

特集 「数値解析技術」

FEM解析を用いた大開口を有するRC梁の構造性能評価

米澤 健次 津田 和明
増田 安彦

Structural Performance Estimation of RC Beam with Large Openings by FEM

Kenji Yonezawa Kazuaki Tsuda
Yasuhiko Masuda

Abstract

“Tube-ren” was developed as a reinforcing method for RC beams with large openings. Tube-ren can allow large openings having diameters up to one-half of the beam depth. FEM analyses were conducted to investigate the influence of the large openings on the structural performance of RC beams. The applicability of the analysis model was verified by comparing the analysis results with the test results. The influence of the openings on overall stiffness and drying shrinkage under sustained loads was also investigated by FEM analysis. The results of the analyses showed that the influence of large openings on beam stiffness was insignificant, and excessive cracks attributable to drying shrinkage around the openings could be avoided by restricting the sustained load.

概要

今般、RC梁に梁せいの約1/2までの大きな開口を許容する「チューブレン[®]補強工法」を開発した。その補強工法を開発する過程において、大きな開口を設けることによるRC梁の構造性能に及ぼす影響を検討するために非線形FEM解析を行った。まず、既往の実験を対象とした解析を行い、実験と解析を比較することで、解析モデルの適合性を検討した。さらに、大きな開口が梁全体の剛性に与える影響、及び、長期荷重時における乾燥収縮の影響を解析的に検討した。その結果、大きな開口を設けた場合でも、所定のスパン及び最小補強量を確保すれば、無開口梁の剛性と概ね同等であり、また、長期荷重をここに示す開口部せん断ひび割れ荷重の算定値以下に制限すれば、乾燥収縮の影響は顕著にならないことを確認した。

1. はじめに

従来、RC梁に設けられる開口の大きさは、梁せいの1/3以下に慣例的に制限されていたが、「チューブレン[®]」補強工法の開発¹⁾により、RC梁に梁せいの約1/2までの開口を設けることが可能になった。Fig.1に本補強工法の概要を示す。本補強工法の概要はFig.1の図及び写真に示すように開口上下のせん断補強材と鋼管を組み合わせることに特徴がある。開口上下のせん断補強材にはフラットバー（以下、FBと称す）を用い、U字に曲げ加工したFBを鋼管の開口上下部に溶接し、開口上下のFBの中に上下の梁主筋を通す補強工法である。これらの開発を行なう過程において、開発工法の構造成立性や有効性を検証する方法としては、今まで主に実験的な検討が行なわれてきた。しかし、実験は多くの時間を費やし、コストの観点からも、想定すべきあらゆる事象に対して、実験的に検討することは不可能である。また、実験では再現できない事象も存在するのが実状である。

一方、大林組では1985年からコンクリート系部材の非線形FEM解析プログラム「FINAL[®]」の開発を始め、継続的にその解析精度の向上、及び、適用範囲の拡大に取り組んできた。最近では、破壊に至るまでのRC部材の非線形挙動に対する解析精度も飛躍的に向上し、実験の代

用として非線形解析が活用できる段階に至っている。

そこで、「チューブレン」の開発に際し、実験の代用として「FINAL」を活用し、非線形FEM解析の結果を用いて、本技術を適用したRC梁の構造安全性を検討した。

まず、実験試験体を対象とした解析を行い、実験と解析の比較により、解析モデルの適用性を検討した。次に、大きな開口を設けることによる梁部材全体の剛性に与える影響、及び、長期荷重下における乾燥収縮の影響を解析的に検討した。

2. 解析モデルの検証

2.1 解析対象実験の概要

解析モデルの妥当性を検証するためにコンクリート強

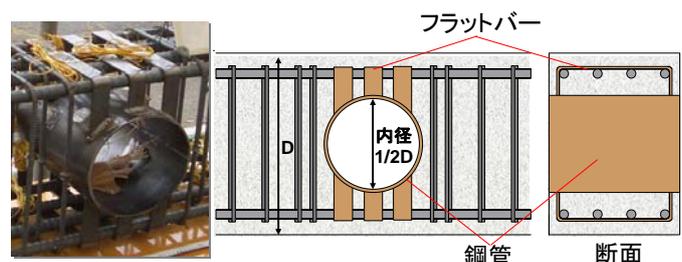


Fig.1 チューブレン補強工法
Tube-ren Reinforcing Method

度を変数とした3つの実験試験体に対して解析を行った。Table 1(a)に試験体諸元, Table 1(b)に鋼材の定数, Fig.2に試験体形状を示す。3体ともに実物の約1/2縮尺模型であり, 断面は350mm×450mmである。また, 径が梁せい

Table 1(a) 試験体諸元
Parameters of Test Specimens

| | S2-No.1 | S2-No.2 | S2-No.3 |
|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|
| コンクリート強度 (N/mm ²) | 42.3 | 25.0 | 67.9 |
| 断面(mm) | B×D= 350×450 | | |
| 開口径 | 225mm (H=1/2D) | | |
| せん断スパン(mm) | L=1800 (a/D=2.0, a=L/2) | | |
| 梁主筋 | 4-D25(異形PC) | | |
| せん断補強筋 | 4-D10@80(SD295) | | |
| フラットバー | 厚さ4.5mm×幅38mm (3組) | | |
| 鋼管 | 厚さ6.0mm×外径237mm | | |

Table 1(b) 鋼材の定数
Properties of Steel Material

| | ヤング係数 | 降伏強度 |
|--------|--------------------------|----------------------|
| せん断補強筋 | 188000 N/mm ² | 368N/mm ² |
| フラットバー | 204000 N/mm ² | 317N/mm ² |
| 鋼管 | 208000 N/mm ² | 298N/mm ² |

