

論文 等分布荷重を受ける4辺単純支持RC板の耐力に関する実験的考察

篠崎 裕生^{*1}・樋口 昇^{*2}・三上 浩^{*3}

要旨：板全面に分布荷重を受けるRC板の耐力に関する研究は、その実験の困難さから実施例はあまり多くない。著者らは4辺単純支持正方形RC板の全面等分布荷重載荷試験を行い、その曲げおよびせん断耐力を検討した。試験体への載荷方法は、平板状のゴムバッグを空気圧で膨らませることで行った。実験の結果、試験体の曲げ耐力はMacGregor等による方法あるいは降伏線理論による方法で安全側に評価できることが分かった。また、せん断耐力は板理論に基づく発生断面力を用いて、はりの耐力をもとに計算する方法では実験値を過小に評価することが分かった。

キーワード：RC板、分布荷重、曲げ耐力、せん断耐力

1. はじめに

著者等は、地中構造物の壁を対象として、その合理的な設計方法について検討を進めている。土圧等の分布荷重が直接作用する当該壁構造は、通常は一方向板として設計する。しかしながら、中壁等が存在する場合はその負担も考慮した2方向板として設計を行う方が合理的である。

板の比較的広い範囲に分布荷重が作用する場合の曲げ耐力については、一方向板あるいは二方向板として平板理論に基づいて計算された断面力に対して設計しておけば、十分安全であることが知られており、建築の床スラブあるいは道路橋床板の設計などで一般的にこの方法が採用されている。この理由として、平板耐力の解析が比較的難しいことと、実際の耐力が板周辺の拘束によって生じる面内力の効果などにより大きくなることなどが要因と考えられる。

一方、せん断力に対する検討については、建築学会鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説¹⁾では、片持ばり式スラブ、開口のあるスラブ以外の通常用いられる床スラブでは、「せん断応力度に対しては十分安全な場合が多く、特に検算を必要としない」としている。また、土木学会

コンクリート標準示方書²⁾では、「幅の広いはりとして、支点の近傍において一方向の断面内でせん断力に抵抗すると想定し、はりに準じて検討を行う」としている。このように、せん断力に対する設計の考え方が異なっていると同時に、特に、コンクリート標準示方書のように、はりに準じた検討ではかなり安全側の設計になっている可能性が考えられる。

これまで、面外力を受ける板の耐力に関しては、脆性的な破壊である押し抜きせん断破壊に関する研究が精力的に行われているが、板全面に分布荷重が作用した場合の耐力についての研究例は、その実験の困難さからあまり見られな



写真-1 ゴムバッグ

*1 三井住友建設（株） 技術研究所土木PC構造研究室（正会員）

*2 三井住友建設（株） 土木営業本部リニューアル営業グループ 工博

*3 三井住友建設（株） 技術研究所土木PC構造研究室 工博（正会員）

い。そこで著者等は市販のゴムバッグ(写真-1)を用いた方法によって等分布荷重を再現した4辺単純支持正方形RC板の載荷試験を実施し、その耐力についての検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 試験方法

ゴムバッグは正方形平板で、外寸は950×950mm、接触面の大きさは930×930mmである。空気無注入時の厚さは約30mmで、最大揚程は520mmである。今回の試験体が破壊に至る数10mmまでの揚程では最大で0.8MPaの圧力を作用させることができる。

試験体への載荷方法を図-1および写真-2に示す。実験室の床と試験体の間にゴムバッグを挿入し、試験体に載せたH形鋼の支承を8箇所のPC鋼棒で試験体とともに床に固定した。H形鋼と試験体の間には直径30mmの丸鋼を挿入し、支承位置で板が回転できるようにした。試験体に設けた貫通孔は、PC鋼棒の径に対して十分余裕を持たせており、試験体の変形がその位置で拘束されることがないように配慮した。

2.2 試験体の概要

平板理論に基づいて作成された計算図表(鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説¹⁾)を用いてRC板に作用する断面力を求め、その断面力に対して、はりとして計算した曲げ耐力あるいはせん断耐力を照査する方法で試験体を設計した。

