

報告 埋設型枠と水中不分離性モルタルで断面修復した扁平 RC 梁の静載荷実験

戸上 卓也^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・南 真樹^{*3}・西谷内 龍司^{*4}

要旨：本研究では、劣化損傷したケーソン側壁部の効率的な断面修復工法として、埋設型枠を設置して水中不分離性コンクリートを充填する工法を提案し、既設コンクリートと補修部の一体性、ボルト孔の削孔に伴う鉄筋破断の影響および埋設型枠の増し厚効果などを検討することを目的に、扁平 RC 梁を母材とした試験体の静的曲げ載荷実験を実施した。その結果、1) 鉄筋破断や断面欠損がある場合においても提案工法で断面修復することにより RC 梁の曲げ耐荷性能が改善されること、2) 補修材料は主鉄筋降伏時までほぼ完全に RC 梁と一体化していること、などが明らかになった。

キーワード：扁平 RC 梁、ケーソン、断面修復、埋設型枠、水中不分離性モルタル

1. はじめに

近年、海洋・港湾コンクリート構造物の摩耗、凍結融解、乾湿繰り返し、塩害等による劣化損傷が問題となっている。特に、ケーソン構造物の場合には、劣化が進行して側壁に穴があくと、中詰砂が流出するなど被害が拡大するため、早期に補修対策を講じなければならない。従来の断面修復工法としては、既設構造物から海側に 1.5 m 程度張り出す形でコンクリートを打設する腹付け工法が用いられているが、施工には広い型枠ヤードが必要になることや、施工後は港口や停泊地が狭くなることなどが問題となっている。一方、鋼製型枠をケミカルアンカーを用いて取り付け、水中コンクリートを充填する工法¹⁾も用いられているが、著者らはこの型枠を埋設型枠とすることで断面修復部の再劣化が抑制され、かつ近年増加している消波ブロックの衝突に対する抵抗性も向上するものと考えた。しかしながら、鋼製型枠を用いる場合には、型枠は勿論のこと固定ボルトも錆により劣化し減肉するため、耐久性に優れる材料を用いる必要がある。

このような問題の解決策として、著者らは埋設型枠および固定ボルトを耐久性に優れる繊維補強モルタルで製作・設置し、水中不分離性コンクリートを充填する工法を提案した。これまで、提案工法の施工性や耐久性については十分に検討されており、一部で実用化されている。しかしながら、既設コンクリートと補修部の一体性や埋設型枠設置による増厚効果などは検証されていないのが現状である。また、埋設型枠設置用ボルト孔の削孔時に万一鉄筋が切断された場合の影響についても未検討である。よって、提案工法の信頼性や汎用性を向上させるためには、埋設型枠設置後における剛性の変化や終局限界

状態を検証することが重要であるものと考えられる。

このような観点から、本研究では、断面欠損したケーソン側壁を埋設型枠を設置して断面修復する場合を想定し、埋設型枠を設置した扁平 RC 梁の静的 3 点曲げ載荷実験を実施した。載荷実験は、実ケーソン側壁の 1/2 縮小模型を対象に行った。

2. 補修工法

写真－1には、断面修復工法の概要を示している。本研究に用いた断面修復工法は、防波堤や岸壁などの港湾コンクリート構造物等の劣化欠損部分を高強度・高耐久性モルタル二次製品(埋設型枠パネル、ボルト・ナット)と形状自在棲枠を使って補修する工法である。埋設型枠パネルおよび取付け用のボルト・ナットは、海水中における耐久性を考慮して配合設計した繊維補強モルタルを用いて製作している。また、ボルトには軸力が作用するため AFRP ロッドにより補強している。施工の手順は、1) 劣化欠損部周辺に埋設型枠パネルを設置するためのコア削孔を行い、2) ボルトを接着固定して埋設型枠パネルを取り付け、ナットで固定した後に、3) 水中不分離性コンクリートを充填する、である。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

