

V-55

鉄筋コンクリート薄肉構造の軸引張剛性の評価

北海道大学工学部	○学生員 武田 雅史
北海道大学大学院工学研究科	フェロ- 大沼 博志
北海道大学大学院工学研究科	正会員 名和 豊春
北海道大学大学院工学研究科	正会員 出雲 健司

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の変形、あるいは変形の拘束に伴う応力を算定することは、設計において重要な項目の一つである。引張力によってコンクリートにひび割れが発生すると、ひび割れ断面では鉄筋が、またひび割れの間では鉄筋とコンクリートが引張力を負担するために、鉄筋コンクリート構造物は複雑な変形挙動を示す。とくに、ひび割れが発生した後、鉄筋が降伏するまでの変形挙動は、これまでにいくつかの研究成果^{1), 2)}が得られてはいるが、より詳細に解明しなければならない課題であると考ええる。そこで、本研究では、中空円筒と半球ドームを組合せた鉄筋コンクリート薄肉構造模型に内圧を作用させる実験を行い、引張力を受けたときの鉄筋コンクリート部材の軸剛性を検討・評価したものである。

2. 鉄筋コンクリート模型の製作および実験方法

2.1 模型の製作

鉄筋コンクリート模型は、図-1 に示すように、底盤、中空円筒および半球ドームから構成されている。底盤は、厚さ 30cm、直径 240cm の円盤に直径 60cm の円孔が設けられている。中空円筒部は、高さ 150cm、内直径 140cm、厚さ 10cm である。中空円筒基部には、高さ 15cm、幅 5cm のハンチを付けた。半球ドーム部は、中空円筒と連続しており、その厚さは 10cm である。頂部に空気抜き用の貫通孔を設けた。これ以外の加圧用治具、圧力計、水循環攪拌用パイプ等は底盤中央のマンホール蓋を通した。

内圧 0.4N/mm^2 に対して FEM 回転軸対称の弾性応力解析を行い、得られた断面力（軸引張力）に対してひび割れ断面の鉄筋応力が 200N/mm^2 以下となるように鉄筋量を算定した。中空円筒および半球ドームには D6mm の異形鉄筋を、また底盤には D16mm の異形鉄筋を用いた。中空円筒の鉄筋比と鉄筋間隔は、縦方向および円周方向がそれぞれ 1.27%、50mm および 1.58%、40mm である。内圧によって生じる中空円筒基部の面外せん断に対しては、底盤より 50cm の高さまで D6mm のせん断補強筋を壁厚方向に配置した。

模型は打継目なしの一体打ちで製作し、また鉄筋は重ね継ぎ手などの継ぎ手部を設けないこととした。乾燥を防止するために、脱型後直ちに模型をポリエチレンシートで覆った。また、模型の内側に厚さ 5mm のネオプレンゴムシートを貼り付け、内圧試験における気密性を確保した。

2.2 使用材料

コンクリートの配合を表-1 に示す。模型の壁厚が 10cm であることと鉄筋間隔が狭いことを考慮して、コンクリートの骨材最大寸法は 10mm とした。また、スランプは $18 \pm 2.5\text{cm}$ とした。コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 とし、内圧試験時に気中養生でおよそ 29N/mm^2 となるように配合を定めた。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、AE 混和剤を添加して AE コンクリートとした。粗骨材は鹿島産および木更津産の豆砂利であり、細骨材は鬼怒川産および木更津産の混合砂を用いた。粗骨材および細骨材の比重、吸水率および粗粒率はそれぞれ 2.60、1.60%、2.75 および 2.68、0.8%、6.08 であった。材齢 28 日の標準養生、および内圧試験時の気中養生コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度およびヤング

Evaluation of Tension Stiffening in Reinforced Concrete Shell Structures

By M. Takeda, H. Ohnuma, T. Nawa and K. Izumo

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (AE 減水)
10	18±2.5	4±1	51.5	46.5	183	355	804	950	1.242

