

特集 「リニューアル」

既存鉄筋コンクリート梁の新設貫通孔に対する補強効果に関する研究



白井 和 貴



勝 俣 英 雄



古 屋 則 之



木 村 耕 三



関 松 太 郎

Study on Effect of Strengthening for New Opening in Existing Reinforced Concrete Beam

Kazutaka Shirai Hideo Katsumata Noriyuki Furuya Kohzo Kimura Matsutaro Seki

Abstract

In renewal construction of buildings, new openings often need to be installed in existing beams. However, structural characteristics such as the shear strength of a beam with a new opening reinforced by a certain method are not well-known. In this research, static loading tests were conducted on Reinforced Concrete (RC) beams that have new openings reinforced by various strengthening methods. From the tests results, it is shown that the shear strength of a RC beam which has a new opening can be recovered by the strengthening methods adopted in this research. It is expected that the flexibility in renewal construction of building equipment will be increased by these strengthening methods.

概 要

建物のリニューアル工事の際には、既存梁への貫通孔の新設が要求される場合がある。しかし、既存梁に貫通孔を設け、その周辺を補強した際の梁のせん断耐力等の構造性能については研究が少なく、不明な点が多い。そこで本研究では、鉄筋コンクリート梁に設けた貫通孔の周辺を各種手法により補強し、静的加力実験により補強時の構造性能について検討した。その結果、梁に貫通孔を新設しても、本実験で適用した補強手法を施すことにより、無孔時と同等以上のせん断耐力まで回復可能であることが確認された。この貫通孔補強手法を活用することで、設備リニューアル工事における自由度の拡大が期待できる。

1. はじめに

建物のリニューアル工事において、古くなった設備システムを更新するため、空調ダクトや給排水配管などの設備配管を新設するケースは多い。

一般に、これらの設備配管は天井裏（スラブ下）に配されるため、配管経路が既存の梁に干渉することとなる。そのため、Fig. 1 a) に示すように、新設配管を梁下に通し、下がり天井として天井高を部分的に低くすることで対応せざるを得ない状況であり、下がり天井の圧迫感により居住性が低下する問題が生じていた。

下がり天井となることを避けるためには、Fig. 1 b) に示すように、新設配管が干渉する梁に新たに貫通孔を開けて配管を通す方法が考えられる。しかしこの場合には、

貫通孔の新設により梁の構造性能が低下することから、孔周辺を何らかの手法により補強する必要が生じる。

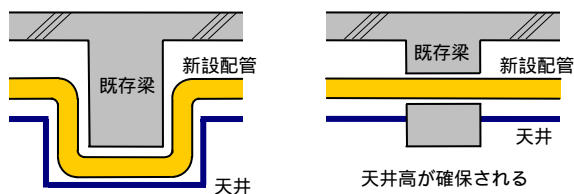
既存の柱・梁・橋脚・煙突などの部材に対する構造補強については、現在までに種々の検討¹⁾²⁾が行われており、蓄積された知見に基づき補強技術が確立され、実用化に至っている。

しかし、既存の梁に貫通孔を新設し、その周辺を補強した場合の梁のせん断耐力等の構造性能については、検討が少なく不明な点が多いことから有効な補強手法が確立されておらず、補強技術の開発および構造実験等による性能検証が必要とされていた。

そこで、リニューアル工事において要求される低騒音・低振動・無溶接などの諸条件を満たす、既存コンクリート梁の新設貫通孔補強工法を新たに開発した³⁾。

本研究では、開発した工法の補強効果を検証するため、鉄筋コンクリート(RC)梁に設けた貫通孔の周辺を各種工法により補強し、静的加力実験を行って補強時の梁の構造性能について検討した。

実験は、矩形断面梁を2シリーズ、スラブ付きT型梁を1シリーズ、無筋コンクリート供試体の要素試験を実施した。本報では、実験シリーズ全体の概要と、矩形断面梁2シリーズの実験計画・結果について報告する。



a) 下がり天井とする場合

b) 梁貫通孔 + 補強

Fig. 1 設備配管時のイメージ
Concept of Equipment Piping

2. 実験シリーズの概要

本研究の実験シリーズ全体の概要をTable 1に示す。

1) B15シリーズ

各補強手法の補強効果を直接的に把握することを主目的とした。試験体としてスラブ無しの矩形断面RC梁を使用し、貫通孔の有無、孔径、補強手法の違いを実験パラメータとした。貫通孔を梁中央に設け、せん断スパン比を短くし、補強部分で破壊するようにした。

2) B20シリーズ

貫通孔補強を施した梁部材全体の構造性能を把握することを主目的とした。矩形断面RC梁試験体を用い、貫通孔の有無、補強手法の違いを実験パラメータとした。貫通孔を梁端部に設け、B15シリーズよりもせん断スパン比を長くとした。

3) T形梁シリーズ⁴⁾

より実状に近く、ニーズが多いと想定される条件での補強時性能を把握することを主目的とした。スラブ付きT形断面RC梁を試験体を用い、孔の有無と補強手法の違いを実験パラメータとした。貫通孔は梁端部に2つ設けた。

4) 無筋コンクリート供試体による要素試験⁵⁾

基礎的データ(孔径、鋼板接着面積、鋼管肉厚による影響など)の取得を目的とした。梁貫通孔周辺を模擬した無筋コンクリート供試体を用い、割裂タイプおよび圧縮タイプの2種の要素試験を実施した。試験パラメータは、貫通孔の有無、孔径、補強手法の違い、その他である。

3) T形梁シリーズ、4) 無筋コンクリート供試体による要素試験の実験計画・結果については、既に文献⁴⁾⁵⁾で報

告されているので、本報では説明を省略する。3)、4) シリーズの検討の詳細については文献⁴⁾⁵⁾を参照されたい。

3. 実験計画(B15, B20シリーズ)