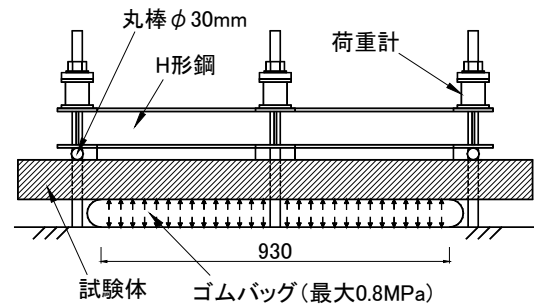


図-1 試験装置概念図



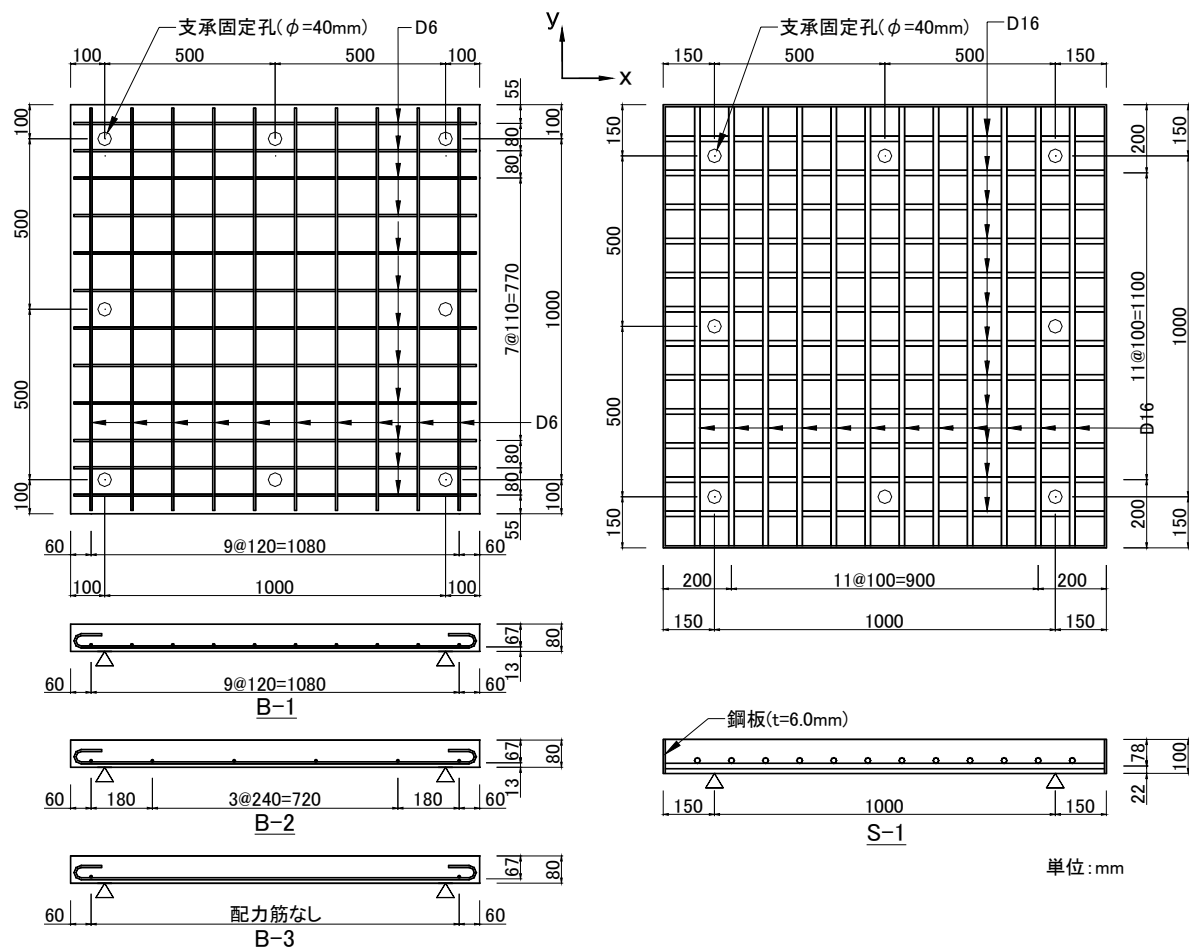
写真-2 試験状況

はりとしての曲げ耐力は断面分割法により、せん断耐力はコンクリート標準示方書に基づいて計算した。表-1に計算結果を示す(x,y方向については図-2参照)。試験体は4体とし、耐力比(曲げ耐力/せん断耐力)はいずれも1以上である。そのうちの3試験体(B-1~B-3)は、配力方向の鉄筋量を変えてその影響を調べた。また、残りの1試験体(S-1)は確実にせん断で破壊するよう耐力比を5以上に設定した。