表-2 コンクリートの力学的性質

材齢	養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
28 日	水中	29.5	2.32	4.13	29.3
加圧試験時	気中	28.7	2.40	4.21	29.6

注：これらの値は 6 本の供試体の平均である。

表-3 鉄筋の力学的性質

	実測直径 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)	備考
ゲージ有*	6.37	333	534	180		6 本の平均値
ゲージ無	6.37	335	535	200	30.7	3 本の平均値

*：ひずみゲージを貼付けた鉄筋

係数を表-2 に示す。なお、気中養生コンクリートは、模型の養生条件とできるだけ同一とするために、脱型後にポリエチレン袋中に密封し、所定の材齢まで模型の近傍に放置したものである。

鉄筋を 10cm の壁厚に二方向複鉄筋で配置し、また適切なかぶりを確保するためにはできるだけ細径の鉄筋を用いることが望ましい。そのため、D6mm の異形鉄筋 (SD295A 相当) を用いることとした。この鉄筋は斜めフシで、また軟鋼と同様に明確な降伏点を持つように製造されたものである。鉄筋の試験結果を表-3 に示す。細径の鉄筋を使用したために、ひずみゲージを貼付したことによる断面欠損および応力集中の影響を受けることが懸念された。そこで、母材およびひずみゲージを貼付した鉄筋の引張試験を行った。その結果、母材のヤング係数 ($2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) に比較して、ひずみゲージを貼付した鉄筋の見掛けのヤング係数は $1.8 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ に低下することが示された。また、降伏時のひずみは 1850×10^{-6} であり、降伏強度と引張強度は貼付しないものとほぼ同一であることが明らかにされた。

2.3 実験方法および測定方法

内圧は水圧で与えた。加圧履歴は、 0.46 N/mm^2 と 0.6 N/mm^2 の内圧を与えた後、最終の破壊まで増加させた。測定項目は、鉄筋とコンクリートのひずみ、および変形とした。D6mm 鉄筋には箔ゲージ (長さ: 3mm) を用いた。ひび割れ発生近傍までのコンクリートのひずみは長さ 60mm のゲージを用いて外表面で測定した。リング型変位計 (定格容量: 10mm、精度: $1000 \times 10^{-6} \text{ mm}$) によって変形を測定した。

3. 解析方法

3.1 ひび割れ発生前の変形

実験に用いた模型は、壁厚に比べて半径が大きいので、薄肉のシェル構造と考えることができる。これに

内圧のみが作用する場合、中空円筒には二軸引張の膜応力が生じる。内圧が作用するとき、薄肉無限円筒の理論より、中空円筒の円周方向と縦方向の応力は次式によって与えられる。

$$\sigma_{\theta} = P_i \times r_i / h \quad (1)$$

$$\sigma_z = P_i \times r_i / 2h \quad (2)$$

ここで、 σ_{θ} は円周方向の応力 (N/mm²)、 σ_z は縦方向の応力 (N/mm²)、 P_i は内圧 (N/mm²)、 r_i は内半径 (mm)、 h は壁厚 (mm) である。

この時の中空円筒のふくらみ変形は、次式で与えられる。

$$\delta_r = \sigma_{\theta} \times \left[\frac{1}{E_c \{1 + (n-1)p_{\theta}\}} \right] \times \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \times r_o \quad (3)$$

ここで、 δ_r は半径方向のふくらみ変形 (mm)、 E_c と ν はコンクリートのヤング係数 (N/mm²) とポアソン比、 p_{θ} は円周方向の鉄筋比、 r_o は外半径 (mm) である。また、 n は鉄筋とコンクリートのヤング係数比である。

