論文　断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮特性に及ぼす断面修復材の圧縮強度，付着状況および修復形状の影響

時　利偉[*1]・三島　直生[*2]・畑中　重光[*3]

要旨：本報では，断面修復されたコンクリートの力学的な挙動を把握するための研究の一環として，柱脚の圧縮縁付近のコンクリート部分を想定した小型のコンクリート供試体を対象とし，圧縮強度の異なる断面修復材を用いて断面修復したコンクリート供試体の圧縮特性に関する実験を試みた。その結果，欠損形状を四角形とすることで，補修モルタルの圧縮強度および弾性係数が母材コンクリートと同等以上であれば，補修界面における付着に関係無く，欠陥の無い母材コンクリートの圧縮強度を維持することが可能となることが明らかになった。

キーワード：断面修復，コンクリート，初期欠陥，角柱供試体，圧縮強度，付着状況，修復形状，弾性係数

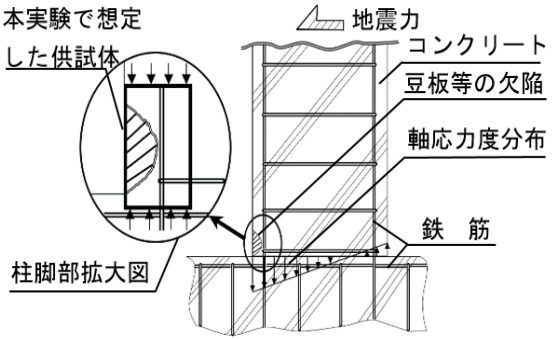
1.　はじめに

鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物の施工段階におけるコンクリート工事では，締固め不足や材料の分離などによって，RC 柱の柱脚部に豆板などの初期欠陥が発生することがある。欠陥面積や深さが大きい場合には，欠陥および欠陥近傍のコンクリートを斫り取り，断面修復材を用いて断面修復を行うのが一般的である [1)]。しかし，断面修復されたコンクリートの力学的な挙動は複雑であり，不明な点が多い。また，構造体の中では，柱脚部分が欠陥のできやすい部位の 1 つであるとともに，地震時には自重による圧縮力だけでなく大きな曲げモーメントが作用してコンクリートが損傷を受ける可能性の高い部位でもあるため，この部分の破壊挙動を把握することは重要であると考えられる。

筆者らは前報 [2)] において，**図－1** に示すような RC 柱脚の圧縮縁付近のコンクリート部分を想定した小型のコンクリート供試体を対象とし，高強度型補修モルタルを用いて断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮特性に関する実験を試みた。同実験における仮定条件を以下に示す。

1)　単純化のために供試体に鉄筋は含まない。
2)　供試体は，RC 柱脚の表面から 100mm の深さの範囲を想定する。
3)　応力は，断面修復材の力学特性が重要となる圧縮側のみを想定する。
4)　曲げモーメントによる応力勾配およびせん断応力は無視する。
5)　欠陥は，コンクリート未充填部の発生しやすいかぶりコンクリート部に発生したものと想定する。

実験の結果からは，断面修復の形状により圧縮特性が大きく変化することなどが明らかとなり，この断面修復形状を設計要因として取り入れることで，断面修復されたコンクリートの品質確保が容易となる可能性が示された。



図－1　RC 柱脚部に発生する欠陥と軸応力度分布のイメージ図 [2)]

本報では，前報 [2)]に引き続き，断面修復形状および補修界面における付着性能に加えて，断面修復材の圧縮強度を要因とした実験を行い，断面修復したコンクリートの圧縮特性に及ぼす影響を把握することを目指す。

2.　実験概要

本実験では，前述した仮定条件はそのままとした。実験条件としては，圧縮試験時の載荷板を固定し，載荷中に載荷板の角度が変化しない条件に変更して実施した。

2.1　実験の要因と水準

実験の要因と水準を**表－1** に示す。実験要因として断面修復材の圧縮強度，補修界面における付着の有無および欠損形状を取り上げた。断面修復材の圧縮強度は，4 水準とした。欠損形状および寸法は，同表に示すような A（三角形），B（四角形）の 2 種類とした。すべての角柱

