

論文 既存 RC 梁のあと施工貫通孔の補強に関する FEM 解析

米澤 健次^{*1}・松井 智哉^{*2}・三原 竜生^{*3}・迫田 丈志^{*4}

要旨：既存 RC 造梁のあと施工貫通孔に対して鋼管を用いて補強した場合の補強効果を把握することを目的とした既往載荷実験を対象に非線形 FEM 解析を実施した。コア抜きにより貫通孔を設ける際にせん断補強筋を切断した場合を対象とした実験と解析の比較より、仮定した解析手法およびモデルにより実験の非線形挙動を良好に再現できることを確認した。また、解析による応力分布の考察により貫通孔に対する鋼管の補強効果を確認した。さらに、コア抜きによりせん断補強筋を切断しない場合に対する解析を行い、せん断補強筋の切断の有無によるせん断耐力への影響を検討した。

キーワード：有限要素法, 有孔 RC 梁, あと施工貫通孔, 貫通孔補強, 鋼管, せん断耐力

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物のリニューアル工事においては、既存の梁に新設の貫通孔が必要とされる場合がある。鉄筋コンクリート造梁（以下、RC 梁と称す）にあと施工貫通孔を設けた場合、梁に断面欠損が生じるため、梁の剛性や耐力などの構造性能は低下することになる。現状、コア抜きにより RC 梁に貫通孔を設ける場合、鉄筋探査等により、せん断補強筋を切断しない位置に貫通孔を設けるように計画されるが、表面に近い位置の鉄筋は探査可能であるが、深い位置にある鉄筋は探査できない場合があり、径が比較的に大きな貫通孔を設ける場合には、せん断補強筋を切断するケースもある。このようにコア抜きによりせん断補強筋を切断する場合は、さらに梁の構造性能を劣化させる要因となり、要求される性能を確保するためにも、状況に応じた適切な補強が必要となる。

補強方法としては、耐震改修促進法に当てはまる耐震補強工事への適用を前提とした開発的な研究の実施と実用化がなされている^{1),2),3)}。しかし、様々な条件下において広く適用されるためには、建築基準法で規定される指定建築材料で構成し、かつ簡易に施工できる補強工法の開発が必要である。

本論文では、新設貫通孔の補強方法の開発を目的として、鋼管による補強を施した有孔 RC 梁の既往実験⁴⁾を対象に非線形 FEM 解析を実施した。コア抜きにより貫通孔を設ける際にせん断補強筋を切断した場合を対象とした実験と解析の比較より、解析精度を確認した上で、解析結果の考察に基づき、補強効果について解析的に検討した。さらに、コア抜きによりせん断補強筋を切断しない場合に対する解析を行い、せん断補強筋の切断の有無によるせん断耐力への影響を検討した。

2. 既往載荷実験の概要⁴⁾

表－1 および表－2 に実験変数および試験体諸元を示す。図－1 および図－2 に梁の断面および試験体配筋を示す。試験体は実大の 1/2 スケールの RC 梁である。試験体数は 5 体である。実験変数は貫通孔および補強の有無、補強鋼管の形状である。梁幅および梁せいは 250mm × 420mm、せん断補強筋比は 0.2%、内法スパンは 1680mm、せん断スパン比 a/D は 2.0 とし、せん断破壊となるように計画された。試験体 B1-RC は無孔 RC 梁で基準試験体である。試験体 B1-O は有孔 RC 梁で無補強である。貫通孔径は 114.3mm であり、梁せいに対する貫通孔径の比は 0.27 である。ここでは、貫通孔を設けることによりせ

表－1 実験変数

試験体名	B1-RC	B1-O	B1-St1	B1-St2	B1-St3
開孔径	なし	D/3.67 (補強鋼管の内径に対しては D/4) せん断補強筋の切断：1 本			
補強	—	なし	鋼管	鍔付鋼管	リング鋼管

