

等分布荷重を受ける RC 板の耐力に関する実験的考察

Experimental Study on Ultimate Strength of RC Slab under Distributed Transverse Load

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

土木技術部 樋口 昇 NOBORU HIGUCHI

等分布荷重を受ける RC 板の終局耐力に関する実験的な研究は極めて少なく、設計法についても十分に整備されているとは言い難い。そこで、著者らは 4 辺単純支持正方形 RC 板のエアジャッキを用いた載荷試験を行い、その耐荷挙動を明らかにするとともに、これまでに提案されている耐力評価手法の検討を行った。その結果、平板理論に基づいた耐力算定法ではせん断耐力を過小評価すること、平面要素を用いた簡易な FEM 解析によって、RC 板の挙動をある程度の精度で評価できること、などが明らかとなった。

キーワード：RC 板，等分布荷重，耐力

There are extremely few studies on the ultimate strength of RC slab subjected to the distributed transverse load. Furthermore, there are several indecisive points in design standard for design technique of RC slab. Authors have, therefore conducted experiments on simply supported square RC slabs with air jack loading. The results showed that simplified FEM model using plane stress elements is applicable for prediction of loading behavior. Flat plate theory was found to extremely underestimated shear strength.

Key Words: RC Slab, Distributed Load, Ultimate Strength

1. はじめに

RC 板の破壊は、はり部材の破壊と同様に、鉄筋の降伏とコンクリートの圧縮破壊を生じる曲げ型のもので、押抜きせん断破壊に代表されるせん断型のものがある。

RC 板に面外方向の力が作用した時の荷重-変形関係の例を図-1に示す¹⁾。曲げひび割れが発生した後、ひび割れが進展し引張鉄筋の一部が降伏する。さらに荷重が増加すると板全体に降伏線が発展し降伏線理論によって計算される曲げ耐力に至り、その後急激に変形が増大して不安定な領域（段階IV）に達する。ここで、曲げ破壊に至る場合もあるが、荷重の作用領域がコーン状に押し抜けることが多い。載荷面積が小さくなるほど図-1の早い段階で押し抜け、脆性的な破壊となる傾向がある。また、曲げ降伏後に押し抜ける場合でも、十分な延性が期待できないため、この種の押抜きせん断破壊に対する研究は早くから精力的に進められてきた。

一方、載荷面積が比較的大きい場合は、一方向板あるいは二方向板として平板理論に基づいた簡易な式で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

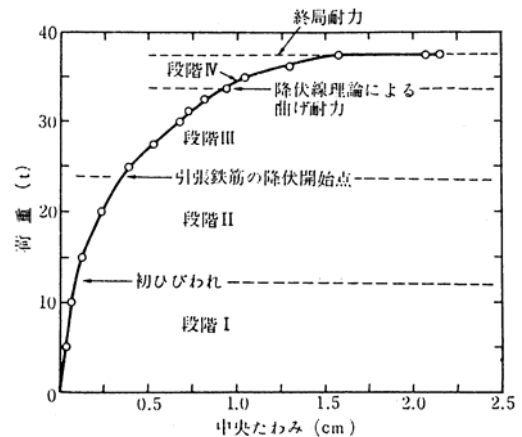


図-1 RC 板の荷重-たわみ曲線の例¹⁾

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。なお、平板の終局耐力については、降伏線理論による値よりも大きくなる¹⁾などの指摘もあるが、特に等分布荷重を作用させる実験の困難さから、十分な研究がなされている

とは言い難い。

一方、部分的な集中荷重が作用しない場合の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²⁾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³⁾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、RC板に生じるせん断応力度の取り扱い方法が異なっている。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もある。

以上のような背景から、ここでは等分布荷重を受ける4辺単純支持の正方形RC板の耐荷挙動を検討するとともに、その耐力について平板理論に基づく既往の提案式や非線形FEM解析などの結果を基に考察した。