*1 株式会社コンステック　東海事業部　調査診断グループ（正会員）修士（工学）
*2 三重大学大学院　工学研究科建築学専攻　准教授（正会員）博士（工学）
*3 三重大学大学院　工学研究科建築学専攻　教授（正会員）工博

表－3　母材コンクリートの調合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	18	60	4.5	46	179	302	792	957	1.25

供試体寸法は，100×100×200mm とした。欠損供試体以外に，欠損無しの健全な角柱供試体 C および円柱供試体 D も作製した。ここで，供試体記号を以下のように定義する。［欠損形状（A，B）－補修モルタルの圧縮強度－付着の有無（有：a，無：b）］

2.2　使用材料および調合

表－2 に使用材料の一覧を，**表－3** に母材コンクリートの調合表を示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材は川砂を，粗骨材は最大寸法 20mm の砕石を，混和剤は高性能 AE 減水剤を用いた。断面修復材として用いた補修モルタルは市販のセメント系高強度型プレミックスタイプ無収縮モルタルの粉体と川砂の混和物（以下，補修モルタル）とした。調合は，予備実験に基づいて決定した。**表－4** に本実験で使用した補修モルタルの調合および測定したモルタルフロー値（JISR5201 に準拠）の結果を示す。

2.3　供試体の作製方法

(1)　圧縮試験用供試体

型枠には，100×100×400 mm の鋼製角柱型枠を用い，中央部に薄い鉄板を入れて固定し，角柱試験体 2 個分の型枠として使用した。

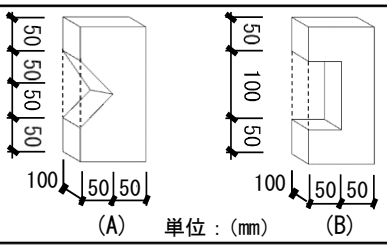
欠損の作製には，**写真－1** に示すように鋼製型枠内に所定の欠陥形状の発泡スチロールを固定し，母材コンクリートを打ち込んだ。付着有りの補修界面とは，この発泡スチロールの表面にある細かな凸凹がコンクリート界面に転写された状態を示す。また，付着無しの補修界面とは，発泡スチロールの表面をガムテープで被覆して発泡スチロール表面の細かな凹凸を無くし，補修モルタルの施工を行う直前にさらに離型剤を塗布した欠損表面である。

コンクリートの圧縮強度および弾性係数を確認するために，φ100×200 mm の円柱供試体 D を 6 本作製した。

打込み後，型枠上面をビニルシートで密閉し，温度 20±3℃の環境下で型枠内封緘養生を行い，材齢 2 日で脱型した。型枠脱型後に，高圧洗浄機で欠損表面に残った発砲スチロール片を清掃し，材齢 14 日まで全供試体を水中養生とした。

コンクリートの材齢 14 日に，水中養生をしたコンクリート供試体の欠損表面にある水膜を拭き，2 時間ほど気中乾燥させた後に各種補修モルタルを施工した供試体（補修界面の付着ありの供試体：A15a，A40a，A60a，A120a，B15a，B40a，B60a，B120a）およびコンクリートの打設時に欠損表面の凸凹を無くした補修界面に

表－1　実験の要因と水準

要因	水準
圧縮強度 Fm (N/mm²)	15，40，60，120
欠損形状および寸法	
補修界面の付着の有無	有り，無し

表－2　使用材料と特性

材料	記号	特性値
セメント	C	早強ポルトランドセメント　密度：3.14g/cm³
細骨材	S	川砂　表乾密度：2.55g/cm³
粗骨材	G	砕石　表乾密度：2.60g/cm³
混和剤	A	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）
断面修復材	DS	セメント系無収縮モルタル粉体と川砂の混和物

表－4　補修モルタルの調合およびフロー値

補修モルタルの記号	W/MS	S/MS	モルタルフロー値 (mm)
E15	0.60	4.0	205
E40	0.40	2.5	130
E60	0.30	1.5	125
E120	0.13	0.0	150

