

# 支持条件や縦横比が異なる RC スラブの耐力に関する実験的考察

## An Experimental Study on Influence of Support Condition and Aspect Ratio to the Ultimate Strength of RC Slabs

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

土木営業推進部 樋口 昇 NOBORU HIGUCHI

4 辺単純, 4 辺固定, 2 辺単純支持条件の正方形 RC 板および縦横比 1:2 の 4 辺単純支持 RC 板の等分布荷重による載荷試験を実施し, 支持条件および縦横比が板の耐力に与える影響を検討した。実験の結果, 4 辺固定, 4 辺単純支持板ともに, 主鉄筋降伏荷重は降伏線理論による計算で精度良く算定できること, 2 辺単純支持板のせん断耐力は, 等分布荷重を複数の集中荷重に置換することで, 既往のせん断耐力式による評価が可能であることなどが分かった。

キーワード: RC 板, 分布荷重, 薄板理論, 降伏線理論, せん断耐力

In order to clarify influence of support condition and aspect ratio to ultimate strength of RC slab, the authors have conducted experiments on square and rectangular shaped RC slabs with simply or fixed supported under distributed loading. The results showed that yield line theory is applicable for predicting yielding load of four sides supported slab. The ultimate shear strength of two sides simply supported slab can be estimated using the conventional formula with transforming distributed load to plural concentrated load.

**Key Words:** RC Slab, Distributed Load, Thin Plate Theory, Yield Line Theory, Shear Strength

### 1. はじめに

著者らは, 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二方向板として設計を行うほうが合理的である。二方向板の使用限界状態の設計は, 2 次元弾性論に基づいた薄板理論による断面力に対して設計することが, 一般的に行われている。一方, 終局限界状態においては, 曲げ耐力に関して降伏線理論が用いられることが多い。

降伏線理論は, 鉄筋コンクリート床板の運動機構を曲率増分が無限大となる線状の降伏領域(降伏線)と剛体変位増分場のみによってつくり, この機構とつり合う荷重の大きさを求める方法であり, 曲げによる板の崩壊荷重を比較的精度良く求めることができる方法である。

一方, RC 板のせん断耐力については, 集中荷重が作用する場合の押し抜きせん断耐力についての検討が各種示方書等で規定されているのみである。押し抜きせん断

以外のせん断耐力の照査については, せん断力が比較的大きい支点の近傍において, それを幅の広い梁とみなして, 一方向の断面内でせん断力に抵抗すると仮定し, 棒部材のせん断耐力算定式を用いた検討が行われている。

著者らは, 4 辺単純支持した正方形 RC 板に全面等分布荷重が作用した場合のせん断耐力について実験検討を行い, 薄板理論による断面力と棒部材としての耐力を基に計算(以下, 簡易法と呼ぶ)した曲げ/せん断耐力比が 5 以上であっても板がせん断破壊しないことなどを明らかにした<sup>1),2)</sup>。すなわち, 現状の板の設計, 特にせん断耐力に関しては極めて不経済なものとなっている可能性があることを指摘した。

本研究では, 全面等分布荷重を受ける RC 板の耐荷挙動および耐力に支持条件や板の縦横比が与える影響を検討するため, 4 辺単純・固定および 2 辺単純支持の場合について載荷試験を実施した。試験体はいずれも簡易法による計算で曲げ/せん断耐力比が 1.0 以上となるように設計した。そして, これまでに実施した 4 辺単純支持正方形 RC 板の試験結果と合わせて, 耐荷挙動を詳細に

分析するとともに、その耐力について既往の耐力算定式などを用いて考察した。

## 2. 実験の概要

### (1) 試験体の概要

試験体は、4辺固定支持および2辺単純支持の正方形RC板と、4辺単純支持で辺長1:2の長方形RC板の合計4体とした。これとは別に、鉄筋を有しないコンクリート板の耐力を確認するため、4辺単純支持の正方形コンクリート板の試験も実施した。