2. 既往の耐力評価法

(1) 計算図表による方法²⁾

平板理論に基づいて作成された計算図表を用いてRC板に作用する断面力を求める方法である。前記の鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説では、本研究で対象とした4辺単純支持板の等分布荷重作用時の応力図として図-2が適用できる。参考までに、正方形板の場合、本計算図表で計算した曲げおよびせん断力は、等分布荷重を受けるはりとして計算した場合のそれぞれ28.8%、92%となり、曲げについては大きく低下するがせん断力については、ほぼ同じ値となる。

本研究で用いた試験体は、この方法によりRC板がせん断で破壊するよう断面を設計した。すなわち、試験体を一方向のはりとして計算した曲げ、せん断耐力と一致する断面力が作用するときの等分布荷重を計算図表により求め、その比(曲げ/せん断)が5以上になるように設定した。この際、一方向断面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。

(2) 降伏線理論による方法⁴⁾

鉄筋コンクリート床板の運動機構を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が降伏線理論である⁴⁾。この方法では、板周囲の健全な部分の拘束の影響や、面内力の効果などは考慮されていないが、板の耐力を簡易に、かつ比

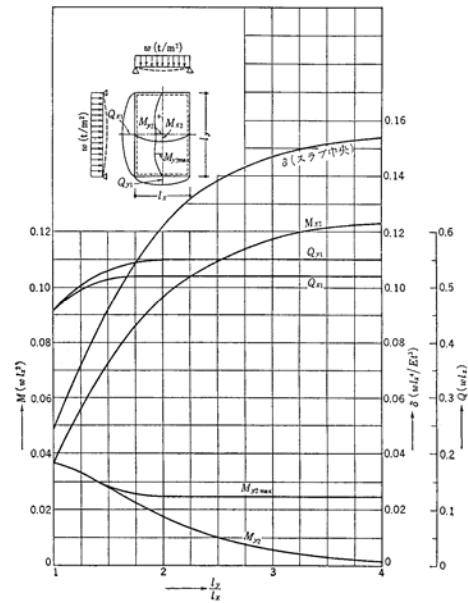


図-2 4辺単純支持の応力と中央点のたわみ²⁾

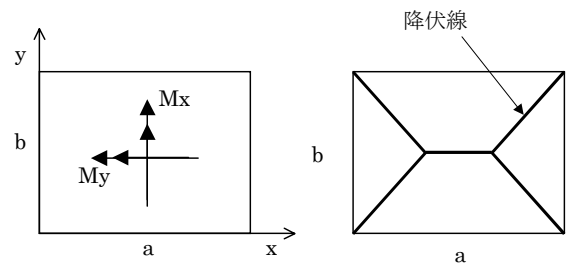


図-3 長方形板の降伏線

較的精度良く求めることができる。

長方形板の場合、降伏線は図-3のようになり、式(1)によって崩壊荷重の値が求められる。

$$P = \frac{24M_x}{a^2} \cdot \frac{1}{\eta^2} \quad (1)$$

ここに、

$$\eta = \frac{1}{\Lambda} (\sqrt{\beta^2 + 3\Lambda} - \beta), \beta = \frac{b}{a}, \Lambda = \frac{M_x}{M_y}$$

Pは崩壊荷重、 M_x 、 M_y は単位幅あたりの塑性モーメントである。ここでの計算では、降伏線理論が簡易な計算法であることを考慮して、 M_x 、 M_y は式(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。

(3) MacGregor^{5),6)}らの方法

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比較的簡易な方法で計算できることをMacGregor

らは示している。この方法は、まず、平板断面の x 方向、 y 方向それぞれのモーメント・軸力と曲率（ $M-N-\phi$ ）の関係を別途計算する。得られた関係から、面内力によって生じる x, y 方向の初期曲率 ϕ_{xi0} 、 ϕ_{yi0} をそれぞれ求めたあと、逐次曲率を増加させて行き、それぞれの曲率に一致する M_x および M_y から、式 (3) によって荷重を計算する。 ϕ_x と ϕ_y の関係およびたわみは式 (4) で求められる。

