中空断面決定に関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE HOLLOW-SECTIONAL DETERMINATION

森村 毅*, 在永末徳**

Tsuyoshi MORIMURA and Suenori ARINAGA

In this present report, we describe a fundamental study on the hollow-sectional determination. The substance is estimate method in the size of effective hollow-sectional of the bending failure preced type, namely this method use equation of the web-flange simultaneously failure and equation of the bending-shearing failure boundary.

Hence, making good use of the merits of these two equation, we made the specimen of hollow-beam to be proved the theory by experiments whether is estimated failure type. And we made experiments of hollow-beam. As a result, the calculated values is generally in a fairly good agreement with the experimental values.

Keywords : hollow-sectional determination, equation of the web-flange simultaneously failure, equation of the bending-shearing failure boundary, hollow-beam

中空断面決定 ウェブ・フランジ同時破壊式 曲げ・せん断破壊境界式 中空はり

1. はじめに

最近、世界的自然環境保護運動の高まりから多量の森林資源を使った型枠材用合板を産業廃棄物として処理することは最早許されない状況になっている。また一方、建設技能工の高齢化、特に型枠大工の不足が深刻化している。こうした状況を解決するために建築工事の近代化を計る必要がある、建設現場の自動化、省力化および情報化などにより、建築工事の合理化とこれに密接に関連した型枠構法の開発が急務である。このような動きの中で、鉄筋コンクリート（以後RCと称す）スラブは合板以外の型枠材形式を用いたものとしてオムニヤ板をはじめ種々なタイプのフルスラブ・ハーフスラブおよび合成スラブ等が出現している。

そのような型枠材は素材の節約および軽量化が必要なため、中空部を設けた中空スラブ形式のものがよく用いられている。一般的に中空部を持つ中空スラブはI型断面が連続した一方向性スラブととらえて設計している場合が多い。これらの中空スラブの断面は施工方法によっ

ては二方向性として機能するものもあるため、たて穴系（穴方向）とよこ穴系（穴方向と直交方向）の両面から検討する必要がある、その中でも特に中空断面はよこ穴系で決まるため、その破壊性状に注目することが重要である。

これまで筆者は上述のRC中空スラブのせん断破壊および曲げ破壊に関する荷重変形特性の研究¹⁾を通して、その破壊メカニズムを明らかにしてきた。特に、RC中空スラブのせん断破壊メカニズムは複雑であるが、筆者提案式である中空部周辺の厳しい部分に破壊面仮定²⁾の概念を導入して誘導したせん断破壊耐力式は実験結果の破壊形式およびせん断破壊耐力値と比較的よく合うことが確認されている。

そこで本論文では過去に誘導したせん断破壊耐力式を一般化し、曲げ破壊先行型で効果的な中空断面を予想するウェブ・フランジ同時破壊式および曲げ・せん断破壊境界式の2式を誘導し、中空断面決定方法について論じた。また、ウェブ・フランジ同時破壊式および曲げ・せ

* 近畿大学工学部建築学科 助教授・工博

** 近畿大学工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kinki Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kinki Univ., Dr. Eng.

せん断破壊境界式の妥当性を調べるため予め破壊形式を予想した中空ばりの試験体モデルを製作し予想どおりの破壊になるかどうか検証実験も併せて行ったので、それについて考察を行ったものである。

2. 解析に用いる基本仮定と破壊面の仮定

一般に板状製品は、製造される材質により製造方法が異なるために、材料の力学的性質におよぼす影響は大きいと考えられる。ここで対象とする中空断面を有する板状製品は、素材のみによって製造されたものであり、完全に硬化した状態を考える。すなわち、粘土状および打ち込み時の柔らかいコンクリート等は対象としない。

