

鋼殻で拘束された鉄筋コンクリート部材に関する解析的検討

A numerical study on RC beams confined in steel tubes

山口泰男*, 平野勝識**, 笹谷輝勝***, 高崎英邦****, 小西真治*****, 土屋智史*****

Yasuo YAMAGUCHI, Katsunori HIRANO, Terukatsu SASAYA, Hidekuni TAKASAKI, Shinji KONISHI and Satoshi TSUCHIYA

* 工修, (株) レールウェイエンジニアリング (〒105-0012 東京都港区芝大門 1-3-8)

** 工修, (株) フジタ, 技術センター土木研究部 (〒243-01245 神奈川県厚木市小野 2025-1)

*** 工修, (株) フジタ, 技術センターコンサルタント部 (〒243-01245 神奈川県厚木市小野 2025-1)

**** 工博 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1 丁目)

***** 博 (工) (財) 鉄道総合技術研究所, 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2 丁目)

***** 博 (工) (株) コムスエンジニアリング (〒113-0031 東京都文京区根津 2-20-1-701)

Two-dimensional nonlinear finite element analysis based on smeared crack approach is applied for steel concrete composite beams longitudinally reinforced with rebars while being confined in steel tubes, which is supposed to be used for underpass construction. The analytical method is verified through the comparison with experimental results failed in flexure and shear. Parametric study is also carried out to investigate more rational structural dimension from the view of initial stiffness, load-carrying mechanism and damage distribution.

Key Words: circular-section steel tube, composite structure, mechanical property, FE analysis

1. はじめに

近年, 既存の交通機能を保持し, かつ周辺環境に配慮した非開削による新設交通の建設技術のニーズが高まっている。そこで, 筆者らは推進工法と鋼管部材を利用した地下構造物の構築工法 (PRE-SHELL 工法) の実用化に向け研究開発を進めている。

本工法は, 図-1 に示すように構造物の輪郭に沿って複数の鋼管エレメントを推進工法により施工するものである。施工手順は図-2 の通りであり, 鋼殻エレメント推進後に構造上の主鋼材である鉄筋によりエレメント相互を連結し, 鋼殻エレメント内部を高流動コンクリートで充填した後, 躯体構築後内部空間の土砂を掘削する工法である。鋼殻エレメントは, 円形, 片側欠円・両側欠円 (図-3) の3つの形状を組合せて使用する。

施工機械は, 玉石混じり礫層対応の汎用サイズの密閉型推進機を使用し, 数mから数十mの土被りの高透水崩壊性地盤においても, 低コストで施工可能という利点を有している。また, 鋼殻エレメントが円形であるために, 水平・垂直の構造体だけでなく, 図-4 に示すような任意の斜め方向への連結が可能であり, 計画自由度の高い構造物を構築することが可能である。

本工法の構造形態は, 円形と2種類の欠円形の鋼殻エレメントと軸方向鋼材である鉄筋, 土留め支保工とせん断補強材としての役割を担う鉛直の隔壁鋼材と充填コンクリートで構成される複合構造である。実用化にあたっては, 設計・施工法確立のため本複合構造の力学的特性を明らかにする必要がある。

