

## [2104] 周辺水平拘束された一方向 RC 床スラブにおける圧縮 および引張薄膜効果に関する研究

正会員 ○ 楢谷栄次（関東学院大学工学部）  
同 町田恭一（関東学院大学工学部）  
和泉好彦（熊谷組横浜支店）

### 1. 緒言

はりや周辺の床スラブ等による境界拘束をもち、鉛直荷重を受けた鉄筋コンクリート床スラブの荷重ーたわみ曲線は、スラブの面内に生ずる圧縮薄膜効果によってJohansenの降伏線理論から得られた曲げ荷重より数倍高いピーク値に達する。その後、たわみの増加と共に、荷重は低下するが、引張薄膜効果によって再び比例的に増大する傾向を示す。RC床スラブの実験は、今までに実大RCスラブや小型RCスラブによって多く行われてきたが、この圧縮薄膜効果は或る仮定に基づいた推定値に過ぎず、未だ実験的に見い出されていない。また、引張薄膜効果に関する実験も極めて少なく、その挙動も不明な点が多い。

二方向RCスラブは、三次元応力状態になるため、これらの面内効果が加わると、非常に複雑になり、メカニズムを解明するのは大変むずかしい。したがって、二方向RCスラブを一方向スラブ（以後、帯スラブと呼ぶ）にモデル化を行い、二次元応力状態においてメカニズムを考えた方が取り扱い易くなると思われる。

本研究は、二方向RCスラブを帯スラブにモデル化した試験体を用いて実験を行い、圧縮薄膜効果と引張薄膜効果について調べた。特に、圧縮薄膜効果に関しては、この事実を確認すると共にいくつかの新しい知見が得られた。また、最大荷重に関して、帯スラブで得られた結果が二方向スラブに適用できることも確認された。ここでは、実験結果を中心にして以下に報告する。

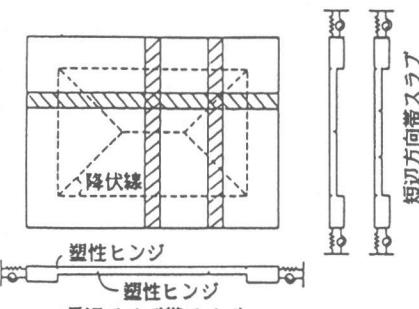


図1. 二方向スラブの帯スラブへのモデル化

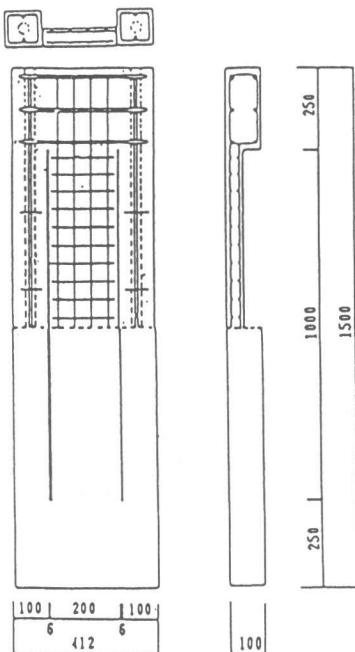


図2. 試験体寸法および配筋図

## 2. 二方向スラブの帯スラブへのモデル化

周辺をはりで水平拘束され、等分布荷重を受けたRCスラブは、図1に示すように、その端部上面に沿ってHogging-momentによるひび割れが発生し、下面にはSagging-momentによるひび割れが亀甲状に発生する。これらのひび割れは、塑性ヒンジに発展し、塑性メカニズムを形成する。これを帯スラブにモデル化するためには、短辺方向では、塑性ヒンジが端部と中央部に一箇所形成される帯スラブおよび塑性ヒンジが端部と中央部に二箇所形成される帯スラブを考え、長辺方向では、塑性ヒンジが端部と中央部に二箇所形成される帯スラブを考える。水平拘束ばかりは、スラブ面内に生ずる圧縮薄膜作用によって外側に移動し、引張薄膜作用によって内側に移動する。また、Hogging-momentも受ける。したがって、水平抵抗とモーメント抵抗を考慮しなければならない。これを帯スラブのスパン方向に配したタイビームにモデル化した（水平抵抗に対してアンボンドPC鋼棒、モーメント抵抗に対して上下の主筋）。また、帯スラブの塑性ヒンジの形成に対しては、形成位置に一点集中荷重または二点集中荷重を加えて、メカニズムに対応させた。