表－1には、使用した材料の配合とフレッシュ性状を示している。また、**表－2**には、試験体の一覧を示している。試験体名の第 1 項目は、RC 梁の状況を示している。N は無損傷、C はコア削孔による鉄筋破断有り、CD はコア削孔による鉄筋破断と断面欠損を模擬した箱抜き有り、

^{*1} 室蘭工業大学 工学部 建築社会基盤系学科 (学生会員)

^{*2} 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

^{*3} (株)南組 取締役 保守維持事業部長 (正会員)

^{*4} 浦河生コンクリート(株) 取締役浦河工場長 (非会員)

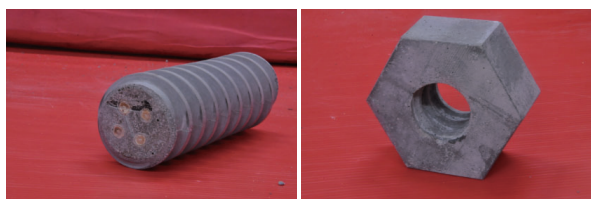
表－１ 使用材料の配合とフレッシュ性状

使用材料名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								スランプ (cm)	空気量 (%)
			C	W	S	G	有機系 短繊維	高性能 AE 減水剤	AE 減水剤	水中不分離性 混和剤		
母材 コンクリート	43.5	42.7	357	155	766	1048	-	-	C×0.8%	-	12	5.5
水中不分離性 モルタル	50.0	-	607	304	1242	-	-	C×2.0%	C×0.3%	C×0.4%	-	-
繊維補強モルタル	270	50.0	723*	195	723**	723	4.55	C×2.0%	-	-	52×52***	5.3

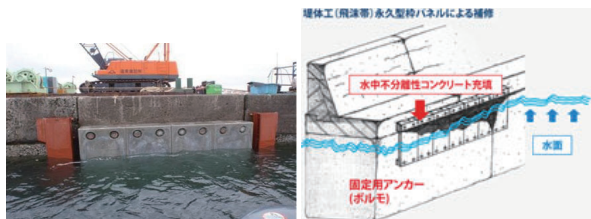
*: セメント混和剤 = 55:45, **: 全量スラグ細骨材, ***: スランプフロー



(a) 埋設型枠パネル



(b) ボルトとナット (ボルトは AFRP ロッド補強)



(c) 設置のイメージ

(埋設型枠設置後に水中不分離性コンクリートを充填)

写真－１ 断面修復工法の概要

表－２ 試験体一覧

試験体名	コア削孔による 鉄筋の破断	断面欠損 の有無	埋設型枠パネル 設置の有無
N	無	無	無
C-P	有	無	有
CD-P-1	有	有	有
CD-P-2			

を示している。また、第２項目の P は、埋設型枠パネルを設置していることを示している。なお、CD-P 試験体の場合には、再現性を確認するため２体について載荷実験を行っている。試験体名の末尾には通し番号を付した。

図－１には、試験体の形状寸法と配筋図を示している。本実験に用いた試験体は、断面寸法 (幅 × 高さ) が 1,200 mm × 200 mm、純スパン長が 2,000 mm の複鉄筋 RC 梁であり、実ケーソン側壁 (厚さ 400 mm) の 1/2 縮小模型である。鉄筋は配置間隔が実ケーソンの 1/2 でかつ鉄筋比が同等になるように配置した。埋設型枠は、RC 梁と同様の