$$q = \frac{8}{b^2} \left[M_x - \frac{N_x b^2 (\phi_x + \phi_{xi})}{\pi^2} - N_x e_x \right] + \frac{8}{a^2} \left[M_y - \frac{N_y a^2 (\phi_y + \phi_{yi})}{\pi^2} - N_y e_y \right] + \frac{8\sqrt{M_x M_y}}{ab} \quad (3)$$

$$\phi_x = \frac{a^2}{b^2} \cdot \phi_y, \phi_x = \frac{\pi^2}{b^2} \cdot \delta, \phi_y = \frac{\pi^2}{a^2} \cdot \delta \quad (4)$$

ここに、 q は載荷荷重、 N は面内力、 e は面内力の偏心量、 δ は平板中央のたわみ、である。

ここで行った実験のように、面内力を考慮しない場合は式 (3) は式 (5) のようになる。

$$q = \frac{8}{b^2} M_x + \frac{8}{a^2} M_y + \frac{8\sqrt{M_x M_y}}{ab} \quad (5)$$

ここでは、 $M-\phi$ 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。

(4) 非線形 FEM による方法

現時点では、RC 板を直接離散化した FEM による手法が最も精度よく耐荷挙動を表現できるものと考えられる。ここでは、平面要素を用いた前川ら⁶⁾の方法を参考に、供試体の解析を行った。使用したソフトは DIANA で、コンクリートの構成則は前川モデル⁷⁾を用いた。解析モデルを図-4に示す。対称性を考慮し試験体の 1/4 をモデル化した。鉄筋はコンクリートとの完全付着を仮定している。コンクリートの引張軟化特性を表す係数およびせん断剛性低下率は、実験結果と合うように調整した値、 $c=1.5^8)$ 、 $\beta=0.4^8)$ とし、後で述べる 2 つの試験体で同じ値を用いた。なお、本解析結果はせん断剛性低下率の影響を比較的大きく受けることが事前に行ったパラメータ解析から分かった。