3.1 試験体

B15, B20シリーズの実験パラメータをTable 2に、試験体の概要をFig. 2に示す。

試験体はほぼ実大スケールのRC梁であり、B15シリーズを計8体、B20シリーズを計6体製作した。両シリーズともに、断面寸法は幅**b**=300mm×せい**D**=500mm、主筋は上下共5-D22(2段配筋、引張鉄筋比 $P_t=1.42\%$)とし、せん断破壊先行型の設計とした。

B15シリーズは、梁の内法スパンを1500mm(せん断スパン比 $M/QD=1.5$)、スターラップを2-D6@150(せん断補強筋比 $P_w=0.14\%$)とした。有孔試験体については試験区間中央

Table 2 実験パラメータ

Test Parameter

試験体	貫通孔	補強手法
B15-RC	無し	無し
B15-O	有り (H D/3)	無し
B15-PL		鋼板 + 貫通ボルト
B15-PLL		折り曲げ鋼板 + 貫通ボルト
B15-CFRP		L型CFRP板 + 定着プレート + あと施工アンカー
B15-PI		鋼管挿入
B15-O2	有り (H=D/4)	無し
B15-PI2		鋼管挿入
B20-RC	無し	無し
B20-O	有り (H D/3)	無し
B20-PL		鋼板 + あと施工アンカー
B20-PLP		鋼板 + 貫通ボルト (PC鋼棒締め付け)
B20-CFRP		L型CFRP板 + 定着プレート + 貫通ボルト
B20-PI		つば付き鋼管

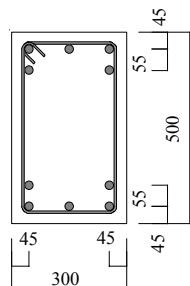
Table 1 シリーズ全体の概要

Outline of Test Series

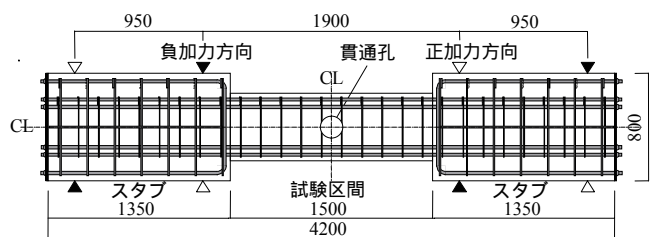
シリーズ名	特徴, 目的	主な補強手法
1) B15シリーズ	・矩形断面、貫通孔は中央 ・補強部で破壊させ、補強効果の直接把握が目的	鋼板 CFRP板 鋼管
2) B20シリーズ	・矩形断面、貫通孔は梁端部 ・補強部を含めた梁全体の性能把握が目的	鋼板 CFRP板 鋼管
3) T型梁シリーズ	・スラブ付きT形梁 ・貫通孔2つを梁端部に設置 ・より実状に近い状況を想定	鋼板 鋼管
4) 無筋コンクリート供試体による要素試験	・割裂タイプ、圧縮タイプの2種 ・孔径、鋼管肉厚、鋼板接着面積等の基礎的データ取得が目的	鋼板 鋼管

B15シリーズ:
主筋 上下共5-D22
スターラップ 2-D6@150
せん断スパン比 $M/QD=1.5$

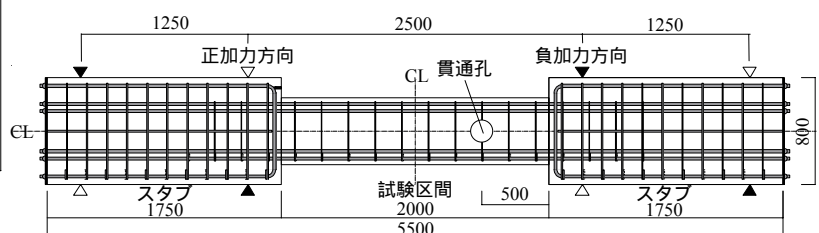
B20シリーズ:
主筋 上下共5-D22
スターラップ 2-D6@200
せん断スパン比 $M/QD=2.0$



a) 試験区間断面(共通)



b) B15シリーズ(B15-O)



c) B20シリーズ(B20-O)

(単位: mm)

Fig. 2 試験体概要
Specimen

に貫通孔を設け、貫通孔の径は、梁せいの1/3に相当する直径 $H=165\text{mm}$ (このとき貫通孔が2組のスターラップを切断する)、または梁せいの1/4に相当する $H=125\text{mm}$ (このときスターラップは切断しない)とした。

B20シリーズは、梁の内法スパンを 2000mm ($M/QD=2.0$)、スターラップを $2-D6@200$ ($P_w=0.11\%$)とし、有孔試験体については梁端部から $1.0D$ 離れた位置に $H=165\text{mm}$ の貫通孔(このとき貫通孔が1組のスターラップを切断)を設けた。

3.2 補強方法

無補強試験体(-RC, -O, -O2)以外の試験体に対して、貫通孔周辺を各種手法により補強した。補強に用いた主な材料は、鋼板、L型の炭素繊維補強プラスチック(CFRP)板、鋼管、ボルト、PC鋼棒、および接着剤である。

代表的な補強部の概観をPhoto 1に、各種補強手法の概要をFig. 3~Fig.4に、試験体および補強に使用した主な材料の強度一覧をTable 3にそれぞれ示す。

各試験体の補強にはエポキシ樹脂系の接着剤を使用した。付着性を向上させるため、接着部分のコンクリート表面を薄く削りとり、各鋼材の接着面はサンダー掛け処

理を行った。鋼板補強および鋼管補強では注入型の接着剤を使用し、接着層の厚さは約 4mm とした。また、L型CFRP板補強では粘性の高い塗布型の接着剤を使用し、接着層の厚さは 1.5mm 程度とし、梁コーナー部はL型CFRP板のRに対応させて面取りを行った。

