

高弾性 CFRP ロッドの
付着性能の改善と
張出し RC 床版の補強への適用性

Bond Improvement of High-Modulus CFRP Rods and
Applicability for Strengthening of Cantilever RC Slabs

2021 年 3 月

長谷川 泰聰

Hiroaki HASEGAWA

山口大学大学院 創成科学研究科

目次

学位論文要旨	・ ・ ・ ・	i
Summary of the Doctoral Dissertation	・ ・ ・ ・	iii
第1章 序論		
1.1 研究背景	・ ・ ・ ・	2
1.1.1 日本の社会インフラの現状	・ ・ ・ ・	2
1.1.2 道路橋の損傷状況	・ ・ ・ ・	4
1.2 道路橋床版の補修・補強	・ ・ ・ ・	6
1.2.1 補修・補強工法の現状	・ ・ ・ ・	6
1.2.2 Near Surface Mounted (NSM) 工法	・ ・ ・ ・	8
1.2.3 NSM 工法に使用される連続繊維補強材	・ ・ ・ ・	9
1.3 本研究の目的	・ ・ ・ ・	11
1.4 GFRP リブを装着した CFRP ロッドに求められる性能	・ ・ ・ ・	12
1.5 本論文の構成	・ ・ ・ ・	13
第2章 既往の研究		
2.1 道路橋床版の設計方法	・ ・ ・ ・	15
2.2 道路橋床版の疲労耐久性に関する研究	・ ・ ・ ・	17
2.3 連続繊維補強材による床版補強に関する研究	・ ・ ・ ・	19
2.4 炭素繊維成形品（プレート/ロッド）による床版補強に関する研究	・ ・ ・ ・	21
2.4.1 炭素繊維成形品の製造方法	・ ・ ・ ・	21
2.4.2 炭素繊維成形品を使用した床版補強	・ ・ ・ ・	23
2.5 Near Surface Mounted 工法に関する研究	・ ・ ・ ・	27
第3章 CFRP ロッドの付着性能の改善方法		
3.1 はじめに	・ ・ ・ ・	33
3.2 付着性能改善方法	・ ・ ・ ・	33
3.3 引抜き実験による付着性能の改善効果	・ ・ ・ ・	34
3.3.1 試験体一覧	・ ・ ・ ・	34
3.3.2 載荷方法	・ ・ ・ ・	35
3.3.3 CFRP ロッドの付着性能改善方法（Series-1 試験）	・ ・ ・ ・	36
3.3.4 GFRP リブ寸法による影響（Series-2 試験）	・ ・ ・ ・	39
3.4 RC はりの曲げ試験による補強効果	・ ・ ・ ・	41
3.4.1 使用材料および試験体一覧	・ ・ ・ ・	41
3.4.2 試験体作成	・ ・ ・ ・	42
3.4.3 載荷方法および計測方法	・ ・ ・ ・	43
3.4.4 最大耐力および破壊性状	・ ・ ・ ・	44
3.4.5 たわみ性状	・ ・ ・ ・	46

3.4.6 ひずみ性状	・ ・ ・ ・	47
3.5 第3章のまとめ	・ ・ ・ ・	49
第4章 最適 GFRP リブ形状の検討		
4.1 はじめに	・ ・ ・ ・	51
4.2 実験方法	・ ・ ・ ・	52
4.3 付着耐力	・ ・ ・ ・	54
4.4 第4章のまとめ	・ ・ ・ ・	57
第5章 GFRP リブを装着した RC はりの曲げ性能		
5.1 はじめに	・ ・ ・ ・	59
5.2 使用材料および試験体作成	・ ・ ・ ・	59
5.3 載荷方法および計測方法	・ ・ ・ ・	62
5.4 静的曲げ試験による補強効果	・ ・ ・ ・	63
5.4.1 最大耐力および破壊性状	・ ・ ・ ・	63
5.4.2 たわみ性状	・ ・ ・ ・	65
5.4.3 ひずみ性状	・ ・ ・ ・	66
5.5 繰返し載荷試験による疲労耐久性能	・ ・ ・ ・	70
5.5.1 繰返し荷重および繰返し回数	・ ・ ・ ・	70
5.5.2 繰返し荷重による疲労耐久性能	・ ・ ・ ・	71
5.6 繰返し載荷試験後の残存耐力試験	・ ・ ・ ・	74
5.6.1 残存耐力	・ ・ ・ ・	74
5.6.2 200万回載荷後のひずみ性能	・ ・ ・ ・	74
5.6.3 曲げ理論の適用性の検討	・ ・ ・ ・	76
5.6.4 せん断スパン内付着影響範囲	・ ・ ・ ・	77
5.7 第5章のまとめ	・ ・ ・ ・	78
第6章 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証		
6.1 はじめに	・ ・ ・ ・	80
6.2 使用材料	・ ・ ・ ・	81
6.3 試験体製作	・ ・ ・ ・	82
6.4 輪荷重走行試験載荷方法	・ ・ ・ ・	84
6.5 荷重プログラムおよび載荷回数	・ ・ ・ ・	85
6.6 ひび割れ進展状況および破壊状況	・ ・ ・ ・	87
6.7 繰返し荷重による張出し床版先端たわみ進展	・ ・ ・ ・	91
6.8 繰返し荷重によるひずみ進展	・ ・ ・ ・	92
6.9 断面高さ方向維ひずみ分布	・ ・ ・ ・	94
6.10 第6章のまとめ	・ ・ ・ ・	95