［注］　W：水、MS：高強度型セメント系無収縮モルタル粉体、S：川砂

写真－1　欠損のある角柱供試体の型枠の例

0.0025g/cm² の塗布量で離型剤を塗布した後に補修モルタルを施工した供試体（補修界面の付着無しの供試体：A15b，A40b，A60b，A120b，B15b，B40b，B60b，B120b）を作製した。離型剤は，鉱物油が主成分である鋼製型枠用離型剤とした。欠損有りで補修無しの供試体は，補修界面の付着無しの供試体の母材コンクリート部分と同条件で作製した。補修モルタルの施工時には，重力による垂れなどにより施工欠陥が発生する可能性がある。本実験では，実験要因以外の施工条件による付着性能の変動

を抑えるために，コンクリート角柱供試体の欠損部分を上向きにして置き,欠損側面を鋼板でふさいで型枠とし，上面から補修モルタルを打ち込んだ後に，コテ仕上げを行った。補修モルタルの練混ぜにはモルタルミキサを用いた。また，補修モルタルの圧縮強度および弾性係数を測定するために，φ50×100 mm の円柱供試体 E を補修モルタルの種類ごとに 6 本ずつ作製した。

断面修復後，補修モルタルの材齢 2 日で脱型し，補修モルタルの材齢 28 日まで温度 20±3℃の養生室でビニルシートによる封緘養生を行った。

(2) 曲げ強さ試験用供試体

4 種類の補修モルタルを用いて作製した圧縮試験用供試体の，補修界面における付着程度を曲げ強さ試験で確認するために，40×40×160mm の曲げ強さ試験用供試体 F を作製した。本供試体は，母材コンクリートと各種補修モルタルを用いて，供試体中央を付着界面となるように作製されたものである。補修界面の状態は，圧縮試験用供試体と同様な付着有りと無しの 2 種類とした。施工方法は，まず 40×40×160mm の型枠の半分に発泡スチロールを入れた後に，コンクリートを打設して 40×40×80mm のコンクリート供試体を作製した。次に材齢 14 日に，コンクリート供試体を型枠に入れ，補修モルタルを打込むことによって，コンクリートと補修モルタルを一体化させた。供試体数は各水準 3 体とした。ここで，コンクリートの粗骨材の最大寸法が 20mm に対して型枠が小さいが，本試験がコンクリートと補修モルタルの界面の付着特性を評価するものであるため，試験結果への影響はないと考えられる。

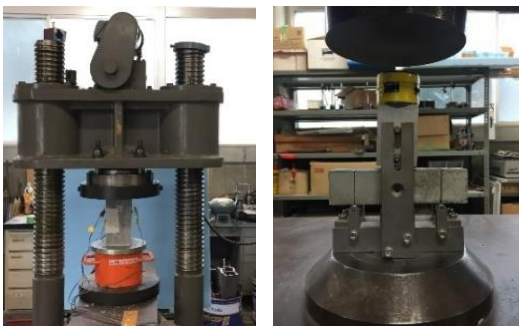
曲げ強さ試験用供試体作製は、圧縮試験用供試体の作製と同時に行った。

2.4 実験方法

(1) 圧縮強度試験

補修モルタルの材齢 28 日に，圧縮実験を行った。供試体の端面は，平滑性を確保するために圧縮試験前日にコンクリート研磨機で仕上げた。供試体のひずみ分布を測定するために，試験当日に，検長 30mm のひずみゲージを所定の位置に貼り付けた。ひずみゲージの検長は，補修範囲(100mm)のうち付着界面の影響を受けない領域としてその 1/3 程度を想定して決定した。ひずみゲージは，補修した角柱供試体の母材コンクリート側と補修モルタル側の側面中央部に貼り付けた。

圧縮試験には，**写真－2(a)** に示すような 500kN 耐圧試験機を用いた。供試体のひずみ勾配が仮定した RC 柱脚の圧縮縁におけるものと大きく異なることを避けるために，載荷時には耐圧試験機の載荷板と供試体の間に球座を設置せず，載荷板を固定した状態で載荷した。載荷板の固定は,載荷板上にあるボルトを締めることによった。



(a) 圧縮強度試験　　(b) 曲げ強さ試験

写真－2 試験方法

表－5 コンクリートおよび補修モルタルの力学特性

補修モルタルの記号	補修モルタル E		母材コンクリート C	
	Fm (N/mm²)	Em (kN/mm²)	Fc (N/mm²)	Ec (kN/mm²)
E15	12.8	13.5	38.2	30.5
E40	40.5	30.1		
E60	59.8	30.5		
E120	128.2	39.1		