すなわち、素材のみで製造された中空断面を有する板状製品とはモルタル・コンクリートのみで製作されたはりおよび押し出し成形品等がこれに相当する。

2. 1 基本仮定

本節で取り扱う板状製品（モルタル、コンクリートも含む）は、素材のみであるため、中空断面を決定する式の誘導に用いる基本仮定は以下の通りである。

- 1) 板状製品は完全弾性体とする。
- 2) 板状製品の断面は、弾性変形に対して平面が保持されるものとする。
- 3) せん断応力が主因で中空部周辺に生じる局部曲げ破壊および斜張力破壊は引張試験・割裂試験より得られる引張強度を用いる。引張試験・割裂試験をしない場合は圧縮試験結果を用いた推定式による。
- 4) 板状製品の曲げ応力による曲げ強度は、曲げ強度算出用テストピースの実測値を用い、3)の引張強度と別けて考える。
- 5) 中空部周辺の応力解析は格子ばり置換で行う。
- 6) 中空断面の穴形状は長円形（円形含む）とする。

2. 2 中空ばりのせん断破壊面の仮定

一定の厚さを持つ板状製品は材料の節約および軽量化等の理由から図1に示すように長手方向に対して中空部をよこに並べてあける場合が多い。そのような板状製品は効果的な中空断面でなければほとんど中空部周辺でせん断応力の主因による破壊で最終耐力に至ると考えられ

図1 中空部を持つ板状製品

る。その破壊は中空部上下のフランジ部分とウェブ部分の付け根付近（円の中心からほぼ45°方向）に集中するひび割れによって起こる傾向を示し、その位置はせん断スパン間で起こっている。

本論文では過去の実験結果²⁾を踏まえて、曲げ破壊先行型になる効果的な中空断面を決定することを目的に中空部周辺で破壊するであろう箇所を予め仮定し、その箇所をせん断破壊面（以後破壊面と称する）と称して式の誘導を行う。

式は一般性を持たせているが、図2(a)に示すように板状製品と若干異なる2点均等荷重曲げ試験用の中空ばりを用いて、せん断スパン間の中空部のせん断破壊性状に着目して誘導するため、曲げ支配領域には中空部を設けなかった。さらに中空断面決定に関する式を簡潔に表現するため、曲げ応力主因による破壊とせん断応力主因による破壊を分けて考え、曲げ応力のみが作用する領域とせん断応力が作用する領域で先行破壊する破壊形式を曲げ破壊およびせん断破壊と呼び、その時の耐力を曲げ破壊耐力およびせん断破壊耐力と名付ける。

その内、図2(b)のせん断応力を受ける中空ばりを図2(c)のように格子ばりにモデル置換して考えるとせん断変形は図2(c)のようになる。そうすると破壊面は図2(d)および下記に示すA-A~D-Dのように仮定できる。

1) A-Aが曲げ破壊する場合(ウェブ曲げ破壊型)

ウェブの一番細いC-C切断面に働くせん断力でA-A切断面のa位置に曲げひび割れが発生し、それによってウェブ付け根部分が局部曲げ破壊する場合。

2) B-Bが曲げ破壊する場合(フランジ曲げ破壊型)

フランジの一番細いD-D切断面に働くせん断力でB-B切断面のa位置に曲げひび割れが発生し、それによってフランジ付け根部分が局部曲げ破壊する場合。

3) C-Cがせん断破壊する場合(ウェブせん断破壊型)

ウェブの一番細いC-C切断面に働くせん断力でC-C切断面のb-c部分が斜張力破壊する場合。

4) D-Dがせん断破壊する場合(フランジせん断破壊型)

フランジの一番細いD-D切断面に働くせん断力でD-D切断面のd-e部分が斜張力破壊する場合。

ただし、1)～4)の破壊条件はせん断応力の主因によって起こるため基本仮定3)の引張強度を越えた時点で破壊するものとする。なお、試験体の素材がコンクリートおよびモルタルの場合は引張および割裂試験を行わず圧縮試験のみでも、その引張強度 σ_t はコンクリートおよびモルタル圧縮強度 F_c の実測値を用いて次式³⁾から算定した推定値を用いる。

$$\sigma_t = 0.607(F_c)^{2/3} \dots\dots\dots ①$$

3. 曲げおよびせん断破壊耐力

この種の応力解析は一般的に2次元弾性学として取り扱う方が厳密解を得るにはよいか中空部周辺の応力集中等の問題が出て非常に難しくなる。そこで筆者はそれを極力さけ、式が簡潔に表現できる近似解法として格子ばりに破壊面仮定を導入して下記のように解析を行った。

