Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，1999

論文　RCスラブの押抜きせん断破壊機構に関する基礎的研究

小澤満津雄*1・内田裕市*2・小柳　洽*3

要旨：RC スラブの押抜きせん断破壊機構解明の基礎的資料を得ることを目的としてスラブ厚，鉄筋比など影響要因を変化させたスラブを作成し載荷試験を行い，耐力および内部ひび割れ状況と荷重－コンクリートひずみ関係の検討を行った。スラブ上面の周方向の圧縮ひずみは最終段階まで増大するが，径方向のひずみは荷重の増加につれて圧縮から次第に引張に変化する現象が見られた。また，内部ひび割れの発達状況により，最終的な破壊時の斜めひび割れは最大耐力の直前で急激に進展することが明らかとなった。

キーワード：RCスラブ，押抜きせん断破壊，内部ひび割れ

1. はじめに

RC スラブの押抜きせん断破壊に関しては，現在までに影響要因の検討，破壊機構あるいは耐力算定式の提案等さまざまな研究がなされている。しかし，いまだ破壊機構は明確になっていない。そこで押抜きせん断破壊機構解明の基礎的資料を得ることを目的として，本研究ではスラブ厚，鉄筋比などの影響要因を変化させたスラブを作成し載荷試験を行い，耐力および内部ひび割れ状況と荷重－コンクリートひずみ関係の検討を行った。特に，スラブ上面の周方向のひずみは最終段階まで増大するが，径方向のひずみは荷重の増加につれて圧縮から次第に引張に変化する現象が見られたので，それらの検討結果について述べる。

2. 実験概要

供試体の種類および寸法諸元を表－1 に示す。供試体寸法は 55×55cm とし，厚さを 3 種類すなわち 4cm (A シリーズ)，5cm(B シリーズ)，7cm(C シリーズ)とし，鉄筋比を 1.0%および 2.0%の 2 種類(B シリーズは，1.5%を加え 3 種類)とした。鉄筋は等方配筋とし，かぶりは 6mm とした。供試体名はスラブ厚と鉄筋比により，表-1 のように名付けた。鉄筋は A1 については細径の D3 を使用し、その他は D6 を使用した。例として B15 供試体の配筋図を図－1 に示す。モルタルと普通コンクリートではせん断破壊の性状が異なると言われているが、供試体寸法の関係からここではモルタルを使用した。モルタルの示方配合を表-2 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用い，細骨材は長良川産(比重 2.59、F.M.=2.80)とした。載荷試験時材齢は 14～22 日である。モルタルの圧縮強度および鉄筋の降伏強度を表－1 に併記する。載荷はスパン 50cm の浮上がりを許す 4 辺単純支持で，60×60×31mm の鋼板を介して中央部分集中載荷にて行った。また，鋼板と供試体の間の荷重分布が一様になるように 60×60×3mm のゴム板を敷いた。計測項目は，荷重，スラブ下面載荷板直下の変位および載荷板近傍のコンクリート上面ひずみとした。荷重は容量 100kN のロードセルにより，変位はストローク 25mm(感度 1/500mm)の変位計を用いて計測した。また，スラブ上面ひずみの測定にはゲージ長 30mm のひずみゲージを用いた。ひずみゲージの貼付位置は図－2 に示すよ

*1　岐阜大学大学院　工学研究科土木工学専攻（正会員）
*2　岐阜大学助教授　工学部土木工学科　工博（正会員）
*3　岐阜大学教授　工学部土木工学科　工博（正会員）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

うに,載荷板に近接した載荷板の各辺に直角方向(径方向とする)および平行方向(周方向とする)とした。B15 シリーズ以外はそれぞれ3体の供試体のうち2体を押抜きせん断破壊が生じるまで単調載荷し,残りの1体は荷重－変位曲線と荷重－コンクリートひずみ曲線をモニターしながら，所定の荷重まで載荷し，その後除荷した。B15 シーズでは 2 体を破壊まで載荷を行い,4 体を途中で除荷した。ここで，押抜きせん断破壊が生じるまで単調に載荷したものを破壊供試体,載荷の途中で除荷したものを除荷供試体とする。載荷終了後の供試体は内部のひび割れ進展状況を観察するために,コンクリートカッターで切断した。