表－2 試験体諸元

		実大	試験体
断面 B×D		500×800mm	250×420mm
主筋(SD490)		上下 5-D32	上下 4+2-D16
せん断補強筋 (SD295)		2-D13@250 $p_w = 0.002$	2-D6@125 $p_w = 0.002$
内法スパン		3200mm	1680mm
コンクリート強度		27 N/mm ²	27 N/mm ²
開孔／ 補強の寸法	CON 削孔径	246mm 程度	鋼管外径
	グラウト厚さ	15mm 程度	なし
	鋼管外径	216.3mm	114.3 mm
	鋼管内径	199.9mm	105.3 mm
	鋼管厚さ	8.2 mm	4.5 mm
	鍔寸法	□320×320mm	□160×160mm
	鍔厚さ	9.0mm	4.5 mm

*1 (株)大林組 技術研究所 上級首席技師 博士 (工学) (正会員)

*2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 コーリョー建販(株)

*4 (株)堀江建築工学研究所 博士 (工学) (正会員)

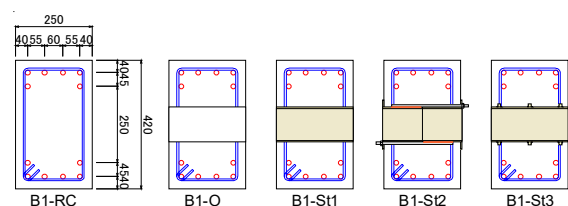
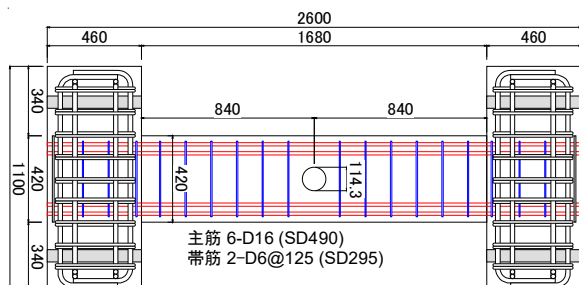


図-1 試験体断面図



図一2 試験体配筋（有孔）

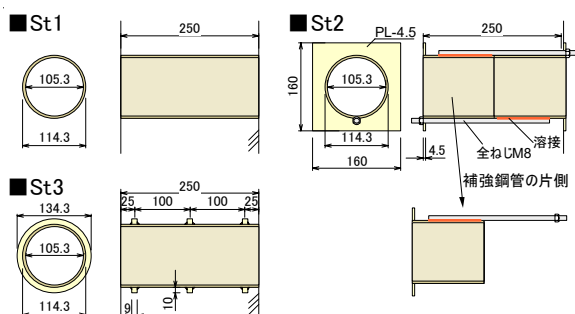


図-3 補強鋼管詳細

ん断補強筋が1組切断されることを想定し、試験体では該当するせん断補強筋を省略している。試験体 B1-St1 B1-St2 および B1-St3 は有孔 RC 梁で補強が施された試験体である。図-3 に補強鋼管の詳細を示す。試験体 B1-St1 は鋼管のみで補強した試験体である。試験体 B1-St2 は錨付き鋼管補強である。錨付き鋼管は2つに分割して製作し、鋼管には全ネジが溶接されている。梁の両側から突き合わせてナットで固定している。試験体 B1-St3 はリング付き鋼管である。試験体 B1-St2 および B1-St3 は面外方向の拘束効果を確認するために計画された。