中空ばりの曲げ破壊耐力式および上述した破壊面1)～4)に対するせん断破壊耐力式の誘導を行い、曲げ破壊耐力時およびせん断破壊耐力時の総荷重を ${}_sW$ および ${}_sW_{bw}$ 、 ${}_sW_{bf}$ 、 ${}_sW_{sw}$ 、 ${}_sW_{sf}$ とすると次式で表される。

3. 1 準備計算

まず、図2(c)の格子ばりを形成する上下のよこ基線は中空部上下の一番細い曲げ応力度分布の圧縮側と引張側の合力位置で、たて基線はウェブの中心線で表した。その状態を図3に表し、それに基づいて式の誘導を行う。

図3からD-D切断面上に分布する曲げ応力度分布によるC-C位置から合力位置Oまでの距離を y とすると、 y は次式で与えられる。ただし、D-DおよびD'-D'切断面上の曲げ応力度は図に示した台形分布として与える。

$$y = (1 + \beta + \beta^2)H/3(1 + \beta) \dots\dots\dots ②$$

なお、 β : 中空丈比 (h/H)

そこでウェブC-C切断面に作用するせん断力を Q_w

と考えると、フランジD-D切断面とD'-D'切断面に作用する曲げ応力度分布の合力差はつり合いから Q_w に等しくなり、合力位置O点に作用する。この Q_w を図3のO点のつり合い条件式から求めると次式となる。

$$\begin{aligned} W\rho/4 &= Q_w y \\ Q_w &= 3(1 + \beta) \tau W/4(1 + \beta + \beta^2) \end{aligned} \quad ③$$

なお、 τ : 中空間比 (ρ/H)、 β : 中空丈比 (h/H)
この式②③はたて長円形およびよこ長円形に関係なく τ と β で定まる値である。

(a) 応力度分布と基線 (b) せん断応力主因による破壊面の応力分布

図3 中空断面の解析モデル図

3. 2 曲げ破壊耐力

曲げ破壊耐力は図2(b)の曲げ応力 M の最大の位置で決まる。よって、 $\sigma_b = M_{\max}/Z$ から曲げ破壊耐力の総荷重 ${}_sW$ は

$${}_sW = BH^2 \sigma_b / 3a \dots\dots\dots ④$$

なお、 a : せん断スパン、 B : はり幅、 H : はり丈
 σ_b : 曲げ強度、 Z : 全断面有効の断面係数である。

3. 3 せん断破壊耐力

せん断破壊耐力式は図2(b)のせん断応力 Q の主因による破壊であり、その耐力式はよこ長円形について図3より誘導し、たて長円形については結果のみ示す。

1) A-Aが局部曲げ破壊する場合、 ${}_sW_{bw}$ (ウェブ曲げ破壊型)

A-A断面に作用する曲げモーメントは式③の Q_w とC-CからA-Aまでの距離を掛けると求まる。

$$\begin{aligned} M_{bw} &= Q_w \cdot \sqrt{2}h/4 \\ Z_{bw} &= B(\rho - \sqrt{2}h'/2)^2/6 \\ &= BH^2 \{ \tau - \alpha\beta + (2 - \sqrt{2})\beta/2 \}^2/6 \\ \sigma_t &= M_{bw}/Z_{bw} \\ {}_sW_{bw} &= 8 \{ \tau - \alpha\beta + (2 - \sqrt{2})\beta/2 \}^2 (1 + \beta + \beta^2) \sigma_t BH/9\sqrt{2}\tau\beta(1 + \beta) \dots \end{aligned} \quad ⑤$$

同様に、たて長円形について求めると次式になる。

$$\begin{aligned} {}_sW_{bw} &= 8 \{ \tau - \sqrt{2}\alpha\beta/2 \}^2 (1 + \beta + \beta^2) \sigma_t \\ &\quad BH/9(1 + \beta) \{ 2 - (2 - \sqrt{2})\alpha \} \beta \tau \end{aligned} \quad ⑤'$$