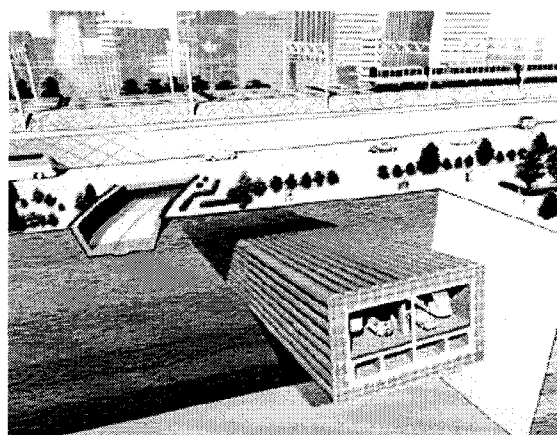


図-1 PRE-SHELL 工法のイメージ

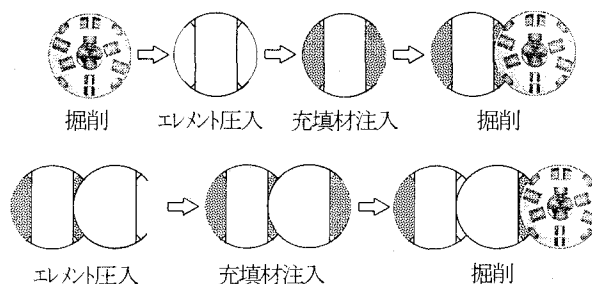


図-2 施工手順

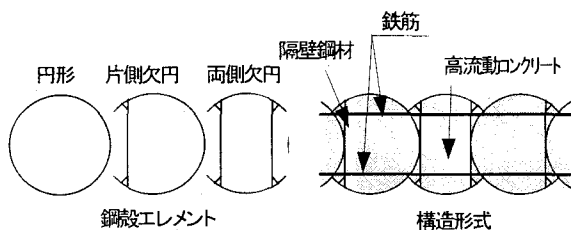


図-3 鋼殻エレメントと構造形式

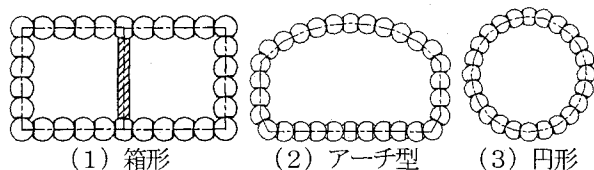


図-4 鋼殻エレメント レイアウト例

本論文では、筆者らがこれまでに行ってきた本構造の曲げおよびせん断の実験的検討¹⁾²⁾³⁾を踏まえ、これを対象とした有限要素非線形解析を実施し、その適用性を確認するとともに、耐荷性状やひび割れ損傷について詳細に検討する。これは、任意の荷重履歴に対する、本工法による地中構造物の応答を地盤と連成することにより算出する構造/耐震性能照査を将来的に実施することを念頭に置いてのことでもある。さらに、実験と解析の両方の知見を活用することにより、鋼殻配置と量を変化させた感度解析を併せて実施し、本複合構造の合理化の可能性を探る試みを行うこととする。

2. 既往の実験概要

本構造に関して、過去に実施した試験体概要を図-5、図-6に、材料特性を表-1に示す¹⁾²⁾。図-5は、正負交番載荷による曲げ試験体で、主筋はD19-SD390である。図-6は、中央一点単調載荷によるせん断実験で、せん断破壊が先行するようにD25のねじりPC鋼棒を配筋している。両試験体の鋼殻エレメントは、 $t=6.4\text{mm}$ (STK400) 鋼管部と、 $t=3.2\text{mm}$ (SS400) の隔壁部を溶接で組み立てられたものである。隔壁部と鋼管部には、主筋のための貫通孔を有している。また、両端支点部のD10によるせん断補強以外には、鉄筋によるせん断補強は行っていない。鋼殻エレメント内部は、主筋の配筋後に $45\sim60\text{N/mm}^2$ の高流動コンクリートで充填一体化している。詳細な実験結果は、後述する解析結果と併記するが、ここでは実験で得られた代表的な知見を示す。

図-7に、曲げ試験体における主筋降伏以降のひび割れ幅分布を示す。図中には、同じ主筋を配筋した通常のRC梁試験体における結果¹⁾も併記してある。通常のRC梁のひび割れ幅が純曲げ区間を中心に一様に分布するのに比べ、本構造は鋼殻エレメント間に変形が集中していることが分かる。しかし、主筋降伏までは、この傾向はそれほど顕著ではないことを確認している。

図-8にシアスパンの異なるせん断試験体の鋼管鉛直部、隔壁鋼材のひずみを示す。隔壁鋼材には0.2%を越えるひずみが発生しているが、隔壁鋼材に隣接する鋼管鉛直部には最大で0.03%程度のひずみしか発生していない。2倍の板厚を考慮しても鋼管鉛直部はせん断力をほとんど負担しないことが分かる。

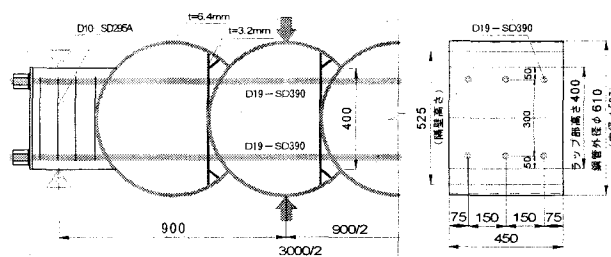


図-5 曲げ試験体 (解析ケース1)

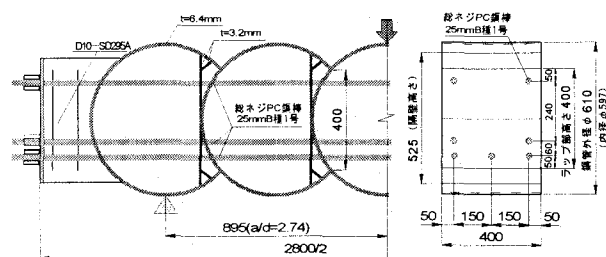


図-6 せん断試験体 (解析ケース3)