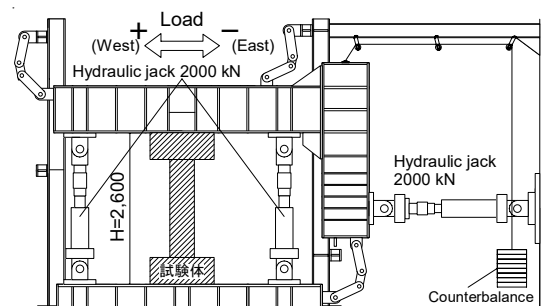


圖-4 載荷裝置

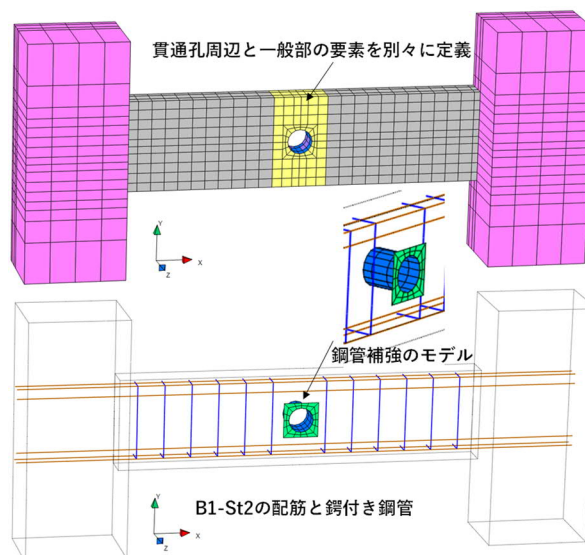


図-5 解析モデル

ん断補強筋が1組切断されることを想定し、試験体では該当するせん断補強筋を省略している。試験体 B1-St1 B1-St2 および B1-St3 は有孔 RC 梁で補強が施された試験体である。図-3 に補強鋼管の詳細を示す。試験体 B1-St1 は鋼管のみで補強した試験体である。試験体 B1-St2 は錨付き鋼管補強である。錨付き鋼管は2つに分割して製作し、鋼管には全ネジが溶接されている。梁の両側から突き合わせてナットで固定している。試験体 B1-St3 はリング付き鋼管である。試験体 B1-St2 および B1-St3 は面外方向の拘束効果を確認するために計画された。

使用されたコンクリートは圧縮強度 28.2~31.2N/mm²の範囲にあり、せん断補強筋には D6 (SD295) を、鋼管等の鋼材には SS400 が用いられている。

載荷装置を図-4 に示す。試験体は梁軸方向を鉛直方向にして載荷装置に設置し、正負交番逆対称曲げせん断加力がなされた。水平力の載荷は変形制御とし、上下スタブの相対水平変位 δ と梁内法長さ L で与えられる相対変形角 R ($=\delta/L$) で $1/1600$, $1/800$, $1/400\text{rad}$ を 1 サイクルずつ行い、 $1/200$, $1/133$, $1/100$, $1/67\text{rad}$ を 2 サイクルずつ繰り返した後、 $1/50\text{rad}$ を 1 サイクルまで載荷が行われた。実験結果としては全試験体ともにせん断破壊に至った。なお、使用材料の特性など、実験の詳細は文献⁴⁾

を参照されたい。

3. 実験の再現解析

3.1 解析モデルおよび材料構成則

一例として、試験体 B1-St2 の解析モデルを図-5 に示す。解析モデルは対称条件を設定し、梁幅方向の半分をモデル化した。解析コードは FINAL⁵⁾を用いた。RC 躯体は六面体要素、鋼管及び錨はシェル要素でモデル化し、鋼管及び錨と RC 躯体の節点は別々に定義し、その間にフィルム要素を配し、界面の接触・剥離およびすべりを考慮した。フィルム要素の特性は、界面法線方向については、接触時は剛、剥離時は応力を負担しないものとして、界面せん断方向に関しては、応力を負担しないようにモデル化した。B1-St3 の鋼管に取り付くリングは、シェル要素の厚みを変化させてモデル化した。B1-St2 の実験試験体では、錨付き鋼管は2つに分割して、全ネジにより連結しているが、解析では全ネジのモデル化は省略し、鋼管は分割されていないものとしてモデル化した。

表-3 に用いた材料構成則の一覧を示す。コンクリートの材料構成則は、貫通孔周辺と一般部で要素タイプを別々に定義した。本実験の試験体においては、コア抜きにより一組のせん断補強筋を切断したものと想定し、貫

通孔周囲にはせん断補強筋は配筋されていないため、せん断補強筋が配された一般部と異なる特性を示すものと考えた。特に、ひび割れ後の引張特性に関しては、コンクリートと鉄筋の付着により生じるテンションスティフニング特性に関しては、一般部と貫通孔周辺で異なるものと考えられる。よって、貫通孔周辺はひび割れ後、急激に応力が低下する材料モデルとし、一般部はある程度のテンションスティフニング特性を見込み、ひび割れ後、応力が緩やかに低下する材料モデルを採用した。なお、表-3に示す材料構成則の詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

主筋およびせん断補強筋は、軸方向のみ剛性を有するトラス要素でモデル化し、主筋に関しては、主筋とRC躯体の節点を別々に定義し、その間にライン要素を挿入し両者間の付着一すべりを考慮した。付着すべり特性において、付着強度は文献⁶⁾の付着割裂強度の計算値を用い、