## 3. 帯スラブの実験概要

### 3. 1 試験体

幅が20cm、内法スパンが100cmと150cm、厚さが4cmと5cmの帯スラブの長辺方向端部を自由境界とし、短辺方向端部を25cm×10cmのはりで水平拘束し、これを10cm×10cmのタイビームで接合させた4タイプの試験体について、2タイプの載荷方法に対応させた合計12体（各タイプ2体づつ）の試験体を作成した。スラブの配筋は、図2に示すように、3φを5cm間隔で縦横に二段に配した。（厚さ5cm；Pt=0.28%、厚さ4cm；Pt=0.35%、降伏点強度；2600kgf/cm<sup>2</sup>）タイビームには、上端および下端にD10で補強し、中央部には、アンボンドPC鋼棒17φ（ヤング係数；2.2×10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>）を配した。セメントは、早強ポルトランドセメント、砂は川砂（粒径25mm以下）を使用し、砂-セメント比は2：1、水-セメント比は55%で鉄筋コンクリートスラブ試験体を作成した。試験体一覧を表1に示す。

### 3. 2 載荷方法および測定方法

内法スパン100cmの帯スラブには、三等分二点集中荷重および中央部一点集中荷重（いずれも線荷重）、また、内法スパン150cmの帯スラブには、三等分二点集中荷重をオイルジャッキ（10ton）によって載荷した。

測定方法としては、スラブの端部上下面および中央部下面にひずみゲージを貼り、また、同位置にバイゲージを取り付け、コンクリート表面のひずみを測定し、また、スラブの端部上端鉄筋と中央部下端鉄筋にひずみゲージを貼り、鉄筋のひずみを測定した。同様に、タイビーム中のアンボンドPC鋼棒の中央部にひずみゲージを貼り、ひずみの測定を行い、これより、スラブに生

表1. 試験体一覧

| 試験体名     | スラブ厚<br>D(mm) | 内法スパン<br>L(mm) | 載荷方法   | コンクリート<br>圧縮強度<br>fc<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|---------------|----------------|--------|--|
| 50-S-2-1 | 50            | 1000           | 二点集中荷重 | 607.9  |
| 50-S-2-2 | "             | "              | "      | 531.2  |
| 50-S-1-1 | "             | "              | 一点集中荷重 | 460.0  |
| 50-S-1-2 | "             | "              | "      | 476.7  |
| 40-S-2-1 | 40            | "              | 二点集中荷重 | 607.9  |
| 40-S-2-2 | "             | "              | "      | 573.1  |
| 40-S-1-1 | "             | "              | 一点集中荷重 | 446.4  |
| 40-S-1-2 | "             | "              | "      | 536.2  |
| 50-L-2-1 | 50            | 1500           | 二点集中荷重 | 562.0  |
| 50-L-2-2 | "             | "              | "      | 503.4  |
| 40-L-2-1 | 40            | "              | "      | 501.8  |
| 40-L-2-2 | "             | "              | "      | 463.7  |

する薄膜応力を検出した。たわみは、内法スラブの六等分点に設置されたピストン形変位計によって測定し、荷重-たわみ曲線をX-Yレコーダーで描かせた。

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 荷重とたわみの関係

本実験から得られた4タイプのRCスラブ試験体(50-S-2, 50-S-1, 40-S-2, 40-L-2)の荷重-中央点たわみ曲線を図3に示した。これらの図において、ひび割れがスラブの端部上面に発生後、剛性を減じながらスラブ面内に生じた圧縮薄膜応力の増加と共に、荷重は増大し、たわみがスラブ厚さの0.25~0.38で最大荷重に達する。その後、たわみを増加させると、荷重は低減し始め、最大荷重直後にArching-through現象が起き、荷重は急激に低下する。これは、スラブ内に形成されるアーチが座屈現象を生じ、アーチ効果が急激に低下したためと考えられる。さらにたわみを増加させると、圧縮薄膜応力の低減と共に、荷重は減じ続けるが、たわみがスラブ厚さの0.63~1.21になると、荷重は増加し始め、荷重はほぼたわみに比例して増加する。これは、スラブ内の中央部鉄筋がフルテンションとなって、引張薄膜効果が生じ、荷重を増大させている。終局たわみは、中央部鉄筋の破断時と考えられるが、測定限界たわみを最終とした。

