

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560580

研究課題名（和文） 複合加力を受ける鉄筋コンクリート円筒シェルの耐荷力と崩壊特性

研究課題名（英文） Ultimate strength and failure characteristics of R/C cylindrical shell under combined loading.

研究代表者

原 隆（HARA TAKASHI）

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・教授

研究者番号：50124102

研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリートシェルは鉄筋とコンクリートで作られ、局面構造を形成している。このような構造は圧縮力や横荷重のような外的に加えられる力に対して大きな強度を示すことが知られているが、これらの力が同時に作用する場合の強度については多くの研究があるわけではない。建物や貯蔵施設を設計する場合には、これらの組み合わせられた力のもとの強度が設計の重要な要素となる。本研究では、このような組み合わせられた荷重を受ける鉄筋コンクリートの強度を、正確な模型を作製して実験した。また、数値計算により強度を推定することにより、製作した模型以外の形状についても強度が推定できるようにした。

研究成果の概要（英文）：Reinforced concrete (R/C) shell consists of a concrete and reinforcement and forms a curved surface structure. It is well known that these structures show a large load bearing capacity under a compressive or a lateral load. However, the strength of these structures has not been investigated much under combined compressive and lateral loads. The strength of R/C shell under combined loads will be an important factor to design buildings and storage tanks. In this research, the strength of R/C structure under combined loads is investigated using the experimental model made precisely. Then calculating the strength by numerical analyses, any kinds of R/C shell will be evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
10年度	1,700,000	510,000	2,210,000
11年度	1,100,000	330,000	1,430,000
12年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：

科研費の分科・細目：工学・建築学・建築構造・材料

キーワード：ultimate strength, reinforced concrete, axial load, lateral load, experiment

## 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート（以下 R/C）シェルは産業施設（冷却塔）に使用される円筒シェルや、建築構造建築物の屋根に使用され、圧縮に強いコンクリートの特性を活かした鉄筋コン

クリートの薄肉構造として知られている。古くはイスラムのドーム、また、近年では、トロハの設計に代表される数多くの作品が作られ利用されている。これは、造形美とともに、シェルの持つ高次不静定次数による局部

崩壊による全体崩壊への進展を防ぐことができる連続体構造の特性を積極的に利用したものである。これらはまた、防災上の観点から再び見直されてきている。

一般的にR/Cシェル構造の構造特性の優位性は理解されてはいるが、梁柱やラチス構造に比べ、設計の観点からは断面算定のための応力解析等の困難さがともなう。また、耐震解析を含む一連の分析から、R/Cシェルは、初期不整や組み合わせ応力下では局所荷重に起因する曲げが卓越した崩壊を示すことが知られているが、軸力下での曲げやせん断による崩壊の評価の分析は十分ではなく、実験的分析と数値的評価が望まれている。

著者は20年にわたり数値解析によるR/C冷却塔の分析を行ってきた。また、数値解析の検証のために、より精度の高い模型を作製し、実験的解析を行ってきた。これらを含め、多くの研究者たちの行ってきた研究成果を実際の設計に展開するためには、梁柱やラチスの構造の設計と同様な、簡易な耐力推定法が必要とされている。そのためには、前述のように、軸力下における、曲げ、せん断の複合荷力を受けるR/Cシェルの終局耐力と崩壊特性を分析し、耐力特性を明らかにすることが必要である。

## 2. 研究の目的

R/Cシェルは面内力に対する構造特性の優位性に期待した連続体構造であり、また、局所破壊が全体破壊に至りにくい性質を持っている。しかし、実際には、初期不整や組み合わせ荷重のもとでは曲げが卓越して崩壊することが知られている。さらに、数値解析が容易ではないことや骨組みのような単純な設計手法がないことから実構造への適用は敬遠されがちである。本研究課題はR/Cシェル構造に対して、軸力下における、曲げ、せん断の複合荷力による終局耐力と崩壊特性を分析し、耐力特性を明らかにすることにより、R/Cシェルの構造特性を有効に利用した設計法確立のための基礎資料を提示する。研究手法は、模型実験による耐力の分析と数値解析による検証である。

## 3. 研究の方法

本研究課題はR/Cシェルの設計法を推定するための資料提示を目的として、軸力、曲げ、せん断の組み合わせ荷重の下で、耐力特性と崩壊特性を実験的に求め、数値解析によりさらに分析を進める。分析のモデルは96cmx96cm、半径688mm、厚さ10mmの鉄筋コンクリート円筒パネルであり、鉄筋は5mmのワイヤメッシュである。モデルは鋼製モールドで作成するため、鉄筋位置のみが初期不整である(図-1)。