表-1 試験体の概要

項目	単位	B-1		B-2		B-3		S-1	
		x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
板厚	mm	80	80	80	80	80	80	100	100
鉄筋	—	D6@110	D6@120	D6@110	D6@240	D6@110	—	D16@100	D16@100
有効高さ	mm	67	61	67	61	67	—	78	62
曲げ耐力	kN・mm/m	6.58	5.47	6.58	2.71	6.58	—	45.8	33.9
せん断耐力	kN/m	46.2	42.2	46.2	33.5	46.2	—	96.3	82.7
荷重(曲げ)	kN	178	144	178	73.3	178	—	1240	916
荷重(せん断)	kN	100	91.6	100	72.8	100	—	209	180
耐力比	—	1.77	1.57	1.77	1.01	1.77	—	5.9	5.1

注: “荷重” は図表¹⁾から求めた断面力が計算曲げ・せん断耐力に達するときの等分布荷重の大きさ



図－2 試験体形状寸法

図－2 に試験体の形状寸法を示す。いずれの試験体もゴムバッグの大きさに合わせて載荷面の大きさを $1.0 \times 1.0\text{m}$ とした。B-1～B-3 試験体の板厚さは 80mm で鉄筋は D6 を用いた。B-1 試験体は、主方向と配力方向の鉄筋比 $p_w(0.43\%)$ が同じになるよう鉄筋間隔を設定した。B-2 試験体は配力方向の鉄筋比が主方向の半分、B-3 試験体は配力方向の鉄筋がない試験体である。

S-1 試験体の板厚さは 100mm で、鉄筋は D16 を用いた。鉄筋比は主方向 2.55% 、配力方向 2.84% である。B シリーズの鉄筋は、端部を折り曲げて定着したが、S-1 試験体は試験体側面に厚さ 6mm の鉄板を設置し、鉄筋をその鉄板に溶接して定着した。

コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表－2、表－3 に示す。コンクリートは普通セメントを使用し、粗骨材の最大寸法は 15mm とした。

試験時は、載荷荷重を荷重計（図－1）で、鉄筋およびコンクリートのひずみをひずみゲージで計測した。

表－2 コンクリートの材料特性値

試験体名	圧縮強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	弾性係数 N/mm^2
B-1～B-3	28.3	2.36	25800
S-1	27.4	2.83	25500

表－3 鉄筋の材料特性値

試験体名	降伏強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	弾性係数 N/mm^2
D6(SD345)	354	537	190200
D16(SD345)	375	572	190500

3. 実験結果

3.1 荷重－板中央変位関係

図－3 に荷重と板中央変位の関係を示す。図には表－1 の曲げおよびせん断耐力計算値(y 方向)を併記した。

B-1～B-3 の各試験体は鉄筋が降伏した後も荷重が増加し、コンクリートが圧縮破壊して荷重が低下し試験を終了した。3 体とも曲げで破壊した。B-1, B-2 試験体の最大荷重は 190kN,169kN で、ほぼ表－1 の x 方向の曲げ耐力 (178kN) 近くまで達したが、B-3 試験体は 115kN でその計算値を大きく下回った。y 方向の計算曲げ耐力はいずれの試験体も上回った。せん断耐力の計算値との比較では、いずれの試験体もそれを上回っており、比較的大きなせん断耐力を有していると考えられる。これらの試験体はいずれも、耐力の小さい方向の計算曲げ耐力で評価すれば安全と考えられる。

S-1 試験体は計算せん断耐力 (x 方向 209kN) を大きく超え、ゴムバッグの容量である 700kN に達したため試験を終了した。700kN までは板に曲げひび割れ以外の損傷は見られず、大きなせん断耐力を有していることが分かった。

