

平成 21 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560473  
 研究課題名（和文） 数値計算による RC スラブの押し抜きせん断破壊の解析および設計への適用  
 研究課題名（英文） Study on the Numerical Analysis of Punching Shear Failure of RC Slabs and Its Application to the Structural Design  
 研究代表者  
 梶 勇 (HIGAI TAKESHI)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授  
 研究者番号：70115319

研究成果の概要：鉄筋コンクリートスラブ（RCスラブ）のせん断破壊は押し抜きせん断破壊と呼ばれる破壊形式であるが、この種の破壊に関する理論的解明は世界的にも不十分な状態である。本研究では、申請者らが独自に開発した三次元非線形有限要素法解析プログラムを活用して、RCスラブの押し抜きせん断耐力に影響を及ぼす要因として、既往の研究では考慮されていないスラブの支持条件、スラブの形状・寸法の影響が大きいことを明らかにするとともに、押し抜きせん断破壊耐力の数値計算結果を良い精度で近似できるような簡単な形の算定式にとりまとめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：土木構造、RCスラブ、押し抜きせん断破壊、FEM解析、設計方法

## 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート（RC）スラブは土木・建築構造物に多用されている部材の一つである。局所的な荷重を受けるスラブのせん断破壊は、押し抜きせん断破壊と呼ばれるが、この種の破壊に関する理論的解明は世界的に極めて不十分であり、構造物の設計は、実験結果に基づく経験式を用いて行っているのが現状である。

RCスラブの押し抜きせん断破壊に関する合理的な設計方法を確立しようと言うことが、本研究の動機であり、目的でもある。

## 2. 研究の目的

申請者らは、スラブ状のRC構造物に適用することを目的として、三次元非線形有限要素法（FEM）解析プログラムを独自に開発してきたが、これによって、RCスラブの押し抜きせん断破壊性状を良い精度で評価できることを明らかにした。

本研究は以下の二つの側面からなっている。

(1) 三次元有限要素法解析のスラブ状構造物のせん断破壊に対する適用性を、さらに広範

な実験結果と比較して検証する。

(2) 検証された解析手法を用いて、スラブのせん断破壊に影響を及ぼす主要因についてのパラメータスタディーを行って、解析結果に基づいた簡単な設計方法を提案する。

### 3. 研究の方法

研究の方法は下記の通りである。

(1) 大規模な数値計算を行うための計算システムの整備

三次元問題であるスラブのFEM解析においては大自由度の計算を行う必要があり、一般的なPCではメモリ不足となる。また、大自由度の連立方程式を効率よく解くためには並列計算システムの利用が望ましい。本研究では、64bitのCPUと16Gのメモリを持つPCとIntelの並列計算用ライブラリーを使用して、これらの要求に応えた。

(2) スラブの押し抜きせん断破壊に対する三次元FEMの適用性の検討

解析結果の妥当性の検討は、適切な実験の結果と解析結果の比較によって行うのであるが、境界条件が明確な望ましい実験結果は少なく、十分な検討は今後の課題となった。

(3) スラブの押し抜きせん断破壊に影響を及ぼす主要因の数値的検討

既往の研究により、押し抜きせん断耐力に影響を及ぼす主要因は、コンクリート強度、鉄筋比、スラブ厚、載荷面積であるとされている。ここでは、そのほかに、スラブのスパン長、形状（縦横スパン比）、支持条件を取り上げて、それら主要因の効果を数値計算によって把握する。

(4) FEM解析結果に基づく押し抜きせん断耐力算定式の検討

解析による数値結果を良い精度で近似できるような、簡単な形の押し抜きせん断耐力算定式を提案して、今後の設計方法の改善に資する。

### 4. 研究成果

(1) スラブの押し抜きせん断破壊に対する三次元FEMの適用性の検討について

申請者が独自に開発した三次元非線形有限要素法プログラムを用いて、載荷位置を変化させた薄いRCスラブ、フーチングのようなやや厚みのあるスラブや曲げモーメントを受ける柱付きフーチングの押し抜きせん断破壊実験結果とFEM解析結果との比較検討を行い、FEM解析結果は、せん断耐力、斜めひび割れ性状および荷重～変位関係に関して、概ね実験結果と一致することを

確認した。

(2) スラブの押し抜きせん断破壊に影響を及ぼす主要因の効果について

矩形RCスラブの境界条件を5種類（相対2辺単純支持2辺自由（A）、4辺単純支持偶角浮き上がり許容（B）、4辺単純支持（C）、周辺補剛梁支持（D）、4辺固定支持（E））に変化させて、既往の研究により押し抜きせん断耐力の主要因であるとされている、コンクリートの圧縮強度、鉄筋比、有効厚さ、載荷面積の要因効果を数値解析した結果、これら主要因の効果は、下記のように、スラブの境界条件によって異なることを明らかにした。