#### 3.3.2 圧縮薄膜効果

RCスラブの面内に生ずる圧縮薄膜応力(アーチ作用)は、端部の水平ばりにおいてスラストを生じ、これがタイビームには引張応力として作用する。この応力はタイビーム中のPC鋼棒に貼り付けられたひずみゲージより解析することが出来る。図4は、試験体(50-S-2, 40-S-2)について、タイビーム中のPC鋼棒から求められた薄膜応力と中央点たわみの関係を描いたものである。ここに、タイビーム中の上下の主筋とコンクリート断面も引張抵抗があるので、PC鋼棒から得られた値は、実際の圧縮薄膜応力より小さく評価されているが、ここでは圧縮

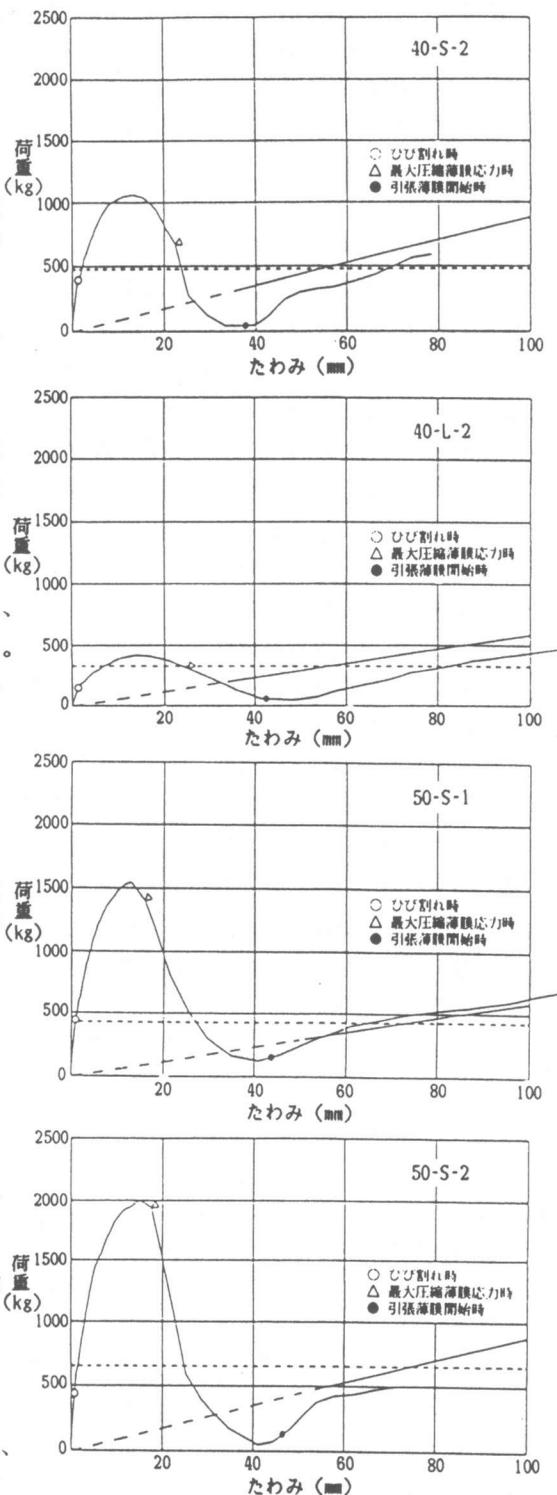


図3. 荷重-中央点たわみ図

薄膜応力として取り扱う。この図から、圧縮薄膜効果はたわみの初期から生することが確認される。また、荷重-中央点たわみ曲線を比較すると、圧縮薄膜応力の最大値は、最大荷重時と一致せず、最大荷重後に現れ、圧縮薄膜応力が最大に達したときに Arching-through 現象が起きることが認められた。これは、スラブ面内に形成されたアーチの座屈現象を示す。この図では、たわみの初期の段階で、引張薄膜効果が現れているが、他のスラブでは初期段階から圧縮薄膜効果が現れているものもあり、P C 鋼棒の締め付けの影響によるものと思われる。