表-3 材料構成則一覧

	項目	一般部	貫通孔周辺
コンクリート	応力~ひずみ関係 (Prepeak)	修正Ahmadモデル	
	応力~ひずみ関係 (Postpeak)	中村・桧貝モデル	修正Ahmadモデル
	引張軟化モデル	出雲モデル (c=0.6)	出雲モデル (c=1.2)
	ひび割れ面のせん断伝達モデル	長沼モデル	
	ひび割れ圧縮劣化特性	応力のみ低減	応力・ひずみともに低減
鉄筋	応力~ひずみ関係	完全弾塑性バイリニア	
鋼管	降伏条件等	von Misesの降伏条件、	
鋼管・錨	応力ひずみ関係	完全弾塑性バイリニア	
鋼管・錨との界面の条件		摩擦・付着はなし、接触剥離は考慮	

付着強度時のすべりは1mmを仮定した。

解析における荷重は、両スタブの端面を、片側は完全固定として、両スタブの端面が平行に移動するように、他端面に強制変位を与えて、正負交番逆対称曲げせん断加力を模擬した。なお、解析は、実験において最大耐力が発揮され、ポストピーク挙動となる変形角1/100radの荷重までを対象として実施した。

3.2 解析結果と実験結果の比較

解析と実験の最大耐力の比較一覧を表-4に、解析と実験のせん断力-変形角関係の比較を図-6に示す。5体ともにポストピーク挙動に至る変形角1.0%のサイクルの履歴性状に関しては、実験と解析で差異が生じるが、最大耐力近傍のせん断力を示す変形角0.5%までの履歴性状に関しては、実験と解析で良好な対応を示し、解析により実験の挙動を精度良く再現できることが確認できる。最大耐力に関しては、無孔梁のB1-RC試験体の負側

表-4 最大耐力の比較一覧

		実験	解析	実験/解析
B1-RC	正側	194.3	185.4	1.05
	負側	-193.5	-173.9	1.11
B1-O	正側	123.0	142.1	0.87
	負側	-136.5	-135.7	1.01
B1-St1	正側	152.3	152.1	1.00
	負側	-150.0	-147.3	1.02
B1-St2	正側	168.8	171.6	0.98
	負側	-168.0	-163.9	1.03
B1-St3	正側	159.8	169.1	0.94
	負側	-156.8	-145.7	1.08