(1)22年度はR/Cシェルの軸圧縮特性の分析

を行う。軸圧縮荷重はサーボコントローラを用いて変位制御で載荷し、詳細な変形、ひずみの分析を行う。

(2)23年度は軸力と横荷重(分布荷重および集中荷重)に対する耐力、崩壊特性を分析する。

(3)24年度は軸力とせん断荷重に対する耐力、崩壊特性を分析する。そして、研究成果をまとめる。

## 4. 研究成果

平成22年度は、軸力と曲げを受けるR/C円筒パネルの耐力特性を分析することを目的とし、数値解析および実験解析の準備を行った。行った内容は以下のとおりである。

(1)円筒シェルの子午線方向並びに周方向に補剛材を配置し、R/C円筒シェル周辺に拘束を加えることにより、軸力、曲げ、せん断の組み合わせ内力状態を発現させ、変形特性や耐力特性を数値解析により分析した。その際に、補剛材寸法を変化させ、応力状態を変化させた。この分析では、複合加力を与えた時のR/C円筒シェルの周辺の拘束条件を満足させるための周辺支持の必要剛性を把握する目的も持つ。

(2)同様にR/C円筒シェルに周辺補剛材(R/Cはり)を配置して、実験的な変形、耐力の分析を行った。

(3)内力状態を実験的により大きく変動させるために、ジャッキシステムを購入し、載荷装置を設計し、組み立てに取り掛かった。現状では、R/Cアーチに対して荷重、変形特性の分析を行っている。数値解析により得られた結果はR/Cシェル構造とR/Cアーチ構造の変形特性および耐力特性の分析としてIASS, EASEC等の各種会議で報告した。

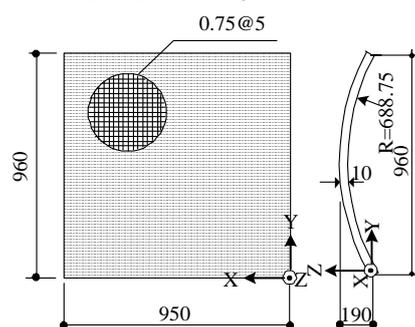


図-1 実験モデル

平成23年度は、軸力と曲げを受けるR/C円筒パネルの耐力特性を分析することを目的とし数値解析においては複合加力による相互作用の影響を考察した。実験解析においては加力システムの有効性と試験体の補強方法を確認した。行った内容は以下のとおりである。

- (1) 円筒シェルのトーナメント载荷による荷重分配の検定と加力システムの性能を確認した。その結果、加力点に利用するR/Cシェルの削孔部が作用荷重の大きい場合に挙動に影響を及ぼし、载荷の均一性が損なわれる場合があることが確認できたため、シェル上面からのジャッキによる集中荷重とエアバッグによる分布载荷を検討した
- (2) R/Cアーチ（奥行き小さいシェル）の放射線方向の外圧を作用させるためのフレームを作製し、载荷試験を行った。結果は良好で、フレームを子午線方向に4組展開することによりシェルに分布荷重が得られることを確認した。また、支点部でのシェルの補強が必要となった。分布荷重についてはエアバッグの性能試験を行い、安全に加力できることを確認した。
- (3) 以上の結果を考慮して10枚のR/Cシェルを作成した。
- (4) 数値解析に関しては、前年度に引き続き補剛されたR/Cシェルの耐荷力特性を分析し、実験結果と比較し、ISEC, ASEM, CONCRETEで公表した。また、装置確認のために実施したR/Cアーチの実験と数値解析の同定について資料をまとめた。
- (5) 複合加力時の数値解析の有効性については、文献調査による既存の実験結果を用いて数値解析を行い、ASEM, IASS, 建築シンポジウムで公表した。