表-1 使用材料の素材試験結果

a) 鉄筋・PC鋼棒

鉄筋・PC鋼棒	鋼種	降伏点 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)	伸び (%)
D10	SD295	395	562	1.86	14.7
D19	SD390	441	638	1.90	14.5
D25	B種1号	1,018	1,154	1.98	13.4

b) 鋼材

種類	鋼種	厚さ (mm)	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)
鋼殻	STK400	6.4	370	512	35.3
隔壁	SS400	3.2	315	435	40.0

c) コンクリート

試験体	養生	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	ポアソン比
曲げ試験体	封かん	44.3	3.44	3.12	0.20
せん断試験体	封かん	59.6	4.30	2.90	0.22

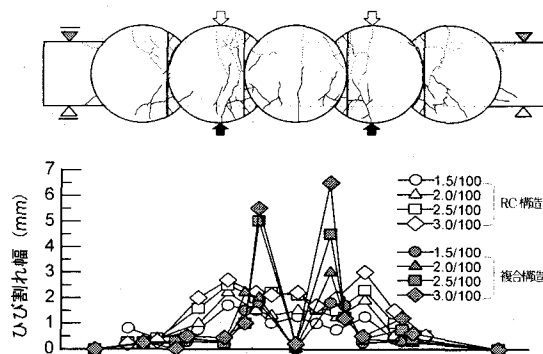
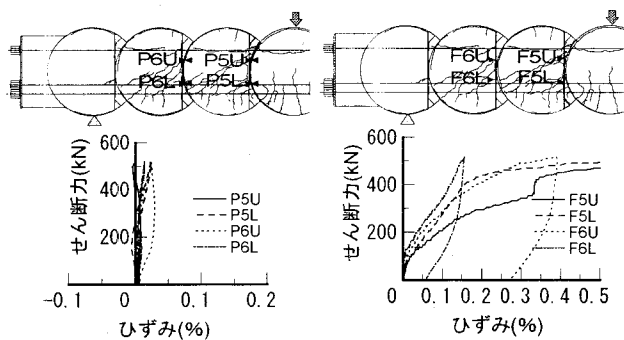


図-7 曲げ試験体ひび割れ幅分布 (主筋降伏以降)¹⁾



(1) 鋼管鉛直部ひずみ (2) 隔壁鋼材のひずみ
図-8 せん断を受ける鋼殻エレメントのひずみ⁹⁾

以上の知見に基づき、本工法の施工性やコストメリットを損なうことなく構造性能を向上させる改善案について、後章にて検討する。

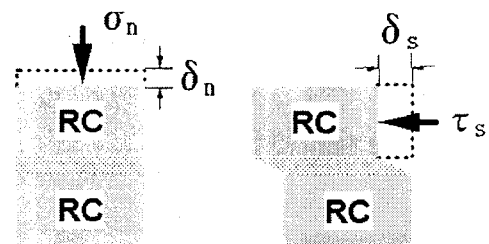
3. 2次元有限要素非線形解析

3.1 解析の概要

本研究では、解析ツールに東京大学コンクリート研究室にて開発中の WCOMD-SJ version 7.7 を使用し、比較的容易に様々なケースを検討できる2次元有限要素非線形解析⁹⁾を適用する。

RC 部は RC 要素、鋼殻部は弾塑性要素にてモデル化することとした。ゾーニング手法⁹⁾を導入することにより、少鉄筋比に対しても解析精度が大きく低下しないよう配慮するとともに、奥行方向に節点を共有させた要素を重ね合わせて配置して、鉄筋および鋼殻の3次元的な配置効果についてはできる限り考慮することとした⁹⁾。また、鋼殻とコンクリートの境界面に、2種類の接合要素を導入した。すなわち、鋼殻と無筋コンクリートの境界面には図-9の軸剛性とせん断剛性を有する接合要素（以下、ユニバーサルジョイントと呼ぶ）を、主筋を通した鋼板の孔部には RC 接合面の局所変形を考慮するために開発された接合要素（以下、「RC ジョイント」と呼ぶ）を適用するものである。なお、奥行方向に上記2者の境界面が共存する箇所には、RC 要素と弾塑性要素を重ね合わせるのと同様に、節点を共有させることにより RC ジョイントとユニバーサルジョイントを配置した。