2.2 解析モデル概要

Fig.4に解析モデルを示す。解析は3次元FEM繰返し載荷解析とし, 試験体の形状及び載荷条件の対称性を利用して, 試験体の半分のみをモデル化した。コンクリートは8節点六面体要素, 梁主筋とせん断補強筋はトラス要素, 鋼管及びフラットバーは4節点シェル要素を用いて表現した。なお, フラットバーとコンクリートの節点は, 別節点として定義し, 付着はないものと仮定した。

本解析で用いた材料構成則を以下に示す。

- 1) コンクリートの主応力～等価一軸ひずみ関係：
(圧縮側) 修正Ahmadモデル²⁾
(引張側) ひび割れまでは線形, ひび割れ後はテンションスティフニング特性として出雲モデル (c=1.0)³⁾
(履歴特性) 文献4) の曲線モデルを採用⁴⁾
- 2) コンクリートのひび割れ：多方向のひび割れを考慮できる非直交ひび割れモデル⁵⁾
- 3) ひび割れ面のせん断伝達モデル：長沼モデル⁶⁾
- 4) 破壊条件：Ottosenの4パラメータモデル (係数：畑中)²⁾

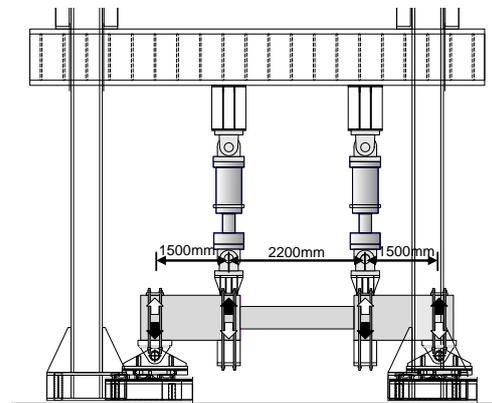


Fig. 3 載荷システム
Loading System

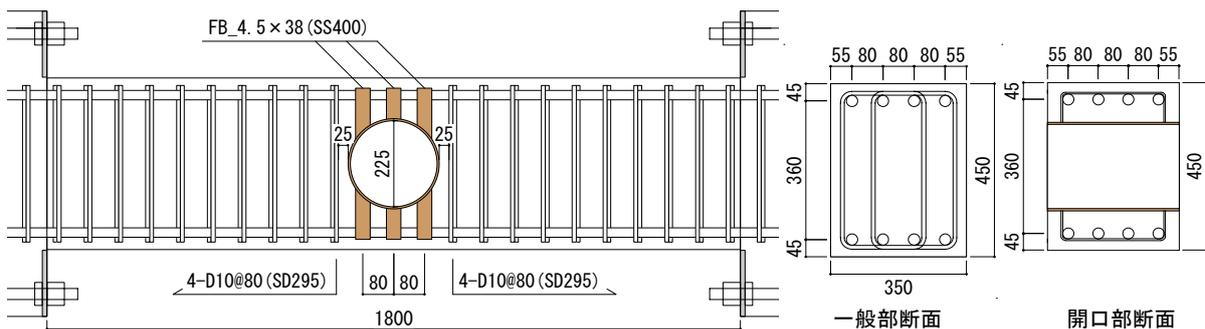


Fig. 2 試験体形状及び配筋詳細
Configuration and Reinforcement of Test Specimens

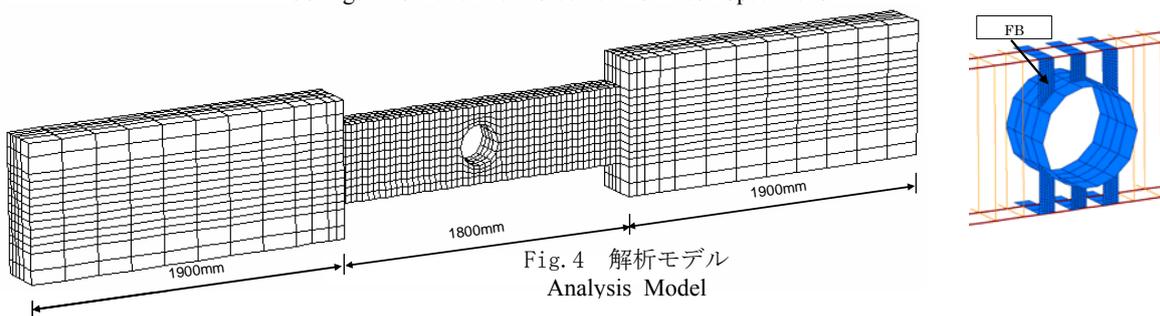


Fig. 4 解析モデル
Analysis Model

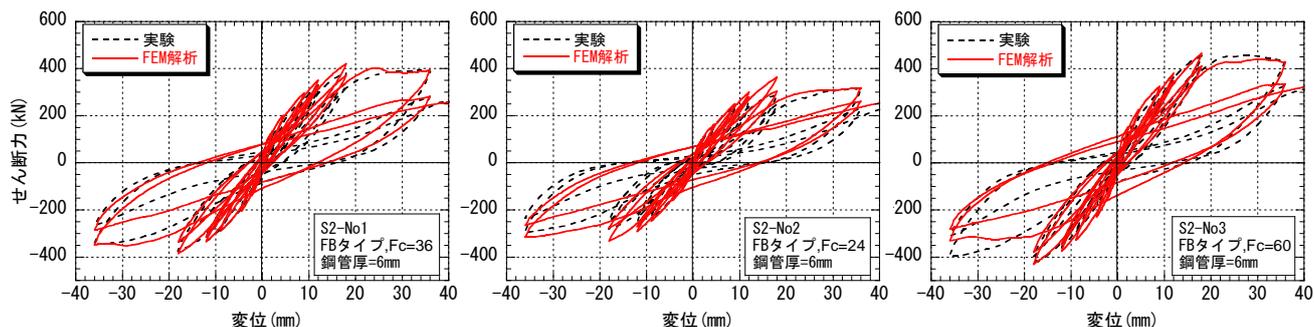


Fig. 5 解析と実験の荷重～変位関係の比較

Comparisons of Load – Displacement Relationships Between Analysis and Test

Table 2 各ピーク時のせん断力の比較
Comparison of Shear Force at Peak of Loading Cycle

| | R=1/800 | R=1/400 | R=1/200 | R=1/150 | 最大耐力 | |
|--------|---------|---------|---------|---------|------|------|
| S2-No1 | 解析 | 137 | 202 | 296 | 351 | 421 |
| | 実験 | 122 | 178 | 278 | 329 | 391 |
| | 解/実 | 1.12 | 1.13 | 1.07 | 1.07 | 1.08 |
| S2-No2 | 解析 | 111 | 164 | 251 | 300 | 364 |
| | 実験 | 111 | 161 | 241 | 264 | 318 |
| | 解/実 | 1.00 | 1.02 | 1.04 | 1.14 | 1.14 |
| S2-No3 | 解析 | 153 | 227 | 325 | 381 | 466 |
| | 実験 | 131 | 197 | 308 | 376 | 458 |