表－6 曲げ強さ試験結果

	記号	補修界面における付着の有無	
		有り	無し
曲げ強さ (N/mm²)	F15	2.34	測定不能
	F40	2.50	
	F60	1.95	
	F120	4.85	

載荷板を固定するタイミングについては，まず載荷板が固定されていない状態で，供試体に載荷し，供試体に損傷が生じない荷重範囲である 40kN の時点で荷重を止めた後，載荷板と供試体端面の間に隙間がない状態で載荷板の固定用ボルトを締めた。なお，供試体端面の摩擦を取り除く処理は施していない。

(2) 曲げ強さ試験

曲げ強さ試験は，補修モルタルの材齢 28 日に，JIS R 5201 に規定されている曲げ強さ試験方法によって行った。載荷位置は曲げ供試体の付着界面の位置とした。曲げ強さ試験の様子を**写真－2(b)** に示す。

3. 実験結果およびその考察

3.1 コンクリートおよび補修モルタルの力学特性

表－5 に，作製したコンクリート角柱供試体 C および補修モルタル供試体 E の圧縮強度および弾性係数の測定結果を示す。同表より，圧縮強度に関しては，概ね計画通りの値を得た。弾性係数に関しては，母材コンクリートと比べて E15 では極端に小さく，E40，E60 では，ほぼ同等で，E120 では大きい結果となった。

3.2 曲げ強さ試験

表－6 に，曲げ強さ試験の結果を示す。各種供試体の曲げ強さは 3 体の供試体の平均値を示し，そのばらつきは最大で 0.5N/mm² 程度であった。付着有りの水準にお

ける測定結果からは，低強度の補修モルタルを用いた供試体 F15 は補修モルタル側で破壊し，これ以外は，中央部にある付着界面で破壊した。曲げ強さは F60 の補修モルタルを用いた供試体が最も低くなった。

F60 の曲げ強さが小さくなった原因としては，**表－4** に示すフロー値が E60 で最も低くなっており，施工性が悪いために付着強度が低下し，曲げ強さが小さくなったと考えられる。

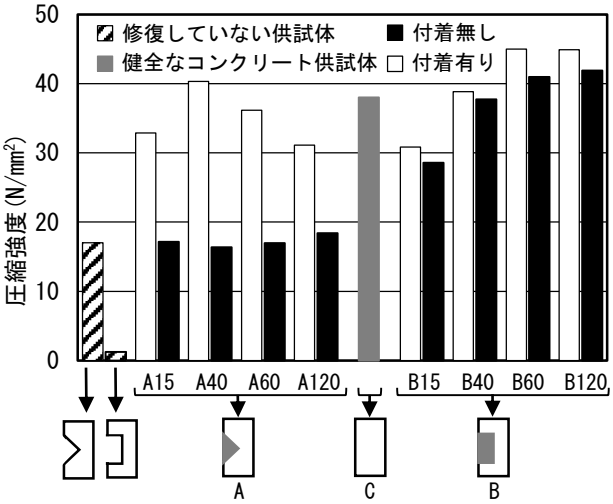
補修界面を平滑にした上で補修界面に離型剤を塗布した供試体(付着無しの水準)では，コンクリートと補修モルタルの付着が無く，脱型時に剥離し，測定不能となった。

3.3　角柱供試体の圧縮強度

(1)　欠損形状 A の場合

図－2 に，各角柱供試体の圧縮強度試験結果を、**表－7** に，破壊状況を示す。同図より，補修界面における付着がある場合(図中の白色)には，母材コンクリートより低い圧縮強度を持つ補修モルタルを用いて断面修復した供試体 A15a は，母材コンクリート C と比べ圧縮強度の低下が見られた。これは，補修モルタルが低強度であるためと考えれる。母材コンクリートより高い圧縮強度を持つ補修モルタルを用いて断面修復した供試体 A60a および A120a でも圧縮強度の低下が見られた。また，これらの供試体においては，破壊状況の観察においてコンクリートと補修モルタルの補修界面に沿ってひび割れが発生した。この原因としては，A60a では曲げ強さ試験の結果から母材コンクリートと補修モルタルの付着が小さかったこと，また，A120a では母材コンクリートと弾性係数が異なることなどが考えられる。