3. 実験結果

3.1 荷重-たわみ関係

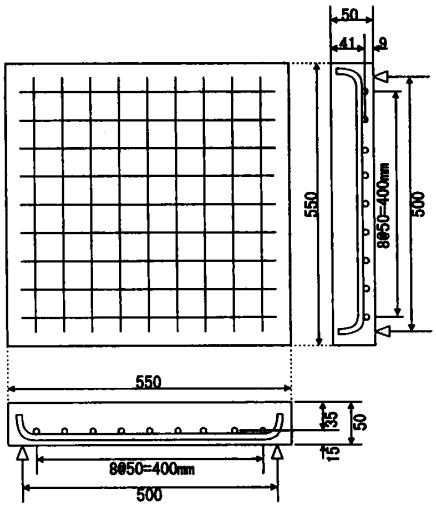
図-3 に A,B,C シリーズ全ての供試体の荷重－たわみ曲線を示す。いずれの供試体も最終的には押抜きせん断破壊を生じた。鉄筋の降伏強度およびコンクリート強度に多少の差はあるが,A1,A2,B1 は破壊時の変形が大きい曲げ卓越型の破壊を示した。全体的にスラブ厚が大きくなるにつれて,また,鉄筋比が増加すれば最大荷

表－1　供試体の種類と寸法諸元および強度試験結果

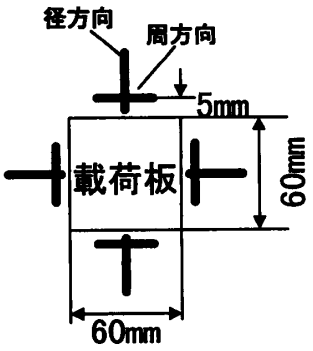
供試体名	供試体数	寸法 (cm)	p %	鉄筋種類	fy N/mm²	fc' N/mm²
A1	3	55×55×4	1.0	D3	309.7	48.6
A2	3	55×55×4	2.0	D6	360.2	46.7
B1	3	55×55×5	1.0	D6	360.2	51.3
B2	3	55×55×5	2.0	D6	360.2	51.3
B15	6	55×55×5	1.5	D6	437.5	41.0
C1	3	55×55×7	1.0	D6	360.2	46.7
C2	3	55×55×7	2.0	D6	404.4	48.6

表－2　モルタルの示方配合

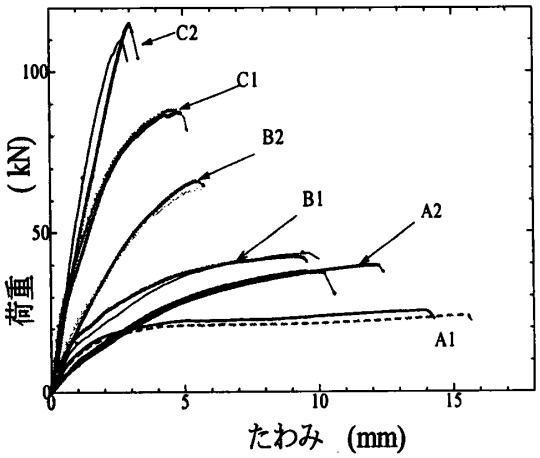
W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	Air (%)
60	286	476	1430	1.0



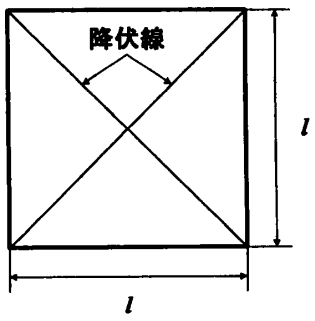
図－1　供試体配筋図　(B15)



図－2　ゲージ貼付位置



図－3　荷重－たわみ曲線



図－4　仮定した降伏線

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

重は増加し,最終たわみが小さくなり,押抜きせん断卓越型になった。

3.2 スラブの終局耐力

表－3 に各スラブの最大耐力の測定値とその時の変位ならびに各種提案式による計算値を示す。曲げ耐力の計算値は降伏線理論 [1] により図－4 に示すような降伏線を仮定して,式(1)を用いて求めたものである。押抜きせん断耐力は式(2)の土木学会式 [2] と式(4)の松井式 [3] によって求めた。

$$V_{um} = 4 \cdot (m_{ux} + m_{uy}) \qquad (1)$$

ここで m_{ux}, m_{uy} : x および y 方向の終局曲げモーメント $(kN \cdot m/m)$

$$V_{us} = \beta_d \cdot \beta_r \cdot \beta_p \cdot f'_{pc} \cdot u_p \cdot d \qquad (2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d} \quad (d:cm) \qquad (3)$$