| | 解/実 | 1.18 | 1.15 | 1.05 | 1.01 | 1.02 |

- 5) 鋼材の応力～ひずみ関係：バイリニア
- 6) 鉄筋の履歴則：修正Menegotto-pintoモデル⁷⁾
- 7) フラットバー及び鋼管の構成則：塑性増分理論に基づく弾塑性モデルにより等方硬化則
- 8) 鋼材の降伏条件：von Mises, 材料定数に関しては材料試験結果を採用した。

2.3 解析モデルの適用性

Fig.5に3体の解析と実験から得られたせん断力～変位関係の比較を示し、Table 2に両者の各載荷ピーク時におけるせん断力の比較を示す。

Fig.5及びTable 2より、最大耐力及び剛性に関して、3体ともに実験と解析の差異は概ね15%以内に収まっており、概ね一致することを確認した。また、コンクリート強度の違いに関わらず、履歴ループの形状に関して実験と解析が概ね良好な対応を示した。

このことから、ここで用いた解析モデルにより、チューブレン補強工法を用いて補強した大開口を有する梁の非線形挙動を良好な精度で再現できることが確認できた。

3. 大開口が梁の剛性に与える影響の検討

3.1 解析概要

条件を統一した無開口梁、単独開口、連続開口の仮想試験体を用いて、前述のFEM解析手法を用いた数値実験を行い、剛性に対する大きな開口の影響を検討した。

仮想試験体としては、径が1/2D (D：梁せい)の開口を1つ有する単独開口と2つ有する連続開口の解析モデルを基に、一般に許容されている開口径の大きさが1/3Dの開口を有する単独開口と連続開口の解析モデル（以下1/3D開口と称す）、及び無開口梁の解析モデルを用い、5ケースの解析結果を比較することにより剛性を検討した。

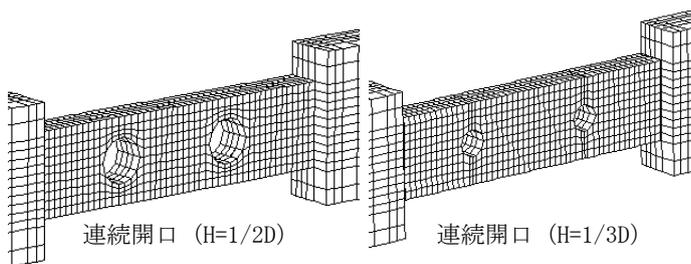


Fig. 6 仮想試験体の解析モデル
Analysis Models of Numerical Study

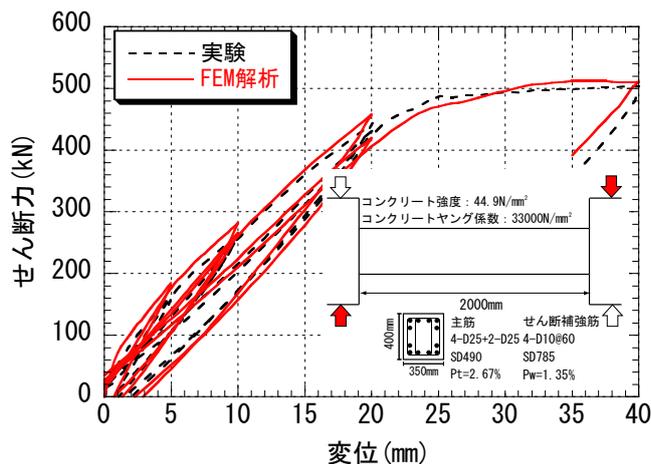


Fig. 7 無開口梁の解析と実験の比較

Comparison of Analysis and Test of RC Beam with No Opening

なお、連続する開口の中心間距離は3H (H:開口径)とした。また、コンクリート強度の違いによる影響を検討するために、それぞれの場合(1/2D単独開口、1/2D連続開口、1/3D単独開口、1/3D連続開口、無開口)について、コンクリート強度を変数としてFc36とFc60を仮定した解析を行った。Fig.6に解析モデルを示す。ここでの数値実験では一般に用いられた場合を想定し、主筋は引張鉄筋比Pt=1.2%、主筋の降伏強度をFc36およびFc60の場合にそれぞれ、390N/mm² (SD390) および490N/mm² (SD490)と仮定し、せん断耐力の実験値に対する曲げ耐力の比(せん断余裕度)が1.3程度となる曲げ降伏先行型の梁部材として解析を行った。その他の解析条件は2章で示した解析と全く同じである。ただし、3つの解析モデルにおいて、開口数及び開口径以外の条件をすべて統一するために鉄筋、FB、鋼管及びコンクリートの材料定数は共通とした。