圧縮薄膜効果は、スラブ厚さ、鉄筋量、境界拘束に大きく影響されるが、50-S-2と40-S-2の圧縮薄膜応力を比較すると、スラブ厚さの大きい前者が後者より大きな値を示していることからもスラブ厚さに関しては明らかである。また、一点集中荷重と二点集中荷重の両者について比較すると、前者は後者より小さく発現している。

### 3. 3. 3 引張薄膜効果

図4の荷重-たわみ曲線において、圧縮薄膜応力が減少し、スラブの中央部におけるひび割れが全断面を貫通すると、薄膜応力は圧縮から引張に転じカテナリー作用を生ずる。中央部の配筋は、たわみが増大すると、大きな伸びを受け、降伏点応力を越え、ひずみ硬化を生じ、引張薄膜応力も増大する。したがって、引張薄膜効果は中央部の鉄筋の引張応力に比例する。ここでは、帯スラブの中央部の塑性ヒンジにおける内部エネルギー逸散と外部荷重によるエネルギー逸散を等しくおくことによって、次の引張薄膜効果を考慮した終局強度式を得た。<sup>2)</sup>

$$\text{一点集中荷重: } P = 4 a t \cdot \sigma_y \cdot w_0 / L$$

$$\text{二点集中荷重: } P = 6 a t \cdot \sigma_y \cdot w_0 / L \quad (1)$$

ここに  $a t$  はスラブ中央部の全鉄筋断面積、 $\sigma_y$  は鉄筋の降伏点強度、 $w_0$  はスラブの中央点たわみ、 $L$  はスラブの内法スパンを示す。(1)式より計算された値を図3に破線でプロットしたが、引張薄膜効果が大きく現れている部分で実験値を(1)式による理論値が比較的良く近似しているのが認められる。引張薄膜効果は、薄膜応力-中央点たわみ曲線において、薄膜応力が圧縮から引張に転ずる点が引張薄膜応力開始点と考えられ、荷重-中央点たわみ曲線で

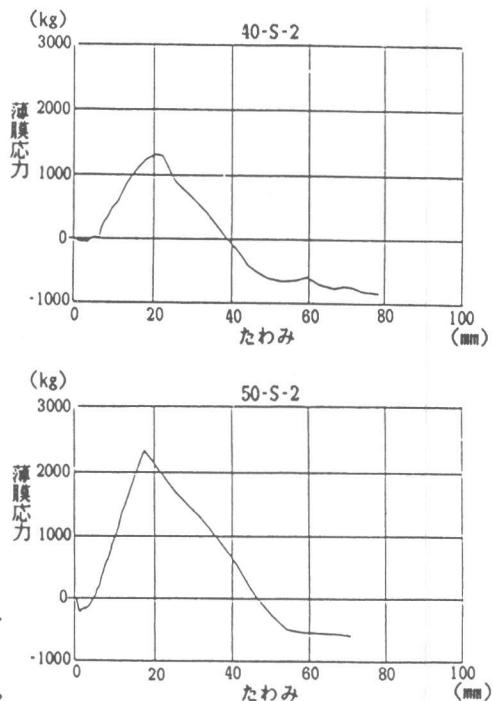


図4. 薄膜応力-中央点たわみ図

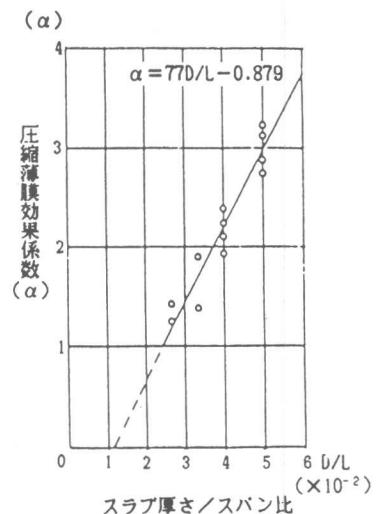


図5.  $\alpha$  と  $D/L$  の関係

は荷重の最小値に対応している。

### 3.3.4 最大荷重とスラブ厚さ／スパン比の関係

帯スラブの荷重-中央点たわみ曲線において、圧縮薄膜効果によって荷重が最大になるときの最大荷重、たわみおよび圧縮薄膜応力、両端固定と仮定した崩壊メカニズムに基づいて、仮想仕事式から算出した曲げ終局強度に関して、12試験体の結果を表2にまとめた。また、最大荷重の曲げ終局強度に対する比( $P_e/P_j$ )とスラブ厚さの内法スパンに対する比( $D/L$ )の関係を図5にプロットし、これより得られた回帰式を次に示す。