ここで f'_{pc} :コンクリート強度の影響を表わす係数、β_d :寸法効果の係数、β_p :鉄筋比の影響を表わす係数、β_r :載荷板周長の影響を表わす係数、u_p :載荷板から $d/2$ だけ離れた断面の周長

$$V_{us} = \tau_{s.max}\{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + \sigma_{t.max}\{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \qquad (4)$$

ここで、$\tau_{s.max}$:コンクリートの最大せん断応力度、$\sigma_{t.max}$:コンクリートの最大引張り応力度、a,b :載荷板の主鉄筋方向、配力筋方向の辺長、x_m, x_d :主筋方向および配力筋方向に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸高さ、d_m, d_d :主筋方向、配力筋方向の有効高さ、C_m, C_d :主筋および配力筋からのかぶり厚さ

最大耐力の実測値 Vu を降伏線理論による曲げ耐力 Vum と比較すると,曲げ卓越型の破壊を示した A1,B1 では Vu/Vum が,ほぼ 1.0 となっている。土木学会式では,β_d が全てのシリーズで 1.5 を超えたので β_d =1.5 とした。その結果,Vum/Vus が 1.0 以上となり,かなり安全側の値となった。参考のために β_d の値を式(3)で求めたものをそのまま用いると,表－3 に示すようにいずれもせん断耐力を 10～20%大きく算定する結果となった。松井式は測定値と計算値の適合性が比較的よかった。

3.3 荷重－コンクリートひずみ関係

図－5,6 にそれぞれ鉄筋比 1.0%および 2.0%における荷重と載荷板近傍の周方向の 4 測点のひずみを平均化したコンクリートひずみの関係を示す。荷重の増加に従って周方向ひずみは圧縮側に単調増加し,最大ひずみは 3000×10^{-6} 程

表－3 スラブの終局耐力

No	最大耐力	最大荷重時変位	終局曲げモーメント		曲げ耐力		押抜きせん断耐力							
					降伏線理論		土木学会式						松井式	
	Vu kN	mm	m_{ux} kN·m/m	m_{uy} kN·m/m	Vum kN	Vu/Vum	βd	Vus kN	Vu/Vus	βd	Vus kN	Vu/Vus	Vus kN	Vu/Vus
A11	25.38	13.95	3.45	2.84	25.1	1.01	1.5	27.5	0.92	2.38	43.75	0.58	29.81	0.85
A12	24.79	11.44				0.99			0.90			0.57		0.83
A21	37.44	10.58	6.16	4.99	44.6	0.84		29.3	1.27	2.44	47.87	0.78	37.15	1.01
A22	39.58	12.17				0.89			1.35			0.83		1.07
B11	43.27	9.64	5.53	4.63	40.6	1.06		38.2	1.13	2.26	57.71	0.75	39.08	1.11
B12	42.19	9.11				1.04			1.10			0.73		1.08
B21	65.97	5.44	10.40	8.82	76.8	0.86		48.1	1.37		72.71	0.91	53.78	1.23
B22	63.24	5.59				0.82			1.31			0.87		1.18
C11	87.70	5.14	12.66	11.39	96.2	0.91		70.3	1.25	2.04	95.56	0.92	70.23	1.25
C12	87.35	4.89				0.91			1.24			0.91		1.24
C21	110.05	2.72	28.09	24.97	212.2	0.52		90.3	1.22		122.77	0.90	101.58	1.08
C22	114.66	3.01				0.54			1.27			0.93		1.13

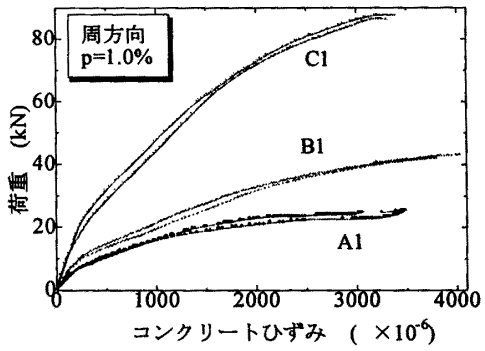
NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