3. 実験の概要

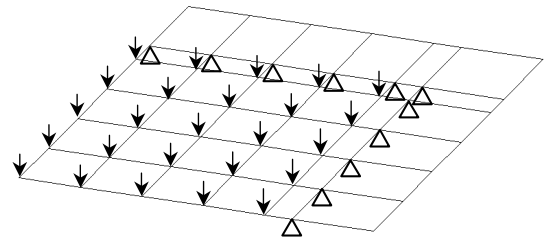


図-4 FEM モデル

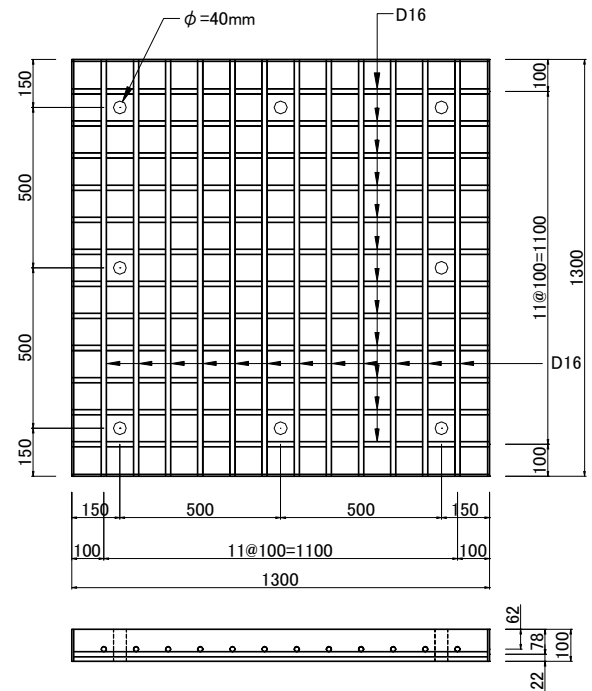


図-5 試験体の形状寸法

図-5に試験体の形状寸法を示す。試験体の板厚は 100mm で、曲げ/せん断耐力比が大きくなるよう鉄筋は D16 を 100mm ピッチで配置した。試験体は同じものを 2 体製作し、一体はエアジャッキによる載荷 (S1-Air)、もう一体は鉄板を介して油圧ジャッキで載荷した (S1-Oil)。図-6に各載荷方法を示す。エアジャッキは SPX 社製で大きさは 950 × 950mm (接触面大きさ 930 × 930mm) である。空気無注入時は厚さ 25mm の平板状であり、実験室の床と試験体の間にエアジャッキを挿入して載荷した。

試験体は、8 箇所に通した PC 鋼棒によって床と接続し、丸棒を配した H 形鋼にて支持されるようにした。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。

エアジャッキは圧力に制限 (0.8MPa) があるため、油圧ジャッキによって等分布荷重を模擬した載荷も行った。

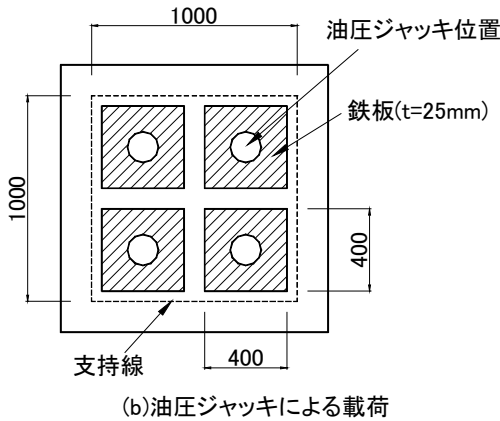
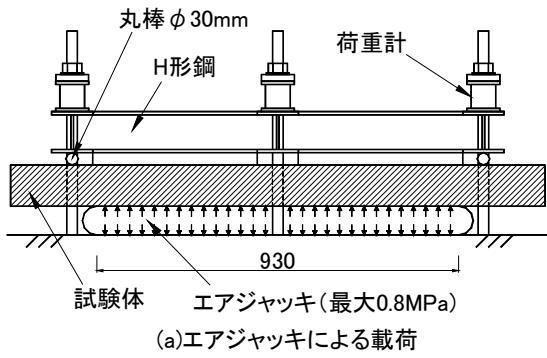


図-6 試験体の形状寸法

た。油圧ジャッキは計4台を図-6(b)に示す位置に、鉄板を介して配置した。鉄板の大きさは400×400mm、厚さ25mmで、比較的大きいため載荷時に鉄板の拘束や、鉄板自体の剛性が影響することが考えられたが、油圧ジャッキ頭部の押抜きせん断破壊を避けるためこの大きさとした。

コンクリートの材料特性値を表-1に示す。普通セメントを使用し、粗骨材の最大寸法は15mmとした。鉄筋の降伏強度および弾性係数はそれぞれ375N/mm²、190kN/mm²である。試験時は、載荷荷重を荷重計(図-6)で、鉄筋ひずみをひずみゲージで計測した。

表-1 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
S1-Air	27.4	2.83	25500
S1-Oil	29.8	2.71	27500

4. 実験結果と考察

(1) 耐力とひび割れ性状

図-7、図-8に圧力と中央点変位の関係を示す。図には、各手法による計算値を併記した。また、図-9に引張側面のひび割れの状況を示す。

図-7に示すS1-Air試験体は、0.1MPa付近でひび割れ

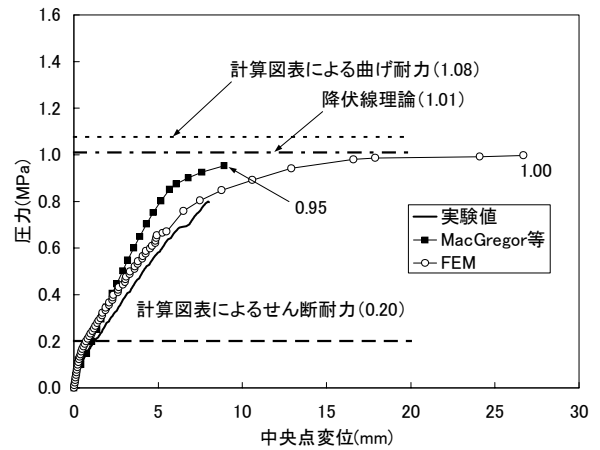


図-7 圧力-中央点変位関係 (S1-Air)