MacGregor 等³⁾は、面内力と面外力を同時に受ける平板の荷重とたわみの関係を簡易な方法で計算できることを示している。この方法では、平板断面の x 方向, y 方向をそれぞれはりとしてモーメント・軸力と曲率 (M-N- ϕ) の関係を計算し、その結果をもとに式(1)によって作用する分布荷重 q を計算する (面内力ゼロの場合)。

$$q = \frac{8}{b^2} M_x + \frac{8}{a^2} M_y + \frac{8\sqrt{M_x M_y}}{ab} \quad (1)$$

ここに、 M_x , M_y : x,y 方向のモーメント, a, b : x,y 方向の辺の長さ, である。

ここでは、M- ϕ 関係を断面分割法によって求めることとした。このとき、鉄筋とコンクリートの応力－ひずみ関係はコンクリート標準示方書に示されているものを用いた。また、コンク

リートの引張軟化特性は考慮していない。B-3 試験体は、 M_y をゼロとして計算した。

板の曲げ耐力は降伏線理論⁴⁾でも求めることができる。ここでの計算では、各方向の塑性モーメント M_x , M_y は式(2) (降線 1) および断面分割法 (降線 2) で計算した。

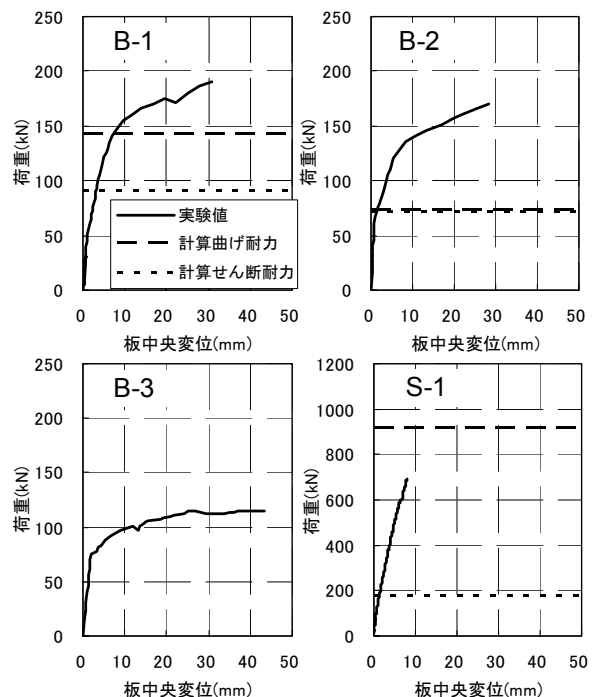
$$M = A_s \cdot f_y \cdot \frac{7}{8} \cdot d \quad (2)$$

ここに、 A_s は単位幅あたりの引張鉄筋の断面積、 f_y は鉄筋の降伏強度、 d は鉄筋の有効高さである。

表－4 曲げ耐力計算値

試験体	実験値 kN	計算値 kN		
		MacGregor	降線 1	降線 2
B-1	191	144	132	144
B-2	170	108	114	109
B-3	115	52.6	73.0	70.0
S-1	691	953	1093	954

計算結果を表－4 に示す。MacGregor 等の方法による最大荷重は、降線 2 とほぼ同じであった。各計算値は実験値を大きく下回っており、かなり安全側の評価を与えることが分かる。一般的に、はりの曲げ載荷試験では主鉄筋が降伏した後は荷重があまり上昇しないが、今回の板の試験では、主鉄筋降伏以降も荷重が大きく増加し



図－3 荷重－板中央変位

ており、はりとは異なった挙動となっている。
この要因としては、板の載荷面より外側の部分の拘束や、今回の試験では支承の丸棒と試験体の間に何も挟んでいないため丸棒が試験体に食い込み、変形を拘束したことなどが考えられる。

図-4 は、B-1～B-3 試験体の圧縮側のコンクリートのひずみと荷重の関係である。これを見ると、x,y 方向で鉄筋量がほぼ等しい B-1 試験体では、x 方向 y 方向ともに同じように圧縮ひずみが増加していくのに対し、x,y 方向で鉄筋量が異なる B-2, B-3 試験体では、配筋方向のひずみが小さく、配筋方向の曲げ負担が小さくなっていることが分かる。