試験体の載荷面の大きさは、等分布荷重載荷用のゴムバッグの大きさに合わせて1,000mm×1,000mmを基本とした。比較用の4辺単純支持正方形RC板は、筆者らが過去に実施したRC板の等分布荷重載荷試験のうち、今回実施した4辺固定RC板と同程度の断面諸元を有するものとした。比較用の試験体と合わせてその形状寸法を図-1に示す。

4辺固定支持板の厚さは80mmで、主鉄筋および配力筋にD6を用いた。鉄筋は圧縮側および引張側にそれぞれ75mm間隔で配置し、板周囲の鉄筋コンクリート部材内に十分な長さを埋め込み定着した。

辺長比が1:2である4辺単純支持長方形板の厚さは120mmで、D13の鉄筋を50mm間隔で配置した。2辺単純支持板の厚さおよび鉄筋配置はこれと同じとしている。2辺単純支持板の幅は920mmであり正方形ではないが、これはゴムバッグの辺長に幅を合わせることで、全幅にわたって分布荷重が作用するように配慮したためである。

比較用の4辺単純支持板の厚さは80mmで、鉄筋はD6を110mm~120mm間隔で配置している。

鉄筋を有しないコンクリート板の厚さは100mmで、載荷面の大きさは1,000mm×1,000mm、板自体の大きさは1,400mm×1,400mmである。

### (2) 試験体の設計

試験体の耐力を、あらかじめ簡易法と降伏線理論により求めた。薄板理論による正方形板の最大断面力とその発生位置を、梁理論による2辺単純支持の場合とともに表-1にまとめた。表-1から、4辺単純支持よりも4辺固定支持のほうが曲げおよびせん断力ともに断面力が大きくなり、また、曲げモーメント最大位置が辺中央に移動することが分かる。一方、4辺単純支持で辺長1:2の場合、最大曲げモーメントはさらに大きくなり、2辺単純支持のそれに近づく。最大せん断力は短辺中央で発生し、2辺単純よりも大きくなるのがわかる。長辺中央でも最大せん断力は0.525であり比較的大きい。

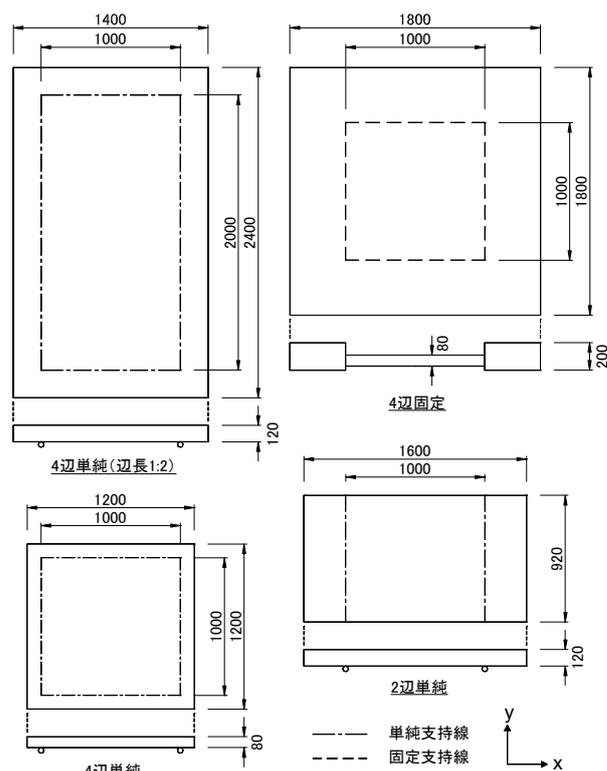


図-1 試験体形状寸法

表-1 薄板理論による板の断面力最大値

支持条件	曲げモーメント		せん断力	
	×pa <sup>2</sup>	位置	×pa	位置
4辺単純	0.0479	辺中央	0.338	辺中央
4辺固定	0.0513	板中央	0.440	辺中央
4辺単純1:2	0.0970	板中央	0.550	短辺中央
2辺単純*	0.1250	支間中央	0.500	支承部