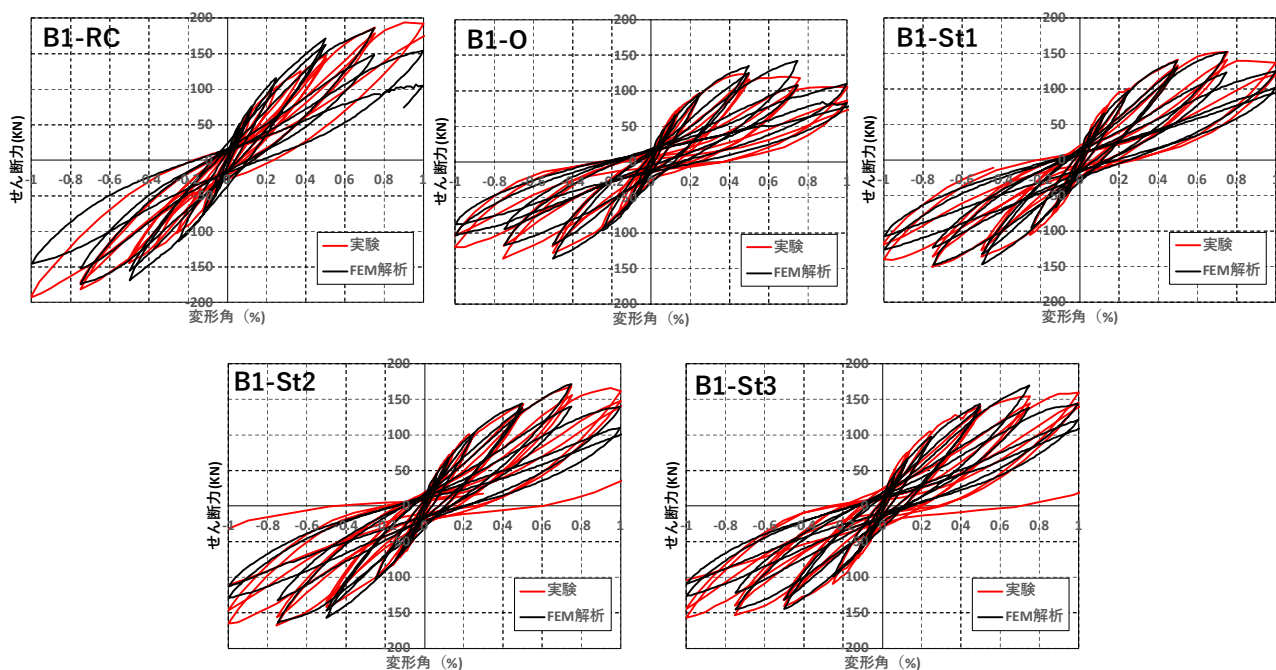


図-6 解析と実験のせん断力-変形角関係の比較

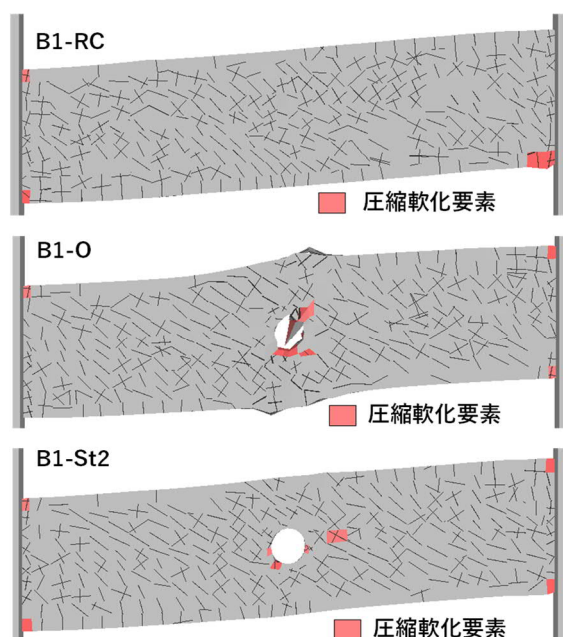


図-7(a) ひび割れ・損傷変形状況（最大耐力時）

で、無補強の有孔梁である B1-O 試験体における正側で、 $\pm 10\%$ をやや超える差異が生じているが、その他の試験体に関しては、差異が $\pm 10\%$ 以内の差異に納まっている。このことより、解析により本実験の最大耐力を概ね評価可能であるものと判断した。

B1-RC（無孔梁）、B1-O（無補強有孔梁）、B1-St2（鈐付き鋼管補強）の解析から得られた最大耐力時のひび割れ・損傷変形状況およびせん断補強筋の降伏状況を図-7(a)(b)にそれぞれ示す。B1-RC に関しては、最大耐力時に部材中央において圧縮強度に到達した要素（図-7 中の赤色部分「圧縮軟化要素」）はないがほとんどのせん断補強筋が降伏しており、実験と同様にせん断破壊に至った。B1-O と B1-St2 に関しては、貫通孔周辺の多くの要素が圧縮強度後の軟化領域に到達し、貫通孔周辺に損傷が集中していることがわかり、実験と同様に貫通孔部分のせん断破壊に至った。無補強有孔梁の B1-O の方が貫通孔周辺の損傷が顕著に表れた。以上より、損傷状況や破壊モードに関しても実験と解析は良好な対応を示すことを確認した。

3.3 解析結果に基づく補強効果の考察

本節では、3 つのタイプの補強鋼管を用いた試験体のうち、最も補強効果があった B1-St2 に着目して考察する。

B1-RC（無孔梁）、B1-O（無補強有孔梁）、B1-St2（鈐付き鋼管補強）の解析から得られた変形角 0.5%時の最小主応力コンターを図-8 に示す。

無孔梁の B1-RC に関しては、梁部材の対角に幅広い圧縮ストラットが形成され、一方、無補強有孔梁の B1-O では、貫通孔部分において圧縮応力が伝達できないため、貫通孔を迂回するように圧縮ストラットが形成されてい