3.2 ひび割れ発生後の変形

ひび割れが発生すると、ひび割れ断面の軸引張力は鉄筋のみによって負担されるので、軸剛性は急激に低下する。しかしながら、ひび割れとひび割れの間ではコンクリートが引張力の一部を負担するために、いきなり鉄筋のみの軸剛性までは減少せずに、内圧の増加に伴って部材の平均剛性が鉄筋のみの剛性に漸近するという挙動を示す。ひび割れが発生して以後、鉄筋が降伏するまでの平均剛性を算定するために、本論文では、鉄筋コンクリート引張部材の実験で比較的適用性が高いと言われている以下の米国 RC サイロの設計式と CEB-FIP モデルコードの評価式³⁾を用いた。

RC サイロの設計式：

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1 - 0.7 \times \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right) \quad (4)$$

CEB-FIP モデルコードの評価式：

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left\{ 1 - K \times \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right\} \geq 0.4 \times \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (5)$$

ここで、 ε_{sm} は鉄筋の平均ひずみ、 σ_s は与えられた断面力に対するひび割れ断面の鉄筋応力 (N/mm²)、 σ_{sr} はひび割れ発生直後におけるひび割れ断面の鉄筋応力 (N/mm²)、 E_s は鉄筋のヤング係数 (N/mm²)、 $K = 1.0$ は初期荷重に対する値、 $K = 0.5$ は持続荷重あるいは繰返し荷重が作用する場合の値である。

(4) 式と (5) 式から、中空円筒のふくらみ変形は次式によって与えられる。

$$\delta_r = \varepsilon_{sm} \times r_o \quad (6)$$

3.3 鉄筋のみの剛性による変形

コンクリートはまったく引張力を負担せずに、鉄筋のみによって断面力を負担する場合の中空円筒のふくらみ変形は次式で表わされる。

$$\delta_r = \frac{\sigma_\theta}{E_s \times p_\theta} \times r_o \quad (7)$$

4. 実験結果および算定式の適用性

中空円筒の外表面で得られたコンクリートのひずみを図-2 に示す。これらは、底盤から 50cm の位置における内圧 0.4N/mm² までの測定値である。表-2 に示すように、コンクリートの割裂引張強度は 2.40N/mm² である。コンクリートの円周方向応力がこの割裂引張強度に達するときひび割れが発生するものとする、0.34N/mm² の内圧が作用したときにひび割れが生じることになる。図-2 に示す内圧とコンクリート表面ひずみとの関係から、コンクリートの引張ひずみが 150~200×10⁻⁶ に達するのは内圧が 0.3N/mm² のときであるので、割裂引張強度よりも幾分低い内圧でひび割れが発生したことが示された。

底盤から 50cm の高さの中空円筒で得られたふくらみ変形と内圧の関係を図-3 に示す。内圧の履歴は、最初 0.46N/mm² まで、次に 0.6N/mm² まで作用させて除荷し、最後に破壊するまで加圧した。また、ふくらみ変形は 3 点の測定値の平均である。最初内圧の増加に伴って、全断面有効とする、すなわちひび割れ発生前の軸剛性から算定される直線に沿ってふくらみ変形は増加しはじめる。内圧がおよそ 0.35N/mm² のとき明確な変曲点が現れ、この点においてひび割れが発生したものと推定される。この内圧は、コンクリート表面ひずみから推定されたひび割れが発生内圧よりも少し大きな値であり、またコンクリートの割裂引張強度から算定されるひび割れ発生内圧にほぼ等しい値である。