pは分布荷重強度、aは1辺の長さ、\*2辺単純は梁理論による

これらの断面力と等分布荷重の大きさの関係をもとに、曲げ耐力については最大曲げモーメントを式(1)で、せん断耐力についてはコンクリート標準示方書の棒部材の設計せん断耐力の式を用いて簡易に計算し、それぞれの耐力を求めた。

$$M = A_s \cdot f_y \cdot \frac{7}{8} \cdot d \quad (1)$$

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

4辺支持の試験体は2方向の鉄筋量がほぼ同じであることから、耐力は2方向の平均とした。また、鉄筋のない供試体の耐力は、最大曲げモーメントをひび割れ発生モーメントとして計算した。なお、ここで用いている簡易法は、曲げモーメントやせん断力に抵抗する断面が一方向であると仮定しており、二方向板としての影響を一切考慮していないため、耐力を過小に評価することが

表-2 試験体の概要

項目	単位	4 辺単純(4S)		4 辺固定(4F)		4 辺単純(4S-Rec)		2 辺単純(2S)		4 辺単純(4S-NR)	
		x 方向	y 方向	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		120		120		100	
辺長	mm	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	2,000	1,000	920	1,000	1,000
鉄筋	—	D6@75	D6@75	D6@75	D6@75	D13@50	D13@50	D13@50	—	—	—
有効高さ	mm	67	61	67	61	100	87	100	—	—	—
計算曲げ耐力*1	kN	131		402		2,112		—		177	
計算曲げ耐力*2	kN	125		157		1,701		594		154	
計算せん断耐力	kN	133		121		493		232		—	

注：1 行目支持条件に続く括弧内記号は試験体名。\*1 は降伏線理論，\*2 は簡易法による計算曲げ耐力。

分かっている<sup>1),2)</sup>。

表-2 に、それぞれの試験体の断面諸元および計算耐力を示した。コンクリートおよび鉄筋の特性値は材料試験結果を用いて計算した。

本研究では主に板のせん断耐力に着目するため、4S を除きいずれの試験体もせん断破壊が先行するように、また、試験体の耐力が、ゴムバッグの能力である 677kN (=0.8MPa×Ag, Ag はゴムバッグによる接触面積) を超えないように板厚さおよび鉄筋量を設定した。

### (3) 載荷試験の概要

等分布荷重は市販のゴムバッグ (写真-1) を用いて模擬した。ゴムバッグは正方形平板の形状で、外寸は 950×950mm、接触面の大きさは 920×920mm 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。

載荷方法を図-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、試験体を PC 鋼棒で床に固定した後、ゴムバッグを膨張させることで等分布荷重を作用させる。4 辺固定支持試験体の場合は、周囲の RC ブロックを PC 鋼棒で床に固定する。2 辺単純支持試験体の場合は、試験体に載せた支承付きの H 形鋼を PC 鋼棒で固定する。いずれも PC 鋼棒位置にはすべてセンターホール型の荷重計を設置し、その合計値を載荷荷重と定義した。

載荷の際に各荷重計の値がばらつくとも試験体に本来作用しないねじり荷重等が作用する可能性があるため、載荷初期に PC 鋼棒のナットの開け閉めで荷重が均等になるよう調整した。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 辺単純支持の支承は、H 形鋼に固定した φ30mm の丸棒で、試験体と丸棒の間に幅 100mm の載荷板を挟んだ。