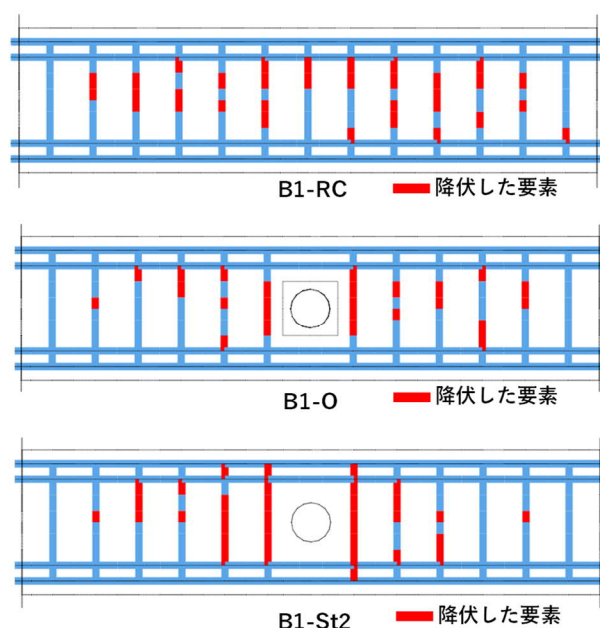


図-7(b) せん断補強筋の降伏状況（最大耐力時）

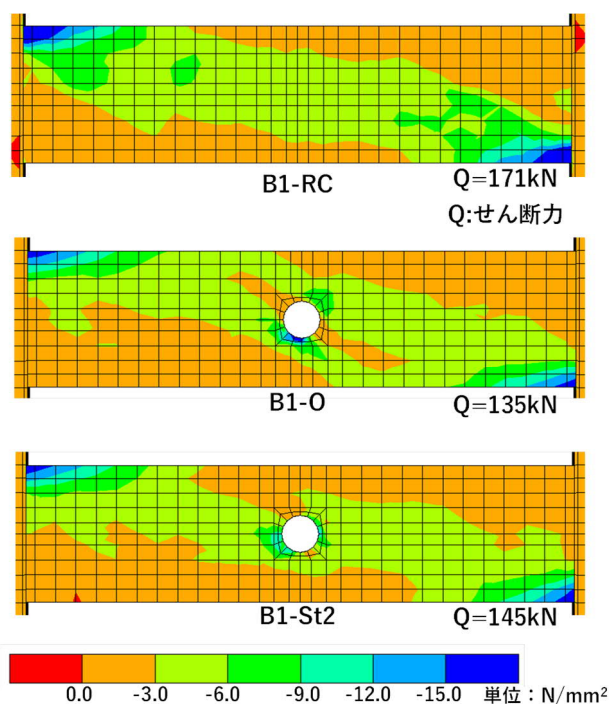


図-8 最小主応力コンター（変形角 0.5%時）

ることがわかる。B1-St2 では、鈐付き鋼管による補強により、貫通孔部分においても圧縮応力が伝達されることで、補強効果が表れることが確認できる。このことが B1-St2 が B1-O よりも最大耐力が約 20%程度向上した要因と考えられる。しかし、本実験では、貫通孔を設けることにより 1 組のせん断補強筋を切断することを想定している。その影響により B1-St2 は無孔梁の B1-RC に比べて、最大耐力が 13%程度低い結果になったものと推察できる。また、せん断補強筋を切断しない場合には、鈐付