補修界面における付着がない場合(図中の黒色)は，補修モルタルの強度レベルに関係無く，いずれも圧縮強度が断面修復していないコンクリート角柱供試体と同等な値，すなわち健全なコンクリート角柱供試体 C の 1/2 弱



図－2　各角柱供試体の圧縮強度試験結果

となっている。これは，母材コンクリートと補修モルタルの界面の付着がないため，載荷途中に，補修モルタルの全ての部分が供試体から剥脱し，欠損部が充填されていない状態で圧縮されたため，補修モルタルが全く機能せず圧縮強度が欠損した母材コンクリートのみで決まるためである。

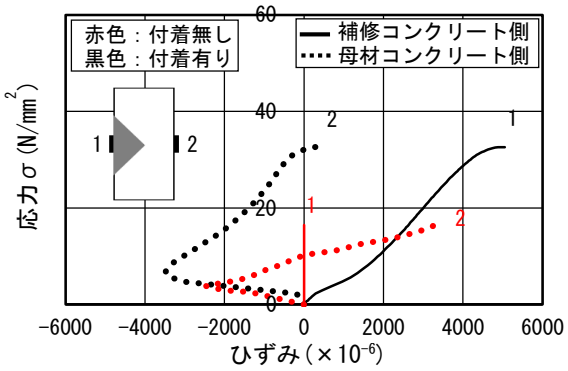
以上の結果より，本実験の範囲では，欠損形状を三角形とした場合は，補修界面における付着が断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮強度に与える影響が大きく，また補修モルタルの圧縮強度が母材コンクリートよりも低い場合，および補修モルタルの弾性係数が母材コンクリートと異なる場合にも圧縮強度が低下することが明らかとなった。

(2)　欠損形状 B の場合

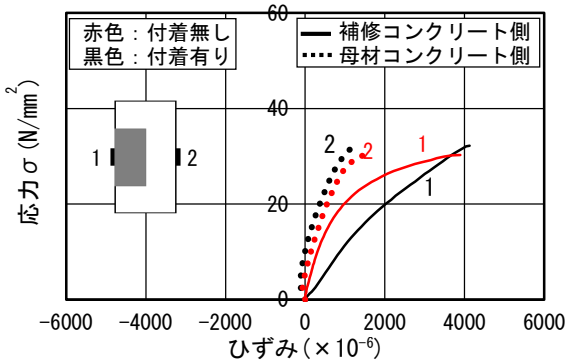
図－2 に示すように，欠損形状 B で断面修復した供試体は，補修界面における付着の有無にかかわらず，補修モルタルの強度の増大につれ圧縮強度が増大する傾向が見られた。健全なコンクリート角柱供試体 C との比較からは，低強度補修モルタルを用いて修復した供試体のみ

