木学会の設計断面

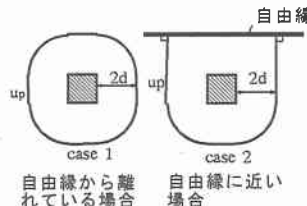


図3 CEB/FIPの設計断面

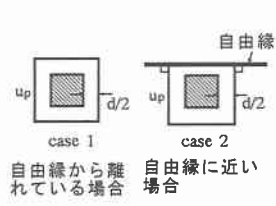


図4 ACI318の設計断面

設計断面  $u_p$  の取り方は、1978年のCEB/FIP Model Code<sup>8)</sup>に準拠して定められており、載荷面が自由縁に近い場合には、図3に示す方法のうち最も小さいものを採用することとなっている。

1990年のCEB/FIP Model Code<sup>9)</sup>では、照査式として次式を用いている。

$$V_{Rd} = \tau_{Rd} u_1 d \quad (2)$$

ここに

$V_{Rd}$  : 設計押抜きせん断耐力

$$\tau_{Rd} = 0.12 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3}$$

$$\xi = 1 + \sqrt{0.2/d}$$

$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \quad (\rho_x \text{ および } \rho_y : \text{二方向の鉄筋比})$$

$u_1$  : 設計断面の周長で、載荷面から2d離れた位置で算定するものとする。

$f_{ck}$  : コンクリートの設計圧縮強度で、単位はMPaである。

1978年のModel Codeから主に改訂された部分は設計断面  $u_1$  の取り方で、載荷面の端から2d離れた位置となっている(図4参照)。また、これに伴って押抜きせん断耐力式も変更されている。なお、自由縁に近い場合は、従来の図3に示すcase3による方法は削除されている。

ACI Building Code 318/89<sup>10)</sup>では、次の3つの式による算定値のうち最も小さいものによって照査することとなっている。

$$V_c = \left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right) \sqrt{f_c} b_o d \phi / 12 \quad (3)$$

$$V_c = \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 2\right) \sqrt{f_c} b_o d \phi / 12 \quad (4)$$

$$V_c = 4 \sqrt{f_c} b_o d \phi / 12 \quad (5)$$

ここに

$V_c$  : 設計押抜きせん断耐力

$\beta_c$  : 載荷面長辺 / 載荷面短辺

$\alpha_s$  : 柱(または荷重)がスラブの中間領域にある場合は40、縁にある場合は30、角にある場合は20

$b_o$  : 設計断面の周長で、載荷面からd/2離れた位置で算定するものとする。

$f_c$  : コンクリートの設計圧縮強度で、単位はMPaである。

$\phi$  : 強度低減係数

設計断面  $b_o$  の取り方は、図5に示すようにCEB/FIP Model Codeや土木学会と異なり、直線だけで構成されている。

## 4. 考察

### 4.1 各国の示方書による評価

前項で示した各国の示方書による設計耐力と実験結果の一例を図6に示す。なお、設計耐力は実験値との適合性を調べるため、 $\gamma_b$ 、 $\phi$ 等の係数は1.0として算定した。横軸には自由縁載荷の影響をあらわすパラメータとして載荷距離e/せん断スパンaをとった。この結果によれば、土木学会が与えている設計耐力では、e/aが小さいときには危険側となることが示された。また、前述の設計断面の取り方として3種類のも

のをを用いるため、荷重位置が自由縁に近づく過程で不連続な評価となっている。しかしながら、実験結果では耐力が自由縁に近づくにつれて連続的な減少となっているようである。

一方、CEB/FIP と ACI318 では、荷重面が自由縁に近い場合には、妥当な評価となっているように見える。しかし、これはいずれの示方書も自由縁から十分に離れた場合にはかなり余裕のある評価であり、自由縁の影響による耐力低下を適切に評価しているとは言い難い。