写真-1 ゴムバッグ

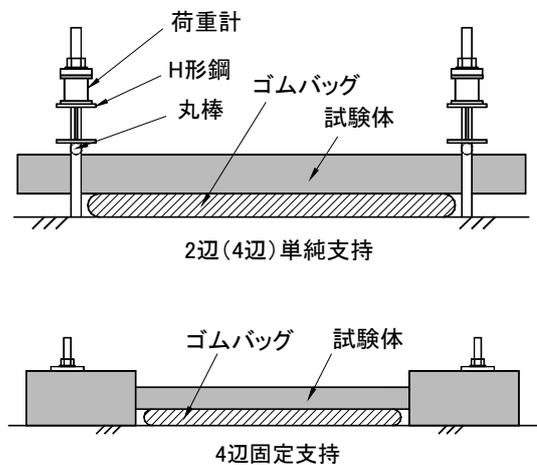


図-2 載荷方法模式図

表-3 コンクリートの材料特性値

試験体名	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
4F, 2S	32.5	2.75	26,700
4S	28.3	2.36	25,800
4S-Rec	36.5	3.21	30,667
4S-NR	39.1	3.08	32,033

載荷は一方方向の単調とし、一定の圧力ごとに板中央の面外方向の変位、載荷荷重、鉄筋およびコンクリート表面のひずみを計測した。

コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-3、表-4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13mmとした。

表-4 鉄筋の材料特性値

試験体名	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
D6	340	517	172000
D13	372	535	191300
D6(4S)	354	537	190200

### 3. 実験結果と耐力の考察

#### (1) 4辺固定支持

図-3に4F試験体の板中央変位と荷重の関係を示す。また、図-4に鉄筋のひずみ分布を示した。100kN付近で最初のひび割れが生じた後、徐々に変位の増加が大きくなり、370kNで板中央部鉄筋が、400kNで辺中央部の鉄筋が降伏した。その後も荷重は増加し、561kNで押し抜きせん断破壊して荷重が大きく低下したため試験を終了した。

図-3には、各方法で計算した耐力も併記した。簡易法による曲げあるいはせん断耐力は、耐力をかなり安全側に評価することが分かる。一方、降伏線理論により曲げ耐力を求める方法では、塑性モーメントを鉄筋の降伏で規定すると鉄筋が降伏する荷重を比較的精度良く推定できることが分かった。

鉄筋が降伏した後も耐力が上がる理由は、板が3次元的に変形することにより生じる面内力の効果のほかに、鉄筋ひずみが硬化領域に入り、鉄筋応力が降伏点応力以上になっていることなどが指摘されている<sup>3)</sup>。参考までに、鉄筋が引張強度(512N/mm<sup>2</sup>)に達していたと仮定した場合の降伏線理論による計算耐力は、実験耐力をやや上回る581kNとなる。

図-5に示すひび割れ状況と、破壊後の試験体の切断面の観察から、押し抜きせん断破壊面は辺の近傍でほぼ45°の角度で生じていることから、せん断スパン比(載荷点から支承前面までの距離)が極めて小さいディーブビーム的な破壊機構であることが予測される。そこで、ディーブビームのせん断耐力式<sup>5)</sup>を用いてせん断耐力の再計算を行った。当該式中の $a_v$ (荷重作用点から支承全面までの距離)についてはひび割れの状況から板厚さである80mmを仮定した。計算値は532kNと実験結果と比較的近い値が得られ、全面等分布荷重における押し抜きせん断耐力評価の一つの可能性が示された。しかしながら、この場合のせん断スパン $a_v$ の取り方については検討が必要である。