Table 3(a) 各ピーク時のせん断力 (Fc36)
Shear Force at Peak of Cycle (Fc36)

| Fc36 | Q1 R=1/800 | Q2 R=1/400 | Q3 R=1/200 | Q4 R=1/150 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 無開口 | 128 | 192 | 283 | 311 |
| 単独開口 (H=1/2D) | 127 | 190 | 274 | 298 |
| 連続開口 (H=1/2D) | 125 | 183 | 268 | 294 |
| 単独(H=1/2D) /無開口 | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 0.96 |
| 連続(H=1/2D) /無開口 | 0.97 | 0.96 | 0.95 | 0.95 |

単位:kN

Table 3(b) 各ピーク時のせん断力 (Fc60)
Shear Force at Peak of Cycle (Fc60)

| Fc60 | Q1 R=1/800 | Q2 R=1/400 | Q3 R=1/200 | Q4 R=1/150 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 無開口 | 139 | 204 | 307 | 364 |
| 単独開口 (H=1/2D) | 137 | 201 | 287 | 344 |
| 連続開口 (H=1/2D) | 135 | 196 | 290 | 338 |
| 単独(H=1/2D) /無開口 | 0.99 | 0.98 | 0.93 | 0.95 |
| 連続(H=1/2D) /無開口 | 0.97 | 0.96 | 0.94 | 0.93 |

単位:kN

Table 3(c) 各ピーク時のせん断力 (Fc36)
Shear Force at Peak of Cycle (Fc36)

| Fc36 | Q1 R=1/800 | Q2 R=1/400 | Q3 R=1/200 | Q4 R=1/150 |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 単独開口 (H=1/3D) | 128 | 188 | 281 | 300 |
| 連続開口 (H=1/3D) | 129 | 188 | 275 | 299 |
| 単独開口 (H=1/2D) | 127 | 190 | 274 | 298 |
| 連続開口 (H=1/2D) | 125 | 183 | 268 | 294 |
| 単独(H=1/2D) /単独(H=1/3D) | 0.99 | 1.01 | 0.97 | 0.99 |
| 連続(H=1/2D) /連続(H=1/3D) | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |

単位:kN

Table 3(d) 各ピーク時のせん断力 (Fc60)
Shear Force at Peak of Cycle (Fc60)

| Fc60 | Q1 R=1/800 | Q2 R=1/400 | Q3 R=1/200 | Q4 R=1/150 |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 単独開口 (H=1/3D) | 139 | 203 | 301 | 356 |
| 連続開口 (H=1/3D) | 142 | 202 | 299 | 347 |
| 単独開口 (H=1/2D) | 137 | 201 | 287 | 344 |
| 連続開口 (H=1/2D) | 135 | 196 | 290 | 338 |
| 単独(H=1/2D) /単独(H=1/3D) | 0.99 | 0.99 | 0.95 | 0.97 |
| 連続(H=1/2D) /連続(H=1/3D) | 0.95 | 0.97 | 0.97 | 0.97 |

単位:kN

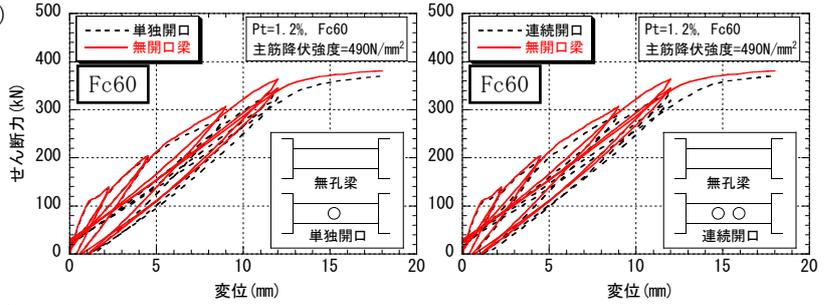
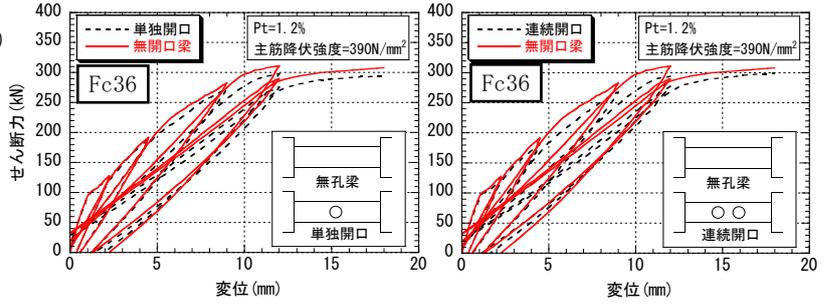


Fig. 8 1/2D開口梁と無開口梁の比較 (荷重～変形関係)

Comparisons of Analysis Results with 1/2D Openings and No Opening

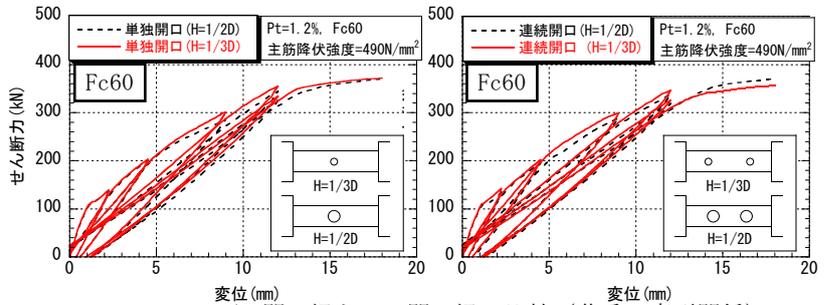
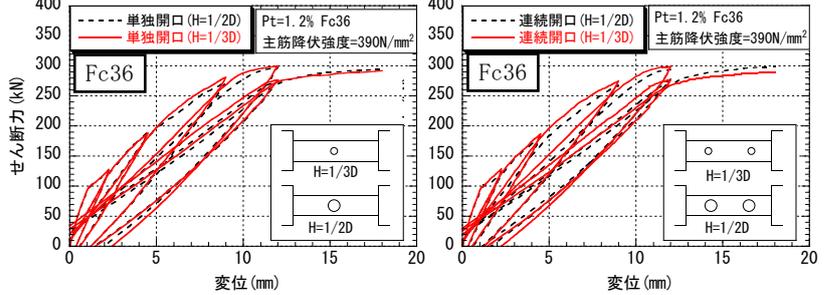