図1は、4辺単純支持スラブの中央断面での斜めひび割れ発生状況の一例である。スラブ中央に載荷されているので解析には1/4モデルを用いている。実線は各 Gauss point における主引張ひずみの大きさと方向を示し、ひび割れの幅と方向を意味する。赤丸は、コンクリートの主圧縮ひずみがピーク応力度時のひずみを超過していることを示す。

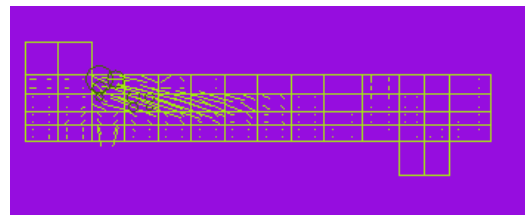


図1 斜めひび割れ発生状況の例

① コンクリート圧縮強度の影響は、スラブの拘束度が最大である4辺固定支持Eにおいて最大であり、以下、拘束度が低下する順に、すなわち、周辺補剛支持、4辺単純支持、4辺単純支持+浮き上がり許容、2辺単純支持の順に低下する。

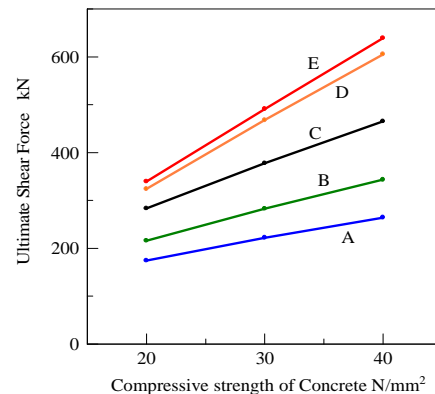


図2 コンクリート圧縮強度の影響

- ② スラブの拘束度が小さい支持条件ほど鉄筋比が耐力に及ぼす影響が大きく、拘束度が大きい4辺固定支持や剛性の大きな梁による周辺補剛支持の場合には鉄筋比の影響はきわめて少ない。

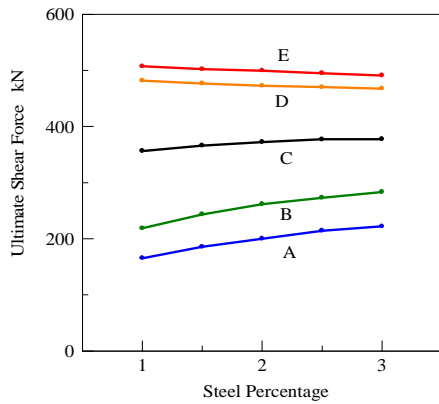


図3 鉄筋比の影響

- ③ スラブ有効高さのせん断耐力に対する影響は、スラブの拘束度が大きい支持条件において小さく、拘束度の小さな支持条件において大きい。
- ④ 載荷面の周長がせん断耐力に及ぼす影響もスラブの拘束程度によって明らかに変化し、拘束度が大きい支持条件の場合ほど周長を大きくしたときの耐力増加が大である。

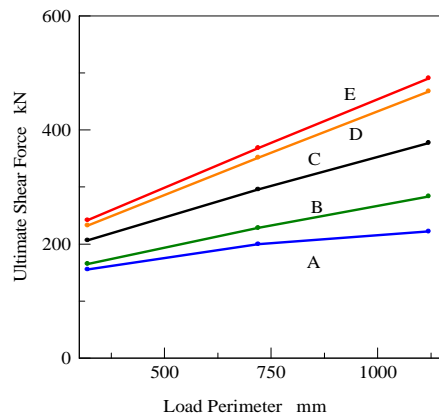


図4 載荷面周長の影響

- (3) FEM解析結果に基づく押し抜きせん断耐力算定式の提案

スラブの支持条件として、物理的に明確であり応用性が高いと思われる、相対2辺単純支持2辺自由、4辺単純支持、4辺固定支持に絞って、スラブのスパン長、スパン比（縦横スパンの比）を変化させた一連の解析を実施して、スラブの形状・寸法が押し抜きせん