#### 4.2 はりとしてのせん断耐力による評価

実験結果から、ある程度幅の小さなスラブでは、はりとしてのせん断破壊が観察されている。以下では、本研究で対象としたスラブに対して、はりとしての検討を行う。ここで用いられるはりとしてのせん断耐力は、次式に示す鉄筋コンクリートはりのせん断強度式<sup>11)</sup>および鉄筋コンクリートディープビームのせん断耐力算定式<sup>12)</sup>によって算出することとした。

$$(はり) \quad V_{cd} = 0.20 (p_w \cdot f_c')^{1/3} (100/d)^{1/4} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) b_w \cdot d \quad (5)$$

$$(ディープビーム) \quad V_{wd} = \frac{0.24 f_c'^{2/3} (1 + \sqrt{p_w}) (1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w \cdot d \quad (6)$$

ここに  $b_w$  : 腹部の幅  $r$  : 支圧板幅  $d$  : 有効高さ (cm)  $p_w = 100A_s / (b_w \cdot d)$   
 $A_s$  : 引張側鋼材の断面積  $f_c'$  : コンクリート圧縮強度 (MPa)

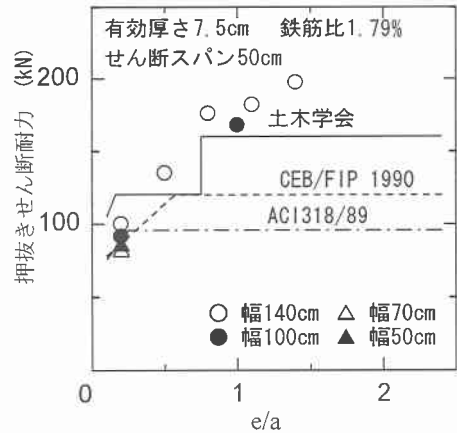


図6 自由縁付近荷重における設計押抜きせん断耐力の比較

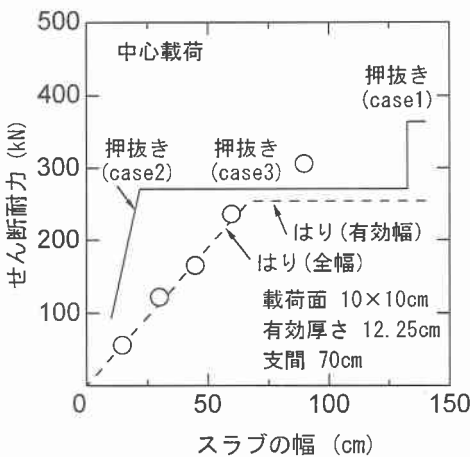


図7 異なる幅のスラブのせん断耐力の比較 (中央荷重)

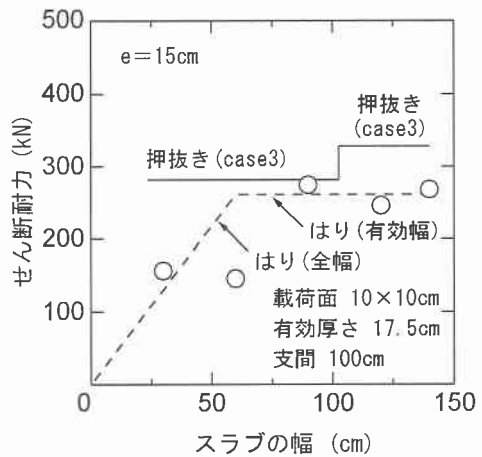


図8 異なる幅のスラブのせん断耐力の比較 (e=15cm)

また、示方書には、スラブをはりとしてせん断に対する検討を行う場合の有効幅は明記されていないが、ここでは幅の大きいスラブに対して曲げの検討に対する有効幅（示方書による）を用いることとした。