(a) 充填中の状況



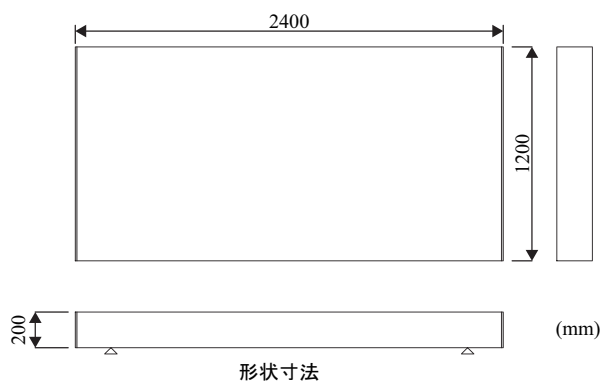
(b) 充填後の状況

写真－２ 水中不分離性モルタル充填時の状況

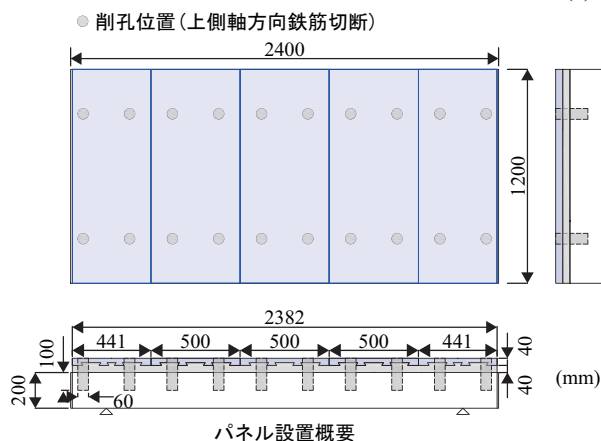
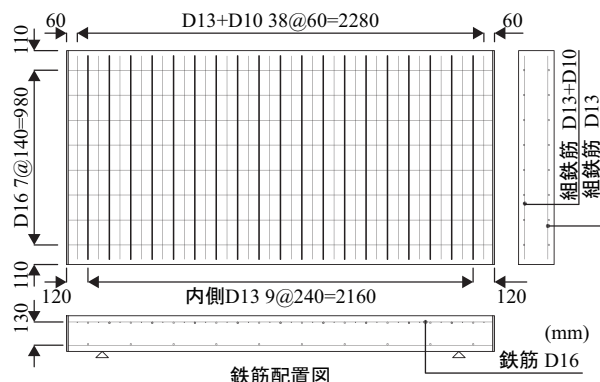
考え方に基いて 1/2 縮小模型を製作した。また、図－２には、試験体側面と鉄筋に貼付けたひずみゲージの位置を示している。

図－１ (a) に示すように、RC 梁の上端および下端の軸方向鉄筋には D16 をそれぞれ 8 本ずつ配置した。また、上端の組立筋には D13 および D10 を用い 60 mm 間隔で交互に配置し、下端の組立筋には D13 を用い 240 mm 間隔で配置した。N 試験体を除く試験体には、ボルト孔の削孔による鉄筋破断を生じさせた状態で埋設型枠パネルを設置し、パネルと RC 梁間に水中不分離性モルタルを充填した。実施工では、水中不分離性コンクリートを用いるが、本研究では 1/2 縮小模型を対象としているため水中不分離性モルタルを用いた。CD-P 試験体の場合には、断面欠損部にも充填した。なお、水中不分離性モルタルは実施工を模擬して水中で充填した。写真－２には、水中不分離性モルタル充填時の状況を示している。

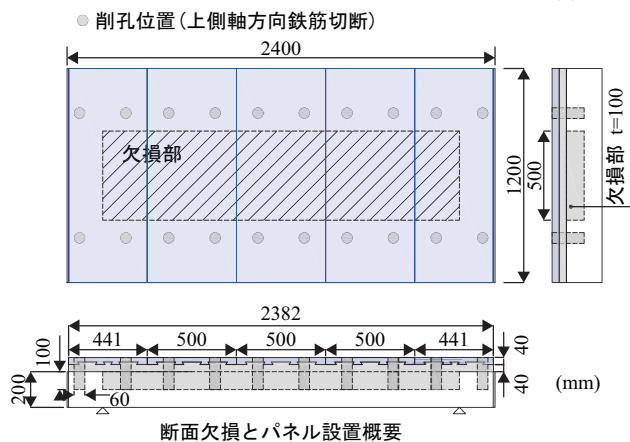
図－３には、使用したコンクリートおよびモルタルの圧縮強度試験により得られた応力－ひずみ曲線を示している。なお、再現性を確認するため６体について圧縮強度試験を行っている。図より、繊維補強モルタルは、圧