なお、 α : 中空幅丈比 (h'/h) である。

2) B-Bが局部曲げ破壊する場合、 ${}_sW_{bf}$ (フランジ曲げ破壊型)

$$\begin{aligned} M_{bf} &= ({}_sW_{bf}/4) \cdot \{ h'/2 - (2 - \sqrt{2})h/4 \} \\ Z_{bf} &= B(2H - \sqrt{2}h)^2/96 = BH^2(2 - \sqrt{2}\beta)^2/96 \end{aligned}$$

$$\sigma_t = M_{br} / Z_{br}$$

$$sW_{br} = (2 - \sqrt{2}\beta)^2 \sigma_t BH / 6 \{2\alpha\beta - (2 - \sqrt{2}\beta)\} \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

同様に、たて長円形について求めると次式になる。

$$sW_{br} = \{2 - 2\beta + (2 - \sqrt{2})\alpha\beta\}^2 \sigma_t BH / 6\sqrt{2}\alpha\beta \dots \dots \dots \textcircled{6'}$$

3) C-Cが斜張力破壊する場合, sW_{sw} (ウェブせん断破壊型)

$$\tau_{max} = 3Q_w / 2A_w = \sigma_t$$

$$sW_{sw} = 8(\tau - \alpha\beta)(1 + \beta + \beta^2) \sigma_t BH / 9\tau(1 + \beta) \dots \dots \dots \textcircled{7'}$$

ただし, A_w はウェブ部分の断面積である。

4) D-Dが斜張力破壊する場合, sW_{sf} (フランジせん断破壊型)

$$\tau_{max} = 3(sW_{sf}/4) / 2A_f = \sigma_t$$

$$sW_{sf} = 4(1 - \beta) \sigma_t BH / 3 \dots \dots \dots \textcircled{8'}$$

ただし, A_f はフランジ部分の断面積である。

なお, 3), 4) はたて長円形について求めるとよこ長円形の式と等しくなるため式⑦⑦', 式⑧⑧' として表した。

以上のことから, 中空ばりの破壊時の総荷重は上述した式④～⑧の内が一番小さい値で決まる。

4. ウェブ・フランジ同時破壊式の誘導

中空ばりは, はり側面に中空部を設けているためせん断破壊しやすいが, 過去行った実験結果をみるとほとんどの場合, 図4のような1)と2)型どちらか一方のせん断応力主因による破壊で決まっている場合が多い。その原因はフランジ厚とウェブ厚のバランスが悪いためと考えられる。そのようなことからフランジ厚とウェブ厚のバランスを良くする必要がある。そのためには, フランジとウェブ付け根が同時破壊するように中空断面を定め, なおかつ曲げ破壊先行型で効果的な中空断面を決定することが理想的であると考えられる。

そこで, 中空部のウェブ付け根とフランジ付け根を同時破壊させるためのウェブ・フランジ同時破壊式 (以下同時破壊と称する) はよこ長円形 ($\alpha \geq 1$) については式⑤と式⑥を, たて長円形 ($0 < \alpha \leq 1$) については式⑤'と式⑥'を等しく置き中空間比 γ で纏めると求まる。式⑨はよこ長円形である。

$$\gamma^2 - \{2\alpha\beta - (2 - \sqrt{2})\beta + 3\sqrt{2}(1 + \beta)(2 - \sqrt{2}\beta)^2 / 16(1 + \beta + \beta^2)(2\alpha - 2 + \sqrt{2})\} \gamma + \{\alpha\beta - (2 - \sqrt{2})\beta / 2\}^2 = 0 \dots \dots \dots \textcircled{9}$$

同様に, 式⑨' はたて長円形 ($0 < \alpha \leq 1$) である。

$$\gamma^2 - \{\sqrt{2}\alpha\beta + 3(1 + \beta)\{2 - 2\beta + (2 - \sqrt{2})\alpha\beta\}^2 / 16\sqrt{2}(1 + \beta + \beta^2)\alpha\} \gamma + \alpha^2\beta^2 / 2 = 0 \dots \dots \dots \textcircled{9'}$$