$$P_e/P_j = 77D/L - 0.879 \quad (2)$$

最大荷重の曲げ終局強度に対する比は、圧縮薄膜効果を示している。この効果は、図5からスラブ厚さ/内法スパン比の増加と共に増大し、影響因子として相関性が高いことがわかる。また、圧縮薄膜効果がなくなる  $P_e/P_j = 1$  のとき、 $D/L$  はほぼ  $1/40$  になる。この値は、R. Park<sup>4)</sup>も述べており、本実験によって裏付けられたことになる。

### 4. 二方向RCスラブへの適用

#### 4.1 圧縮薄膜効果係数

(2)式で得られた  $P_e/P_j$  を圧縮薄膜効果係数  $\alpha$  と定義し、これを二方向RCスラブの圧縮薄膜効果に適用する。等分布荷重を受け、周辺を水平拘束された長方形スラブ(短辺スパン  $L_x \times$  長辺スパン  $L_y$ )の圧縮薄膜効果は、図6に示されているように、X方向は、最大で圧縮薄膜効果係数  $\alpha_x$  をもつ台形分布、Y方向は、最大で圧縮薄膜効果係数  $\alpha_y$  をもつ三角形分布と仮定する。これらの分布を等価な長方形分布に置換すると、その係数  $\bar{\alpha}_x$ 、 $\bar{\alpha}_y$  は次式で与えられる。

$$\bar{\alpha}_x = 1 + \frac{1}{2} (\alpha_x - 1) \left( 2 - \frac{L_x}{L_y} \right), \quad \bar{\alpha}_y = \frac{1}{2} (\alpha_y + 1) \quad (3)$$

(3)式で与えられた係数に対して、それぞれ降伏線で分割された荷重分布(X方向は台形分布、Y方向は三角形分布)を全荷重で除した比率を乗じ、総和を求める、二方向RCスラブの圧縮薄膜効果係数が次式のように導かれる。

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left[ 1 + \frac{1}{2} (\alpha_x - 1) \left( 2 - \frac{1}{\lambda} \right) \right] + \frac{1}{4\lambda} (\alpha_y + 1) \quad (4)$$

ここに、 $\lambda = L_y/L_x$  で辺長比を示す。これより、二方向RCスラブの圧縮薄膜効果は、(2)式の帯スラブの圧縮薄膜効果係数と辺長比によって与えられることがわかる。

表2. 最大荷重に関する結果

| 試験体名     | スラブ厚／スパン比<br>$D/L$ | 最大荷重時      |                 |               | 曲げ終局強度<br>$P_e(kg)$ | 圧縮薄膜効果<br>$P_e/P_j$ |
|----------|--------------------|------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------|
|          |                    | 圧縮薄膜応力(kg) | 荷重<br>$P_t(kg)$ | 中央たわみ<br>(mm) |                     |                     |
| 50-S-2-1 | 1/20               | 2374       | 2025            | 12.7          | 643                 | 3.15                |
| 50-S-2-2 | "                  | 1930       | 2000            | 15.0          | 646                 | 3.10                |
| 50-S-1-1 | "                  | 2278       | 1338            | 15.2          | 431                 | 3.10                |
| 50-S-1-2 | "                  | 1510       | 1550            | 12.9          | 429                 | 3.02                |
| 40-S-2-1 | 1/25               | 1293       | 1225            | 12.9          | 482                 | 2.55                |
| 40-S-2-2 | "                  | 1066       | 1038            | 15.2          | 488                 | 2.13                |
| 40-S-1-1 | "                  | 1362       | 669             | 13.2          | 325                 | 2.06                |
| 40-S-1-2 | "                  | 1254       | 775             | 10.0          | 325                 | 2.39                |
| 50-L-2-1 | 1/30               | 1020       | 850             | 14.9          | 429                 | 1.99                |
| 50-L-2-2 | "                  | 786        | 638             | 16.4          | 429                 | 1.49                |
| 40-L-2-1 | 1/37.5             | 326        | 420             | 13.5          | 325                 | 1.29                |
| 40-L-2-2 | "                  | —          | 475             | 13.7          | 327                 | 1.46                |