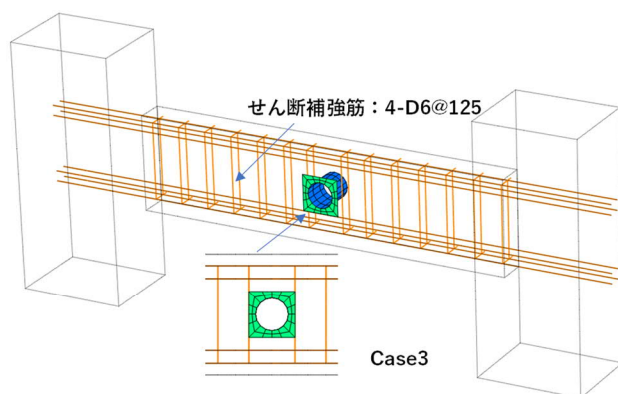


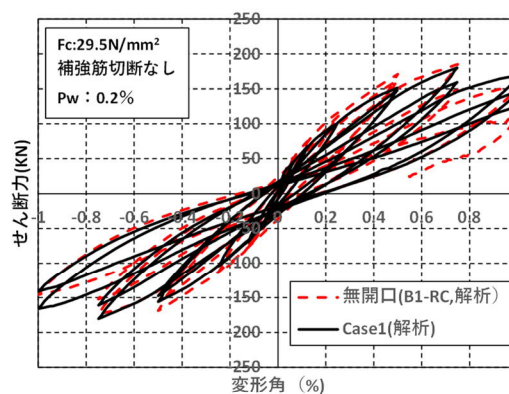
図-9 Case3 の解析モデルにおける配筋

表-5 解析ケース一覧

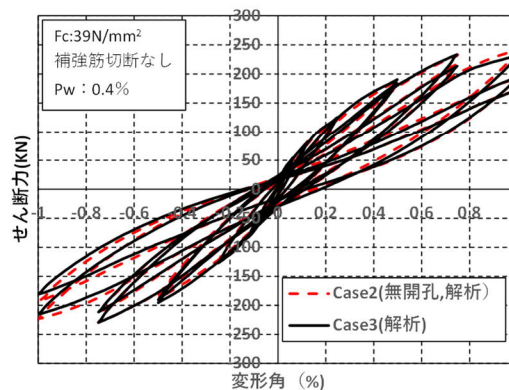
	Case1	Case2	Case3
解析モデル	B1-St2のモデルに基づく		
貫通孔の有無	あり	なし	あり
コンクリート強度(N/mm ²)	29.5	39.0	
せん断補強筋比(%)	0.2	0.4	
比較対象の解析結果	B1-RC	—	Case2

表-6 解析結果による最大耐力の比較

	Case1	Case2	Case3
FEM解析結果	180	240	250
無開口梁との比	0.97	—	1.04



(a) Case1 と B1-St2 の比較



(b) Case2 と Case3 の比較

図-10 各 Case のせん断力—変形角関係の比較

き鋼管による補強により、無孔梁と同等の耐力を有する可能性がある。せん断補強筋の切断の有無については、次章にて FEM 解析により検討する。

4. せん断補強筋の切断の有無が最大耐力に与える影響

4.1 検討概要および解析モデル

コア抜きにより、既存の RC 梁に貫通孔を設ける場合、せん断補強筋を切断する可能性があり、解析対象とした実験では、1 組のせん断補強筋を切断したことを想定した試験体を用いられた。貫通孔による断面欠損に関しては、鋼管を用いることで、圧縮応力を伝達することができ、補強できることが推察されたが、主に引張応力を負担するせん断補強筋が欠損することによる影響に対しては、鋼管による補強では、補いきれない可能性がある。そこで、B1-St2 の解析モデルを用いて、せん断補強筋を切断しない場合を想定した解析を行い、無孔梁と同等の構造性能を発揮できるかを検証した。また、コンクリート圧縮強度やせん断補強筋比を高くした場合の補強効果を把握するために、コンクリート圧縮強度とせん断補強筋比を変えた解析を実施した。解析ケースの一覧を表-5 に示し、一例として Case3 における解析モデルの鉄筋配置を図-9 に示す。解析モデルは B1-St2 のモデルを用い、貫通孔がせん断補強筋のピッチ間に設けられた場合

を想定し、せん断補強筋のトラス要素の配置を調整したモデルを用いた。Case1 は B1-St2 において、せん断補強筋の位置を調整したもので、B1-St2 の再現解析に用いた材料特性を用い、無孔梁の B1-RC の再現解析結果と比較した。Case2 は、Case3 との比較用として、無孔梁でコンクリート圧縮強度を 39N/mm² に高め、せん断補強量を 2 倍 (4-D6@125, Pw=0.4%) に高めた解析である。また、Case3 は Case1 のモデルに対して、コンクリート圧縮強度を 39N/mm² に高め、せん断補強量を 2 倍 (4-D6@125, Pw=0.4%) に高めた解析である。コンクリート圧縮強度を 39N/mm² としたのは、一般に中低層建物の梁に用いられるコンクリートの設計基準強度としては、高めの強度区分となる条件下で検討するためである。なお、再現解析では、貫通孔周囲と一般部で材料構成則を変えていたが、ここでの解析では、せん断補強筋が切断されないことを想定しているため、貫通孔周囲も含め、表-3 の「一般部」に示す材料構成則を採用した。