式⑨⑨' の γ は, フランジ厚を表すパラメーターである β (h/H) 時の同時破壊させるウェブ厚を表すため同時破壊式と呼ぶ。図5は式⑨⑨' の $\gamma - \beta$ 曲線で表し, $\gamma - \beta$ 曲線上は同時破壊型で, それより上側がフランジ曲げ破壊型, 下側がウェブ曲げ破壊型を表す。

図4 せん断応力主因による主な破壊状態図

図5 ウェブ・フランジ同時破壊曲線図

5. 曲げ・せん断破壊境界式

曲げ破壊とせん断破壊の境界線を求めるために式④と式⑤⑤'を等しく置く。これにより, 曲げ破壊とせん断破壊 (ウェブ曲げ破壊) の境界曲線式が得られ, それを式⑩⑩'で示す。式⑩は $\alpha \geq 1$ のよこ長円形の場合である。

$$\gamma^2 - \beta \{2\alpha - 2 + \sqrt{2} + 6\sqrt{2}(1 + \beta) \sigma_b / 16(1 + \beta + \beta^2)(a/H) \sigma_t\} \gamma + \beta^2 / 2 = 0 \dots \dots \dots \textcircled{10}$$

同様に, 式⑩' はたて長円形 ($0 < \alpha \leq 1$) である。

$$\gamma^2 - \{\sqrt{2}\alpha\beta + 3(1 + \beta)(2\beta - 2\alpha\beta + \sqrt{2}\alpha\beta) \sigma_b / 8(1 + \beta + \beta^2)(a/H) \sigma_t\} \gamma + \alpha^2\beta^2 / 2 = 0 \dots \dots \dots \textcircled{10'}$$

なお, σ_b : 素材の曲げ強度, σ_t : 素材の引張強度, a/H : せん断スパン比である。これを図6(a)(b)に示し, 曲線より右側がせん断破壊領域で, 左側が曲げ破壊領域である。図6作成のために用いた σ_b , σ_t は検証実験で行ったモルタル強度の実験値を用いた。

(a) $a/H = 2$ 一定で α を変化させた場合 (b) $\alpha = 0.50$ 一定で a/H を変化させた場合

図6 曲げ・せん断破壊境界曲線図

6. 検証実験

前節で述べた中空断面を決定するために誘導した曲げ・せん断破壊境界（以後曲げ・せん断境界と称する）式および同時破壊式の妥当性を検証するため、試験体は検証実験用に作成した図7の◇で示すように予め各理論式の中から破壊モデルを選択し、それに、したがって素材にモルタルを用いた試験体を製作し、検証実験を行う。なお、検証実験は円形中空断面について行った。また、図7の中空断面決定図作成の説明については後述する。

6. 1 試験体

試験体は図7の中空断面決定図から選択したものを製作した。その内容は図8に示すように円形の中空部を設けた中空はりで曲げ破壊型とせん断応力主因によるウェ

図7 中空断面決定図（円形断面の場合—検証実験用）

ブ曲げ破壊型・フランジ曲げ破壊型および同時破壊型モデルの4種類である。その寸法は梁幅3cm、梁せい4cm、全長さ40cmである。試験体数は各種2体ずつ計8体製作した。しかし、その内2体については脱型時に破壊したため6体となった。その断面形状は表1に示した。

図8 破壊モデル試験体

表1 試験体形状

試験体	番号	はば mm	せい mm	中空間距離 mm	あな寸 mm	せん断スパン mm
曲げ破壊型 試験体	1	31.4	41.4	5.0	22.0	100.0
	2	31.4	41.0	5.0	22.0	100.0
せん断破壊型	1	29.8	40.7	2.5	22.0	100.0
ウェブ曲げ型	2	32.1	42.1	2.5	22.0	100.0
フランジ曲げ型	1	29.7	40.1	5.0	32.0	100.0
同時破壊型	1	30.5	40.2	3.4	32.0	68.0