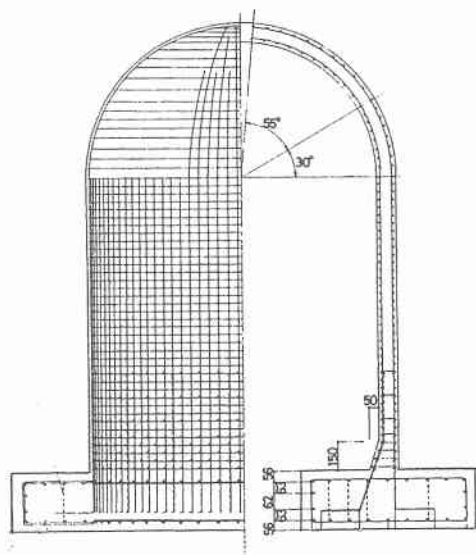


図-1 鉄筋コンクリート模型

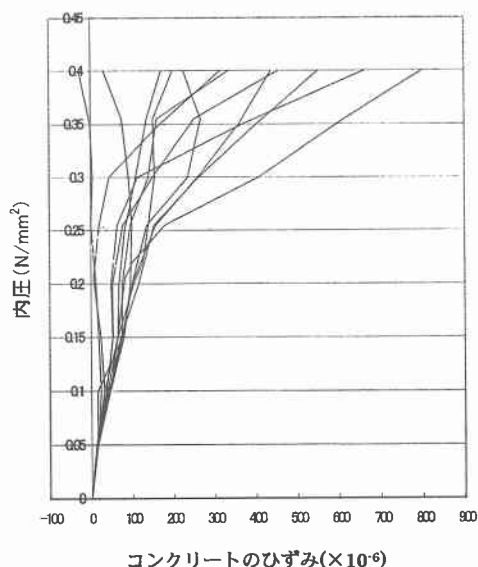


図-2 内圧とコンクリートひずみの関係

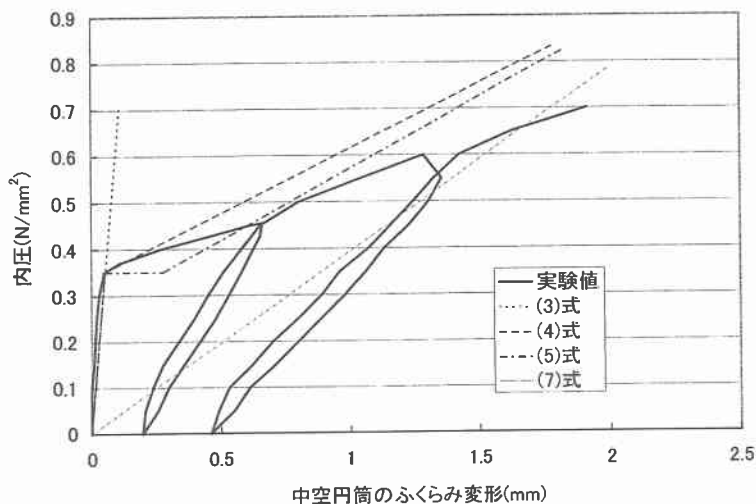


図-3 内圧と中空円筒のふくらみ変形の関係

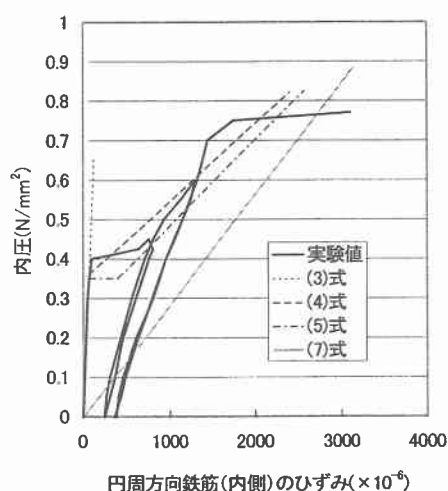


図-4 内側鉄筋のひずみ履歴

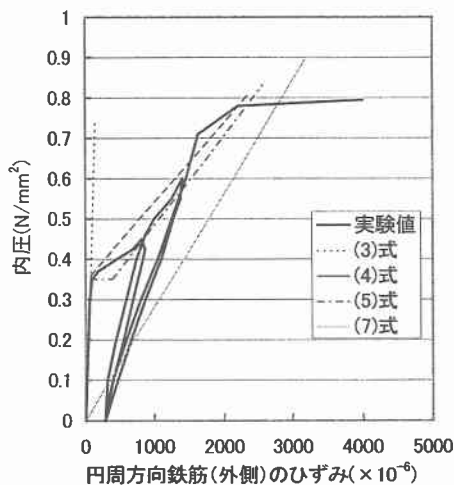


図-5 外側鉄筋のひずみ履歴

ひび割れ発生以後、内圧とふくらみ変形の勾配は小さくなり、(7)式の鉄筋のみの軸剛性から算定される直線に漸近する。そうして、鉄筋が降伏したとき、この直線を横切ることになる。米国 RC サイロの設計式ならびに CEB-FIP モデルコード評価式の両式によって求められた、ひび割れ発生後の内圧とふくらみ変形の間係をともに図-3 に示した。前者は、ひび割れ発生直後には実験結果とよく一致するが、軸剛性を高めに評価する傾向にあることがわかる。一方、後者はひび割れ発生直後には(5)式の第二項の条件によって変形のみが増加することとなるが、内圧が増加した段階では前者よりも実験結果とよい一致を示したがって、全体的には軸剛性を高めに評価するものの、米国 RC サイロの設計式ならびに CEB-FIP モデルコード評価式の両式はひび割れ発生後の変形挙動の解析に適用できると考えられる。

図-4 と図-5 に、それぞれ円周方向の内側鉄筋と外側鉄筋のひずみ履歴を示す。円周方向の鉄筋ひずみは、中空円筒のふくらみ変形と同様の挙動を示すことがわかる。ただし、個々の鉄筋ひずみには相当にバラツキが見られる。これは、ひずみゲージを貼付した位置とひび割れ発生位置との関係によるものである。両者が完全に一致する場合には、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみは鉄筋のみのものに急速に近づくであろう。しかしながら、ひずみゲージの位置がひび割れの間にある場合には、軸剛性は鉄筋のみのものよりも大きくなる。これらの図から、鉄筋ひずみから得られる軸剛性はふくらみ変形からのものよりも大きいことが示された。これは、ひずみゲージの位置が平均剛性を表わす鉄筋位置よりもひび割れ間の中央に近いためであると考えられる。また、鉄筋が降伏した後、鉄筋ひずみは鉄筋のみの軸剛性から得られる直線を越えることが明らかにされた。実験結果と米国 RC サイロの設計式ならびに CEB-FIP モデルコード評価式の解析結果との比較から、両式は円周方向鉄筋のひずみ履歴の解析に適用できることが示された。