ユニバーサルジョイントの剛性値は、既往の解析による知見と実験結果との整合性から、表-2 のように設定した。鉛直方向では、鋼殻とコンクリート間でめり込みがないよう大きな圧縮剛性を設定するとともに、引張力の伝達を無視することとした。せん断方向では、開閉口時で剛性値を変化させている。ここで、本構造形式では、通常の RC 梁と異なり大変形時に鉄筋のダボ作用が重要な役割を果たしてくる。本来は、ダボ作用に関して、任意の条件に適用可能な形でモデル化を行い RC ジョイントにて考慮しなければならないが、採用した解析手法ではそこまでの汎用化はなされておらず、計算の煩雑さを防ぐ観点からこれを無視している。ここでは、主筋に隣接するユニバーサルジョイントのせん断剛性を代用的に高めることによって、簡略的に主筋のダボ作用を考慮することとした。その比率は鋼材量を念頭において定めたものである。なお、事前検討によって、主筋隣接部のせん断剛性値が部材応答に大きな影響を及ぼすことを確認している。



(1) 鉛直剛性 (2) せん断剛性

図-9 ユニバーサルジョイントの概念

表-2 ユニバーサルジョイントの剛性値

剛性方向	適用部位	閉口側	開口側	適用ケース
鉛直	すべて	1.0×10^6	0.0	1～5
せん断	主筋部以外	1.0×10^2	1.0	1～5
	主筋部隣接	1.0×10^4	1.0×10^3	1, 2
	主筋2本部	1.6×10^4	1.6×10^3	3, 4, 5
	主筋3本部	2.4×10^4	2.4×10^3	

単位: N/mm²/mm

表-3 解析ケース一覧

先行破壊形式	解析ケース	鋼管板厚 (mm)		隔壁 (mm)
		鉛直区間	上下区間	
曲げ	1 (実験)	6.4	6.4	3.2
	2	なし		
せん断	3 (実験)	6.4		
	4	3.2		
	5	なし		

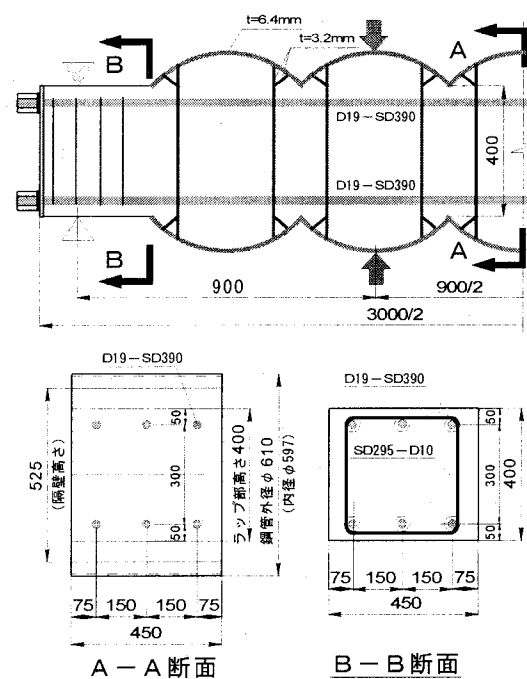


図-10 解析ケース2 (曲げ破壊先行型)

3.2 解析ケース

解析ケース一覧を表-3に示す。初めに、解析精度の確認を兼ねて、実験供試体を模擬した曲げとせん断試験体をそれぞれ1ケース検討し、続いて、実験結果に基づいて鋼材量を削減したケースを、曲げ1ケースとせん断2ケースについて検討する。各ケースの概要は、以下の通りである。

(1) 曲げ破壊先行型の解析ケース

解析ケース1(図-5)は、既往の曲げ試験体と同一である。解析ケース2(図-10)は、鋼管鉛直部のみを鉛直隔壁($t=3.2\text{mm}$)に置換したものである。

(2) せん断破壊先行型の解析ケース

解析ケース3(図-6)は、既往のせん断試験体と同一である。解析ケース4(図-11(1))は、解析ケース3の鋼管の鉛直部のみの板厚を $t=6.4\text{mm}$ から $t=3.2\text{mm}$ に薄肉化したものである。また、解析ケース5(図-11(2))は、鋼管鉛直部($t=6.4\text{mm}$)を $t=3.2\text{mm}$ の隔壁に置き換えたものである。