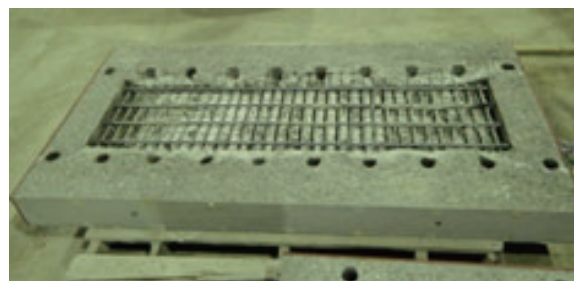
(a) N 試験体



(b) C-P 試験体



(c) CD-P 試験体

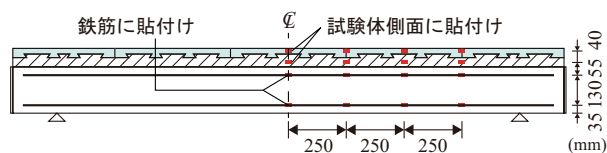


図－１ 試験体図

縮強度が 100 MPa 程度であるにもかかわらず、終局ひずみが $4,500 \mu$ 程度に至るまで安定した耐荷性状を示していることが分かる。これは、混入した繊維の架橋効果によるものと考えられる。表－３には、各使用材料の力学試験結果を示している。これらの結果は、後述する断面分割法による RC 梁の耐力計算に用いた。

3.2 実験方法および測定方法

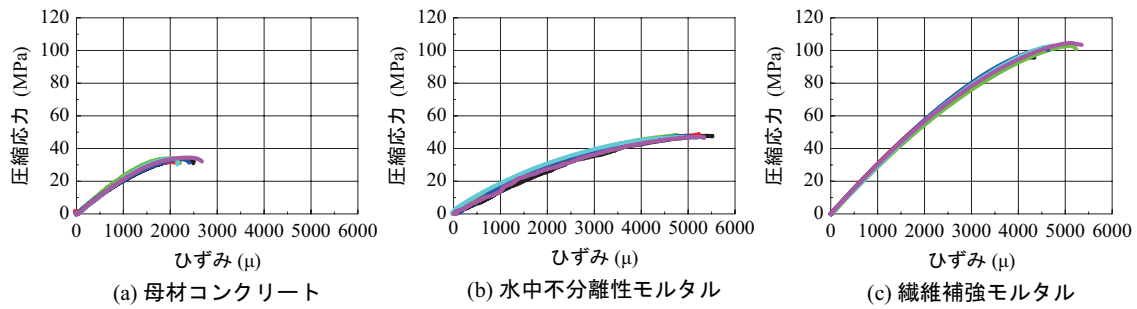
載荷実験は、外力によりケーソン側壁が隔壁間において円筒状に曲げ変形する状況を想定して行った。なお、パネル裏側の突起は、想定した曲げ変形に対するずれ止め(せん断キー)である。写真－３には、実験状況を示し



図－２ ひずみゲージ貼付け位置

ている。

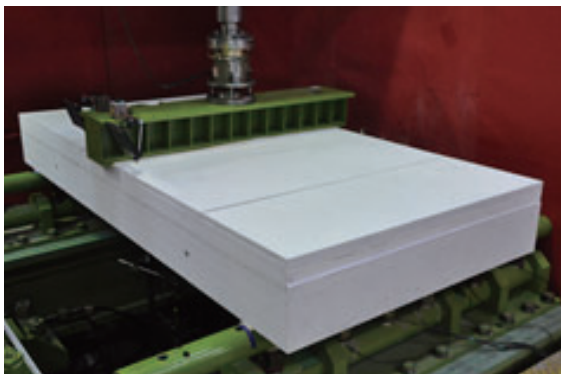
測定項目は載荷荷重および梁底面各位置の変位、支点反力、試験体側面および鉄筋の軸方向ひずみである。なお、載荷荷重と支点反力は、ロードセルを用いて計測している。また、載荷点変位に関しては、レーザ式変位計