4.2 解析結果

図-10(a) (b) に各 Case のせん断力—変形角関係の比較を示し、表-6 に各 Case の最大耐力の比較を示す。

B1-St2 においてせん断補強筋を切断しなかった場合を想定した Case1 は、B1-RC の解析結果と比較して、やや剛性が低いものの、最大耐力に関しては、概ね同等の性

能を有することがわかる。

Case1 に対してコンクリート圧縮強度およびせん断補強筋比を高めた Case3 は、無孔梁の Case2 と比較して、顕著な差異はみられない。図-11 に Case2 と Case3 の最大耐力時（変形角 0.75% 時正側 1 回目）の最小主応力コンターの比較を示す。両ケースともに貫通孔を有する場合でも、錨付き鋼管補強を施すことで、無孔梁と同等の幅の圧縮ストラットが形成されていることがわかる。

以上の結果より、せん断補強筋を切断しなかった場合においては、貫通孔による断面欠損を錨付き鋼管を用いて補強することにより、無孔梁と概ね同等の最大耐力に回復できる可能性があることがわかった。今後、実験的な検証が望まれる。

5. まとめ

既存 RC 梁のあと施工貫通孔を対象に鋼管を用いて補強した場合の補強効果を検討するために、既往実験を対象とした非線形 FEM 解析を実施した。また、FEM 解析により、せん断補強筋の切断の有無がせん断耐力に与える影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 無孔梁、補強のない有孔梁、貫通孔を鋼管、錨付き鋼管、およびリング付き鋼管で補強した梁 5 体の既往実験における非線形挙動および最大耐力を FEM 解析により、良好な精度で再現できることがわかった。
- 2) 無補強の有孔梁の B1-O では、貫通孔部分は圧縮応力が伝達できないため、貫通孔を迂回するように圧縮ストラットが形成され、錨付き鋼管補強の B1-St2 では、鋼管により、貫通孔部分においても圧縮応力が伝達されることにより、幅広い圧縮ストラットが形成されることを解析的に検証できた。
- 3) せん断補強筋を切断しなかった場合においては、貫通孔による断面欠損を錨付き鋼管を用いて補強することにより、無孔梁と概ね同等の最大耐力に回復できる可能性があることがわかった。

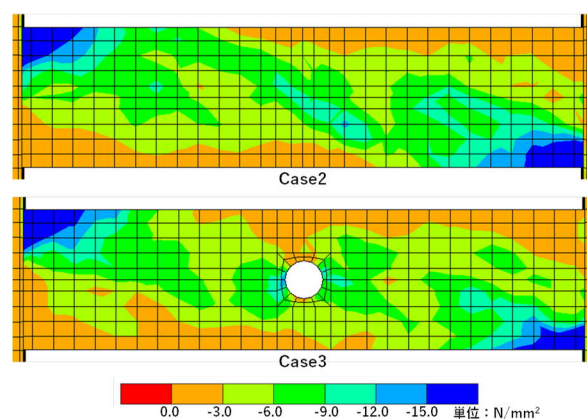


図-11 Case2 と Case3 の最小主応力コンターの比較

参考文献

- 1) 白井和貴，勝俣英雄，古屋則之，関松太郎：既存鉄筋コンクリート梁の新設貫通孔補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集，Vol.27，No.2，2005
- 2) 渡辺英義，小田切智明，河合邦彦，本岡圭：既存 RC 梁の新設開孔補強に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.591-592，2020.9
- 3) 藤本効，中村洋行，福山洋ほか：定着金物を用いた連続繊維シートによる RC 構造物補強工法の開発：その 3 実大既存梁のあと施工開孔への適用実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.477-478，2007.7
- 4) 松井智哉，辻本泰雅，岡本匡平：既存 RC 梁のあと施工開孔に対する鋼管補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集，Vol.46，No.2，2024
- 5) K. Naganuma, K. Yonezawa, O. Kurimoto, H. Eto: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 586, 2004.8
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999