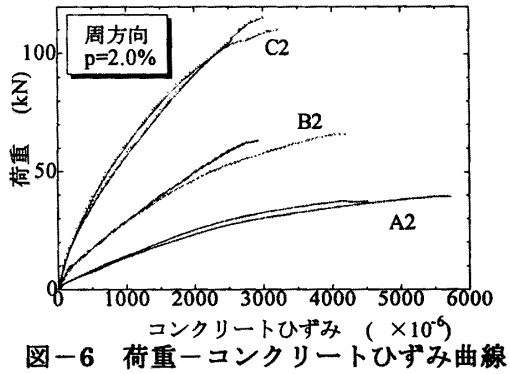
度あるいはそれ以上であった。次に、図－7,8 に鉄筋比 1.0%および 2.0%における荷重と径方向の 4 測点のひずみを平均化したコンクリートひずみ曲線を示す。弾性解析によれば径方向ひずみも周方向ひずみと同様に荷重の増加につれて増大するはずである。しかしながら，実測によれば径方向ひずみは当初は荷重の増加につれて増加するが，ある段階から増加の割合が緩くなり，さらに荷重が増加すると径方向ひずみは増加から減少に変化した。鉄筋比 1.0%のスラブでは，径方向の圧縮ひずみの最大値は 300×10^{-6}～400×10^{-6} 程度であった。鉄筋比 2.0%のスラブの径方向の最大圧縮ひずみは、300×10^{-6}～500×10^{-6} 程度であった。また、図－9,10 に鉄筋比 1.0%および 2.0%のスラブにおける荷重と，平均化した径方向ひずみをそれぞれ最大値で割って無次元化したものを示す。径方向ひずみはいずれも，最大耐力の 60～80%付近で圧縮ひずみが最大値に達した。荷重の増加につれて周方向ひずみが単調増加するのに対し，径方向ひずみがある荷重レベルより増加から減少に転じ最終的に引張になることは，この間に生じるスラブ内のひび割れによってスラブ内の応力の流れを大きく変化させる構造変化が生じていることを表わしていると考えられる。

3.4 内部ひび割れ状況

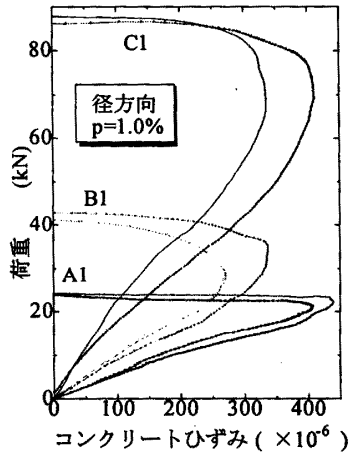
載荷試験が終了した供試体を切断し，スラブの内部ひび割れ状況について調べた。肉眼で検出できないひび割れはアセトンを塗布してから確認した。ここでは，A,B,C シリーズの破壊供試体と，B15 シリーズの除荷供試体における内部ひび割れ状況の検討結果を示す。表－4 には除荷した時の荷重を Vst とし，破壊供試体 2 体の破壊荷重の平均値を Vu，除荷供試体の載荷レベルを Vst/Vu として示す。まず，図－11～13 に A と B および C シリーズの破壊供試体の内部ひび割れ状況を示す。いずれのシリーズも破壊供試体は、載荷板直下