図－3 圧縮強度試験結果

表－3 力学特性

使用材料名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏応力 (MPa)	弾性係数 (GPa)
母材 コンクリート	33.4	2.38	-	22.8
水中不分離性 モルタル	47.5	3.02	-	16.1
繊維補強 モルタル	100.3	4.97	-	29.9
鉄筋	-	-	392	200



写真－3 実験状況

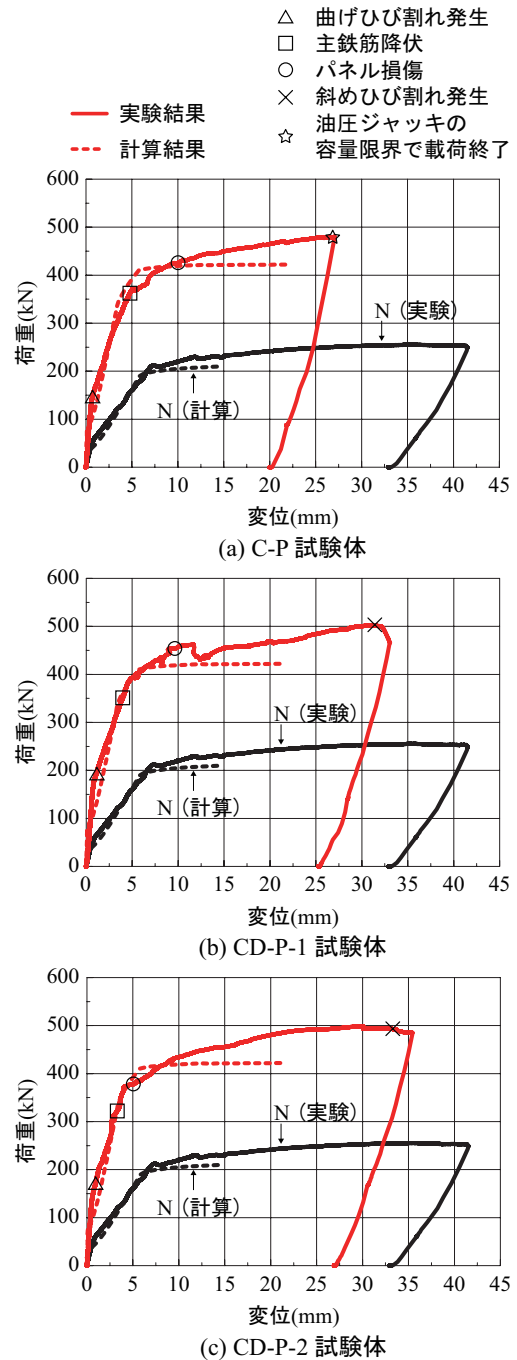
を用いて計測している。実験終了後には、試験体のひび割れ状況を撮影している。

4. 実験結果と考察

4.1 荷重－変位関係

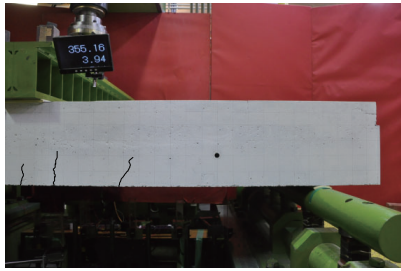
図－4 には、C/CD-P 試験体の荷重－変位関係を N 試験体と比較して示している。なお、計算結果はコンクリート標準示方書²⁾に準拠し、母材コンクリート、水中不分離性モルタルと埋設型枠パネルの完全付着を仮定した断面分割法の結果に基づいて算出している。なお、C-P 試験体は油圧ジャッキの容量限界のため変位が 27 mm の時点で載荷を終了した。