いずれのケースにおいても、鋼管の上下縁は 6.4mm 、隔壁鋼材は 3.2mm の鋼板で一定としている。解析では、載荷板に変位制御により単調載荷を行い、いずれの解析ケースにおいても、主筋の降伏以降まで載荷を行った。なお、自重は、考慮していない。

以上の実験ケースで削減される鋼材量は、1鋼殻エレメントあたりの試算で解析ケース1、ケース3を100%とすると、鋼管鉛直部を隔壁に置換したケース2、ケース5で7%減。鋼管鉛直部を薄肉化したケース4で12%減となる。

4. 解析結果と考察

4.1 曲げ破壊先行型

(1) M- θ 関係

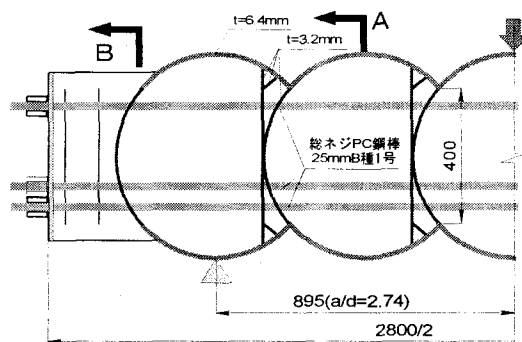
解析結果と実験結果の曲げモーメントと部材角の関係を図-12に示す。実験を模擬した解析ケース1をみると、曲げ耐力に関して実験結果と比較的良好な相関を示しており、解析で設定した接合要素の各種剛性値が概ね妥当なものであると解釈できる。ただし、図-13に示す包絡線で比較すると初期剛性を過小に見積もっており、改善の余地が伺える。解析精度向上のためには、鋼殻とコンクリート間での引張を無視していることを改めるとともに、主筋のダボ作用を忠実にモデル化する必要があると考えられる。今後の課題としたい。

鋼管鉛直部を隔壁に置換した解析ケース2では、解析ケース1と曲げ耐力にはほとんど差異がない一方で、解析ケース1より高い初期剛性と降伏荷重を示している。本構造において、鋼管鉛直部は内部に充填コンクリートがあるものの、その曲面形状のためか初期剛性への寄与は困難であることが伺える。また、解析ケース2のように鋼材を配置することで、設計上有用な弾性域の性能向上に効果的であることが分かる。

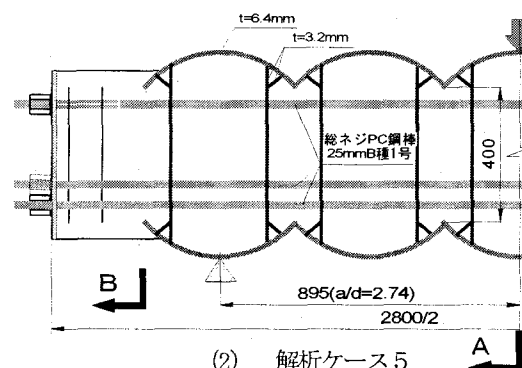
(2) ひび割れ損傷状況

図-14に解析ケース1の $1/100\text{rad}$ と $3/100\text{rad}$ 時のひび割れパターンを示す。図では変形量を15倍にして表示している(以下、同じ)。解析におけるひび割れ状況を観察すると、鉄筋とコンクリートの付着により、曲げひび割れは下縁ではなく引張主筋位置から発生し鉛直方向に進展する。これは、比較のために図-15に示した、解析ケース1に対応する実験によるひび割れ発生状況と良く

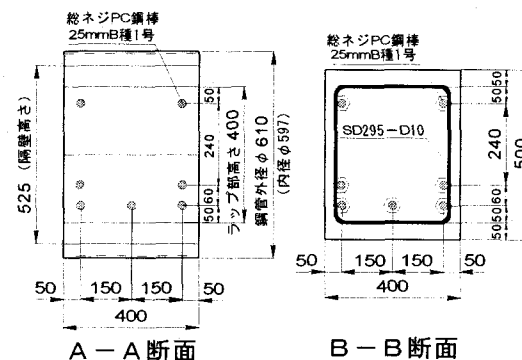
一致している。また、変形は、鋼殻エレメント接合部に集中しており、図-7と同様の傾向にある。以上より、本解析手法は、供試体内部におけるミクロレベルでの応力や損傷状態を再現できていると考えられる。なお、本手法は、分散ひび割れモデルに基づいており、解析におけるひび割れパターンは、現実の1本1本のひび割れを再現しているものではないことに留意されたい。



(1) 解析ケース4



(2) 解析ケース5



(3) 断面 (共通)

図-11 解析ケース (せん断破壊先行型)