6. 2 打ち込みモルタルの力学特性

試験体作製に使用したモルタルの材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、砂は1.2mm以下を使用、水セメント比60%、セメント：砂の割合は1：1であった。その力学的性質は表2に示した。

表2 材料の力学的性質

圧縮試験結果		曲げ試験結果	
圧縮強度 kg/cm ²	ヤング係数 kg/cm ²	曲げ強度 kg/cm ²	曲げヤング係数 kg/cm ²
408.5	231000	50.8	247000

6. 3 実験方法

検証方法は図9に示すように、試験体の曲げによる材料特性を調べるために試験体中央の圧縮側と引張側にストレインゲージを貼り、支点間距離30cm、荷重点距離10cmの2点荷重の曲げ試験型で行った。荷重は破壊するまで漸増荷重で行い、各荷重段階の破壊状況は目視で、ひずみ量はひずみ測定装置で計測した。

図9 ゲージ位置および荷重状態図

6. 4 実験結果

図10、図11は各試験体の代表的な最終破壊状態と曲げ応力度－ひずみ度を示す。表3は実験結果の破壊耐力値と計算値および破壊形式の比較を表したものである。

図10 実験後の破壊状態図

図11 各試験体の曲げ応力－ひずみ曲線

表3 実験値と計算値の比較

試験体	番号	実験値 破壊耐力 (kgf)	計 算 値					耐力比 計算値 実験値	破 壊 形 式	
			曲げ耐力 (kgf)	フランジ曲げ 破壊(kgf)	ウェブ曲げ 破壊(kgf)	ウェブせん 断破壊(kgf)	フランジせん 断破壊(kgf)		実験	計算
曲げ破壊型 試験体	1	100	91	150	349	256	271	0.91	B	B
	2	85	89	146	346	254	266	1.05	B	B
せん断破壊型 ウェブ曲げ型	1	43	83	135	49	51	248	1.14	BW	BW
	2	59	96	162	54	57	288	0.92	BW	BW
フランジ曲げ型	1	39	81	45	159	172	107	1.15	BF	BF
同時破壊型	1	23	123	46	41	29	111	1.26	SW	SW

B：曲げ破壊

BW：せん断破壊型でウェブ付け根部分が破壊する場合

BF：せん断破壊型でフランジ付け根部分が破壊する場合

SW：せん断破壊型でウェブ部分でせん断破壊する場合

7. 考 察

以上の結果から次のように考察される。

7. 1 中空断面の決定方法について

1) 同時破壊曲線の特性

図5および図12から、この曲線の特性は、よこ長円形 ($\alpha \geq 1$) の場合、中空丈比 β が増加すると、中空間比 γ が増加する。すなわち、これは α , β が増加すると、それに比例してウェブ幅が細く、またウェブ付け根までの距離が長くなるため、 α , β が小さいものと比較してウェブ曲げ破壊領域が増加することを意味している。たて長円形 ($1 \geq \alpha > 0$) の場合はその逆の傾向を示す。

図12 ウェブ・フランジ同時破壊曲線の特性

2) 曲げ・せん断境界曲線の特性

図6から、この曲線の特性は、曲げ破壊領域に中空断面がない場合を考えているため、せん断スパン比 (a/H) および β が増加すると、曲げ破壊領域は増加する傾向を示している。

3) 中空断面決定図および $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ の求め方

a) 中空幅丈比 α 時の中空丈比 β と中空間比 γ の決定

この場合は、まず中空部の断面形状を $\alpha \geq 1$ (よこ長円形) か $1 \geq \alpha > 0$ (たて長円形) の何れかの α を選択する。次に図5の同時破壊曲線と図6の曲げ・せん断境界曲線から α に対応する曲線を選択し図13の中空断面決定図を作成する。これによって図中の同時破壊曲線と曲げ・せん断境界曲線の交点Aを定めると、点Aの座標は (β_A, γ_A) となる。この点Aは同時破壊曲線の曲げ破壊とせん断破壊の境界を表す重要な点である。そこで、曲げ破壊先行型の中空断面を決定する場合、同時破壊曲線上の点Aの左側で、かつ β_A に近接した β 値を定めると、 γ も定まり α 時の効果的な β , γ が決定される。