図7は、幅の異なるスラブ（荷重はスラブ幅の中心）について比較を行ったものである。なお、実験データは、コンクリート強度が30MPaのときに得られる耐力とするために、実測値に $\sqrt{30/f_c}$ を乗じて補正を行った。図中の実線は、土木学会示方書による設計押抜きせん断耐力（ $f_c' = 30\text{MPa}$ のとき）をあらわしており、破線ははりとしてのせん断耐力（ $f_c' = 30\text{MPa}$ のとき）をあらわしている。この結果から、幅の小さいスラブ（有効幅より小さい幅をもつもの）では、はり耐力に概ね一致することが示されており、設計押抜きせん断耐力では評価できないことが示されている。また、幅90cmのスラブに対しては有効幅を用いたはりのせん断耐力が押抜きせん断耐力とほぼ一致しており、近似的に評価が可能であることが示されている。

図8は、荷重位置を自由縁から15cmと固定した場合について、幅の異なるスラブの耐力を比較したものである。前図と同様に、実験結果は $f_c' = 30\text{MPa}$ の場合に補正を行っており、押抜き（実線）およびはりのせん断耐力（破線）についても $f_c' = 30\text{MPa}$ として算定した。この結果においても、実験値は全体的に設計押抜きせん断耐力を下回り、妥当な評価を得ることはできなかった。また、はりとしてのせん断耐力は、スラブ幅の大小に関係なく、概ね良い評価を得る結果となった。

これらの結果を踏まえて、全供試体について次の試算を行った。①スラブの押抜きせん断耐力として、(1)式によって算定する。②はりのせん断耐力として、曲げに対する有効幅を用いて(5)式と(6)式の算定値のうち大きい方をとる。部材としての終局せん断耐力は、①②の算定値のうち小さい方をとることとする。この試算において、(5)式によるせん断耐力が採用されたものを図9に、(6)式によるせん断耐力が採用されたものを図10に示す。また、図中の押抜きせん断耐力（■）は、参考のためはりとしてのせん断耐力が採用されないときのものである。この結果から、押抜きせん断破壊とみられるスラブにおいても、はりとしてのせん断耐力によって評価が可能であると考えられる。

これまでの検討結果から、自由縁付近荷重の押抜きせん断耐力を過大評価している原因は、図3に示した設計断面のcase2とcase3による低減方法では不十分であることが明らかであり、押抜きせん断に対する評価は、“完全押抜きせん断破壊”（この場合の設計断面はcase1となる）だけに限ることが妥当であると考えられる。新たな方法として、自由縁付近荷重の影響による耐力低下は、上述したはりとしてのせん断耐力を用いて行う方が合理的である。これらの考えを基に、全供試体についてせん断耐力を評価した結果を図11に示す。この結果、押抜きせん断耐力をとるものが20体、はりのせん断耐力をとるものが40体、ディープ