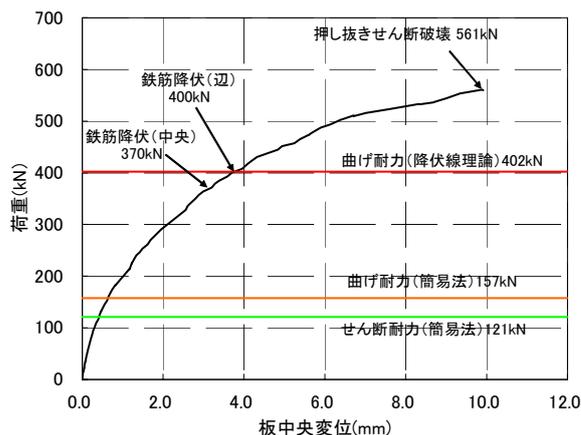
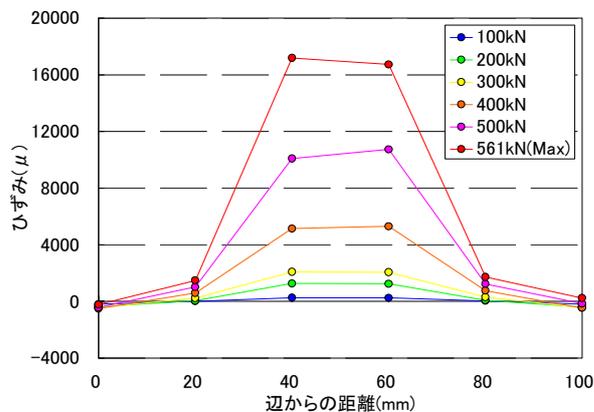
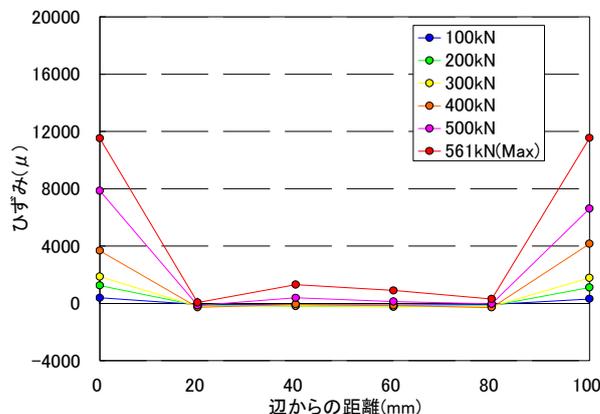


図-3 荷重—板中央変位 (4F)



(a) 開放面側鉄筋



(b) 載荷面側鉄筋

図-4 鉄筋ひずみ分布 (4F)

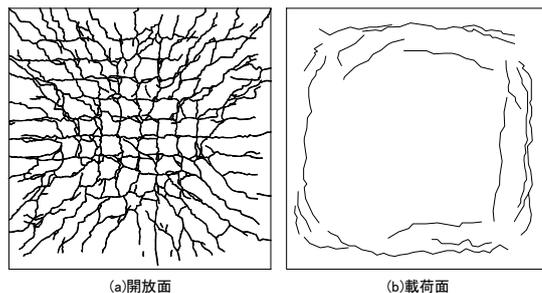


図-5 最終ひび割れ状況 (4F)

(2) 4 辺単純支持

図-6 に 4S 試験体の板中央変位と荷重の関係を示す。40kN 程度でひび割れが生じ、その後 127kN で板中央において鉄筋が降伏した。鉄筋降伏後も荷重は増加し、191kN で板の載荷側面のコンクリートが圧縮破壊した。本試験体においても、鉄筋の降伏時荷重を降伏線理論によって精度良く求められることが分かった。

参考までに、(1)と同様に鉄筋が引張強度(537N/mm<sup>2</sup>)に達していたと仮定した場合の降伏線理論による計算耐力は実験最大荷重とほぼ同じ 199kN となる。また、(1)と同様にディープビームのせん断耐方式により求めた押し抜き計算耐力は実験耐力を大きく上回る 564kN となった。

(3) 2 辺単純支持

図-7 に 2S 試験体の板中央変位と荷重の関係を示す。2S 試験体は、100kN 付近から支間中央付近でひび割れが生じはじめたが、その後も剛性が低下することなく荷重が増加した。450kN 付近で、試験体側面に斜めひび割れが観察されたがその後も荷重が増加し、577kN で斜めひび割れ部分においてせん断ずれを生じて荷重が急激に低下した。