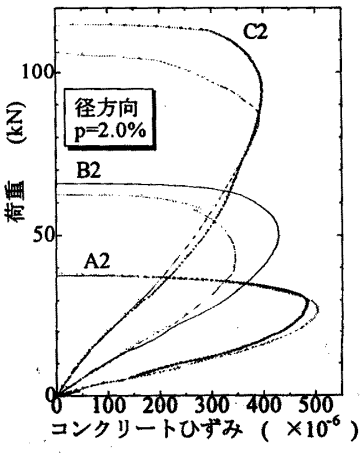
図－5 荷重－コンクリートひずみ曲線



図－6 荷重－コンクリートひずみ曲線



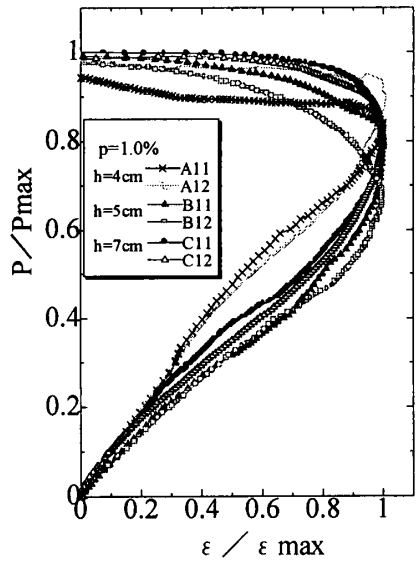
図－7 荷重－コンクリートひずみ曲線



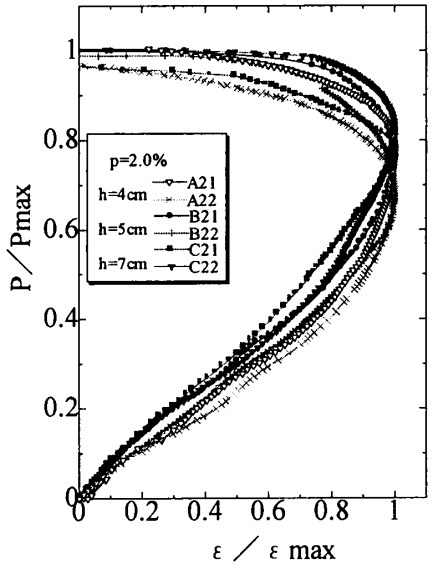
図－8 荷重－コンクリートひずみ曲線

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute



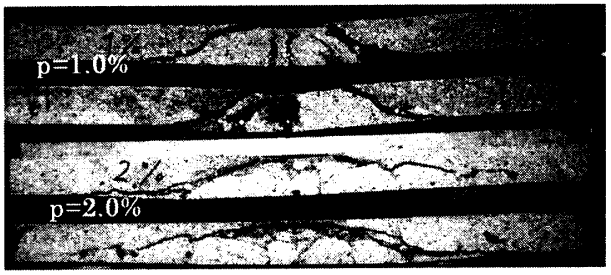
図－9　無次元化した径方向ひずみ



図－10　無次元化した径方向ひずみ

表－4　除荷供試体の載荷レベル

	No	スラブ厚 (cm)	p (%)	Vst kN	Vu kN	Vst/Vu
B	B153	5	1.5	44.47	53.77	0.83
	B154			56.16		1.04
C	C23	7	2	113.68	112.36	1.01



図－11　内部ひび割れ状況（A シリーズ）

近傍から載荷板に向かって鉛直に近い曲げひび割れが入り、最終的に載荷板から斜めひび割れが鉄筋位置まで達し、押抜きせん断破壊を示している。次に,図－14～15 に、B15 シリーズ（鉄筋比 1.5%）の除荷供試体の内部ひび割れ状況を示す。Vst/Vu が 1.0 を超えたことは破壊供試体の最大荷重よりも除荷供試体の最大耐力が大きかったことによる。B153 は Vst/Vu が 0.83 で,載荷板縁の 4 点で測定した径方向ひずみが全て減少に転じた時に載荷を中止したものであり、この場合には載荷板に向かう鉛直に近い曲げひび割れのみが発生している。B154 は Vst/Vu が 1.04 であるが、載荷板縁の 4 点で測定した径方向ひずみが減少を続け,全てゼロに達した時に除荷したものである。この場合には、曲げせん断ひび割れが鉄筋位置から載荷板方向に伸びて,途中で止まっている。最大耐力の約 80% 以上まで載荷を行った B153 と B154 供試体は載荷板に向かって伸びる曲げひび割れか曲げせん断ひび割れが確認できた。最大耐力を超えた点まで載荷を行った C23 の除荷供試体の内部ひび割れ状況を図－16 に示す。これより、除荷供試体は載荷板に向かう鉛直に近い曲げひび割れが載荷板直下から伸び,それがつながってコーンを形成しており,さらに最終的な斜めひび割れが載荷板に向かって伸びている。以上のことより、最大耐力の少なくとも 80%程度までは,載荷板直下に鉛直方向の曲げひび割れまたは曲げせん断ひび割れが発生しているだけで,最終的な斜めひび割れに連なるひび割れは検出できなかった。従って押し抜きせん断破壊をもたらす最終的な斜めひび割れは、最大荷重の直前で急激に拡がるものと考えられる。