Fig. 9 1/2D開口梁と1/3D開口梁の比較 (荷重～変形関係)

Comparisons of Analysis Results with 1/2D and 1/3D Openings

また、無開口梁のせん断補強筋量は、開口梁の一般部と同じとした。また、1/3D開口の解析モデルでは本工法を用いた開口補強とし、補強量は単独開口及び連続開口のモデルと同程度とし、せん断スパンa/Dは2で統一した。

解析における荷重履歴としては、実験と同様に変形角 R=1/800,1/400,1/200,1/150rad (2回繰返し) で正負交番繰返し荷重を行い、R=1/100radまで解析を行った。剛性の比較方法としては、各荷重ピークと同じ変形時のせん断力を比較した。

また、開口の無い一般的なRC梁(無開口梁)に対する解析精度に関しては、既往の実験⁸⁾を対象とした解析を行い検証した。解析モデルは前述のものと同じである。

その解析結果と実験結果の比較をFig.7に示す。図より、本解析モデルによれば開口が無い一般的なRC梁に関しても良好な精度で非線形挙動を再現できることがわかる。

3.2 検討結果

単独開口梁、連続開口梁のそれぞれについて、H=1/2Dの開口梁と無開口梁の荷重～変位関係の比較をFig.8に示し、H=1/2Dの開口梁とH=1/3Dの開口梁の荷重～変位の比較をFig.9に示す(H:開口径)。また、それぞれについて各変位時のせん断力の比較をTable 3(a)-(d)に示す。

ここでの解析結果の比較においては、コンクリート強度が高い方が開口の影響によるひび割れ後の剛性低下が

やや大きくなる傾向がみられる。しかし、剛性に対する $H=1/2D$ の大きな開口の影響は、無開口梁との比較において、概ね5%程度の剛性低下率である。また、 $H=1/2D$ と $H=1/3D$ の開口梁の比較においては1~3%程度の剛性低下率であった。本検討では、せん断スパンが $a/D=2$ の短い梁を想定している。スパンが長くなればなるほど、剛性に対する開口の影響は小さくなることは明らかであり、本検討は最も開口の影響を受けやすい条件下で行っていると言える。 $H=1/2D$ の大きな開口を設けた場合の剛性低下率は、各変位時にせん断力で比較した場合、無開口梁に対する剛性低下率は5%であり、一般に許容されている $H=1/3D$ の開口梁と比較すると3%程度であった。このことより、剛性に対する $H=1/2D$ の開口の影響は非常に小さいことがわかった。また、図より、連続開口をとした場合においても、 $R=1/400\text{rad}$ までの剛性は、無開口梁の剛性と殆ど差異は無かった。梁せいの1/2程度の開口を有する場合でも、本補強法を用いた部材の剛性は開口の無い一般の梁と同等であると判断できる。

4. 長期荷重時における乾燥収縮の影響の検討

4.1 解析概要

本補強工法を用いたRC梁において長期荷重時の乾燥

収縮ひずみによる影響を解析的に検討した。本検討では、本補強工法の適用範囲において、長期荷重時にせん断力が最も大きくなる位置に径が $1/2D$ (D :梁せい) の開口を設けた場合を想定した。同じ開口位置に径が $1/3D$ の開口を設け、一般に用いられる開口補強金物を用いた場合と開口が無い場合についても解析を行い、それらの解析結果を比較することにより、本補強工法を用いた場合の乾燥収縮ひずみの影響を検討する。なお、解析は2次元非線形FEM解析とし、2章に記載した解析モデルを用いた。

4.1.1 解析条件 Fig.10に境界条件を示し、Fig.11に解析モデルを示す。解析モデルは両端固定梁を想定し、対称条件を用いて半分のみをモデル化した。ただし、固定端の水平変位はフリーとして、回転のみを拘束した。解析ケースとしては、開口径、開口有無、鉛直荷重を変数として計4ケースの解析を行った。CASE1~3では、梁端部のせん断力が(1)式で求められる無開口部の長期許容せん断力に達するまで鉛直等分布荷重を載荷し、CASE4では開口中心位置のせん断力が開口部せん断ひび割れ荷重(2)~(4)式)に達するまで鉛直等分布荷重を載荷した。長期荷重載荷後、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁹⁾」に準じて 400μ の乾燥収縮ひずみを与えた。

主筋量は引張鉄筋比 $P_t=1.2\%$ (上端・下端で共通) として、全てのケースで共通とした。なお、無開口部のせん

Table 4 長期荷重と開口位置のせん断力
Sustained Loads and Shear Force at Opening

| | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 |
|------|-------|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|
| Fc21 | | 86.8 N/mm Q _o =186 kN | | 71.2 N/mm Q _o =151 kN |
| Fc36 | | 100.0 N/mm Q _o =211 kN | | 92.0 N/mm Q _o =195 kN |

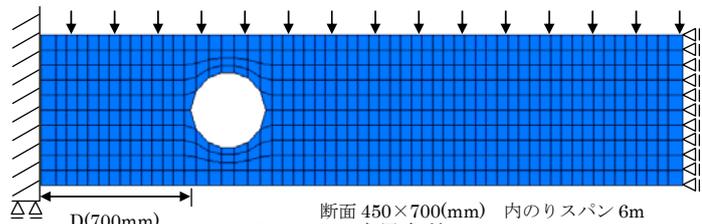
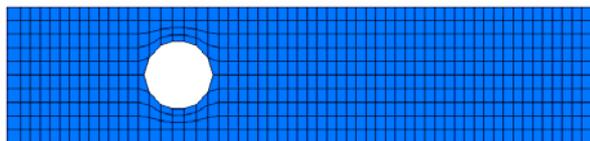
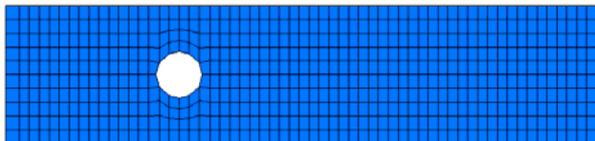
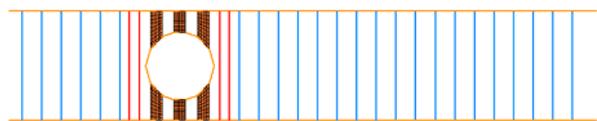