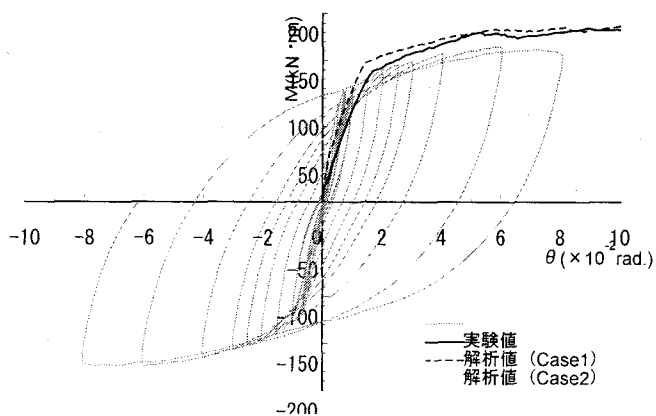


図-12 M- θ 関係 (実験と解析の比較)

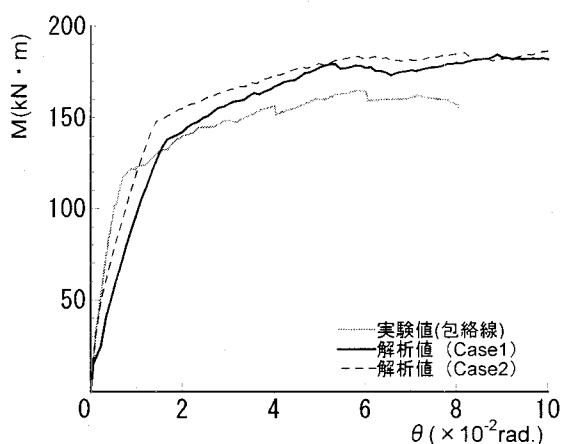


図-13 M-θ 関係 (正側)

図-16 に解析ケース 2 のひび割れパターンを示す。図-14 のケース 1 と比較すると、ケース 1 が鋼殻接合部に損傷が集中するのに対して、ケース 2 はひび割れが比較的分散していることが分かる。

4.2 セン断破壊先行型

(1) 荷重-変形関係

図-17 に解析ケース 2～5 と実験による荷重～変位関係を示す。実験を模擬した解析ケース 3 をみると、解析は実験を概ね再現できていると思われる。変位 10mm までの載荷初期において良く一致しているが、それ以降の変形域での乖離が認められる。これは、実験では最終的に鋼殻エレメント間の鉄筋によるダボ作用が耐力に大きく寄与しているのに対し、解析ではこのダボ作用を主筋に隣接するユニバーサルジョイントのせん断剛性によって代用的にモデル化していることが要因の 1 つであると考えられる。この傾向は、以降の解析ケース 4、5 においても同様である。

鋼管鉛直部の板厚を薄肉化した解析ケース 4 は、解析ケース 3 と比較して変位 10mm 以降で若干の荷重低下が認められる。また、鋼管鉛直部を隔壁鋼材で置換した解析ケース 5 は、変位 10mm 以降もいずれのケースよりも高い値を示し、最大荷重以降も急激な荷重低下も見られない。従って、鋼材の配置としては、解析ケース 5 が最も合理的となる結果であると言える。

(2) ひび割れ損傷状況

図-18 に解析ケース 1 の変位 10mm と 30mm におけるひび割れパターンを示す。また、図-19 に解析ケース 3 に対応するせん断実験によるひび割れ発生状況を示す。ここでも、曲げと同様に、鋼殻エレメント接合部に損傷が集中する傾向は共通している。また、本構造におけるせん断ひび割れが卓越する破壊状況は、解析が実験をよく再現していることが分かる。

図-20 に解析ケース 4 の、図-21 に解析ケース 5 の変位 10mm におけるひび割れパターンを示す。鋼管鉛直部を薄肉化した解析ケース 4 は、解析ケース 3 と比較してほとんど差がないことが分かる。また、鋼管鉛直部を隔壁鋼材と置換した解析ケース 5 は、曲げの解析ケース 2 の場合と同様に、ひび割れ損傷の分散傾向が明確に現れている。