5. まとめ

鉄筋コンクリート模型に内圧を作用させる実験を行い、軸引張力を受ける鉄筋コンクリートの変形挙動を検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 軸引張力を受ける鉄筋コンクリートの一般的な変形挙動を得ることができた。すなわち、ひび割れが発生する以前には全断面有効とした軸剛性によって、またひび割れ発生後は鉄筋の平均ひずみの評価式によって変形を算定することができる。さらに、鉄筋が降伏したとき、鉄筋のみの剛性から求められる変形よりも大きくなる。
- (2) 中空円筒のふくらみ変形の実験結果から、ひび割れが発生するときの内圧は、コンクリートの割裂引張強度から算定される値にほぼ等しいことが明らかにされた。
- (3) ひび割れ発生後から鉄筋が降伏するまでの変形挙動は、米国 RC サイロの設計式および CEB-FIP モデルコードの評価式によってよく算定できることが示された。

参考文献

- 1) H. H. Abrishami and D. Mitchell : Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening, ACI Structural Journal Vol.93, No.6, pp.703-710, 1996
- 2) Thomas T.C.H. and Li-Xin Z. : Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membrane Elements, ACI Structural Journal, Vol.93, No.1, pp.108-115, 1996
- 3) CEB-FIP : CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Comite Euro-International du Beton and Federation Internationale de la Precontrainte, 1978
- 4) E. Wollrab, S.M. Kulkarni, C. Ouyang and S.P. Shah : Respose of Reinforced Concrete Panels under Uniaxial Tension, ACI Structural Journal, Vol.93, No.6, pp.648-657, 1996