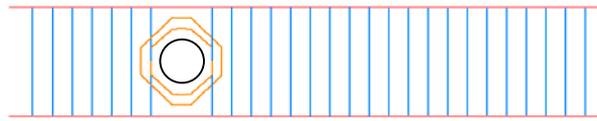
Fig. 10 境界条件
Boundary Conditions



P_t=1.2%, 一般部せん断補強筋:2-D13@100(P_w=0.56%), 鋼管厚:12mm, FB:6mm
CASE1,CASE4 (開口径:1/2D, チューブレン補強)



P_t=1.2%, 一般部せん断補強筋:2-D13@100 (P_w=0.56%), 開口補強金物: φ10-3組
CASE2 (開口径:1/3D, 一般開口補強金物)



P_t=1.2%, 一般部せん断補強筋:2-D13@100 (P_w=0.56%)
CASE3 (無開口)

Fig. 11 解析モデル
Analyzed Model

断補強筋量は2-D13@100mm (Pw=0.56%) と仮定し、断面を450mm×700mm、内法スパンを6mと仮定した。Table 4に各ケースの長期荷重 (単位長さ当たり)、開口位置のせん断力を示す。

○長期許容せん断力の算定式

$$Q_L = b_j \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 w_f \cdot (P_w - 0.002) \} \quad (1)$$

ここで、 f_s : コンクリートの長期許容せん断力(N/mm²),
 w_f : せん断補強筋用長期許容引張応力(N/mm²)
 P_w : あばら筋比, α : 4/(M/Qd+1)
 ただし $1 \leq \alpha \leq 2$ (ここでは $\alpha=1$)

○開口部せん断ひび割れ荷重の算定式

$$V_c = \phi \cdot \sigma_T \cdot b \cdot D' / \kappa \quad (2)$$

$$\sigma_T = 0.33(\sigma_B)^{0.5} \quad (3)$$

$$D' = D - H - 2 \cdot t \quad (4)$$

ここで、 V_c : ひび割れ耐力計算値(N), b : 梁幅(mm),
 D : 梁せい(mm), H : 開口径(mm), t : 鋼管厚(mm),
 σ_B : コンクリートの圧縮強度(N/mm²), ϕ : 耐力係数 (ここでは =1.0), κ : 断面形状係数 (ここでは1.5)

4.1.2 解析ケース 解析ケースは開口径の大きさ、開

口の有無、及び長期荷重を変数とした4ケースに対して、コンクリート強度を21N/mm²とした場合と36N/mm²とした場合について計8ケースの解析を実施した。

4.1.3 材料定数 仮定した各材料定数を以下に示す。

○コンクリート

ひび割れ後のコンクリート引張側の材料構成則は、安全側の評価としてテンションスティフニング効果は無視し、土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾に準じて、要素寸法の影響を受けない引張軟化特性を考慮した。

○鉄筋、鋼管、及びFB

各鋼材の降伏強度は、規格降伏点とした。

主筋 : 降伏強度 : 345N/mm²,
 ヤング係数 : 2.05×10⁵N/mm²

せん断補強筋 : 降伏強度 : 295N/mm²,
 ヤング係数 : 2.05×10⁵N/mm²

鋼管 : 降伏強度 : 235N/mm²,
 ヤング係数 : 2.05×10⁵N/mm²

4.2 検討結果

Fig.12及びFig.13にFc21とFc36のCASE1～4の乾燥収縮ひずみ400μ導入後のひび割れ状況、最大主ひずみコンターを示す。また、Table 5に鉛直荷重載荷後及び乾燥収縮ひずみ導入後の梁中央部のたわみ量を示す。