以上より、せん断に対しては、鋼管鉛直部の隔壁鋼材への置換をした解析ケース 5 が、最も効果的な諸元であるとの推論を導くことができる。

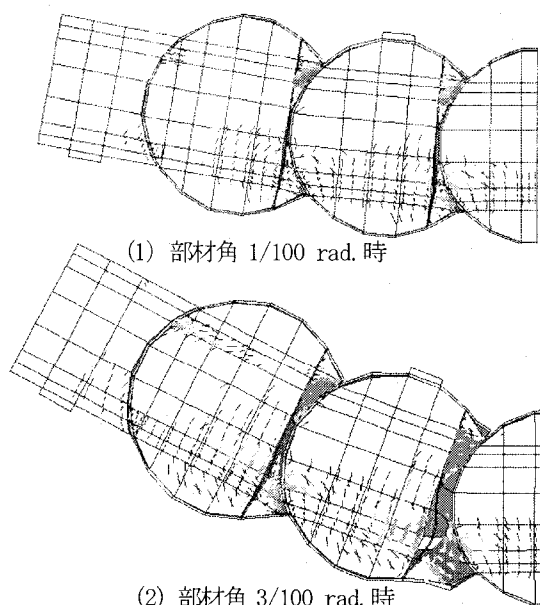


図-14 ひび割れパターン (曲げ: ケース 1)

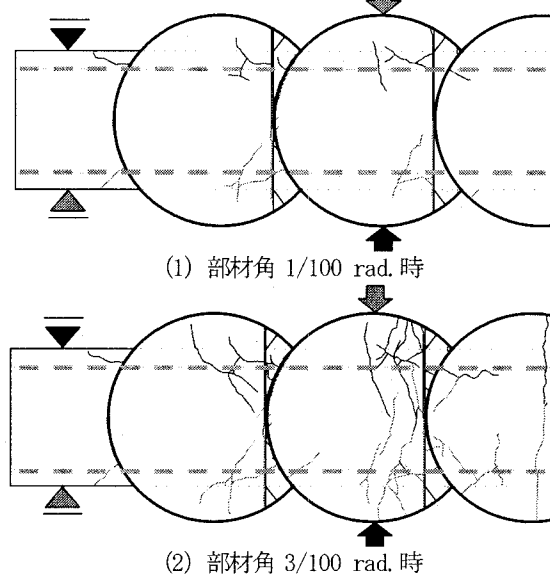


図-15 曲げ実験 ひび割れ発生状況

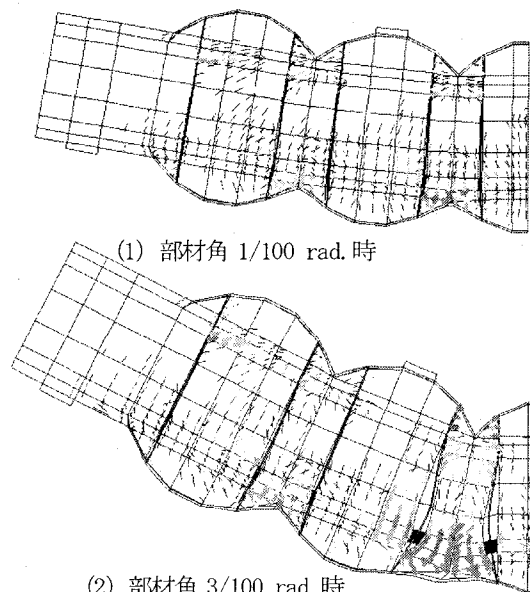


図-16 ひび割れパターン (曲げ: ケース 2)

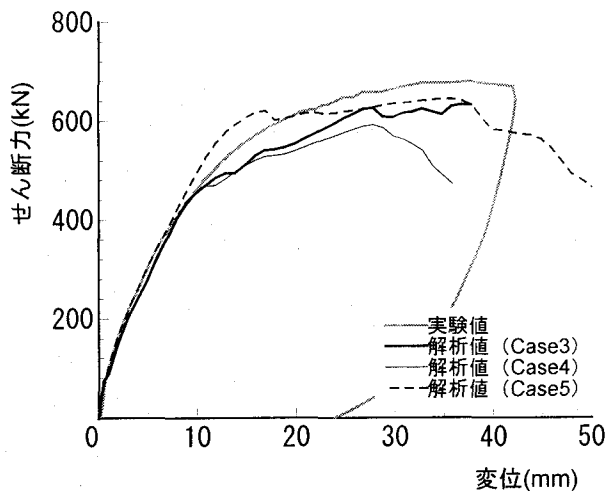


図-17 荷重-変位関係 (せん断)