図-7 に示した簡易法によるせん断耐力は、実験耐力を大きく下回っている。参考までに、せん断耐方式にディープビームの式を用いた場合の計算耐力は、 $a_v$  を断面高さ(120mm)とすると、495kN となる。(2)でも述べたとおり、この場合のせん断スパン  $a_v$  の取り方については検討が必要である。

齋藤ら<sup>6)</sup>は等分布荷重を多点の集中荷重に置き換えて梁のせん断耐力を計算する手法を提案している。これは、梁のせん断耐力がせん断スパン比  $a/d$  の影響を受けるのは、支承反力の影響が主であるという点を考慮し、ある任意の位置の梁のせん断強度を、置き換えた任意の集中荷重によって発生する支承反力の影響によるものと、その集中荷重によって発生する作用せん断力の影響によるものの和で表すものである。せん断強度を求める梁の任意の位置とそのとき考慮する集中荷重および支承反力の位置との関係で決まる  $a/d$  の値を用いて、式(2)および式(3)でせん断強度を計算し、値の大きい方をその位置でのせん断強度とする。

$$V_{cal} = 0.20 \cdot (p_w \times f_c')^{1/3} \times (d/1000)^{-1/4} \times [0.75 + 1.4 \times (a/d)] \times b \times d \quad (2)$$

$$V_{cal} = 0.24 \cdot f_c'^{2/3} \times (1 + 3.33 \times r/d) \times (1 + \sqrt{p_w}) \times b \times d / [1 + (a/d)^2] \quad (3)$$

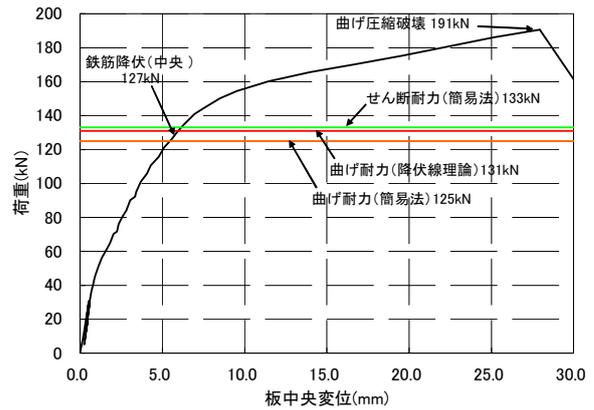


図-6 荷重—板中央変位 (4S)

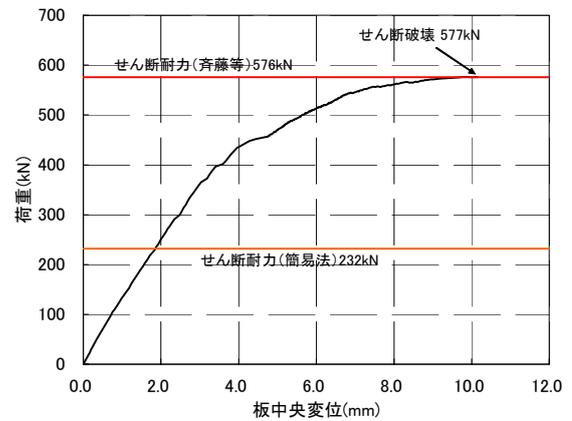
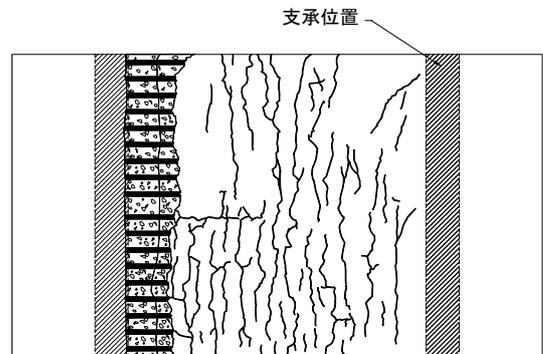