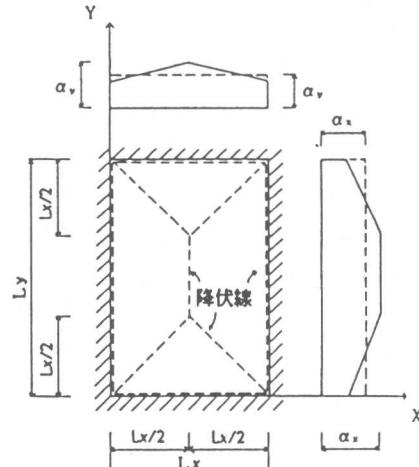


図6. 二方向スラブにおける圧縮薄膜応力の分布

## 4. 2 二方向RCスラブの

### 圧縮薄膜効果

本実験で用いられたRC帯スラブと全く同一の水平拘束ばかり、厚さ、スパン、鉄筋量をもつ正方形および長方形RCスラブについて、空気圧による等分布荷重で載荷して、圧縮薄膜効果に関して調べた既発表の実験結果を表3に示した。<sup>1)</sup>この表における理論値は、曲げ効果のみを考慮したJohansenの降伏線理論から計算されたものである。これらの二方向RCスラブに対して、(4)式を適用して得られた結果を同表に示した。これより、二方向RCスラブの圧縮薄膜効果は、帯スラブから導かれた圧縮薄膜効果係数によって与えられた値より若干大きく評価されている。これは、帯スラブのコンクリートの圧縮強度が二方向RCスラブのコンクリート圧縮強度より高く発現したためと思われる。これらの結果から、RC帯スラブから導かれた圧縮薄膜効果は、二方向RC長方形スラブの圧縮薄膜効果の評価に十分な精度をもって適用できると考えられる。

## 5. 結論

周辺を水平ばかりで拘束され、鉛直載荷を受けたRC帯スラブの実験から、圧縮および引張薄膜効果に関して、以下の事柄が示唆される。

- (1) 圧縮薄膜効果は、たわみの初期から生ずる。
- (2) 圧縮薄膜応力の最大値は、最大荷重と一致せず、最大荷重後に現れる。
- (3) 圧縮薄膜応力が最大に達したとき、Arching-through現象が生ずる。
- (4) 荷重ーたわみ曲線において、引張薄膜効果の開始点と荷重が最小になる点がほぼ一致する。
- (5) 引張薄膜応力は、スラブ中央部の全鉄筋が降伏したと仮定して、仮想仕事法より導いた式と良く一致する。
- (6) 端部のはりの水平剛性を一定とした帯スラブの圧縮薄膜応力は、スラブ厚さ／内法スパン比とほぼ線形関係にあり、スパンの1/40のときなくなる。
- (7) 二方向RCスラブの圧縮薄膜効果は、帯スラブによって得られた圧縮薄膜効果から推定することができる

## 参考文献

1. 横谷栄次、町田恭一；等分布荷重を受けた周辺補剛鉄筋コンクリート長方形スラブの曲げ耐力に関する実験的研究、日本建築学会関東支部研究報告集 vol.53 昭和57年
2. 横谷栄次、町田恭一、堀井広光；鉄筋コンクリートスラブの引張薄膜応力効果に関する研究 日本建築学会関東支部研究報告集 vol.54 昭和58年
3. 横谷栄次；周辺水平拘束された鉄筋コンクリートスラブの終局荷重の薄膜応力効果、日本建築学会論文報告集 第196号、昭和47年
4. R.Park and W.L.Gamble ; Reinforced Concrete Slabs , McGraw-Hill, 1980
5. 横谷 栄次、町田 恭一、和泉 好彦；水平拘束されたSFRC帯スラブの曲げ挙動に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集 vol.57 昭和61年