リニューアルの対象となる古い建物の場合、梁のせん断耐力が現行の基準レベルまで達していない場合がある。

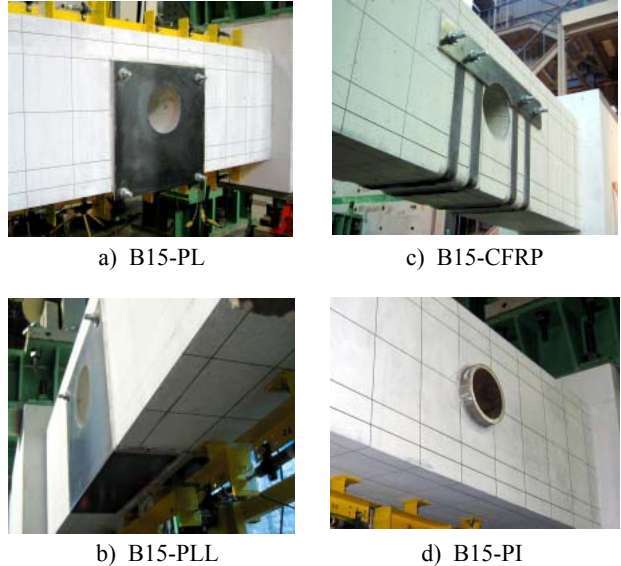


Photo 1 補強部概観
View of Strengthening Portion

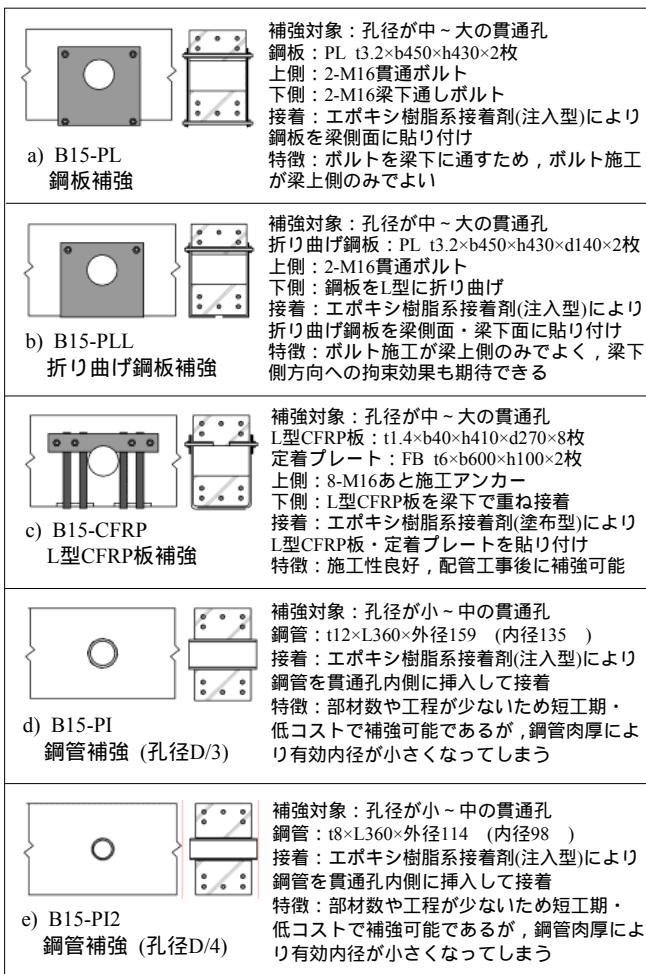


Fig. 3 補強手法概要 (B15シリーズ)
Strengthening Method (B20 Series)

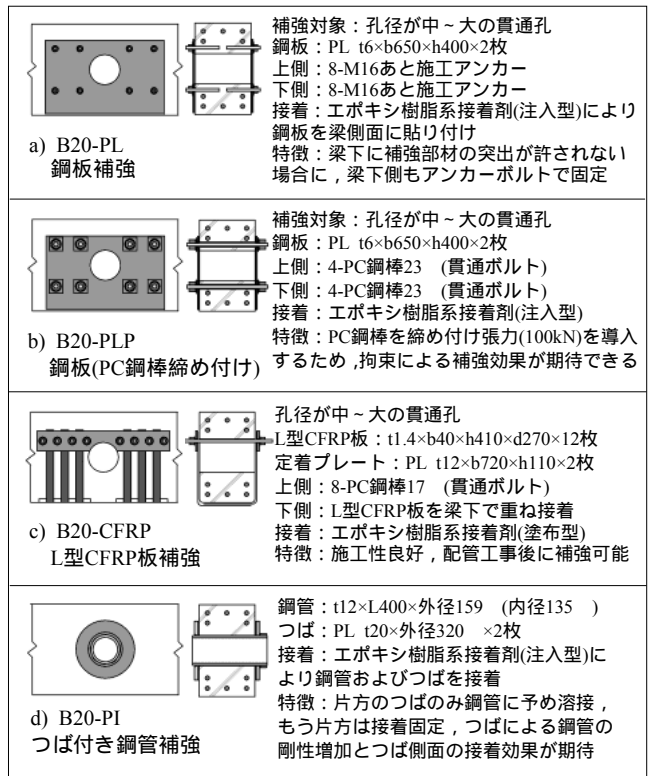


Fig. 4 補強手法概要 (B20シリーズ)
Strengthening Method (B20 Series)

しかしここでは、貫通孔を新設する前と同等まで貫通孔周辺のせん断耐力を回復させることを第一の補強目標とした。ただし、梁全体を別途せん断補強する場合には、貫通孔周辺でのせん断破壊を防ぐように、または現行基準レベル以上のせん断耐力まで向上するように貫通孔周辺を補強する必要がある。

3.3 加力・計測方法

2機のアクチュエータと加力用治具を使用し、試験体に地震時を想定した逆対称の加力を行った。加力は主として、荷重20, 40, 80(kN), 部材角1/1000, 1/500, 1/250, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50(rad)の正負交番繰り返し漸増載荷とした。計測は、試験体の全体変形、鉄筋および各補強部材の歪み、その他について行った。

4. 実験結果(B15, B20シリーズ)

4.1 破壊状況

各試験体の最終破壊状況をFig. 5～Fig. 6に示す。各試験体とも、最後まで主筋の降伏は認められず、せん断型の破壊状況を示した。

1) B15シリーズ (Fig. 5)