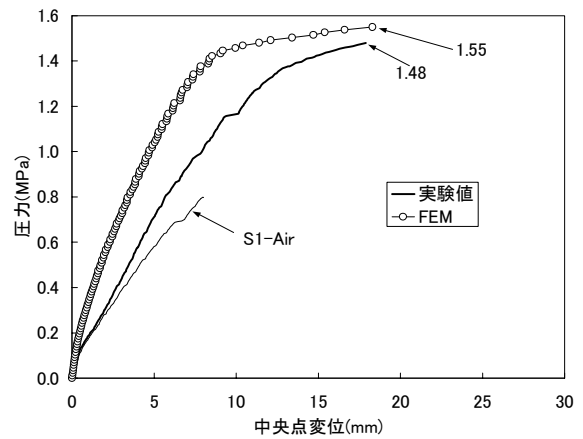


図-8 圧力-中央点変位関係 (S1-Oil)

が発生し始め圧力-変位の勾配が若干小さくなった後、その勾配を維持したまま0.8MPaに達した。0.5MPa程度からは新たなひび割れの発生が少なくなり、変位の増加とともにひび割れ幅と長さが進展する定常状態となった。ひび割れは、鉄筋位置に沿ったものが板中央付近から発生し始め、その後中央から四隅に向かって放射状に伸びるものが見られるようになった。

計算図表によるせん断耐力は0.2MPaであるが、最もせん断力が大きくなる辺の中央部においても、ひび割れの発生は見られず、健全な状態であった。FEM解析の結果は、ひび割れ後の剛性が実験とよく一致しており、耐力は1.0MPaとなった。これに対し、MacGregor等の方法では、剛性を硬めに評価する傾向があるが、耐力は0.95MPaとFEMの結果とほぼ一致した。簡易な手法である降伏線理論の値も1.0MPaで両者の結果とほぼ一致したが、計算図表による曲げ耐力はこれらの計算値よりも若干大きな値となっている。

図-8に示すS1-Oil試験体も0.1MPa付近からひび割れが生じ始め、若干剛性が低下するが、S1-Air試験体よりも大きな剛性を保持したまま1.1MPaで鉄筋が降伏ひず

みに達した。その後、鉄筋の降伏領域が徐々に広がりながら耐力はさらに上昇し、1.3MPa 付近からコンクリートの圧縮破壊が進行し、圧力の増加に対して変形量が大きくなった。最後は荷重用の鉄板が押し抜ける形で破壊した(写真-1)。

図-9に示すひび割れ状況をもとに、0.2MPa 時のひび割れを S1-Air 試験体と比較すると、鉄筋に沿ったひび割れが多く発生している。これは、油圧ジャッキの当たる位置や、荷重板が正方形であることなどが関係しているものと思われる。圧力が大きくなると鉄筋に沿ったひび割れがさらに増加し、放射状に進展するひび割れは支点近くのみが発生するようになっていく。これも荷重板の影響が大きいと考えられる。

S1-Oil 試験体の FEM 解析の結果は、実験値よりも剛性を高めに評価している。これは、FEM では、荷重鉄板とコンクリートを一体と仮定しており、実験では生じていると思われる鉄板とコンクリートのずれを考慮していないためと考えられる。FEM では、1.4MPa 程度で鉄筋が降伏ひずみに達し、それ以降剛性が大きく低下した。最終的な耐力は実験値とほぼ一致した。なお、S1-Oil 試験体の FEM 解析においては、荷重鉄板についてもモデル化している。