検証実験で用いた図7の中空断面決定図は図13を円形断面についてまとめたものである。

b) 中空丈比 β 時の中空幅丈比 α と中空間比 γ の決定

この場合は、まず図5と図6の全ての α に対する曲線を図14中に表す。したがって、図中には全ての α に対する同時破壊曲線と曲げ・せん断境界曲線の組み合わせの

曲線があり、それぞれの α に対する交点を求めると図中のAB線となる。このAB線は式⑨⑨'と式⑩⑩'の交点から求まる線で α 決定線と名付ける。次に任意の中空丈比 β_c を選択し、この β_c からたて軸 γ に平行線を引き、 α 決定線との交点 α_c を求め、 α_c から水平線を引くとたて軸 γ との交点 γ_c が定まる。したがって曲げ破壊先行型の中空断面を決定する場合、この γ_c および α 決定線の α_c より下側のB点側にある最初の α 時の同時破壊曲線と β_c の交点 γ を選択すれば、これは定めた β_c 時の効果的な α および γ である。

c) 中空間比 γ 時の中空幅丈比 α と中空丈比 β の決定

γ 時の効果的な α , β の決定方法は上述のb)と同様な方法で求めるが、この場合は上述の β と γ を入れ替えて考えるとよい。なお、図中では矢印を逆方向にすれば γ 時の α , β が求まるのでここでは省略する。

以上のa) b) c)の方法によって得られた効果的な断面形状は、さらに、式⑦⑦'と式⑧⑧'によって検討を加え、その安全性を確認する。

図13 中空断面決定図 (α 時の $\beta \cdot \gamma$ 決定)

図14 中空断面決定図 (β 時の $\alpha \cdot \gamma$ 決定)

7-2 検証実験の考察

上述の7-1に示した中空断面決定図の妥当性を検証するために行った検証実験の検討と考察を行う。

1) 中空断面決定図と試験体の β , γ の選択について

図7は図13と同様にして $\alpha=1$ すなわち円形断面についてまとめた中空断面決定図である。この図を説明すると、破壊領域は3ブロックに分かれ、斜線部分は曲げ破壊領域、それ以外はせん断応力主因による破壊領域で、その領域はさらに、同時破壊曲線より上側と下側に分かれ上側がフランジ曲げ破壊領域、下側がウェブ曲げ破壊領域である。

この図を用いて検証実験では各破壊領域のブロックおよび同時破壊曲線上から4種類の検証用の β , γ を選択した。

2) 破壊耐力

表3からわかるように各モデル試験体の計算値の破壊耐力は実験値の破壊耐力と比較すると、破壊傾向も含めてほぼ $\pm 15\%$ 範囲内の誤差で比較よく合う傾向を示した。このことから、本提案式は破壊傾向も含めて耐力評価できる。

3) 破壊状態について

図10は破壊耐力時の破壊図である。図10(a)は曲げ破壊モデルの破壊図である。図からわかるように荷点間に曲げひび割れが生じていっきに破壊した状態を示している。図10(b)はせん断によるウェブ曲げ破壊モデルの破壊図である。これはウェブ付け根部分の破壊によってフランジ上下部がいっきに曲げひび割れが生じて耐力に至った。図10(c)はせん断によるフランジ曲げ破壊モデルの破壊図である。これはフランジ付け根部分に曲げひび割れが生じ、いっきに耐力に至った。図10(d)は同時破壊モデルの破壊図である。これによると一番薄いウェブ部分のせん断破壊によって破壊し、その後フランジの付け根で曲げ破壊を生じた後耐力に至った。この試験体は予想破壊形式と実験値が異なったことから実験後、実測値による各せん断破壊破壊耐力値を調べるため式④～式⑦を図15に示した。図からわかるように $0.78 < \beta$ においてウェブせん断破壊による耐力が同時破壊を若干下回ることがわかった。