表－7　角柱供試体の破壊状況

	A15	A40	A60	A120	C	B15	B40	B60	B120
付着有り									
付着無し									

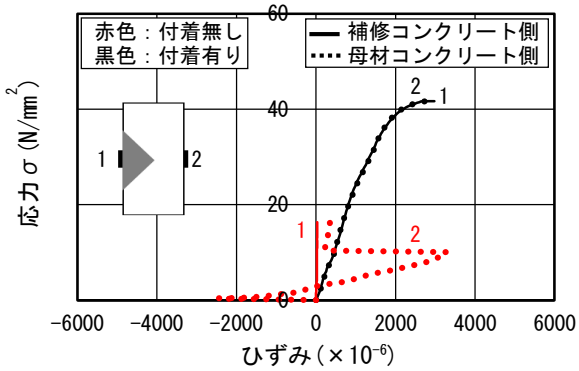


(a)　供試体 A15

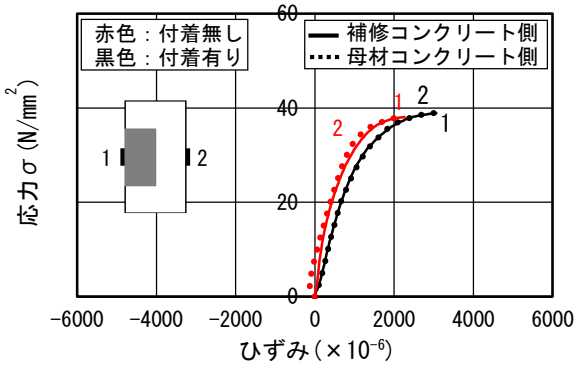


(b)　供試体 B15

図－3　母材コンクリートより補修モルタルの圧縮強度が低い場合における断面修復した角柱供試体の応力－ひずみ曲線



(a)　供試体 A40



(b)　供試体 B40

図－4　母材コンクリートと補修モルタルの圧縮強度が同等な場合における断面修復した角柱供試体の応力－ひずみ曲線

圧縮強度の低下が見られた。他の供試体は，健全なコンクリート角柱供試体と同等以上の圧縮強度となった。付着の有無の影響については，付着の無い場合は，付着有りの場合と比べて数 N/mm² 程度の強度の低下が見られるものの，三角形の欠損形状の場合と比べるとその差は極めて小さいと言える。

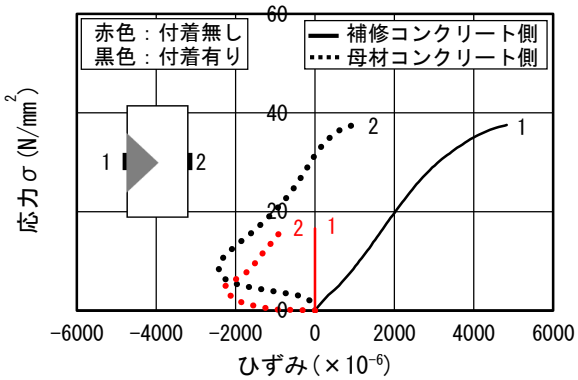
欠損形状 B の断面修復していない供試体は，ほぼ圧縮力に耐えることができない結果となった。これは，供試体側面の対角線上の応力の集中する位置（ひび割れの入る位置）に欠損が存在するため，載荷初期から，偏心載荷による曲げモーメントが働き，曲げ破壊するためと考えられる。

これより，欠損形状を四角形とした場合には，補修モルタルの圧縮強度および弾性係数が母材コンクリートと同等以上であれば，補修界面における付着に関係無く，欠損の無い母材コンクリートと同等以上の圧縮特性を有していることがわかる。

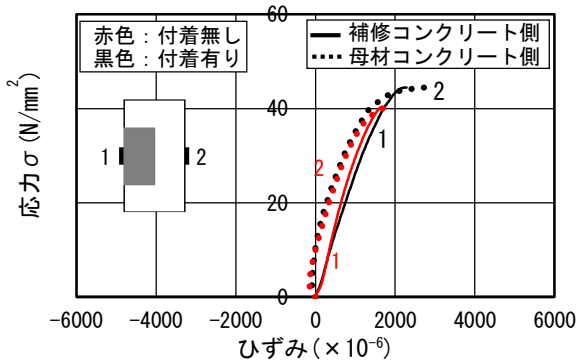
3.4　ひずみ分布

(1)　母材コンクリートより補修モルタルの圧縮強度が低い場合(A15，B15)

母材コンクリートより低い圧縮強度を持つ補修モルタルを用いて断面修復した各角柱供試体の応力―ひずみ曲線を図－3 に示す。ただし，ここでは応力として供試



(a)　供試体 A60



(b)　供試体 B60

図－5　母材コンクリートより補修モルタルの圧縮強度が高い場合における断面修復した角柱供試体の応力－ひずみ曲線

体全体の平均値を用いる。ひずみの符号については、圧縮ひずみを正、引張ひずみを負として示した。同図より，補修界面の付着の有無と欠損形状に関係なく，供試体のいずれも載荷初期の段階に母材コンクリート側に引張ひずみが発生した。この原因は，補修モルタルの弾性係数が母材コンクリートと比べて低かったことにより曲げモーメントが発生したことによる。