有孔無補強(B15-O, B15-O2)では、斜めひび割れが無孔(B15-RC)と比較して早期に貫通孔周辺に発生し、その後も孔を貫く斜めひび割れや孔周辺の損傷が顕著に進展して破壊に至った。

鋼板補強(B15-PL, B15-PLL)では、孔周辺のひび割れ発生時期は有孔無補強(B15-O)と比べて遅く、補強によるひび割れ抑制効果が認められた。鋼板接着部の破壊によって最大耐力が決定し、その後急激に耐力低下し、鋼板表面の接着剤剥離とコンクリート内部の破壊が混在する

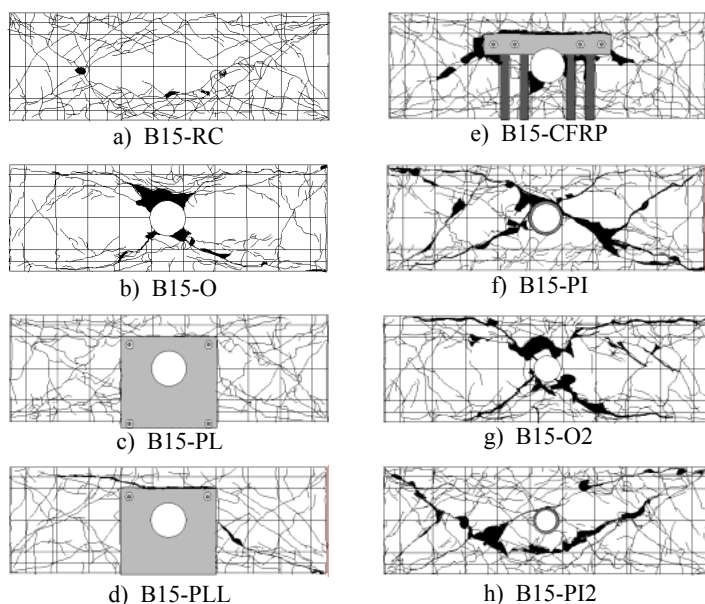


Fig. 5 最終破壊状況 (B15シリーズ)
Final Crack Pattern (B15 Series)

Table 3 使用材料強度

Material Properties

試験体	B	y	w y	bd	補強部材
B15-RC	27.0	410	381	-	-
B15-O	27.6			-	-
B15-PL	27.7			>6.0	PL=255
B15-PLL	28.8			>6.0	PL=255
B15-CFRP	28.4			>26	CF=2525 PL=318
B15-PI	28.2			>6.0	PI=308
B15-O2	26.0			-	-
B15-PI2	28.0			>6.0	PI=273
B20-RC	28.4	373	378	-	-
B20-O	25.9			-	-
B20-PL	32.7			>6.0	PL=346
B20-PLP	29.8			>6.0	PL=346
B20-CFRP	32.0			>26	CF=2525 PL=275
B20-PI	33.0			>6.0	PI=265 PL=397

B: コンクリート圧縮強度 (単位: N/mm²)
 y: 主筋の降伏強度
 w y: せん断補強筋の降伏強度
 bd: 接着剤の鋼材に対する接着強度 (メーカー規格値)
 PL: 鋼板, 定着プレート, 鋼製つばの引張降伏強度
 CF: L型CFRP板の破断強度
 PI: 鋼管の引張降伏強度

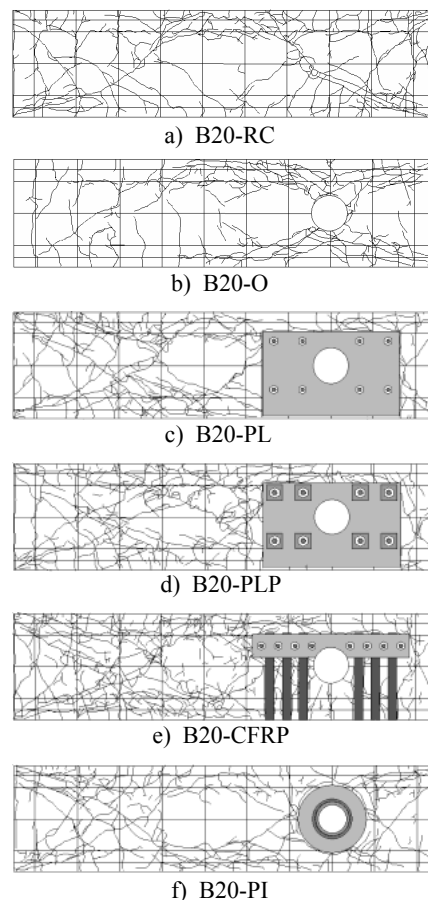


Fig. 6 最終破壊状況 (B20シリーズ)
Final Crack Pattern (B20 Series)

破壊状況を示した。

L型CFRP板補強(B15-CFRP)では、有孔無補強(B15-O)と概ね同じ時期に孔周辺にひび割れが発生したが、その後の損傷の進展はCFRP板の拘束により抑制され、最終的に定着プレート貼り付け部コンクリートのコーン破壊に至った。

鋼管補強 (B15-PI, B15-PI2) においては、D/3孔径を補強したB15-PIでは早期から孔周辺に損傷が生じ、孔を貫く斜めひび割れにより最大耐力に達した。一方、D/4孔径を補強したB15-PI2では、孔を貫くひび割れは少なく、最大耐力に達した後も補強部分における損傷はあまり進展しなかった。

2) B20シリーズ (Fig. 6)

無孔(B20-RC)と有孔無補強(B20-O)の破壊過程はB15シリーズの場合と似通った傾向を示した。

鋼板補強(B20-PL, B20-PLP)およびL型CFRP板補強(B20-CFRP)については、補強部分周辺の損傷は比較的少なく、補強を施さない側(Fig. 6の左側)でのせん断破壊によって最大耐力が決まった。