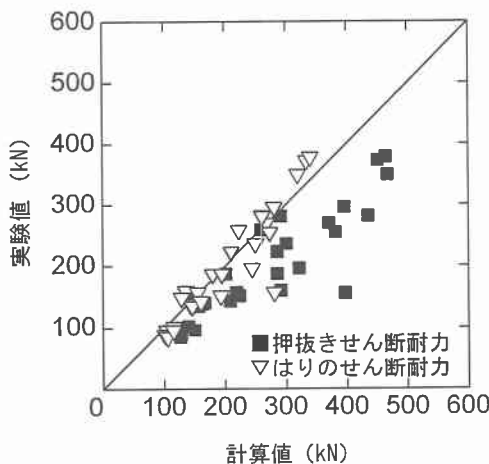


図9 RCはりのせん断耐力とした場合

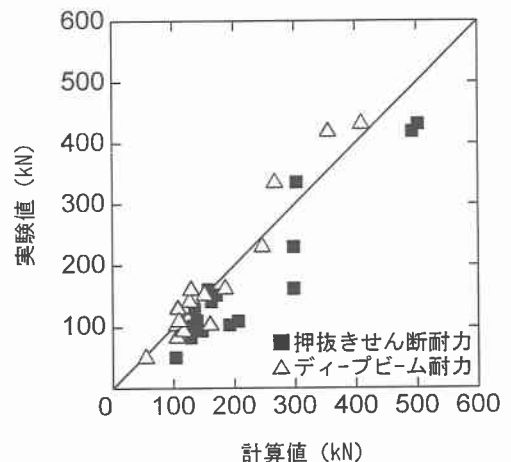


図10 RCディープビームのせん断耐力とした場合

ビームのせん断耐力をとるものが19体となった。また、3体のスラブについては、曲げ耐力がそれらを下回った。これらの耐力の適合性については、実験値／算定値の平均値が1.03であり、変動係数は14.0%であり、比較的良い結果となった。なお、はりとしてのせん断耐力算定に用いた有効幅は、弾性解に基づいているので任意の支持条件にも拡張しやすい利点を持っているので、実用的な評価であると考えられる。

## 5. まとめ

一方向RCスラブの押抜きせん断実験の結果を基に、終局せん断耐力について検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) スラブに作用する荷重が自由縁に近づくにつれて、連続的に耐力が減少していくことが実験結果によって示された。
- 2) 土木学会の示方書による設計押抜きせん断耐力は、荷重が自由縁に近づくときには過大評価となることが明らかとなった。また、CEB/FIPとACI318による設計押抜きせん断耐力は、自由縁付近に荷重があるときには概ね実測値と適合しているが、荷重が自由縁から離れている場合は過小評価となっている。
- 3) 幅の小さいスラブおよび自由縁付近に載荷されたスラブのせん断耐力に対しては、曲げに対する有効幅を用いてはりとしてのせん断耐力によって評価できることが示された。

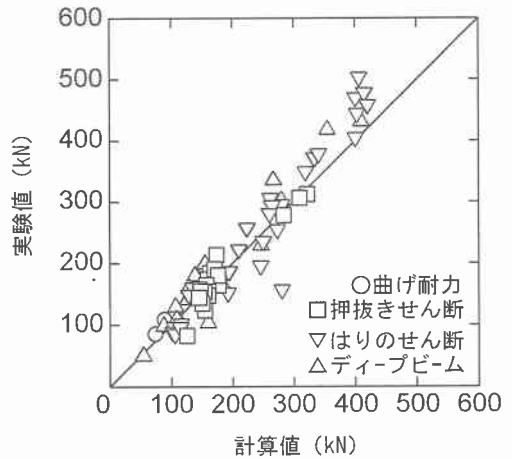


図11 スラブの終局耐力の評価

## 参考文献

- 1) 高橋義裕, 角田與史雄: RCスラブの押抜きせん断耐力に対する自由縁の影響について, 第5回コンクリート工学年次講演論文集, pp.273-276, 1983
- 2) 武政高弘, 吉川正之: 自由縁を持つRCスラブのせん断耐力について, 北海道大学卒業論文, 1981
- 3) 今村晃久, 真岸 徹: 自由縁を有するRCスラブの押抜きせん断耐力に関する研究, 北海道大学卒業論文, 1981
- 4) 高橋有裕, 板倉雅彦, 高倉英文, 逢田秀樹: RCスラブの押抜きせん断耐力に対する自由縁の影響, 北海学園大学卒業論文, 1982
- 5) 太田雅士, 山本浩嗣, 村田祐司, 武田 稔: 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, 北海学園大学卒業論文, 1983
- 6) 岸野義夫, 佐藤由広, 高野勝也, 松沢和人: RCスラブの押抜きせん断耐力に対する自由縁及び載荷深さの影響に関する研究, 北海学園大学卒業論文, 1986
- 7) コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編, 土木学会, 1991
- 8) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, CEB, 1978
- 9) CEB-FIP Model Code 1990, CEB, 1990
- 10) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318M-89) and Commentary-ACI 318RM-89, ACI, 1989
- 11) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.167-176, 1986
- 12) 二羽淳一郎: FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式, 第2回RC構造のせん断問題に関する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.119-128, 1983