平成24年度は前年に引き続きR/C円筒シェルについての载荷試験を行った。

- (1) 実験では、子午線方向に圧縮破壊の10%（非線形性を考慮した場合は75%）の軸力を作用させた後に曲げ载荷試験を行った。曲げ载荷は1点集中荷重および分布荷重とした。また、分布荷重はこれまで行ってきたトーナメント载荷による擬似等分布荷重から、エアバッグを用いた分布荷重とした。载荷装置を図-2に示す。
- (2) 実験解析では、シェルの変形、ひずみ、破壊荷重、ひび割れを測定した。実験の結果、あらかじめ軸圧縮荷重を加えたシェルのほうが軸圧縮を加えない場合に比べて曲げ剛性が高く、耐荷力がやや高いことが示された。また、破壊形状については軸圧縮力が作用する場合に破壊が局所的であることが示された。
- (3) 数値解析においては、実験を行ったR/Cシェルを有限要素法でモデル化し、材料定数は材料試験結果を使用した。また、载荷状況も実験と同様に、軸圧縮力を加えた後に曲げ荷重を载荷した。数値解析を行った結果、実験結果とほぼ同様の結果が得られた。図-3に軸圧縮時の座屈形状

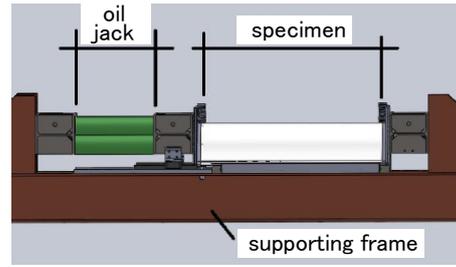


図-2 载荷装置

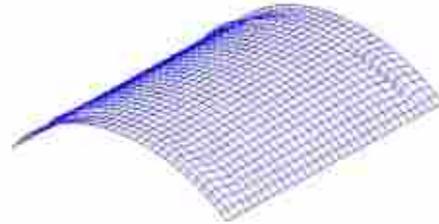


図-3 圧縮座屈

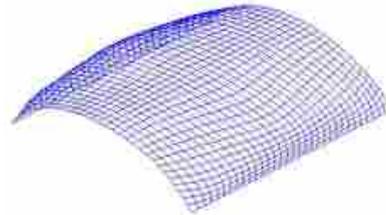


図-4 軸圧縮力と集中荷重時の変形

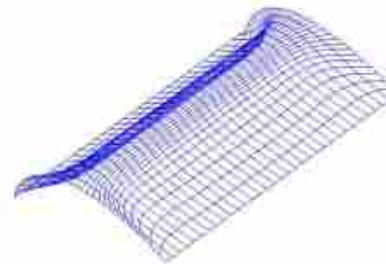


図-5 軸圧縮力と分布荷重時の変形

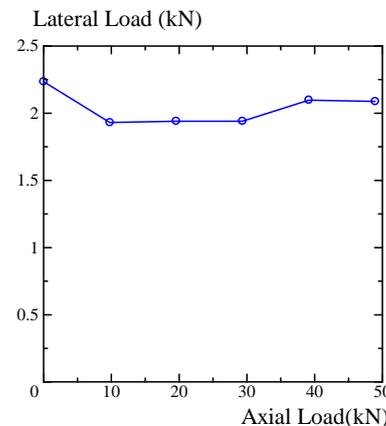


図-6 軸圧縮力と集中荷重耐荷力の推移

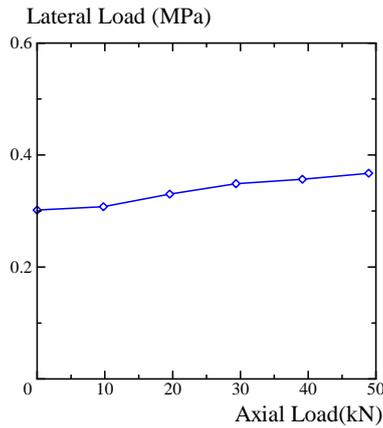


図-7 軸力と分布荷重耐荷力の推移



図-8 実験時のひび割れ

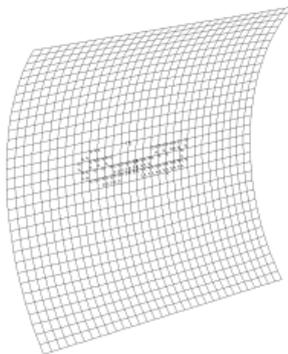


図-9 数値解析によるひび割れ

を示す。また、図-4および図-5に75%の軸圧縮のもとでの集中荷重および分布荷重によるR/Cシェルの変形を示す。

- (4) 数値計算により荷重の組み合わせについてパラメトリック解析を行った結果、実験と同様の傾向が得られた(図-6、図-7)。図-8、図-9に実験によるひび割れと数値解析によるひび割れを示す。実験のひび割れは終局状態であり、両者は完全に一致していないが、ひび割れ性状に同様の傾向が見られる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Hara T., Application of computational technologies to R/C structural analysis. *Computers & Concrete* Vol.8. pp 97-110, 2011