つば付き鋼管補強(B20-PI)では、補強を施さない側におけるひび割れの進展によって最大耐力が決まり、補強を施さない側は無孔(B20-RC)と似通ったひび割れ状況を示した。

4.2 包絡線の比較

B15シリーズおよびB20シリーズの正負両側について

のせん断力 - 変形角関係の包絡線をFig. 7 ~ Fig. 8に示す。ここで、グラフの縦軸はせん断力の絶対値で示している。また各補強試験体のグラフには、補強効果を比較検討するため、無孔時(-RC)および有孔無補強時(-Oまたは-O2)の包絡線を重ねて示す。

Fig. 7のa) は、B15シリーズの無補強試験体についての比較である。無孔(B15-RC), D/4有孔(B15-O2), D/3有孔(B15-O)と貫通孔の径が大きくなるに従って包絡線の耐力が低下する状況が確認できる。最大耐力以降の耐力低下の度合い(負勾配)については、孔径を大きくしても顕著な違いはみられない。一方、Fig.8のa)よりB20シリーズの無孔(B20-RC)およびD/3有孔(B20-O)を比較すると、貫通孔の設置による最大耐力の低下はB15シリーズの場合と比べて僅かであるが、最大耐力以降の耐力低下の負勾配が比較的急になっており、貫通孔を梁端部に設けたことによる影響が現れたものと考えられる。

両シリーズの全ての補強試験体において、孔周辺を補強することで、有孔無補強時(-O)の包絡線の耐力を大きく上回った。さらに、Fig.7 e)のB15-PIを除き、無孔時(-RC)とほぼ同等以上の最大耐力まで回復できており、各補強による耐力向上の効果が明確に示されている。

最大耐力以降の耐力低下の度合い(負勾配)に着目すると、例えばFig.7のB15シリーズでは、無孔(B15-RC)および鋼管補強(B15-PI, B15-PI2)では耐力低下の度合いが比較的緩やかである。これに対し、鋼板補強(B15-PL, B15-PLL)およびL型CFRP板補強(B15-CFRP)では最大耐力以

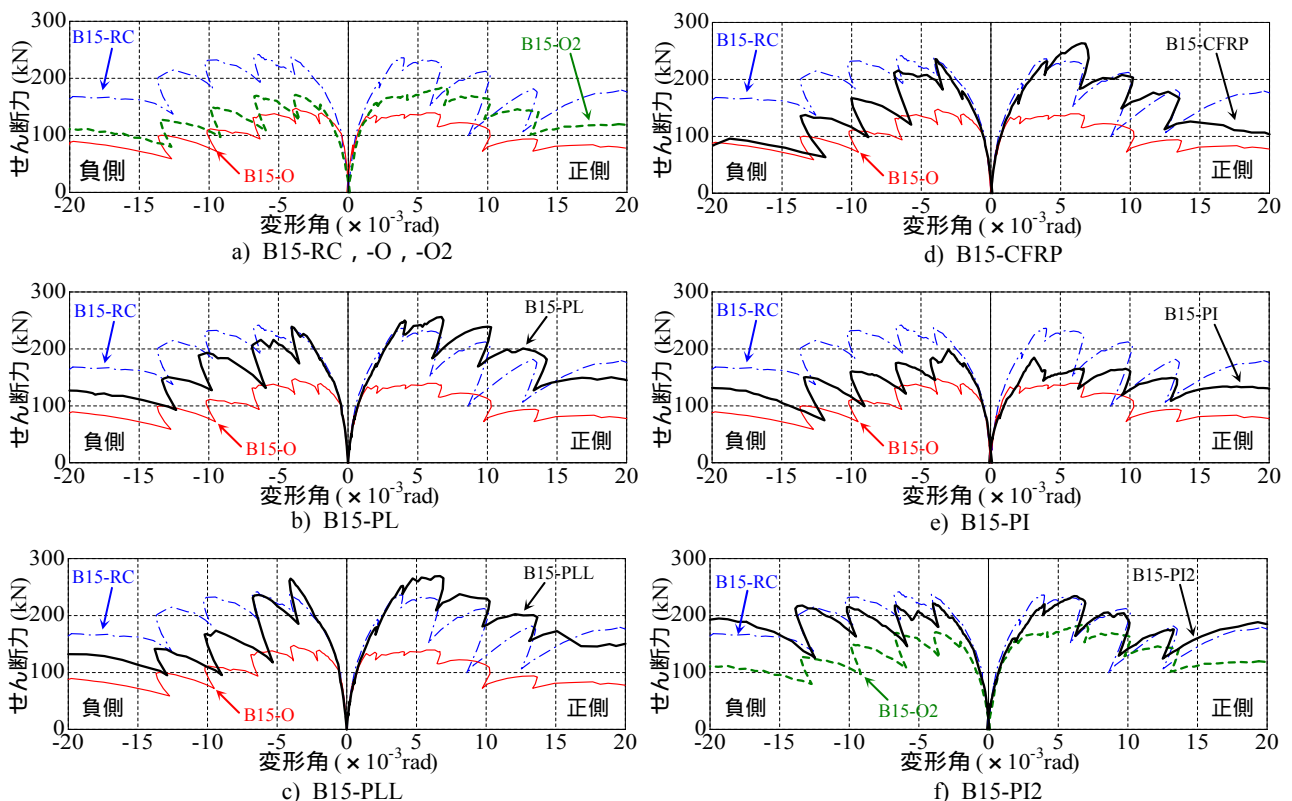


Fig. 7 包絡線の比較 (B15シリーズ)
Comparison of Envelope Curve (B15 Series)

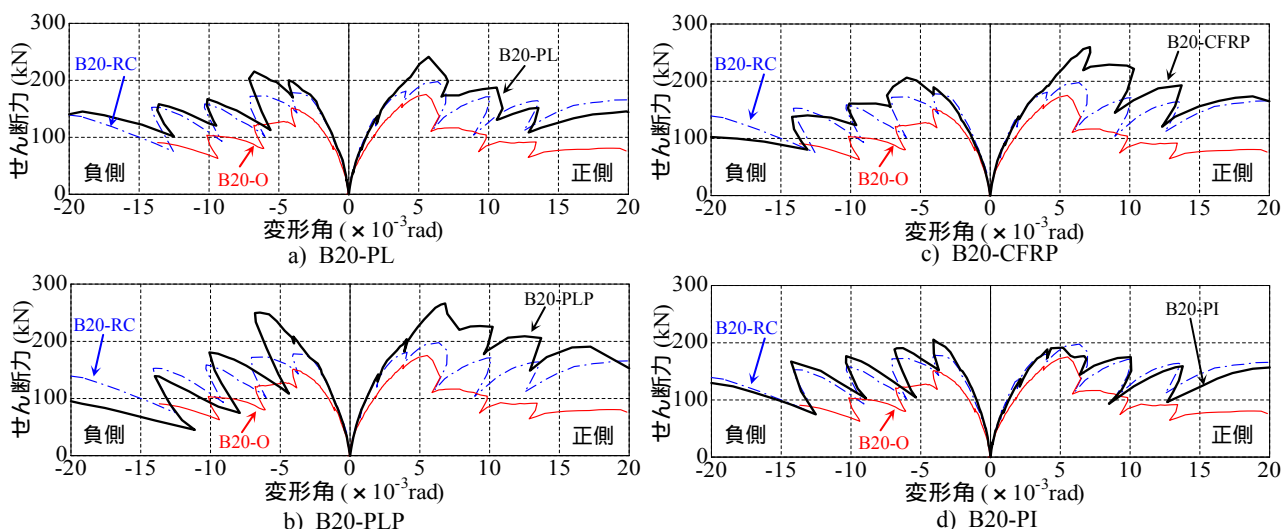


Fig. 8 包絡線の比較 (B20シリーズ)
Comparison of Envelope Curve (B20 Series)

降の荷重低下の度合いが比較的急であり、最大耐力が向上した分、やや脆性的な破壊性状を示す傾向がみられた。Fig.8のB20シリーズにおいても同様の性状が認められた。

正側については、B15-PIを除く両シリーズの各補強試験体において、変形角が約1/100(rad)までは無孔時とほぼ同等以上の耐力を維持できている。また、特に補強効果の大きいB15-PLLやB20-PLPでは、変形角が約1/60(rad)までは無孔時と同等以上の耐力を維持できている。

正負の包絡線の差異について着目すると、例えばFig.7のB15シリーズでは、無補強(B15-RC, B15-O, B15-O2)および上下対称の補強を施した試験体(B15-PI, B15-PI2)については、正側と負側で包絡線の差異が比較的小さい。

これに対し、スラブが取り付くことを想定し上下非対称の補強を施した試験体(B15-PL, B15-PLL, B15-CFRP)では、正側と比べて負側の包絡線の耐力がやや低下する傾向が示された。Fig.8のB20シリーズでも同様の性状が認められた。ただし、実際の梁にはスラブが取り付くことが多く、スラブの取り付く部分の耐力はスラブの影響により増大することが期待できるため、補強部分が上下非対称であっても実用上は問題ないものと考えられる。

4.3 諸耐力の比較

実験結果から得られた、各試験体の諸耐力の比較一覧をTable 4に示す。

曲げひび割れ確認時のせん断力 P_{fc} については、貫通孔の有無や補強の違いによる顕著な差はみられなかった。

せん断ひび割れ、または孔周辺の斜めひび割れ確認時のせん断力 P_{sc} については、貫通孔を設けることで無孔時と比べて P_{sc} が低下している。しかし、B15-CFRPを除いて各補強により無孔時と概ね同程度の P_{sc} まで回復しており、補強による効果が認められる。

最大耐力 P_{max} については、B15シリーズの無孔(B15-RC)、D/4有孔(B15-O2)、D/3有孔(B15-O)の P_{max} を比較すると、

Table 4 実験結果の諸耐力比較
Comparison of Strength from Test Results

試験体	P_{fc} (kN)	P_{sc} (kN)	P_{max} (kN)	{-RCとの比較}
B15-RC	60	130	238	{ 1.00 }
B15-O	60	80	148	{ 0.62 }
B15-PL	80	130	256	{ 1.08 }
B15-PLL	80	140	269	{ 1.13 }
B15-CFRP	60	80	264	{ 1.11 }
B15-PI	70	120	199	{ 0.84 }
B15-O2	70	85	184	{ 0.77 }
B15-PI2	70	130	234	{ 0.98 }
B20-RC	30	130	198	{ 1.00 }
B20-O	30	80	175	{ 0.88 }
B20-PL	50	130	241	{ 1.22 }
B20-PLP	40	135	266	{ 1.34 }
B20-CFRP	45	120	260	{ 1.31 }
B20-PI	50	140	203	{ 1.03 }

P_{fc} : 曲げひび割れが確認された時点のせん断力 (正負の絶対値)

P_{sc} : せん断ひび割れ、または貫通孔周辺の斜めひび割れが確認された時点のせん断力 (正負の絶対値)

P_{max} : 最大耐力 (正負の絶対値)

無孔時に対してD/4有孔時には約8割、D/3有孔時には約6割まで P_{max} が低下した。一方、B20シリーズでは、D/3有孔時(B20-O)の P_{max} は無孔時(B20-RC)の P_{max} に対して約9割となり、B15シリーズの場合と比べて新設貫通孔による最大耐力の低下度合いが小さかった。

補強試験体の最大耐力については、両シリーズの全ての補強試験体の P_{max} が有孔無補強時(-Oまたは-O2)の P_{max} を上回り、さらにB15-PIを除いて無孔時(-RC)とほぼ同等以上の P_{max} まで回復しており、各補強手法の有効性が明確に示されている。

同じ鋼板貼り付け補強に関して、固定方法の違いによる影響について比較した場合、鋼板補強 (B15-PL)と折り曲げ鋼板補強(B15-PLL)の P_{max} では、折り曲げ鋼板の方が