5. まとめ

本研究により得られた成果をまとめると以下の通りである。

- 1) 既報の実験を対象とした2次元有限要素非線形解析を実施した結果、採用した解析手法であれば、本稿で対象とした複合構造の応答を概ね評価できる見通しを得た。特に、ひび割れ損傷評価については、実験結果とよく一致した。さらなる精度向上には、主筋のダボ作用を忠実に考慮する必要があると考えられる。
- 2) より一層の合理化を目的とした感度解析から、鋼管鉛直部の薄肉化によるせん断耐力や変形性状への影響は少ないことを確認した。さらに、鋼管鉛直部の隔壁鋼板への置換はひび割れ損傷を分散化し、初期剛性や変形性状を改善する効果が高いことを示唆する結果が得られた。

以上の結果を踏まえ、本稿で対象としたような複合構造物に対しても、本有限要素解析を活用した性能照査手法の確立とさらなる合理化追求を目指し、今後も検討を継続することとしたい。

参考文献

- 1) 山口泰男ほか：鋼殻で拘束された鉄筋コンクリート部材に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp1185-1192，2003.3
- 2) 山口泰男ほか：外殻鋼材で拘束された鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，2001
- 3) 山口泰男ほか：外殻鋼材で拘束された複合部材の曲げ性状に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，Vol.11，pp299-304，2003.11
- 4) Mackawa, K. et al. : Nonlinear mechanics of reinforced concrete, SPON Press, 2003.
- 5) 土屋智史ほか：梁のせん断耐力と斜めひび割れの3次元分布に及ぼす側方筋の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.997-1002，2001.

(2003年9月12日受付)

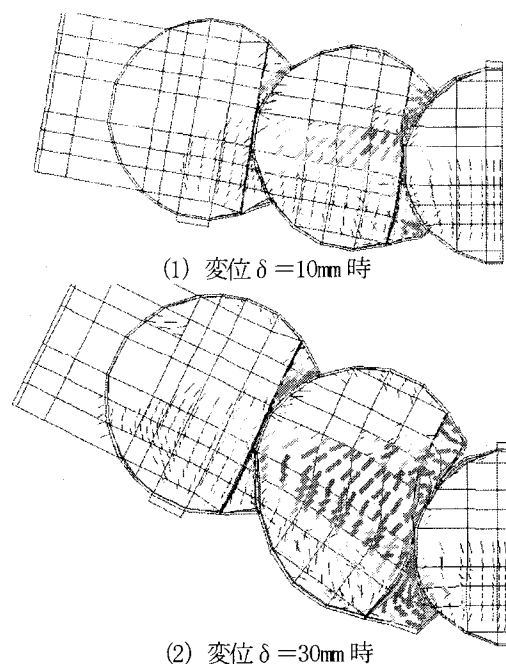


図-18 ひび割れパターン (せん断：ケース3)

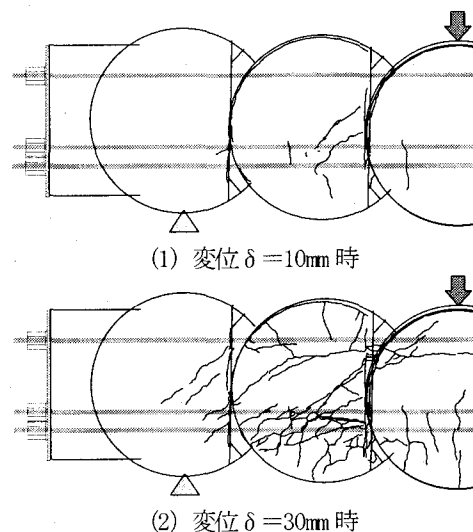


図-19 せん断実験 最終ひび割れ発生状況

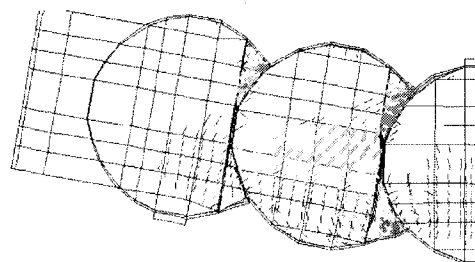


図-20 ひび割れパターン (せん断：ケース4， $\delta=10\text{mm}$)

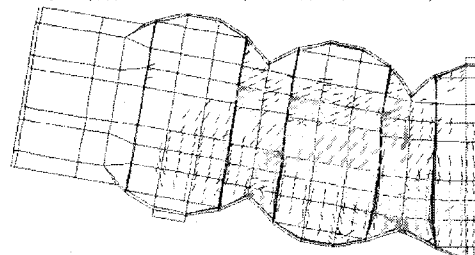


図-21 ひび割れパターン (せん断：ケース5， $\delta=10\text{mm}$)