図より、N 試験体は荷重が 200 kN 程度まで増加した後主鉄筋が降伏して増加勾配が大きく低下している。一方、C/CD-P 試験体の場合は、ひび割れ発生荷重、主鉄筋降伏荷重、および曲げ剛性が N 試験体よりも大きく、鉄

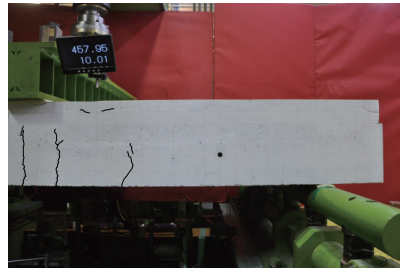


図－4 荷重－変位関係

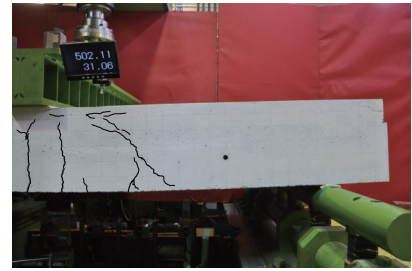
筋降伏後も変位と共に荷重が増加していることが分かる。これより、鉄筋破断や断面欠損がある場合においても埋設型枠パネルで補修することで RC 梁の曲げ耐力性能が



(a) 鉄筋降伏時



(b) パネル損傷発生時



(c) 斜めひび割れ発生時

写真－4 CD-P-1 試験体のひび割れ進展状況

改善されることが明らかになった。

計算結果を実験結果と比較すると、C/CD-P 試験体の実験結果は主鉄筋が降伏する変位 5 mm 程度まで計算結果と概ね同様の性状を示していることが分かる。なお、計算結果では主鉄筋降伏後荷重が増加しないのに対し、実験結果では変位の増加に伴って荷重も徐々に増加している。これは、実験では載荷点近傍の上縁コンクリートが鉛直および水平方向から圧縮を受ける三軸圧縮状態となっているため、見かけの圧縮強度が大きくなったことなどが原因であるものと推察される。

C/CD-P 試験体は、いずれも変位の増加に伴って埋設型枠パネルの圧縮破壊や損傷および部分的な剥離を生じた。CD-P 試験体には 2 体とも RC 梁部で斜めひび割れが開口したため載荷を終了した。なお、写真－4 には、CD-P-1 試験体における鉄筋降伏時、パネル損傷発生時、および斜めひび割れ発生時のひび割れ進展状況を示している。

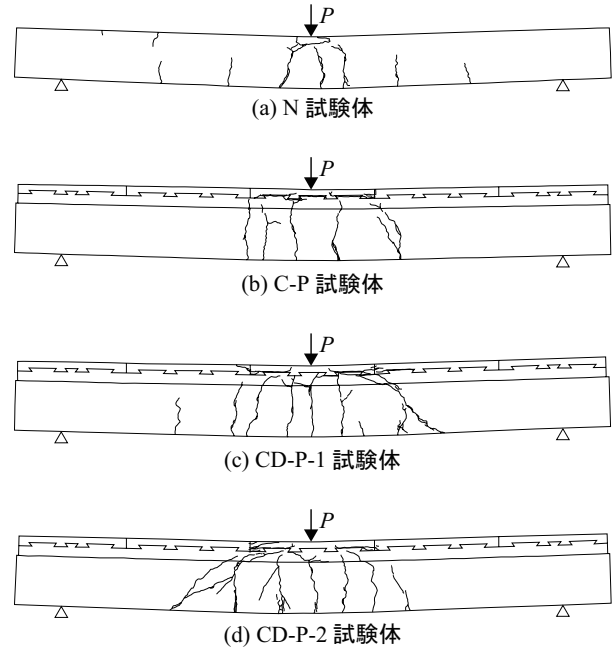
4.2 ひび割れ性状

図－5 には、実験終了後における各試験体側面のひび割れ性状を示している。図より、いずれの試験体も、スパン中央部近傍において曲げひび割れが大きく開口していることが分かる。N 試験体の場合には、上縁コンクリートが圧壊しており、典型的な RC 梁の曲げ破壊に至っていることが分かる。また、C-P 試験体の場合には、埋設型枠と水中不分離性モルタルの界面にひび割れが発生していることから、部分的な剥離が生じているものと考えられる。