断耐力に及ぼす影響（図5～図7）を明らかにするとともに、解析結果を良い精度で近似することができ、かつ、簡単な形の押し抜きせん断耐力算定式①から③を提案した。

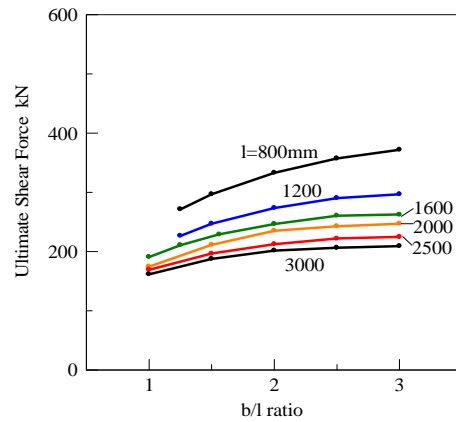


図5 相対2辺単純支持2辺自由スラブのせん断耐力

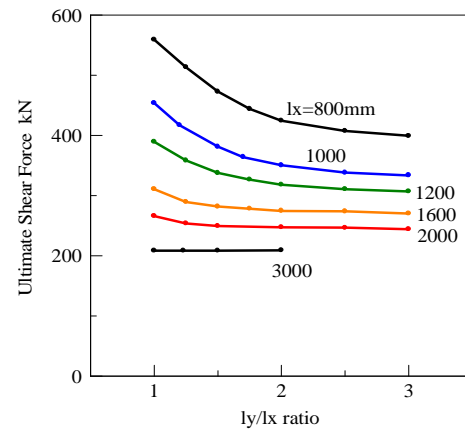


図6 4辺単純支持スラブのせん断耐力

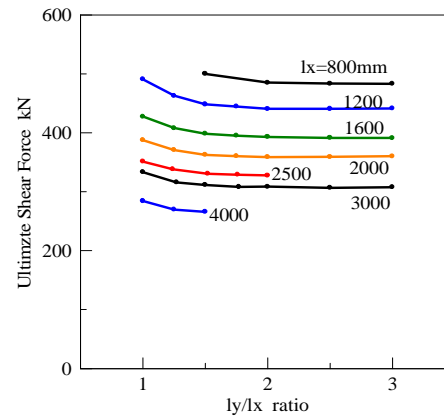


図7 4辺固定スラブのせん断耐力

押し抜きせん断破壊耐力算定式  
① 2 辺単純支持 2 辺自由スラブ

$$V_u = 0.0612 f_c'^{0.599} (100 p)^{0.270} \left( \frac{1000}{d} \right)^{0.357} \\ \times \left( \frac{1000}{l} \right)^{0.361} \left( \frac{b}{l} \right)^{0.360} (u + 6\pi d) d$$

ここで、

$$1.0 \leq \frac{b}{l} \leq 3.0 - \left( \frac{l}{3000} \right)$$

② 4 辺単純支持スラブ

$$V_u = 0.112 f_c'^{0.709} (100 p)^{0.037} \left( \frac{1000}{d} \right)^{0.403} \\ \times \left( \frac{1000}{l_x} \right)^{0.729} \left( \frac{l_x}{l_y} \right)^{0.317} (u + 3\pi d) d$$

ここで、

$$1.0 \leq \frac{l_y}{l_x} \leq 3.5 - \left( \frac{l_x}{1000} \right)$$

③ 4 辺固定スラブ

$$V_u = 0.0890 f_c'^{0.899} (100 p)^{0.026} \left( \frac{1000}{d} \right)^{0.372} \\ \times \left( \frac{1000}{l_x} \right)^{0.391} \left( \frac{l_x}{l_y} \right)^{0.142} (u + 2\pi d) d$$

ここで、

$$1.0 \leq \frac{l_y}{l_x} \leq 2.26 - \left( \frac{l_x}{4600} \right)$$

かつ、

$$2.26 - \left( \frac{l_x}{4600} \right) \geq 1.5$$

ただし、①、②、③の式において

$V_u$  : 押し抜きせん断耐力 N  
 $f_c'$  : コンクリート圧縮強度 N/mm<sup>2</sup>  
 $p$  : 鉄筋比 (2 方向の平均値)  
 $d$  : スラブの有効高さ mm

(2 方向の平均値)

$l_x$  : 短辺のスパン長 mm  
 $l_y$  : 長辺のスパン長 mm  
 $b$  : 自由辺の長さ mm (①式)  
 $l$  : 単純支持辺の長さ mm (①式)  
 $u$  : 載荷面の周長 mm

ここで示した押し抜きせん断破壊耐力は、荷重がスラブの中央に載荷される場合の耐力であり、載荷位置としては耐力が最小になる場合である。道路橋 RC 床版のように移動荷重を受ける場合には、最も不利な荷重位置を考慮する必要があるため、上式による耐力を用いるのがよい。また、荷重位置がスラブ中央以外で固定されるような場合には、上式の耐力は安全側の値を与える。なお、2 辺単純支持 2 辺自由支持スラブの場合、荷重が自由縁付近に載荷される場合の耐力低下を別途考慮する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 八若幹彦、檜貝 勇、中村 光、斉藤成彦、押し抜きせん断破壊するスラブ状 RC 構造物の非線形有限要素法解析、土木学会論文集 E、Vol. 63 No. 2、pp. 341-356、平成 19 年(2007 年)、査読あり

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜貝 勇 (HIGAI TAKESHI)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授  
 研究者番号：70115319

(2) 研究分担者

斉藤 成彦 (SAITO SHIGEHICO)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授  
 研究者番号：00324179

高橋 良輔 (TAKAHASHI RYOSUKE)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教  
 研究者番号：10371783