図-7 荷重—支間中央変位 (2S)



(a)開放面ひび割れ図



(b)側面写真

図-8 ひび割れ状況 (2S)

ここに、 $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度、 $p_w$ ：鉄筋比、 $b$ ：部材の幅、 $r$ ：支承や載荷板の長さ、 $a$ ：せん断スパン、である

各集中荷重に対して求めたせん断強度と、その位置の作用せん断力の比 ( $Z$ ) を合算して、その値が最も大きくなる位置がせん断破壊位置の計算値で、その値が 1.0 となる荷重の大きさがせん断耐力の計算値となる。なお、等分布荷重を集中荷重に置き換える際の分割幅は、10mm とした。

図-9 に、計算した 2 辺単純支持板の  $Z$  の分布を示す。図より、 $Z$  の最大値は支承から 190mm の位置となり、この位置でせん断破壊することが予測された。この場合のせん断破壊の位置の定義は、せん断破壊面と有効高さ  $d$  の 1/2 点が交わる位置であるが、図-8 に示すとおり実験での破壊位置 (170mm) とほぼ一致した。また、せん断耐力の計算値は 576kN となり、実験耐力を良い精度で推定できることが分かった。

(4) 4 辺単純支持辺長 1:2

4S-R 試験体は、250kN 付近から板中央付近でひび割れが生じはじめ、その後 916kN まで載荷したが破壊に至らず、エアバッグの能力に達したため試験を終了した。最大荷重時の鉄筋のひずみは短辺方向中央で  $1,507\mu$  であり、降伏ひずみ ( $1,965\mu$ ) には達していなかった。

4S-R 試験体の計算せん断耐力は、簡易法では 493kN であるが、試験体の耐力はその荷重を大きく上回っており、他の試験体と同様に簡易法ではせん断耐力をかなり安全側に評価する可能性があることが分かった。

長方形板では、荷重を短辺方向だけで受ける一方向板としての性質が顕著になると言われており、コンクリート標準示方書では、短辺と長辺の比が 0.4 以下の 2 方向板が等分布荷重を受ける場合は一方向板に近似して断面力を求めて良いとしている。しかしながら、4S-R 試験体のように短辺と長辺の比が 0.5 であっても、せん断耐力は一方向板として計算したせん断耐力の 2 倍以上あることが分かった。

(5) 4 辺単純支持無筋

4S-NR 試験体の荷重と板中央変位の関係を図-11 に示す。図には板に発生したひび割れの模式図も併記した。4S-NR 試験体は、98kN で辺に平行するひび割れが縦横に発生し、変位が急増した (段階 1)。また荷重が上昇し 144kN で放射状のひび割れが発生して崩壊した。最終的なひび割れの性状は降伏線理論における降伏線によく似たものとなっていることが分かる。板の耐力は、降伏線理論による計算値 (177kN) に対して、段階 2 にお