〔学会発表〕(計20件)

- ① Hara T. Strength of R/C shell under combined axial and flexural loadings. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013. 9. ヴロツワフ (ポーランド)
- ② Hara T. Strength of R/C shell panel under combined loadings, Proceedings of the 2013 International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures Technologies in Concrete Structures, 2013. 9. チェジュ (大韓民国)
- ③ 原 隆, 曲げと軸力を受ける R/C 円筒パネルの載荷試験, 日本建築学会大会, 2013. 8. 30. 札幌
- ④ Hara T. STABILITY OF R/C SOLAR UPDRAFT TOWERS, New Developments in Structural Engineering and Construction, ISEC-7, 2013. 6. 19. ホノルル (アメリカ)
- ⑤ Hara T., Numerical analysis of the load bearing capacities of R/C panel, Proceedings of ASEA-SEC-1, 2012. 11. 28. パース (オーストラリア)
- ⑥ HARA T., Compressive Strength of R/C Cylindrical Panel with Edge Beams, Proceedings of 2nd International Conference on Computational Design in Engineering, 2012. 11. 15. チェジュ (大韓民国)
- ⑦ Hara T. and Doh J.H., Finite Element Investigation of R/C Wall with Openings, Proceedings of ICCCB2012 2012. 6. 28. モスクワ (ロシア)
- ⑧ HARA T., Numerical Evaluation of Repaired Cooling Tower Shell after Damaging, Proceedings of 6th ISCT 2012, 2012. 6. 21. コロン (ドイツ)
- ⑨ HARA T., Numerical and Experimental Behaviour of R/C Arch, Proceedings of IASS 2012, 2012. 5. 23. ソウル (大韓民国)
- ⑩ 原 隆, 構造壁とスラブ接合の数値評価, 日本建築学会シンポジウム「コンクリート連続体の構造デザインの可能性」2011. 11. 1. 東京
- ⑪ HARA T., Ultimate strength of edge stiffened R/C cylindrical shell. *Concrete* 2011, 2011. 10. 13. パース (オーストラリア)

- ⑫ HARA T., Behaviour of R/C Arch Structure Subjected to External Loading, IABSE IASS INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2011. 9. 23. ロンドン (連合王国)
- ⑬ HARA T., Local Failure of Cooling and Solar Updraft Towers, IABSE IASS INTERNATIONAL SYMPOSIUM 2011. 9. 21. ロンドン (連合王国)
- ⑭ Hara T. and Doh J.H., Finite Element Modeling Approach for Wall with Various Support Conditions, Advances in Structural Engineering and Mechanics, 2011. 9. 19. ソウル (大韓民国)
- ⑮ Kawaguchi K. and Hara T. The experimental analysis of R/C shell structure stiffened by edge Beams, Advances in Structural Engineering and Mechanics, 2011. 9. 19. ソウル (大韓民国)
- ⑯ HARA T., NUMERICAL EVALUATION OF THE EFFECTS OF HOOP EDGE BEAMS ATTACHED TO THE CYLINDRICAL R/C SHELL, Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction (ISEC-06), 2011. 6. 20. チューリッヒ (スイス)
- ⑰ 川口 恵, 原 隆, R/C シェル構造における縁梁の有効性に関する研究, 2010 年度日本建築学会中国支部研究報告, 2011. 3. 6 (徳山工業高等専門学校)
- ⑱ Hara T., Numerical Evaluation of the Effects of Edge Beams Attached to the Cylindrical R/C Shell Structures, EASEC-12, 2011. 1. 21. 香港 (中国)
- ⑲ Hara T., Ultimate strength of R/C cylindrical shell with edge beams. IASS Symposium 2010, 2010. 11. 10. 上海 (中国)
- ⑳ Kato S., Hara R., Nakazawa S., Hara T. and Muto A., Ultimate strength evaluation of reinforced concrete wide arch considering the effects of concrete tensile strength and geometric imperfection. IASS Symposium 2010, 2010. 11. 10. 上海 (中国)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://news-sv.ajj.or.jp/kouzou/s13/newpage.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

原 隆 (HARA TAKASHI)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・教授

研究者番号 : 50124102

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし