

鉛直打継面を対象とした既存 RC 梁の補強効果検証実験

水 越 一 晃 増 田 安 彦 萩 尾 浩 也
 岸 浩 行 藤 井 彰 人
 (設計本部) (設計本部)

Experiment to Verify the Effectiveness of Reinforcing RC Beam Focusing on Vertical Joints

Kazuaki Mizukoshi Yasuhiko Masuda Hiroya Hagio
 Hiroyuki Kishi Akihito Fujii

Abstract

From a carbon-neutral perspective, when a reinforced concrete building is rebuilt, the existing members are occasionally reinforced and reused in the same building. The stiffness, strength, and deformation performance depend on the treatment of the joint surfaces. However, few studies have focused on combined treatments. In this study, bending shear experiments were conducted on RC beams, focusing on the treatment of the joint surfaces. The experimental results showed no difference of up to 2% in the deformation angle due to the effect of the joints. The strength of each beam exceeded the bending strength calculated for all cross sections. Treating the joint surfaces effectively suppressed the reduction in strength and improved the deformation performance at large deformations.

概 要

近年、カーボンニュートラルの観点から、鉄筋コンクリート(RC)造建物の建替え時に、既存躯体を増打補強して増築する事例が増えている。このような増打補強された部材の剛性、耐力、変形性能等は、新旧コンクリート打継面の処理方法に依存すると考えられる。しかし、打継面の処理方法を変数として比較検証した実験事例は少ない。そこで、片側面を増打補強した RC 梁を対象に、4 通りの打継面の処理方法を用いて新旧一体とした RC 梁の曲げせん断実験を実施した。実験の結果、変形角 2% までは打継面による明確な差はみられなかった。梁の曲げ耐力はいずれも一体断面とみなして計算した曲げ降伏耐力を上回ったことから、既往式の単純加算で評価可能であった。また、打継面に設けたあと施工アンカー、コッター、ウォータージェットによる目荒しは、大変形時の梁の耐力低下抑制や変形性能向上に有効であることがわかった。

1. はじめに

我が国では、温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させる、カーボンニュートラル（以下、CN）を 2050 年までに目指すと宣言しており¹⁾、CN に向けた取り組みに関心が高まっている。建設業においては、政府は 2025 年から新築建物におけるライフサイクル CO₂ 算出義務化の検討に着手しており²⁾、今後、新築建物を対象とした CN 技術はますます注目されることが予想される。

鉄筋コンクリート（以下、RC）造の新築建物における近年の CN に向けた取り組み例を示す。大林組技術研究所内の実験棟新築工事では、既存建物の RC 基礎梁を分割解体して建て替え後の基礎梁として再利用し、CO₂ 排出量を削減している³⁾。また、歴史的建築物の外観を保護するため、地上階の外壁を残して内部のみを建替えた事例もある^{例えば 4),5)}。このように、RC 建物の建替え時に既存躯体を再利用して CN に貢献する事例が増えている。

既存 RC 躯体を新築建物に再利用する場合、新設コンクリートを既存梁を増打補強する場合がある。この増打によって新旧一体となった部材の剛性、耐力、変形性能等は、新旧コンクリート打継面の処理方法に依存すると考えられる。北條ら⁶⁾は、両側面および底面を増打補強した RC 梁を対象に、打継面の処理方法を変数として 2 点曲げ実験を実施し、補強梁の剛性、耐力、変形性能等について検証を行っている。一方、外壁を残した建替え工事^{例えば 4),5)}のように、片側面を増打補強した RC 梁を対象に、打継面の処理方法を変数とした実験データは見当たらない。CN 達成に既存躯体のリユースは有効である一方で、打継面の処理方法に応じた実験データが少ないことやその設計法が確立していないため、既存躯体リユースが広く普及するには至っていないと考えられる。

そこで、打継面を有する増打補強 RC 梁の設計法確立を目標に、鉛直打継面の処理方法を変数とした曲げせん断実験を行い、実験データを蓄積することとした。

2. 実験概要

Fig. 1 に実験対象となる RC 梁試験体の詳細を示す。試験体は縮尺率 1/2 を想定した。梁断面は既存新設とも 200mm×350mm とし、試験区間のスパンは 2000mm（せん断スパン比=2.86）とした。試験対象となる梁の両端部には、試験機に試験体を固定するためのスタブを設けた。試験体は既存梁のみを先行して製作し、新設梁やスタブと接する既存梁側面に打継処理を施した後、新設梁とスタブのコンクリートを同時に打設して製作した。

実験パラメータは鉛直打継面の処理方法である。鉛直打継面の処理状況を Photo 1 に示す。試験体 C は鉛直打継面に特別な処理をしない状況を再現した試験体であり、ディスクグラインダーを用いて表面のレイタンスを除去する程度のカップ掛けのみ行った。試験体 CA にはカップ掛けに加え、接着系あと施工アンカー（注入方式）を打設した。あと施工アンカー筋には、端部にフック等を設けていない、直線状の異形鉄筋(D6)を使用した。あと施工アンカーの有効埋込み長さは、既存側は $8d_a$ (d_a : 呼び径) とし、新設側は小梁下端筋の直線定着相当とみなして $20d_a$ とした。試験体 CC にはカップ掛けに加え、コッター（高さ 50mm、深さ 20mm）を 2 列設けた。コッターは矩形断面とし、コンクリート打設前に予め既存梁の型枠内に埋め込んだ押出発泡ポリスチレンを、コンクリート打設後に撤去して製作する簡易なものとした。試験体 WJ には硬化遅延シートによってコンクリート表面の硬化を遅延させた状態で、市販の高圧洗浄機を用いて表面にコンクリートの粗骨材（最大寸法=20mm）の半分程度が表れるまで凹凸を設けた。スタブと接する既存梁小口面には試験体 WJ と同様の手順で打継処理を行い、スタブとの一体性を確保した。4 体の試験体は、鉛直打継面以外は同一形状であり、同一の手順で製作した。

Fig. 2 に加力方法および変形角の計測方法を示す。試験体両端のスタブと試験装置は PC 鋼棒で緊結した。実験は変位制御による正負交番の逆対称曲げせん断載荷とした。両スタブの新設梁側に固定した計測治具に取り付けた 3 つの変位計(E, C, W)を用いて、両加力スタブが平行に載荷するように制御した。3 つの変位計のうち、変位計 C の値を代表変位とし、その変位を試験区間の半分で除して梁の変形角 R を求めた。加力は $R=0.125\%$ を正負 1 サイクル行った後、 $R=0.25\%$, 0.5% , 1% , 2% , 4% をそれぞれ正負 2 サイクルずつ行い、最後に正側に押切載荷を行った。なお、試験体 C のみ、試験機トラブルにより 2% のサイクルを 3% に変更して載荷した。

試験体の想定破壊形式について、鉛直打継面の処理方法による影響が表れやすいよう、既存梁が曲げ降伏後にせん断破壊に至った後、新設梁が曲げ降伏する計画とした。Table 1 にコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。既存梁コンクリートの設計基準強度は、外観保護が求められる比較的古い歴史的建築物の RC 梁を想定して 15N/mm^2 に設定した。

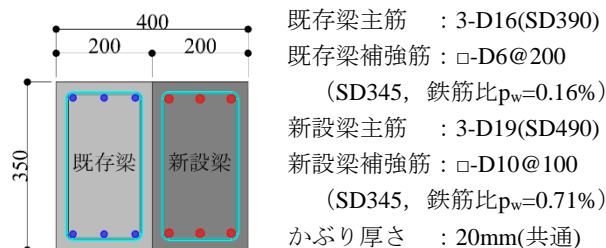


Fig. 1 RC梁試験体の詳細
Detail of RC Specimen

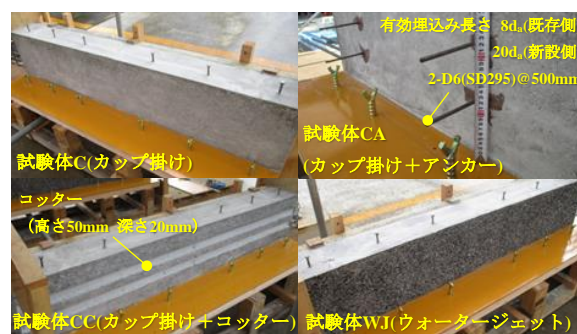


Photo 1 試験体名称と鉛直打継面の処理状況
Details of Vertical Joints

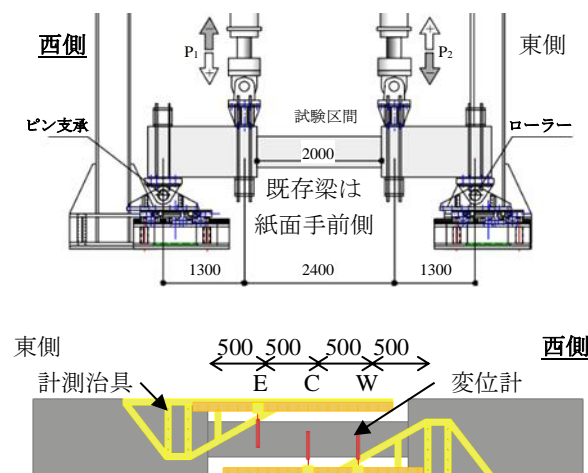


Fig. 2 加力方法および変形角の計測方法(単位:mm)
Setup for Exp. and Measuring Deformation Angle

Table 1 材料試験結果 (4試験体平均)

Material Test Results				
コンクリート	設計基準強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	
既存梁	15	14.1	16.9	
新設梁	40	48.4	26.6	

鉄筋径	鋼種	使用部位 (Fig. 1)	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
D6	SD295	アンカー筋	408※	199
D6	SD345	既存梁補強筋	374	191
D10	SD345	新設梁補強筋	380	194
D16	SD390	既存梁主筋	439	193
D19	SD490	新設梁主筋	532	198

※0.2%オフセット値

3. 実験結果

3.1 梁せん断力-変形角関係

各イベント時の梁せん断力のうち、計算値を Table 2 に、実験値を Table 3 に示す。Table 3 の主筋降伏時とは、梁端部における梁主筋のひずみが、梁主筋の降伏強度とヤング係数から求めた降伏ひずみ(2274 μ)に達した時を意味する。Table 3 の最大耐力の計算値は、既存梁と新設梁の曲げ降伏時の計算値を合計したものである。各試験体の耐力は曲げ降伏耐力計算値の 1.2 倍程度であった。

Fig. 3 に正側の梁せん断力 Q -変形角 R 関係を示す。各試験体の初期剛性は概ね同じであり、鉛直打継面の処理方法による違いはみられなかった。R=2%までは履歴曲線や梁主筋降伏のタイミングに顕著な差はなく、打継面の処理方法による影響は確認されなかった。R=4%以降においては、試験体 CA, CC, WJ は試験体 C に比べて梁の曲げ耐力低下が少なかった。なお、両梁の端部およびスパン中央のせん断補強筋を対象に鉄筋ひずみを計測したが、4 試験体とも降伏ひずみには達しなかった。

3.2 コンクリートのひび割れ

Fig. 4 および Photo 2 に、R=+4%時における梁側面のコンクリート損傷状況を示す。黒線は加力前に生じていた初期ひび割れを、青線は正載荷時に生じたひび割れを、赤線は負載荷時に生じたひび割れを、それぞれ示す。曲げひび割れ(鉛直ひび割れ)の間隔は、いずれの試験体も、補強筋ピッチの広い既存梁の方が、補強筋ピッチの狭い新設梁よりも大きかった。せん断ひび割れ(斜めひび割れ)は、既存梁においては R=0.5%のサイクルで、新設梁においては R=1%のサイクルで、それぞれ生じた。R=1%のサイクルでは、既存梁は主筋降伏と同時に付着割裂による梁主筋に沿ったひび割れ(水平ひび割れ)が上端付近に生じ始め、R=2%時に顕著に現れた。一方、新設梁側にはこのような水平ひび割れは確認されなかった。

Table 2 各イベント時の梁せん断力(計算値)

	Shear Forces at Each Event (Cal.)	
	計算値(単位: kN)	
	曲げ降伏時($a_t \times f_t \times j$)※ (短期許容曲げモーメント ⁷⁾ 時)	せん断耐力時 ⁸⁾
既存梁	74	77
新設梁	127	197
合計	201	274

※ a_t : 引張鉄筋全断面積, f_t : 鉄筋の降伏強度(Table 1)
 j : 応力中心距離((7/8) d), d : 梁の有効せい

Table 3 各イベント時の梁せん断力(実験値)

試験体名称	Shear Force at Each Event (Exp.)		最大耐力 計算値 (kN)	実験/計算 (-)
	既存梁主筋 降伏時 (kN)	新設梁主筋 降伏時 (kN)	実験値 (kN)	
C	179	206	240	1.20
CA	187	207	244	1.21
CC	181	209	245	1.22
WJ	187	213	250	1.24

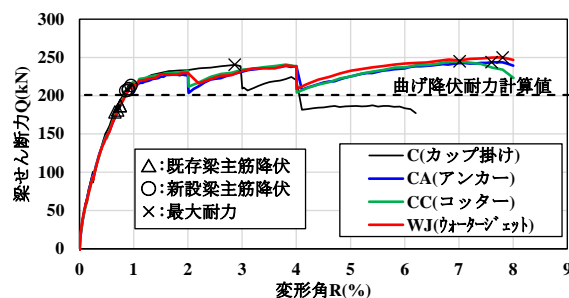


Fig. 3 梁せん断力 Q -変形角 R 関係 (正側包絡線)

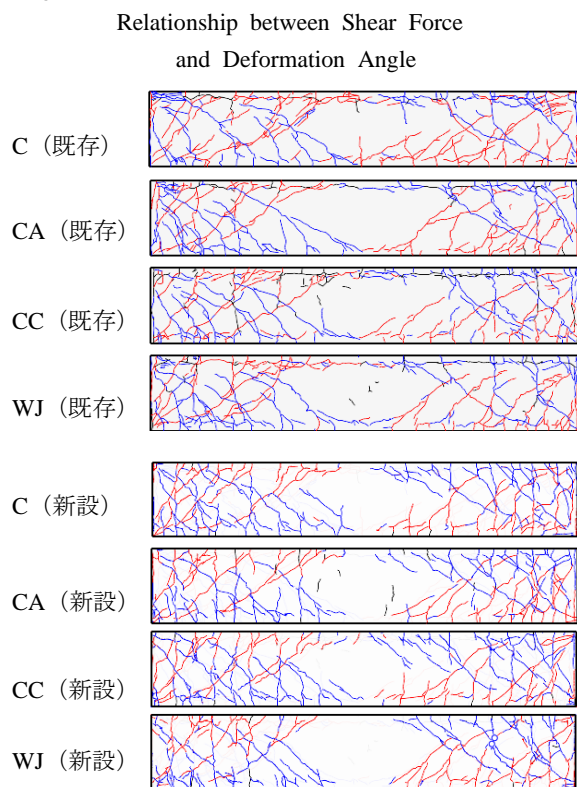


Fig. 4 梁側面のコンクリート損傷状況
(R=+4%時, いずれも紙面左が西側)

Damage of Concrete

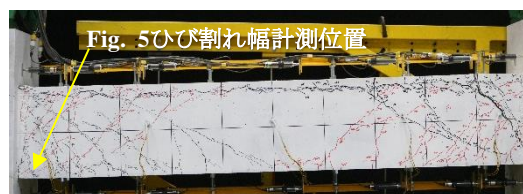


Photo 2 コンクリート損傷状況 (試験体CAの例)
既存梁面 R=+4% 1サイクル目ピーク時

Damage of Concrete

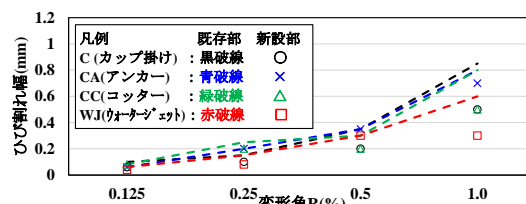


Fig. 5 ひび割れ幅の推移 (1サイクル目)

Transistion of Crack Width

打継面の処理方法を変数として比較すると、 $R=+4\%$ 時におけるコンクリートの損傷に顕著な差は見られなかった。

Fig. 5 に 1 サイクル目ピーク時におけるひび割れ幅の推移を示す。計測したひび割れは、試験区間のうち最も西端に生じたひび割れである(Photo 2)。ひび割れ幅は、クラックスケールにより計測した。いずれの試験体も変形角の増大とともにひび割れ幅が増大した。また、既存梁のひび割れ幅は新設梁のひび割れ幅よりも大きい傾向にあった。

3.3 既存梁と新設梁の相対ずれ

Fig. 6 に、既存梁および新設梁の下面における鉛直方向の相対ずれ量の推移を示す。相対ずれ量は、試験部中央において直尺を用いて 0.5mm 単位で計測した(Photo 3)。なお、上面における相対ずれ量には鉛直打継面のずれに加えて 3.2 節で述べた付着割裂ひび割れによる目開きも含まれることから、下面のみを対象とした。試験体 C は $R=3\%$ 、それ以外の試験体は $R=4\%$ の試験体観察時に相対ずれが生じていることを確認した。 $R=4\%$ 時においては、試験体 C に比べて試験体 CA、CC、WJ の相対ずれ量は小さかった。面外方向の相対ずれ量は計測していないが、打継面付近の目開きは $R=2\sim 3\%$ 時にはみられず、 $R=4\%$ 時にわずかに生じた。

3.4 曲率

次式より、各試験体の曲率分布を算出した。計測区間 i における曲率 ϕ_i は、各測定区間における梁の伸縮量より算出した。梁の伸縮量は、試験体上下面に設けた変位

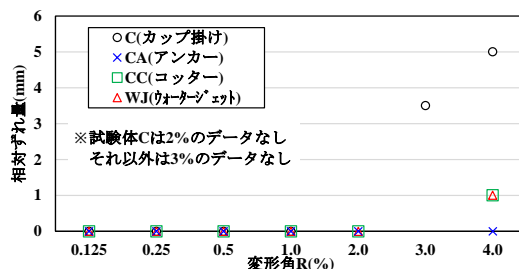


Fig. 6 既存梁および新設梁の下面における鉛直方向の相対ずれ量の推移

Transition of Relative Vertical Displacement

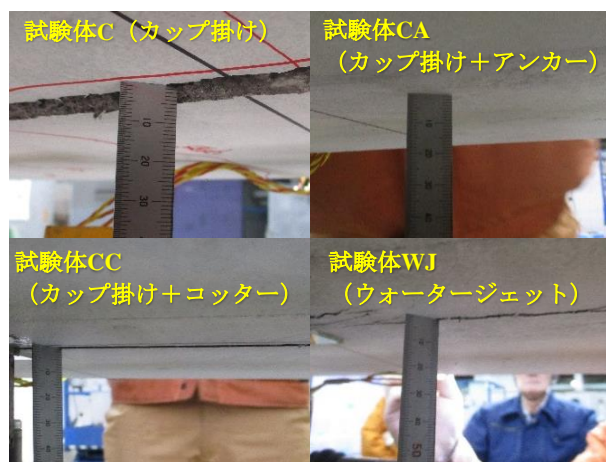


Photo 3 相対ずれ量の計測 ($R=4\%$)
Measurement of Vertical Displacement

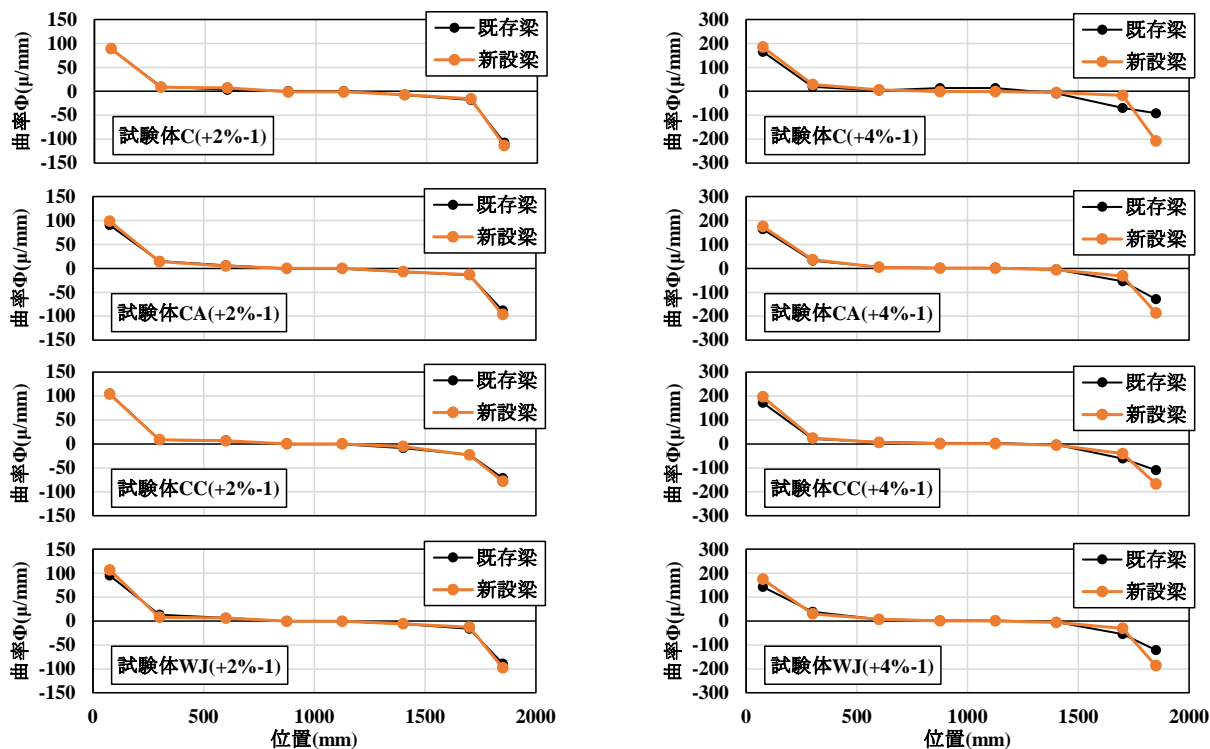


Fig. 7 曲率分布 (1サイクル目ピーク時 横軸の0は西端を、2000は東端を示す 左: $R=+2\%$ 時 右: $R=+4\%$ 時)
Curvature Distribution

計により計測した。

$$\theta_i = \frac{\Delta\theta_i}{\Delta x_i} \quad (1)$$

$$\Delta\theta_i = \frac{\delta_t - \delta_b}{j_o} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\theta_i$ は区間*i*の回転角、 Δx_i は区間*i*の測定距離、 δ_t および δ_b は各区間上下の変位計の変位量、 j_o は試験体上下に設けた変位計間の距離である。Fig. 7に、 $R=+2\%$ および $+4\%$ の1サイクル目ピーク時における各試験体の曲率分布を示す。曲率は試験区間両端部で卓越しており、それ以外の範囲ではほとんど生じなかった。既存梁と新設梁の曲率を比較すると、 $R=+2\%$ 時には、各試験体とも既存梁と新設梁で各区間において曲率に差は見られなかった。一方、 $R=+4\%$ 時には、既存部の付着割裂ひび割れなどのコンクリート損傷の進行により、試験体の東側において新設部の曲率が既存部の曲率よりも増大した。打継面の処理方法を変数として比較すると、試験体Cは他の3試験体に比べて東端の曲率が若干大きい傾向がみられたが、顕著な差はみられない。

3.5 負担せん断力の比率

Table 4に、既存梁主筋降伏時における負担せん断力を示す。梁のせん断力 Q は、梁主筋の梁端部に設けたゲージによるひずみから次式⁷⁾を仮定して曲げモーメント M を算出し、試験区間(2000mm)で除して求めた。

$$M = a_t \times f_t \times j \quad (3)$$

ここで、 a_t は引張鉄筋断面積、 f_t は引張鉄筋の応力で、ヤング率とひずみゲージで計測したひずみを乗じたもの、 j は梁の応力中心距離($(7/8)d$)、 d は梁の有効せいである。既存梁と新設梁のせん断力を合計したせん断力 Q_a は、試験装置に設けたロードセルで計測した荷重から求めた梁のせん断力 Q_L と概ね一致した。新設梁のせん断力 Q_2 は、既存梁のせん断力 Q_1 のおよそ1.5倍程度であった。打継面の処理方法を変数として比較すると、負担せん断力の比率に顕著な差は見られなかった。

4. 考察

4.1 曲げ耐力

本試験体の曲げ耐力は、いずれの試験体とも曲げ降伏耐力計算値の1.2倍程度を有する(Table 3)ことから、既往式⁷⁾で算出した2つの梁曲げ降伏耐力の単純加算で評価可能と考えられる。

4.2 既存梁と新設梁の一体性

既存梁と新設梁の一体性について、履歴曲線(Fig. 3)に着目すると、試験体Cはそれ以外の3体に比べて $R=2\%$ を超える大変形時には耐力低下が生じている。

よって、大変形時における梁の耐力低下抑制や変形性能向上には、あと施工アンカー、コッター、ウォータージェットによる目荒しなどの打継面処理が有効であると考えられる。鉛直方向の相対ずれ量(Fig. 6)に着目すると、 $R=4\%$ 時における相対ずれ量は試験体Cが最も大きく、次いでコッターやウォータージェット目荒しとなり、あと施工アンカーは生じなかった。コッターやウォータージェット目荒しは、打継面の片側のコンクリートが低強度であることでコンクリートの損傷が生じやすかったことや、ウォータージェット目荒しについては面外方向の目開きによって凹凸の噛み合いが弱まったことが原因として考えられる。よって、あと施工アンカー等の打継面処理が梁の一体性保持に有効であり、特に、大変形時においてあと施工アンカーは相対ずれの抑制に効果的であると考えられる。梁の曲率分布(Fig. 7)に着目すると、4試験体とも $R=2\%$ では既存梁と新設梁の曲率は試験区間において差は無いことから、打継部の処理方法によらず、両梁が一体的に変形していると考えられる。

4.3 既存梁と新設梁の負担せん断力の比率

既存梁と新設梁の負担せん断力の比率について、両梁の形状は同一であることから、主たる原因は既存梁と新設梁の剛性の違いによるものと考えられる。具体的には、コンクリートのヤング係数と、梁主筋の径(断面積)である。Table 5に、弾性状態における梁主筋を考慮した各梁の曲げ剛性やせん断剛性と、それらの逆数の和の逆数で合成した部材剛性を示す⁷⁾。新設梁の部材剛性は既存梁に対して1.48倍であり、負担せん断力の比率(Table 4)と概ね一致した。

4.4 既存梁に生じた付着割裂ひび割れ

本実験では、実験計画時には想定していなかった付着割裂ひび割れ(水平ひび割れ)が既存梁の上端主筋に沿って生じた。この原因について考察する。ここでは、既存梁主筋の付着強度と平均付着応力を比較し、検討を行う。付着強度は付着信頼強度 τ_{bu} ⁸⁾より、平均付着応力 τ_f は次式⁸⁾より、それぞれ求めた。

Table 4 既存梁主筋降伏時の梁負担せん断力

試験体名	鉄筋ひずみから求めた				ロードセルから求めた	
	既存梁 せん断力 Q_1 (kN)	新設梁 せん断力 Q_2 (kN)	せん断力の 合計 Q_a (kN)	比 Q_2/Q_1 (-)	せん断力 Q_L (kN)	比 Q_a/Q_L (-)
C	71	106	177	1.48	179	0.99
CA	72	111	184	1.54	187	0.98
CC	70	101	171	1.45	181	0.94
WJ	74	106	180	1.43	187	0.96

Table 5 材料試験値を用いた梁の剛性

Calculated Beam Stiffness				
	曲げ剛性 (kN/mm)	せん断剛性 (kN/mm)	部材剛性 (kN/mm)	部材剛性比 (-)
既存梁	14.4	171	13.3	1.48
新設梁	21.3	263	19.7	

$$\tau_f = d_b \times \Delta\sigma / \{4 \times (L - d)\} \quad (4)$$

ここで、 d_b は既存梁主筋径、 $\Delta\sigma$ は部材両端部の主筋の応力度の差、 L は試験区間、 d は梁の有効せい(316mm)である。 $\Delta\sigma$ について、既存梁に生じた付着割裂ひび割れはR=2%時に顕著となったことから、既存梁主筋の付着強度と平均付着応力の比較はR=2%時を対象に検討した。 $\Delta\sigma$ は既存梁主筋の応力度の差から求められる。R=2%時には引張側主筋は降伏していることから、Table 1の降伏強度を用いた。一方、圧縮側主筋はR=1%時に行った繰り返し載荷によって引張降伏していることから、R=2%時における圧縮側主筋の応力度をひずみから計算することができなかった。そこで、平面保持を仮定した断面解析を行い、実験と同じひずみが引張側主筋に生じた時の圧縮側主筋ひずみにTable 1に示すヤング係数を乗じて圧縮側鉄筋の応力度を求めた。断面解析の結果、圧縮側鉄筋の応力度は254N/mm²(圧縮)であった。

上記計算の結果、R=2%時の平均付着応力は1.65N/mm²、既存梁主筋の付着強度は1.58N/mm²であり、平均付着応力は付着強度を上回った。よって、実験時に付着割裂ひび割れが生じたと考えられる。実験計画時に想定していなかった付着割裂ひび割れが生じた原因として、試験体設計時に比べてコンクリート実強度が低く、また、鉄筋の降伏強度が高くなったことが考えられる。

5. まとめと課題

増打補強されたRC梁を対象に、鉛直打継面の処理方法をパラメータとして正負交番の逆対称曲げせん断載荷実験を行った。本実験の範囲において、以下の知見を得た。

- 1) 本試験体の曲げ耐力は既存梁と新設梁を一体断面として既往式より求めた計算値の1.2倍程度を有しており、既往式を用いて梁ごとに計算した曲げ降伏耐力の単純加算で評価可能であった。
- 2) 鉛直打継面に設けたあと施工アンカー、コッター、ウォータージェットによる目荒しは、大変形時における梁の耐力低下抑制や変形性能向上に有効であった。
- 3) 梁の鉛直方向の相対ずれ抑制には、あと施工アンカー、コッター、ウォータージェット目荒しによる打継面処理が有効であり、変形角R=2%を超えるような大変形時には、あと施工アンカーが効果的であった。

本報では鉛直打継面の施工方法に着目するためシンプルな矩形断面の梁を用いて検討を行った。しかし、実建物ではスラブによる水平打継面を有する場合がある。水平打継面による影響については今後の課題とする。また、本実験では、梁を試験機に固定するために梁の両端にスタブを設けている。このスタブの拘束効果により梁の一体性が得られた可能性がある。このスタブによる影響や実際の柱梁接合部への影響についても今後の課題となる。

謝辞

日本ヒルティ殿にあと施工アンカーの施工に関してご協力を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省，“カーボンニュートラルとは”，脱炭素ポータル，環境省，https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/，（参照 2025-5-16）
- 2) 読売新聞，“解体までの建築物「生涯CO₂」算出義務化へ、政府が制度検討”，読売新聞オンライン，2025-1-6，<https://www.yomiuri.co.jp/politics/20250105-OYT1T50056/>，（参照 2025-5-16）
- 3) 大林組，“国内初，建物解体後の鉄骨およびコンクリート製の構造部材を新築建物へリユース”，2024-6-27，大林組プレスリリース，https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20240627_1.html，（参照 2025-5-16）
- 4) 大林組，“京都・祇園の文化財がホテルとしてよみがえる”，2024-8-30，OBAYASHI Thinking，<https://www.obayashi.co.jp/thinking/detail/project87.html>，（参照 2025-5-16）
- 5) 三井不動産，野村不動産，“「日本橋一丁目中地区第一種市街地再開発事業」着工”，2021-12-7，<https://www.nomura-re.co.jp/cfiles/news/n2021120701943.pdf>，（参照 2025-5-16）
- 6) 北條稔郎，田中剛，田淵基嗣，森浩二，孫玉平，谷口貴大：既存地下構造の再利用におけるRC梁の補強に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp 417-418，2008.9
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp. 124-125，2024.12
- 8) 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，pp. 142-144，175-177，1999.8