以上から、エアジャッキによる荷重では最終的な破壊荷重については確認できなかったが、計算図表によるせん断耐力は大きく上回っていることから、計算図表による耐力算定結果は過大な安全率を有することが分かった。また、終局耐力の計算値は、FEM、降伏線理論、MacGregor 等の方法には、大きな差異は認められなかったが、計算図表による方法は、耐力を若干大きめに評価することが分かった。

(2) 鉄筋ひずみと変形

図-10に S1-Air 試験体の鉄筋のひずみ分布を FEM の結果とともに示す。

圧力が 0.5MPa 程度までは、FEM 結果は実験値と比較的良く一致している。しかし、それ以降圧力が増加すると、実験値は板中央から支点に至るまで比較的フラットに鉄筋のひずみが増加するのに対し、FEM 値は RC 板の中央付近でひずみが急増し、支点に向かって大きな勾配でひずみが低下する傾向にある。FEM 値は実験値よりも早く鉄筋ひずみが降伏ひずみを超えていることがわかる。これは、FEM では支点をピンスライドで仮定しているのに対し、今回の実験ではスライド機構がないことから、面内の拘束力が比較的大きくなってフラットなひずみ分布となったものと考えられる。

図-11は、S1-Air 試験体の面外方向たわみの分布を

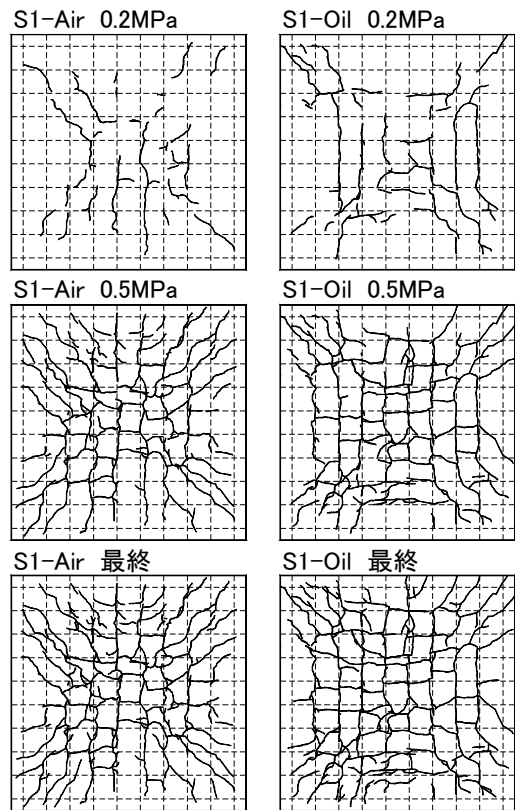


図-9 ひび割れの状況

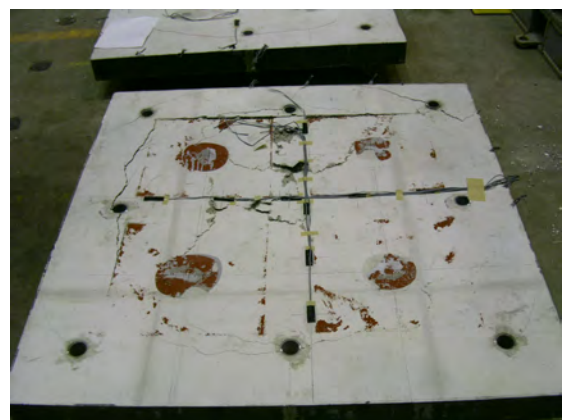


写真-1 破壊後の荷重面の状況 (S1-Oil)