その結果、破壊モデルと実験結果の破壊パターンとはほぼ一致した。しかし、用いた同時破壊モデル試験体は試験体寸法が小さいため、若干の寸法誤差によっても計算上の破壊パターンが異なってしまう製作の困難さがわかった。

4) 曲げ応力度-ひずみ度曲線

図11は各試験体の代表的な曲げ応力度-ひずみ度曲線である。それによると圧縮側・引張側ともほぼ直線であり弾性挙動で破壊したことを示している。その特性は、各試験体の曲げ応力度の大小にかかわらずほぼ同じであ

ることがわかった。

5) 効果的な断面形状について

7-1および図7からわかるように、同時破壊曲線、曲げ・ウェブ境界曲線と曲げ・フランジ境界線の交点より若干内側の同時破壊曲線上の点 $\gamma=0.85$, $\beta=0.66$ が、ウェブとフランジのバランスがとれ、かつ曲げ破壊する効果的な円形断面の形状と考える。それを確認する計算結果表4とその断面形状を図16に示した。

図15 同時破壊試験体の実測値による $sW - \beta$ 関係図

図16 効果的な断面形状図

表4 効果的な断面形状時の計算結果

単位: $\times sW / \sigma_t B H^2$

β	γ	曲 げ 破 壊	γ_{17} 曲げ 破 壊	フランジ 曲げ 破 壊	γ_{17} せん 断 破 壊	フランジ せん 断 破 壊
0.66	0.85	0.203	0.204	0.204	0.251	0.453

以上を纏めれば7-1から、ある素材に効果的な中空部を設ける場合、 α , β , γ の内、一つを決定すれば他のパラメータの2つは図13および図14から容易に定まることがわかった。さらに、定まった中空断面の安全性を確認するため式⑦⑦', 式⑧で検討を加える必要がある。その中空断面決定方法に関する検証は7-2の中空ばりで行い、円形断面でかつ素材がモルタルという限定された部材であるが、各破壊ブロックの特性を非常によく示すことがわかった。それらのことから、限定された範囲内であるが7-1は中空断面決定方法に関する一方法として提案できると考える。

8. 結 び

最近では素材を節約するため各種板状製品（型枠材を含む）に中空部を設けることが多くなった。そのような状況にもかかわらず中空断面を決定する規程がないため、経験をたよりに各業界バラバラで中空断面を決定しているのが現状である。中空断面を決定する重要な条件として、曲げ破壊先行型で、かつ経済的な断面形状であることが挙げられ、それらを満足するような中空断面を決定する方法があれば非常に有効であるといえる。

本論文では、ウェブ・フランジ同時破壊式および曲げ・せん断破壊境界式を図表化し、それを用いて中空はりや中空スラブ形式を持つ板状製品の効果的な中空断面を決定する一方法を提案し、検証実験も併せて行ったものである。

その結果、破壊面仮定を用いる大胆な方法であるが、中空断面決定方法は α 、 β 、 γ の内一つを定めれば他の2つは容易に定まり、簡単に中空断面を決定できることがわかった。また、検証するために製作した破壊モデル

試験体と検証実験値の破壊耐力および破壊形式がともに非常によく合い限定された範囲内であるか曲げおよびせん断破壊耐力式の裏付けが得られたと考える。これらのことから本提案式である中空断面を決定する上述の2式は本実験の範囲内であるか弱軸方向のせん断耐力および中空の断面形状決定に関して充分評価できると考える。

参考文献

- 1) 森村 毅：直交異方性鉄筋コンクリートスラブの荷重変形特性に関する実験的研究（その2），日本建築学会中国・九州支部研究報告，第7号，昭和62年3月
- 2) 森村 毅・藤谷義信：直交異方性鉄筋コンクリートスラブの荷重変形特性に関する実験および解析的研究(Part3)，日本建築学会構造系論文報告集，第389号，1988.7
- 3) 小坂義夫・森田司郎：鉄筋コンクリート構造，丸善，昭和57年10月

(1994年5月25日原稿受理，1995年3月22日採用決定)