CD-P 試験体の場合には、C-P 試験体よりも載荷時の変位が 20 % 程度大きいため、損傷度が大きい。RC 梁部には曲げひび割れの他、斜めひび割れが発生し、梁上部においては埋設型枠の剥離のみならず、その継ぎ目部における圧縮破壊や水中不分離性モルタル部のひび割れも見られる。ただし、RC 梁部に斜めひび割れが発生するまでは、荷重が増加していたため、鉄筋破断や断面欠損部の補修効果は保持されていたものと判断される。

4.3 断面高さ方向のひずみ分布性状

図－6 には、C/CD-P 試験体の断面高さ方向のひずみ分布性状を示している。ここでは、載荷点変位が 2.5, 5.0



図－5 ひび割れ性状

および 10.0 mm における各断面のひずみ分布の実験結果を計算結果と比較して示している。また、各断面の計算曲率も示している。なお、計算結果は、荷重－変位関係の場合と同様に、平面保持を仮定した断面分割法により算出した。

図より、断面高さ方向のひずみの分布勾配(曲率)は、スパン中央部で最も大きく、変位量の増加に伴って増大する傾向にあることが分かる。また、実験結果と計算結果を比較すると、計算曲率 $\phi_c = 0.005 \sim 0.008$ (1/m) の場合において、両者が比較的良好に対応する傾向にあることが分かる。これは、計算による主鉄筋降伏曲率 $\phi_{yc} = 0.007$ (1/m) 程度であるため、主鉄筋降伏時までは RC 梁と水中不分離性モルタルおよび埋設型枠の付着がほぼ完全に確保されていることを示しているものと考えられる。

また、変位が 5 および 10 mm 時には、スパン中央部近傍において実験結果と計算結果が対応しない傾向にあるが、これは、主鉄筋が降伏し上縁の損傷が著しくなり、埋設型枠の部分的な剥離等が発生していることを示しているものと考えられる。