P_{max} がやや大きくなっており、梁下のアンカーボルトを省略できる点でも折り曲げ鋼板補強の方が優れているといえる。また、B20シリーズの鋼板補強B20-PLとB20-PLPを比較すると、B20-PLPの方が1割ほど P_{max} が大きくなった。B20-PLPでは、PC鋼棒の締め付けによって梁側面からの拘束効果が生じ、耐力が向上したと考えられる。

B15シリーズの鋼管補強(B15-PI, B15-PI2)を比較すると、孔径がD/3の場合(B15-PI)では無孔時までは耐力を回復できていないが、孔径がD/4の場合(B15-PI2)で無孔時とほぼ同等の最大耐力まで補強できている。これより、要求される補強量が少ない場合には、鋼管補強により十分に対応可能であるといえる。

5. 耐力評価式の検討

5.1 既往のせん断耐力評価式を用いた検討

無孔RC梁および有孔RC梁についての既往のせん断耐力評価式⁶⁾を用いて各試験体のせん断終局耐力をそれぞれ算定した結果をTable 5に示す。

Table 5の欄に、実験で得られた各試験体の最大耐力 P_{max} を示す。また欄に、(1)式より算定した各試験体の曲げ終局耐力 Q_{mu} を示す。

次に、無孔(B15-RC, B20-RC)、および補強試験体のうち補強部以外の破壊によって最大耐力が決定した試験体(B15-PI2, B20-PL, B20-PLP, B20-CFRP, B20-PI)についてのせん断終局耐力 Q_{su} を(2)式⁶⁾により算定し欄に示す。

欄より、無孔試験体(B15-RC, B20-RC)および非補強部破壊型の鋼管補強試験体(B15-PI, B20-PI)の算定値 Q_{su} は、各実験結果の P_{max} とほぼ対応しているといえる。

一方、B20-PL, B20-PLP, B20-CFRPについては、欄の算定値 Q_{su} と比較して実験結果の P_{max} が大きくなっている。これは、十分な補強によって補強部分の剛性・耐力が大きくなり向上したため、実質的な破壊区間が無孔時(B20-RC)と比べて短くなったことが要因と考えられる。そこで、補強によって非補強部分の有効せん断スパンがやや短い状態になったと仮定し、ここでは一例としてFig. 9に示すように補強区間の中心から反対側の梁端部までの長さを新たな算定上のせん断スパンとして M/Qd を評価して、(2)式により耐力を算定した。算定結果を Q_{su}' として欄に示すが、このように略算した Q_{su}' は、それぞれの実験値 P_{max} と概ね対応しているといえる。ただし、ここで用いた有効せん断スパンの評価手法は、貫通孔が梁端部にある場合の一例であり、貫通孔の位置等の条件が異なる場合に適用するためには別途検討が必要であるといえる。

続いて、全ての有孔試験体(無補強・補強とも)についてのせん断終局耐力 Q_{suo} を(3)式⁶⁾により算定し、欄に示す。

このとき、補強試験体については補強効果を考慮せず無補強として算定した。なお(3)式における P_s の評価については、文献⁶⁾に忠実に斜め45度の角度を用いた場合、B15シリーズのD/3有孔試験体ではスターラップを1本もカウントしない($P_s=0\%$)ため、実験結果の破壊状況やスター

Table 5 耐力算定値の比較
Comparison of Calculated Strength

試験体	P_{max} (kN)	Q_{mu} (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{su}' (kN)	Q_{suo} (kN)	Q_{suo}' (kN)
B15-RC	238	401	234	-	-	-
B15-O	148		-	-	130	-
B15-PL	256		-	-	130	250
B15-PLL	269		-	-	132	246
B15-CFRP	264		-	-	132	280
B15-PI	199		-	-	132	-
B15-O2	184		-	-	170	-
B15-PI2	234		237	-	174	-
B20-RC	198	273	189	-	-	-
B20-O	175		-	-	101	-
B20-PL	241		201	245	116	-
B20-PLP	266		193	234	113	-
B20-CFRP	260		199	243	116	-
B20-PI	203		202	-	117	-

P_{max} : 実験で得られた最大耐力
 Q_{mu} : (1)式より算定した M_u におけるせん断耐力
 Q_{su} : (2)式より算定した無孔梁のせん断終局耐力
 Q_{su}' : 有効せん断スパンを修正して(2)式より算定したせん断終局耐力
 Q_{suo} : (3)式より算定した有孔梁のせん断終局耐力
 Q_{suo}' : (3)式の算定値に補強効果を加算して求めたせん断耐力

$$M_u = a_t \cdot y \cdot j \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.092 k_u k_p (F_c + 18)}{M/Qd + 0.12} + 0.85 (P_w w_y) \right\} b j \quad (2)$$

$$Q_{suo} = \left\{ \frac{0.092 k_u k_p (F_c + 18)}{M/Qd + 0.12} (1 - 1.61H/D) + 0.85 (P_s s_y) \right\} b j \quad (3)$$

ここに、
 M_u : 曲げ終局モーメント (N・mm)
 a_t : 引張鉄筋断面積 (mm²)
 y : 主筋降伏強度 (N/mm²)
 k_u : $d > 400$ mmのとき0.72
 k_p : $2.36 P_t^{0.23}$
 P_t : 引張鉄筋比 (小数値)
 F_c : コンクリート強度 (N/mm²)
 M/Qd : せん断スパン比
 P_w : せん断補強筋比
 w_y : せん断補強筋の降伏強度 (N/mm²)
 b : 梁幅 (mm)
 j : 応力中心距離 (mm)
 d : 有効せい (mm)
 H : 貫通孔直径 (mm)
 D : 梁せい (mm)
 P_s : 孔周辺のせん断補強筋比 (文献⁶⁾では孔中心から斜め45度の範囲を横切るせん断補強筋の断面積から評価)
 s_y : 孔周辺のせん断補強筋の降伏強度 (N/mm²)