補修界面の付着がある場合には，載荷初期から，供試体 A15 は，供試体 B15 より母材コンクリート側に発生する引張ひずみが大きくなっている。これは，載荷初期から欠損形状 A の補修モルタルが効いていないことを示している。

補修界面の付着がない場合には，欠損形状を三角形とした A15b 供試体は，補修モルタル側のひずみが載荷初期段階から最大荷重までほぼ変化しなかった。これは，載荷開始直後から補修モルタルが母材コンクリートから剥離し，補修界面から荷重の伝達がなかったためと考えられる。欠損形状を四角形とした B15b 供試体に関しては，付着界面に付着が無い場合でも，補修モルタルが A15b のように供試体から外れることがないため，供試体全体で圧縮力を負担していることがわかる。

(2) 母材コンクリートと補修モルタルの圧縮強度が同等な場合(A40，B40)

母材コンクリートと同等な圧縮強度を持つ補修モルタルを用いて断面修復した各角柱供試体の応力―ひずみ曲線を**図－4** に示す。補修界面に付着がある場合には，供試体 A40 と供試体 B40 のいずれも欠損形状の種類にかかわらず，補修モルタルとコンクリートの変形は荷重の全段階にわたってほぼ一致している。これは，補修モルタルとコンクリートの力学特性である圧縮強度および静弾性係数の両方が近いためと考えられる。

補修界面に付着がない場合には，供試体 A40b は，補修モルタルが低強度である A15b の場合とほぼ同じ結果となった。供試体 B40 に関しては，載荷初期の段階で母材コンクリート側に引張ひずみが発生した原因は，補修モルタルと母材コンクリートの間に離型剤の層が存在しているため，この部分が変形して母材コンクリート断面に曲げ応力が発生したためと考えられる。ただし，その後は母材コンクリートと補修モルタルでほぼ同一の応力－ひずみ曲線となっている。

この結果からは，欠損形状が三角形の場合には，母材コンクリートと近い圧縮強度，静弾性係数を有する断面修復材を選択しても，付着が無い場合には，母材コンクリートと同等の圧縮強度は得られないと言える。

(3) 母材コンクリートより補修モルタルの圧縮強度が高い場合(A60，B60)

母材コンクリートより高い圧縮強度を持つ補修モルタル(60, 120N/mm^2)を用いて断面修復した各角柱供試体の応力―ひずみ曲線はほぼ同じ傾向となったため，一例として**図－5** に A60，B60 の結果を示す。すべての条件において，補修モルタルと母材コンクリートの強度が同等なものよりも，補修モルタルの強度が小さい水準の結果に近い傾向を示した。

補修モルタルの静弾性係数は，E40 と近い値が得られているの対して曲げ強さ(付着強度)は，E15 よりも小さい結果となっていることから，付着界面の状態が悪く，その影響が支配的となっている可能性も考えられる。

4. まとめ

本実験では，母材コンクリート強度に対する補修モルタルの圧縮強度レベルを変化させた時の，断面修復した角柱コンクリート供試体の圧縮特性の評価を実験的に行った。その結果，以下の知見が得られた。

1) 欠損形状を三角形とした場合には，断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮強度は，補修モルタルの圧縮強度の影響よりも，補修界面における付着の有無の影響が大きく，補修界面の付着の無い場合には，補修モルタルが全く機能しない。
2) 欠損形状を四角形とした場合には，断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮強度は補修界面における付着の有無の影響より，補修モルタルの圧縮強度による影響が大きく，補修モルタルの圧縮強度の増大につれ，増大する。
3) 欠損形状を三角形とした場合には，補修モルタルの圧縮強度が母材コンクリートより高く，かつ補修モルタルの弾性係数が母材コンクリートと同一で，かつ付着が良好という極めて限定的な場合のみ，欠損の無い母材コンクリートと同等な圧縮特性が得られる。
4) 欠損形状を四角形とすることで，補修モルタルの圧縮強度および弾性係数が母材コンクリートと同等以上であれば，補修界面における付着に関係なく，欠陥の無い母材コンクリートと同等以上の圧縮特性を有している。

参考文献

1) 社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術，[基礎編]，pp.250-263，2012.2
2) 時　利偉，三島直生，畑中重光：断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮特性に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1735-1740，2017.