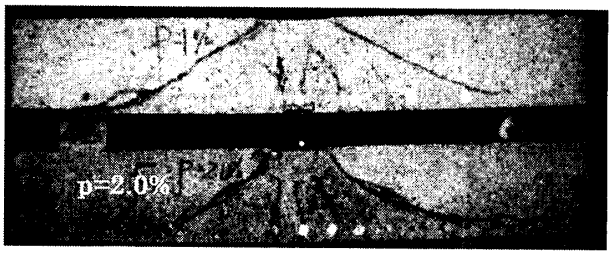
4.　まとめ

本実験におけるまとめを以下に示す。

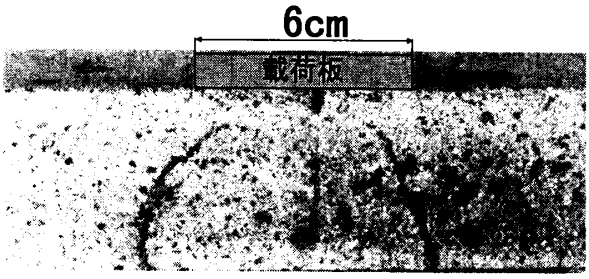
NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

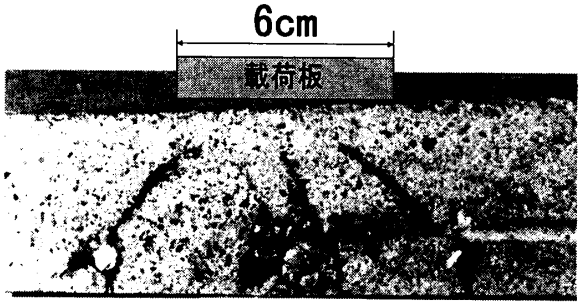
図－12　内部ひび割れ状況（B シリーズ）



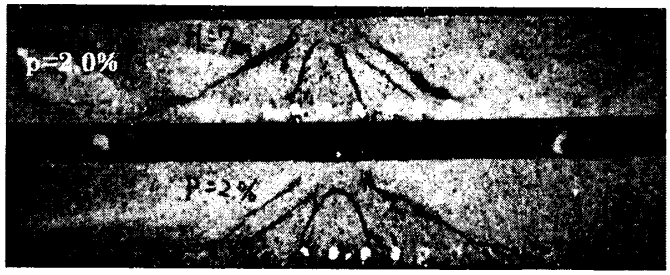
図－13　内部ひび割れ状況（C シリーズ）



図－14　内部ひび割れ状況（除荷供試体 B153）



図－15　内部ひび割れ状況(除荷供試体 B154)



図－16　内部ひび割れ状況(除荷供試体 C23)

1)　曲げ卓越型の破壊を示した A1, B1 では降伏線理論による曲げ耐力は実測値とほぼ一致した。

2)径方向ひずみは，当初荷重の増加に対して増加するがある段階から増加の割合は緩くなり、さらに荷重が増加すると径方向ひずみは増加から減少に転じた。一方，荷重の増加につれて周方向ひずみは圧縮側に単調増加した。このように，周方向ひずみが単調増加するのに対し，径方向ひずみがある荷重レベルから，増加から減少に転じ最終的に引張になることは，この間にスラブ内で応力の流れを大きく変化させる構造変化が生じていることを表わすものと考える。

3)　押抜きせん断破壊をもたらす最終的な斜めひび割れは最大荷重の直線で急激に全体的に拡がるものと考えられる。

参考文献

1) K. W. Johanson: Brudlinieteorier, Kopenhagen, 1943, English Translation ; Yield -Line Theory, Cement and Concrete Association, London, 1962

2) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成３年度版)設計編, 1991

3) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集, Vol. 348／V-1、pp. 133-141, 1984. 8

NII-Electronic Library Service