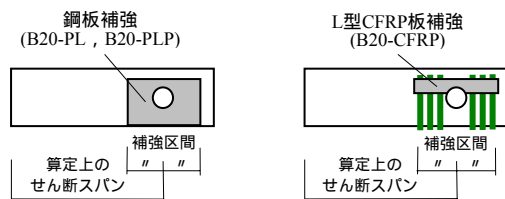


Fig. 9 有効せん断スパンの評価例
Evaluation of Effective Shear Span

Table 6 補強部材の平均歪み
Average Strain of Strengthening Portion

試験体	平均歪み ($\times 10^{-6}$)	ヤング係数 (N/mm^2)	Q' (kN)
B15-PL	367	$E_s=180000$	120
B15-PLL	347		114
B15-CFRP	2768	$E_{CFRP}=127000$	148

ラップの歪み分布と異なる状況となった。そのためB15シリーズの P_s の算定については、有孔無補強(B15-O)の孔周辺のひび割れ・破壊状況に基づいてひび割れ面の角度を37度とし、同様にB20シリーズについてはB20-Oの破壊状況に基づき角度を35度として P_s を与え Q_{suo} を算定した。

B15-OおよびB15-O2の算定値 Q_{suo} は実験値 P_{max} と比較的近い値を示しているのに対し、B20-Oでは実験値よりもかなり小さい算定結果を示した。これは、B20シリーズでは貫通孔を梁端部に設けたため、梁中央に貫通孔を設けた場合と比べてアーチ作用の圧縮ストラットの低減が少なく、アーチ作用による荷重伝達が残存したため最大耐力の低下があまり生じなかったものと推察される。

続いて、B15-PL、B15-PLL、B15-CFRPのせん断終局耐力を以下のように算定し、 Q_{suo}' としてTable 5の欄に示す。B15-PL、B15-PLL、B15-CFRP各試験体の、 P_{max} 時における主要なひび割れ付近の補強部材(鋼板、L型CFRP板)の梁材軸直交方向の歪みの平均値から各補強部材の負担力 Q' を求め、(Table 6)、この Q' を(3)式による有孔無補強時の各算定値 Q_{suo} (Table 5の欄)に加算することで Q_{suo}' を算定した。このように算定した Q_{suo}' は、B15-CFRPについては実験値 P_{max} よりも若干大きい値を示しているものの、概ねよい対応を示しているといえる。

6. まとめ

既存鉄筋コンクリート(RC)梁に貫通孔を新設し、その周辺に各種補強(鋼板補強、折り曲げ鋼板補強、L型CFRP板補強、鋼管補強)を施した場合の梁の構造性能について静的加力実験により検討した結果を以下にまとめる。

- 1) 貫通孔を設けることで、無孔時と比べて最大耐力が低下する。孔を梁スパンの中央に設けた場合と比べて、梁端部に設けた場合には、最大耐力の低下度合いは小さいが、最大耐力以降の耐力低下の度合いが急激であった。
- 2) 各種補強を施すことで、有孔無補強時と比べて孔周辺の斜めひび割れの発生を抑制する効果がみられた。
- 3) 各種補強を施すことで、有孔無補強時よりも最大耐力が向上した。
- 4) 鋼板補強、L型CFRP板補強については、補強を施すことで、無孔時と同等以上の最大耐力まで回復可能であることが示された。ただし、補強部で破壊した場合、最大耐力以降は無孔時と比べてやや脆性的な挙動を示す傾向がみられた。

5) 折り曲げ鋼板を用いた補強により、平鋼板として梁下側に通しボルトを配置して固定する場合と同等以上の補強効果が得られた。

6) 鋼板補強(PC鋼棒締め付け)により、梁側面へ拘束力を導入することで、補強性能が向上した。

7) 鋼管補強により、貫通孔の径によっては無孔時とほぼ同等の最大耐力まで回復できることが示された。また、最大耐力以降の変形性能は無孔時とほぼ同程度であった。

8) 既往の無孔RC梁および有孔RC梁の耐力評価式を用いて、補強後のせん断耐力について検討を行った。補強部で破壊する場合、および非補強部で破壊する場合のそれぞれについて、補強後のせん断耐力の評価を試み、算定値は実験値と比べて概ねよい対応を得た。

本研究で採用した貫通孔補強手法を用いることにより、設備リニューアル工事における自由度の拡大が可能となると考えられ、今後の活用が期待される。

謝辞

L型CFRP板補強の実験にあたり、日本シーカ(株)から補強材料を提供頂きました。ここに感謝いたします。

T形梁の実験シリーズ、および無筋コンクリート供試体の要素試験にあたっては、実験の実施と結果分析を横浜国立大学 田才晃助教授に委託しました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 大野了, 小畠克朗, 勝俣英雄, 岡島豊行: 炭素繊維による既存RC橋脚の耐震補強に関する研究(その1) - 補強法と効果の確認実験 -, 大林組技術研究所報, No.43, pp.33~38, 1991
- 2) 佐藤裕一, 勝俣英雄, 小畠克朗: 炭素繊維貼付けによる既存部材の補強に関する研究(その3) 梁のせん断補強への適用に関する実験, 大林組技術研究所報, No.54, pp.33-40, 1997
- 3) 白井和貴, 勝俣英雄, 古屋則之, 木村耕三, 関松太郎: 既存コンクリート梁の新設貫通孔に対する補強工法の開発, 大林組技術研究所報, No.68, 2004
- 4) 蔦壁潤一郎, 安岡威, 勝俣英雄, 田才晃: 既存T形梁の新設貫通孔に対する補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第26巻, pp.349~354, 2004
- 5) 山崎和宏, 蔦壁潤一郎, 白井和貴, 田才晃: 貫通孔を有するコンクリート要素の補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第26巻, pp.355~360, 2004
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1999, pp.137-140, 271-272, 1999
- 7) 小宮敏明, 益尾潔: 鉄骨増設ブレース補強用の接着接合部および間接接合部の終局耐力: コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1657-1662, 2000
- 8) 東レ株式会社, 日本シーカ株式会社: トレカラミネート工法設計・施工マニュアル, 1998