鉛直荷重載荷後及び乾燥収縮ひずみ導入後のたわみに

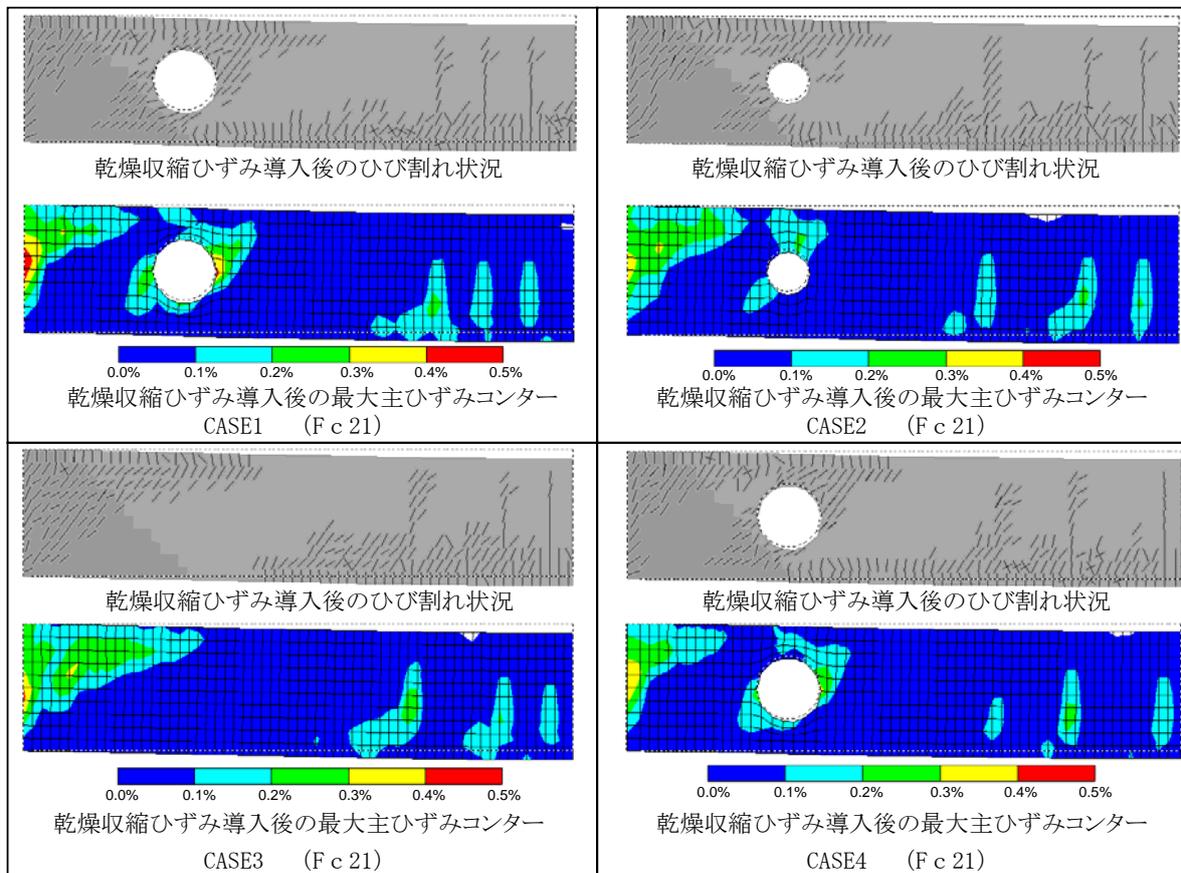


Fig. 12 ひび割れ状況及び最大主ひずみコンター (Fc21)
 Crack Pattern and Maximum Principal Strain Contour (Fc21)

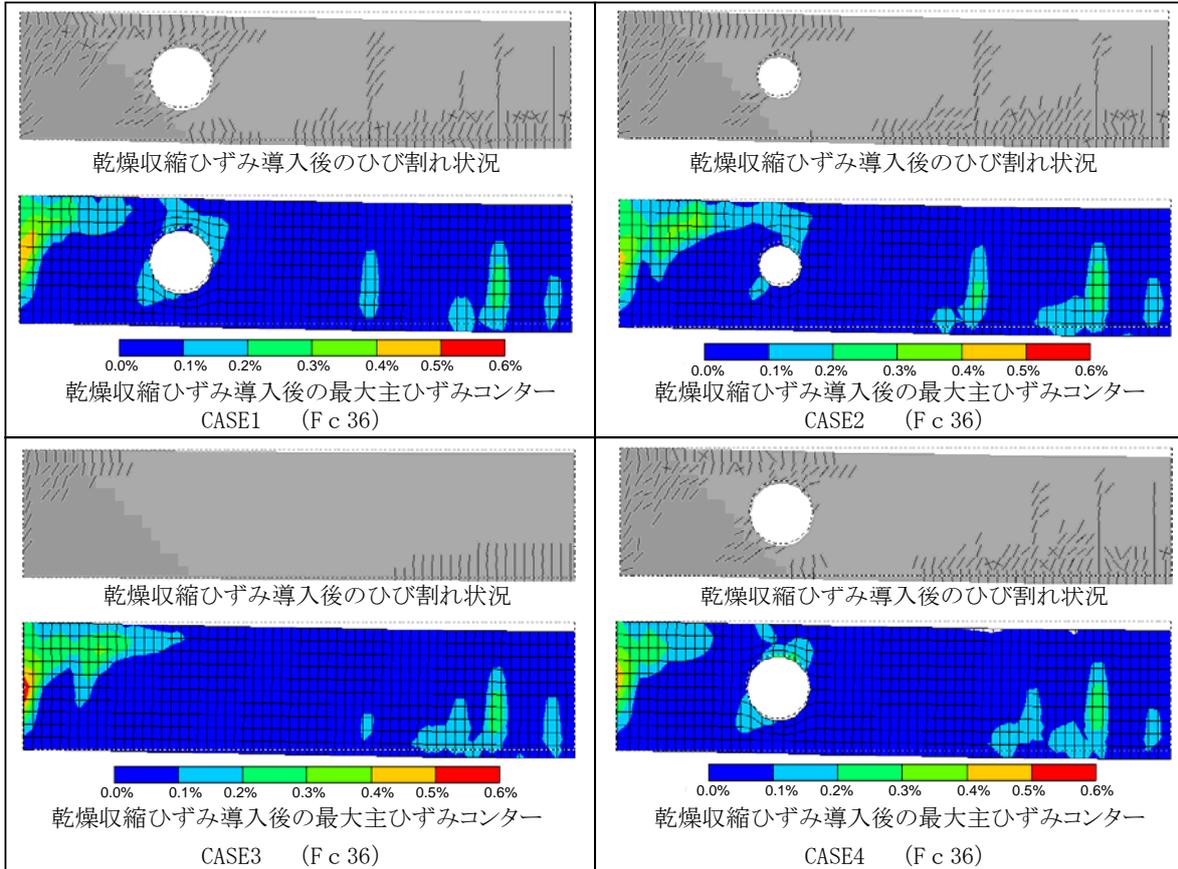


Fig. 13 ひび割れ状況及び最大主ひずみコンター (Fc36)
Crack Pattern and Maximum Principal Strain Contour (Fc36)