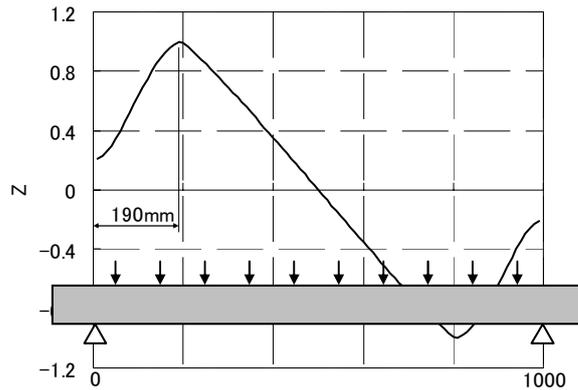


図-9 Z 値の分布

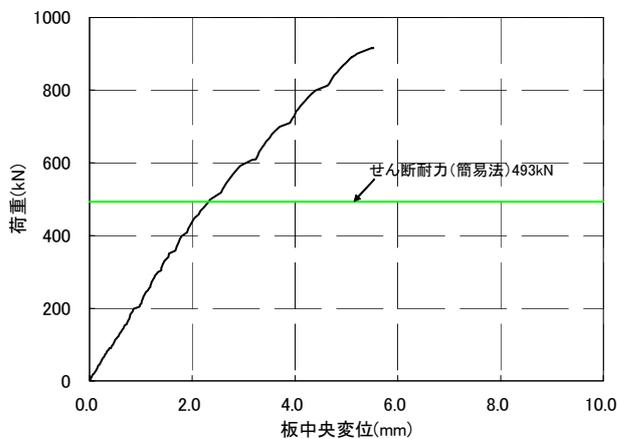


図-10 荷重—支間中央変位 (4S-R)

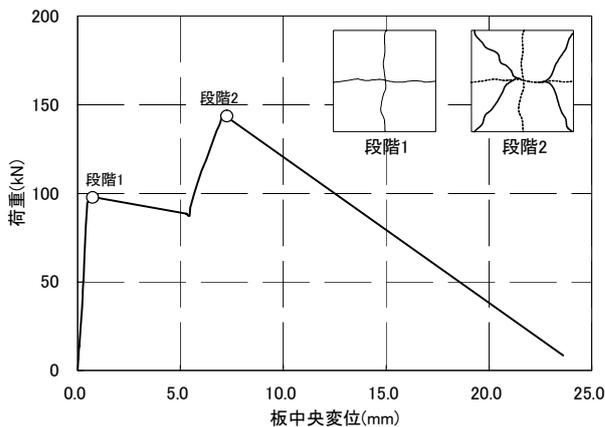


図-11 荷重—支間中央変位 (4S-NR)

ける荷重が比較的近い値を示していた。鉄筋の有無により、板のひび割れ性状が大きくことなること、その破壊挙動はせん断破壊と同様に脆性的であることが分かった。また、耐力は曲げ引張強度を用いた降伏線理論でおおむね評価できることが分かった。

#### 4. まとめ

ゴムバッグを用いて等分布荷重を再現した 4 辺固定支持、4 辺単純支持および 2 辺単純支持 RC 板の載荷試験を行い、その耐荷挙動および耐力について既往の計算式等を用いて考察した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- ① 4 辺固定、4 辺単純支持 RC 板の載荷荷重は、主鉄筋降伏後も上昇し、それぞれ押し抜きせん断破壊、曲げ圧縮破壊した。主鉄筋が降伏するときの荷重は、降伏線理論による計算曲げ耐力とほぼ一致した。
- ② 薄板理論による断面力と棒部材のせん断強度の組み合わせで 4 辺固定支持正方形板のせん断耐力を求める場合には、せん断強度の計算にディープビームの式を用いることで実験結果を評価できる可能性がある。この場合のせん断スパンの取り方については検討が必要である。
- ③ 2 辺単純支持 RC 板のせん断耐力および破壊の位置は、等分布荷重を複数の集中荷重に分割して、支承の影響なども考慮した齋藤らの方法でおおむね評価できることが分かった。
- ④ 4 辺単純支持で縦横比を 1:2 にしても、せん断耐力は簡易法の 2 倍以上あることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 篠崎裕生，三上浩，樋口昇：等分布荷重を受ける RC 板の耐力に関する実験的考察，三井住友建設技術研究所報告，Vol.4，pp.55-60，2006.9
- 2) 篠崎裕生，樋口昇，三上浩：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.391-396，2007
- 3) 小柳洽：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い，コンクリート工学，Vol.19，No.8，pp.8-13，1981
- 4) 谷村幸裕，渡邊忠朋，佐藤勉，棚村史郎：ケーソン基礎頂版のせん断耐力に関する研究，土木学会論文集 No.739/V-60，pp.153-163，2003.8
- 5) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，土木学会，2002
- 6) 齋藤啓一，高橋宏幸，石橋忠良，丸山久一，秋山充良，鈴木基行：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