3.2 ひび割れ性状

試験終了後の試験体上面（引張側面）のひび割れ状況を図-5 に示す。B-1, B-2 試験体では板中央付近に格子状のひび割れが見られ、板端に向かうにしたがって試験体の角隅に向かってひび割れが放射状に進展している。B-3 試験体では、鉄筋に直交した方向ひび割れが卓越しており、配筋のない影響が見られる。しかし、試験体の角隅に向かってひび割れが進展することは他の試験体と同じである。放射状のひび割れは支承位置をまたいで試験体縁まで達している。

一方、S-1 試験体は、ほぼ全面にわたって格子状のひび割れが発生しているのが分かる。これは、鉄筋量が多いためひび割れの分散性が増しているためと考えられる。支承から外側の面のひび割れは図-5 には描いていないが、B シリーズと同様に試験体縁まで達するひび割れは多く発生していた。支承の外側まで達するひび割れのいくつかは最大荷重に達する前に発生しているが、このことは支承の外側の部材も荷重の負担をしていることを示しており、耐力を精度良く評価するためにはこれらの影響も考慮する必要があると考えられる。

なお、作用せん断力が最も大きく曲げモーメントが小さい辺中央付近では、いずれの試験体もそのひび割れ密度は小さく、なおかつ、ひび割れが生じて辺に直交する方向のものが見ら

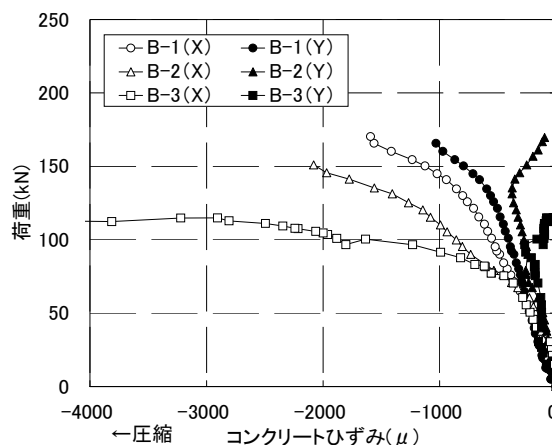


図-4 荷重-コンクリートひずみ

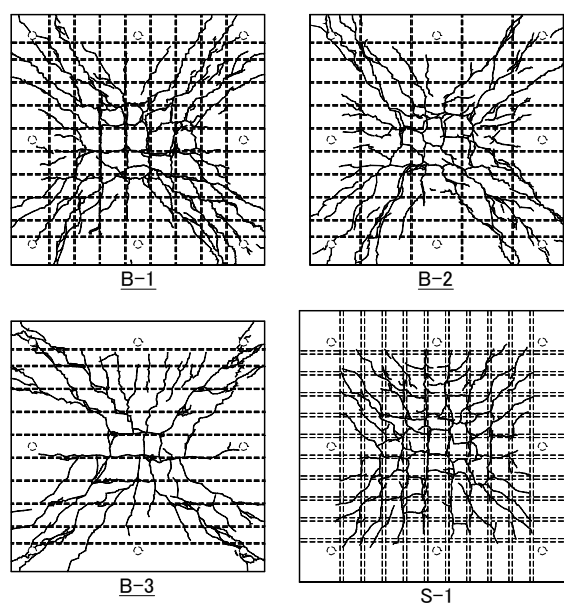


図-5 破壊後のひび割れ状況

れるだけであった。一般的に、せん断破壊が初期の曲げに起因するひび割れが斜め方向に進展して生じる場合が多いことに鑑みると、4 辺単純支持板では、このように最大せん断力位置で曲げモーメントが最小となるような断面力によるひび割れ性状もせん断耐力に大きく影響していると考えられる。

3.3 せん断耐力の考察

以上の通り、文献 1) にしたがって耐力比を 1 ～5 として板を設計しても実際にはせん断で壊れることがなかった。これに関して、等分布荷重を受けるはりのせん断耐力および FEM 弾性計算による断面力分布から考察を行った。