関しては、Table 5より鉛直荷重が同じのCASE1～CASE3の比較から、開口の有無及び開口径の大きさの影響は小さいことがわかる。

しかし、開口を有する場合に関しては、開口径が1/2Dの場合と1/3Dの場合のひび割れ状況から、両者ともに乾燥収縮ひずみ導入後には開口周りに斜めひび割れが生じる結果となった。また、最大主ひずみコンターの比較より、開口径が1/2Dの場合は、1/3Dの場合に比べて、開口周辺に局所的なひずみ集中が生じた。このことより、無開口の長期許容せん断力を載荷した場合においては、径が1/2Dの開口を設けると、乾燥収縮の影響で開口周辺には幅広いひび割れが生じる可能性があることがわかった。

一方、CASE4は開口位置のせん断力が(2)～(4)式で求まるひび割れ荷重程度となるように鉛直荷重を小さくした場合の解析結果である。図より、CASE4とCASE2の開口周辺のひずみは同程度であることがわかる。このことより、本補強工法による1/2Dの開口を設けた場合でも、開口位置のせん断力が開口部のせん断ひび割れ荷重程度の鉛直荷重であれば、1/3Dの開口を設けた場合と同程度のひずみレベルに収まり、1/2D程度の開口を設けても乾燥収縮による影響は顕著にならないものと考えられる。

Fig.14に(2)～(4)式による開口部ひび割れ荷重と(1)式による無開口梁の長期許容せん断力の比較を、横軸をコン

Table 5 梁中央のたわみ量
Flexure Deformation at Center of Beam

| Fc21 | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 長期荷重時 | | | | |
| 梁中央たわみ(mm) | 2.00 | 1.89 | 1.92 | 1.38 |
| 乾燥収縮ひずみ導入時 | | | | |
| 梁中央たわみ(mm) | 5.33 | 5.11 | 5.24 | 4.48 |
| Fc36 | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 |
| 長期荷重時 | | | | |
| 梁中央たわみ(mm) | 1.94 | 1.86 | 1.87 | 1.64 |
| 乾燥収縮ひずみ導入時 | | | | |
| 梁中央たわみ(mm) | 5.18 | 5.29 | 4.97 | 4.80 |

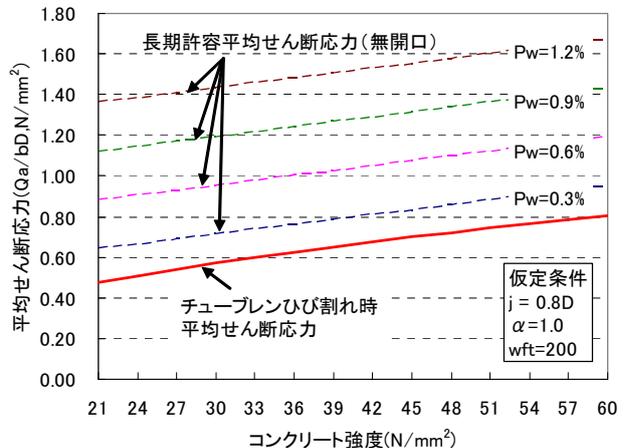


Fig. 14 長期許容荷重の比較
Comparison of Sustained Loads

クリート強度として示す。図より、(2)式～(4)式で求まる開口部のひび割れ荷重の計算値は、無開口梁の長期許容せん断力と比較して小さい。本補強工法の適用範囲として開口上下の補強量は、 $1.9 \text{ N/mm}^2 \leq P_{wd} \cdot s \cdot \sigma_y \leq 3.9 \text{ N/mm}^2$ と制限を設けており、FBの強度を 235 N/mm^2 とした場合、最低でも開口上下の鋼材量は0.8%程度となる。無開口梁の $P_w=0.8\%$ の時の長期許容せん断力と比較すると、(2)式～(4)式で求まる開口部のひび割れ荷重の計算値はその半分程度となる。本補強工法により大きな開口を設ける場合は、開口位置のせん断力を(2)～(4)式で得られる開口部のひび割れ荷重以下となるように長期荷重を制限すれば、乾燥収縮による影響は、一般に許容されている1/3Dの開口を設けた場合と同等であると判断した。

5. まとめ

本報では、非線形FEM解析プログラム「FINAL」を用いて「チューブレン補強工法」を用いて補強した大開口RC梁について、剛性及び長期荷重下の乾燥収縮に着目し、構造性能を評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 既往の実験試験体3体の解析を通して、ここで示す解析モデルによりチューブレン補強工法を用いて補強した大開口を有する梁の非線形挙動を良好な精度で再現できることがわかった。
- 2) 梁のせん断スパン比が2.0以上の場合においては、 $H=1/2D$ の大きな開口を設けた場合の剛性低下は、無開口梁に対して5%程度であり、一般に許容されている $H=1/3D$ の開口梁と比較すると3%程度であった。このことより、本補強工法を用いて補強した開口梁は、無開口梁と同等の剛性を有することがわかった。
- 3) 本補強工法を用いたRC梁における長期荷重時の乾燥収縮ひずみによる影響を解析的に検討した。その結果、本補強工法により大きな開口を設ける場合は、開口位置のせん断力を(2)～(4)式で得られる開口部のひび割れ荷重以下となるように長期荷重を制限すれば、乾燥収縮による影響は、1/2D程度の開口を設けても、一般に許容さ

れている1/3Dの開口を設けた場合と同等であると判断できる。

参考文献

- 1) 梁せいの半分の大開口が可能なRC梁開口補強工法, 建築技術, p. 73, 2009. 2
- 2) 長沼一洋: 三軸応力下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp. 163-170, 1995
- 3) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No. 87. 9-1, pp. 107-120, 1987. 9
- 4) 長沼一洋, 他: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp. 135-142, 2000. 10
- 5) 米澤健次, 他: 正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の三次元非線形FEM解析, 大林組技術研究所報No. 67, 2003
- 6) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, pp. 39-48, 1991. 3
- 7) Ciampi, V., et al.: Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkley, Nov., 1982.
- 8) 杉本訓祥, 他: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価システム「耐震予報™」の開発, 大林組技術研究所報 No. 69, 2005
- 9) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」1991一部改定
- 10) コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, 土木学会, 2002制定