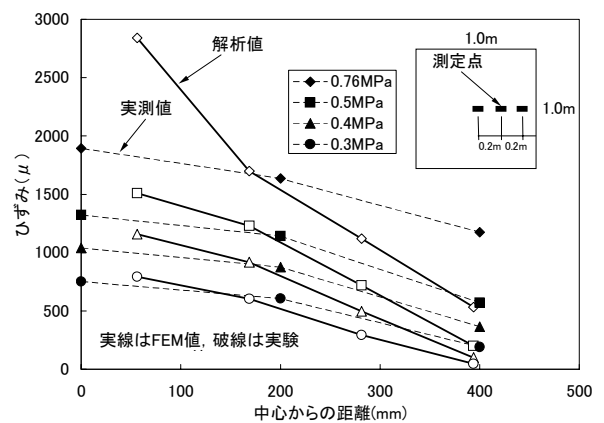


図-10 鉄筋ひずみの分布 (S1-Air)

FEM 結果とともに示したものである。同じ圧力で比較すると、全体的に実験値のほうが大きくなっているが、分布の傾向は FEM と比較的良く一致している。

以上、図-10、図-11 から、平面要素を用いた FEM 解析によってある程度の精度で RC 板の挙動を解析できることが分かった。しかしながら、平板構造の解析の場合、境界条件の設定やせん断剛性低下率などのパラメータの設定で結果が大きく変わる可能性があるため、注意が必要である。

5. まとめ

正方形 RC 板の等分布載荷試験および各種方法による耐力の評価を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ①計算図表によるせん断応力度からせん断耐力を計算する方法は、せん断力を過小評価する可能性がある。
- ②耐力の計算値は、降伏線理論、MacGregor 等による方法、FEM 解析でほぼ同じ値となった。計算図表による方法は、若干耐力を大きく評価することが分かった。
- ③ FEM 解析によってある程度の精度で RC 板の挙動を解析できることが分かった。しかしながら、境界条件の設定やせん断剛性低下率などのパラメータの設定で結果が大きく変わる可能性があるため、使用に当たっては留意する必要がある。

現在、エアジャッキで破壊まで載荷できるように、板の耐力を小さく設計した試験体の載荷試験を計画している。その試験では x 方向と y 方向の鉄筋比を変えた場合で破壊モードがどのように変化するか確認する予定である。今後、FEM 解析の精度を向上させるとともに、特に、板がせん断破壊する場合について検討して行きたい。

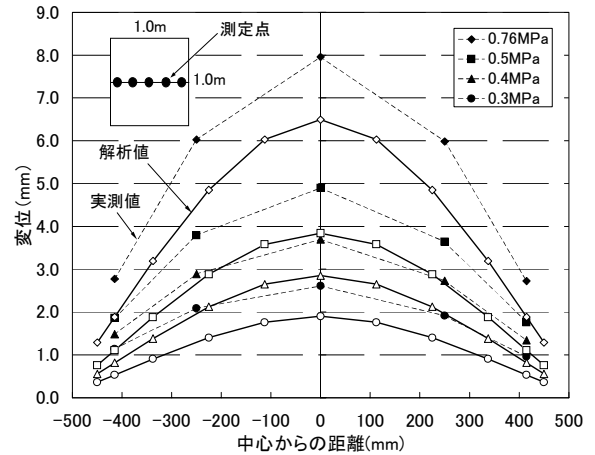


図-11 たわみの分布 (S1-Air)

参考文献

- 1) 小柳 治：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.9,No.8,pp.3-13，1981.8
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，1979
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【構造性能照査編】，2002.3
- 4) 土木学会：構造力学公式集，1986.6
- 5) A. O. Aghayere, J. G. MacGregor : Test of Reinforced Concrete Plates under Combined In-Plane and Transverse Loads, ACI Structural Journal, pp.615-622,1990
- 6) A. O. Aghayere, J. G. MacGregor : Analysis of Concrete Plates under Combined In-Plane and Transverse Loads , ACI Structural Journal, pp.539-547,1990
- 7) Paulus Irawan, Koichi Maekawa : Path-Dependent Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells , J. Materials, Concrete. Struct, Pavements, JSCE, No.557/V-34, pp.121-134, 1997.February
- 8) Okamura, H. and Maekawa, K. : Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete , Gihodo-Shuppan, Tokyo, 1990