斉藤らは多点荷重を受けるはりのせん断耐力

を二羽らの提案式をもとに計算する手法を提案しており、等分布荷重を受ける場合にも適用できることを示している⁵⁾。これによれば、せん断耐力とともに、破壊位置をある程度推定することも可能である。計算方法の詳細についてはここでは省略するが、適用に当たっては、せん断スパン比が 2.5 以下でディープビームの式を、それ以上ではりの耐力式を適用した。また、等分布荷重を集中荷重に置き換える際の分割数は、計算結果がほぼ一定値に収束する 20 分割とした。

表－5 に計算結果をまとめて示す。計算耐力は表－1 で示した計算耐力の 1.4～1.6 倍となっているが、いずれも実験値を下回っている。表に示した破壊位置とは、せん断破壊面と有効高さの d の 1/2 点が交わる位置の、支承からの水平距離であり、せん断耐力と発生するせん断力の比が最も小さくなる位置である。いずれの試験体も支承から 100mm 前後の位置で破壊が発生するとの結果が得られた。

図－6 は弾性 FEM 解析によるせん断応力度の分布を示している。図－6 左は辺中央から板中央に至る線上の分布で、2 対辺単純支持（はり）の場合と比較した。板の方が発生せん断応力度は全体に小さく、特に表－5 で明らかになった、はりの場合の破壊位置（支承から 100mm 前後）では、両者の差が最も大きくなっている。

図－6 右は、支承から 100mm の位置で板の辺と平行した線上のせん断応力度（せん断力の方向は図－6 左と同じ）の分布を示している。参考に板の縦横比が 1:2 の場合の値も併記した。これによれば、せん断応力度は辺の中央で最も大きくなるが、そこから離れると急激に低下することが分かる。このようなせん断応力の分布性状が板のせん断耐力に大きく影響していると考えられる。縦横比が 1:2 の場合は、辺中央にほぼせん断応力度一定の区間が生じるため、壊れ方もはりに近い挙動になることが予想される。

4. まとめ

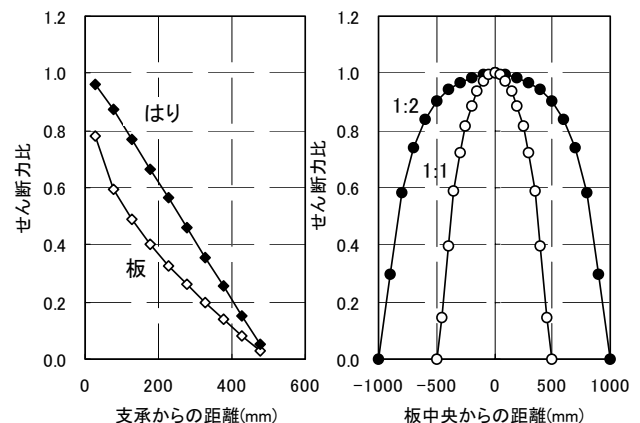
ゴムバッグを用いた正方形 RC 板の等分布荷

表－5 せん断耐力計算値

試験体名	実験値 kN	計算値 kN	破壊位置 mm
B-1(x)	191 ^{*1}	160	100
B-1(y)		140	80
B-2(y)	170 ^{*1}	120	90
S-1(x)	691 ^{*2}	320	110
S-1(y)		260	80

*1：曲げで破壊

*2：ゴムバッグの制限により未破壊



図－6 せん断応力度の分布

重載荷試験を行い以下の点が明らかとなった。

- (1) 板の曲げ耐力は、MacGregor 等の方法あるいは降伏線理論によって安全側に評価できる。
- (2) 平板理論による断面力と、はりのせん断耐力を用いた方法で求めたせん断耐力は、実験値を過小に評価する。
- (3) 弾性 FEM 解析により、板のせん断応力度の複雑な分布がせん断耐力に大きく影響していることが考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，1979
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【構造的な性能照査編】，2002.3
- 3) A. O. Aghayere, J. G. MacGregor : Analysis of Concrete Plates under Combined In-Plane and Transverse Loads , ACI Structural Journal, pp.539-547,1990
- 4) 土木学会：構造力学公式集，1986.6
- 5) 斉藤 啓一ほか：多点荷重を受ける RC はりのせん断耐力評価に関する研究，土木学会論文集，No.767，V-64，pp.87-98，2004.8