以上のことから、提案の埋設型枠と水中不分離性モル

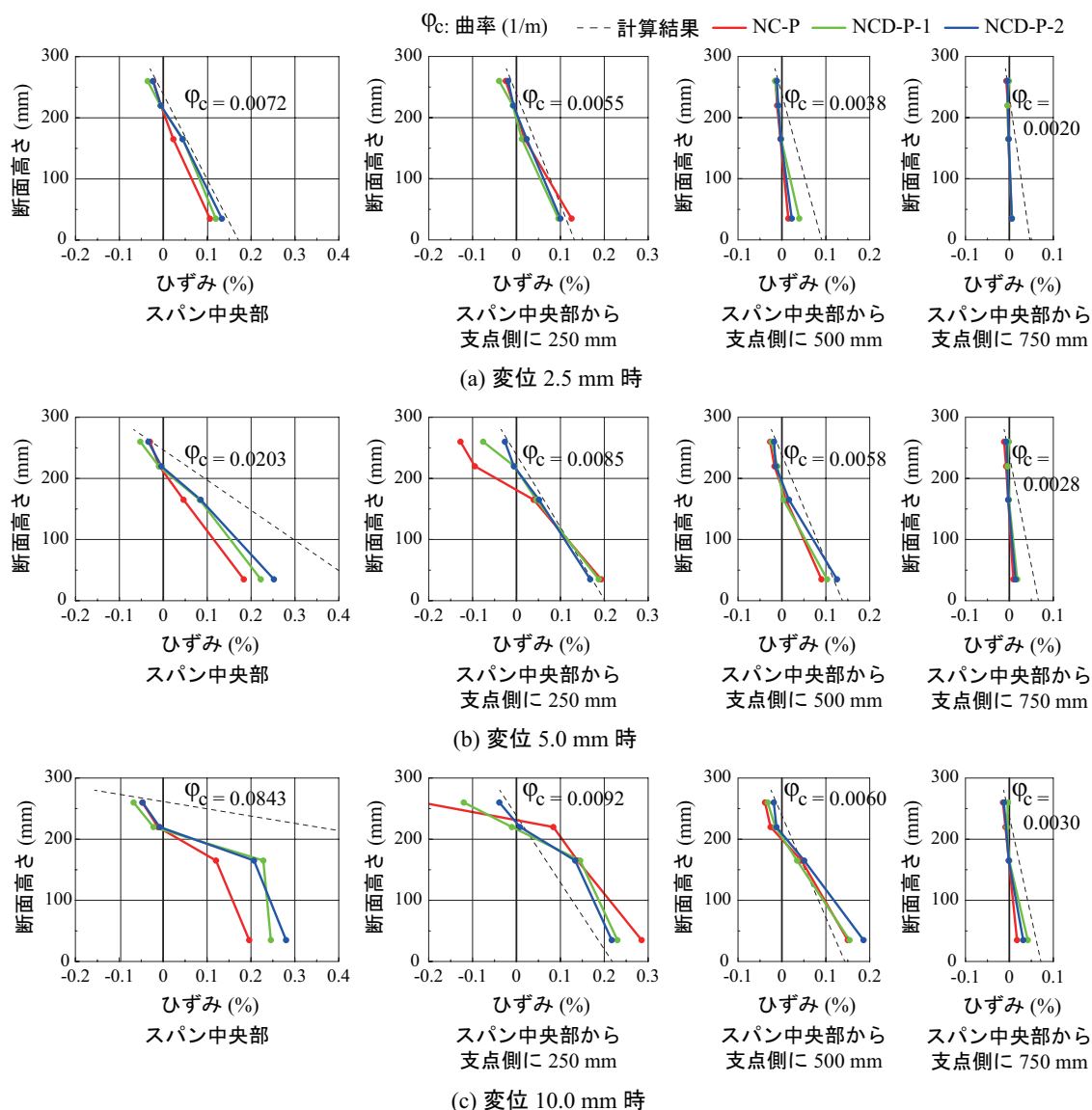


図-6 各変位時における各断面のひずみ分布性状

タルを用いた断面修復工法は、母材である RC 梁の鉄筋破断やコンクリートの断面欠損がある場合においても、十分な補修効果を発揮することが明らかになった。また、これらの補修材料は主鉄筋降伏時まではほぼ完全に RC 部材と一体化していることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、劣化損傷したケーソン側壁部の効率的な断面修復工法として、埋設型枠パネルを設置して水中不分離性コンクリートを充填する工法を提案し、既設コンクリートと補修部の一体性、ボルト孔の削孔に伴う鉄筋破断の影響や埋設型枠パネルの増し厚効果などを検討することを目的に、扁平 RC 梁を母材とした静的曲げ荷重実験を実施した。本実験により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 鉄筋破断や断面欠損がある場合においても、実ケーソンを模擬した RC 梁に提案の断面修復工法を適用

することにより、その曲げ耐荷性能は当初断面(無損傷)の場合よりも大きくなる。

- 2) 埋設型枠パネルおよび水中不分離性モルタルは、RC 梁の主鉄筋降伏時まではほぼ完全に RC 梁と付着し一体化している。
- 3) 主鉄筋降伏後、塑性化が進行し断面曲率が大きくなると、埋設型枠パネルの損傷や水中不分離性モルタルの部分剥離などを生じる。ただし、著しい耐力低下には至らない。

参考文献

- 1) 国土交通省 東北地方整備局：防波堤ケーソンの損傷対策に関する技術マニュアル(案)ー消波ブロック衝突による側壁損傷対策ー, 2007.1
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2012