第7章 結論	
7.1 本研究のまとめ	・ ・ ・ ・ 97
7.2 今後の課題と研究展望	・ ・ ・ ・ 99
参考文献	・ ・ ・ ・ 100
本論文に関する著者の発表論文	・ ・ ・ ・ 107
謝 辞	・ ・ ・ ・ 108

学位論文要旨

高弾性 CFRP ロッドの付着性能の改善と張出し RC 床版の補強への適用性

長谷川 泰聰

日本の社会インフラは 1970 年代の高度経済成長期に建設されたものが多く、今後その多くが建設から 50 年を経過し、維持・更新の時期を迎えつつある。橋梁においては輪荷重を直接受ける床版の損傷が大きく、交通量の多い道路や古い橋梁では鉄筋コンクリート (RC) 床版の抜け落ちも発生している。床版補強に関しては様々な工法が開発され、現在も多数の橋梁の維持補修が行われているが、その多くが RC 床版下面側の補強となっている。床版上面側の補強の場合、路面高を変更させることなく、交通規制時間もできるだけ短い補強が求められるが、それらのニーズに合致した工法はほとんどない。

本研究では耐腐食性に優れる Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) ロッドを、RC 床版上面に敷設した超早強ポリマーセメントモルタル (Polymer Cement Mortar: PCM) 内に埋設することで、これらの課題を克服する工法を考案した。ここで引抜成形法により製造される高弾性 CFRP ロッドは表面の凹凸がなく、超早強 PCM との付着性能が低いといった課題が残る。そこで、Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) リブを CFRP ロッドに装着することで付着性能を改善した。本研究は、この付着改善した CFRP ロッドによる RC 床版の補強効果について実験的に調べたものである。

本論文の構成は 7 章となっており、それぞれの章の内容を以下に示す。

「第 1 章 序論」では、日本の社会インフラの現状を述べ、老朽化した RC 床版の損傷状況に関して取りまとめた。あわせて老朽化した RC 床版に対して現在実施されている補強方法についてもまとめ、その中でも本研究で採用した Near Surface Mounted (NSM) 工法の概要と同工法に使用される連続繊維補強材についても概説した。

「第 2 章 既往の研究」では、道路橋床版の設計方法の変遷と現行の設計方法を整理するとともに、関連する既往の研究をレビューした。

「第 3 章 CFRP ロッドの付着性能改善方法」では、直径 12mm の CFRP ロッドに種々の付着改善策を施した引抜き耐力試験と、これを補強材に用いた RC はりの曲げ載荷試験についてまとめた。付着性能改善策は大きく分けて 2 種類で 6mm 程度の肉厚の GFRP リブを装着する方法と CFRP ロッドを 25mm 程度まで大径化させる方法とした。

引抜き耐力試験においては CFRP ロッドの付着耐力を向上させた場合、鉄筋の付着強度以上の耐力が得られたものの、24~27MPa 程度のコンクリートでは埋設コンクリートの割裂破壊が発生することがわかった。RC はりの曲げ載荷試験においては計算上の曲げ圧縮破壊耐力の 90% 程度の荷重まで CFRP ロッドの抜け出しが発生しない結果となったが、リブ部分で大きく剛性が変化することから CFRP ロッドの破断ひずみで 50% 程度のひずみでロッドが破断する結果と

なった。CFRP ロッドの破断ひずみ程度まで有効に機能させるためには、ロッドの付着性能を低下させない程度まで GFRP リブを小さくする必要があることがわかった。

「第4章 最適 GFRP リブ形状の検討」では、リブ厚を 6.0mm 未満、リブ長を 50mm 以上とした場合の引抜き耐力試験についてまとめた。試験結果より、リブ長を 75mm としても CFRP ロッドの付着耐力は向上せず、1.5~4.5mm のリブ厚の範囲ではリブ厚が厚くなると徐々に付着耐力が低下することがわかった。この試験を通じて、6.0mm 未満のリブを装着する場合は、リブ長 75mm、リブ厚 1.5mm 程度が最適の形状であることがわかった。

「第5章 GFRP リブを装着した RC はりの曲げ性能」では、第4章で得られた結果を基に、GFRP リブ加工した CFRP ロッドを埋設した RC はりを用いて、静的載荷試験による曲げ耐力性能と定点繰返し載荷試験による疲労耐久性能についてまとめた。

静的載荷試験では GFRP リブ加工した CFRP ロッドで補強した RC はりは、計算上の鉄筋の降伏荷重以上の曲げ耐力を示し、CFRP ロッドの破断ひずみの 90%程度まで CFRP ロッドの抜け出しが生じないことがわかった。定点繰返し載荷試験では静的耐力の 75%の荷重を上限として繰返し載荷を行ったところ、100 万回から 200 万回の間で鉄筋が降伏したが、CFRP ロッドの抜け出しは発生しなかった。また、200 万回載荷後の残存耐力試験においても静的曲げ耐力と同程度の耐力を示しながら、CFRP ロッドの荷重-ひずみ勾配も静的載荷試験時と同程度となり、繰返し載荷による CFRP ロッドの付着性能の低下もみられなかった。以上の結果より GFRP リブ厚を 1.5mm まで薄くしても RC はりの補強材として有効と判断された。

「第6章 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証」では、実橋に使用した場合の挙動を調べるため、上記の CFRP ロッドで補強した RC 張出し床版に対する輪荷重走行試験についてまとめた。本試験では輪荷重走行下でのひび割れ進展状況、損傷が進展した際の張出し床版端部の変位増加状況、CFRP および鉄筋のひずみ進展状況を調べた。荷重レベルは補強前の鉄筋降伏荷重の 130%程度（補強後の鉄筋の許容応力度の 150%程度の荷重）となる 60kN からスタートし、80kN まで 10kN ずつ階段状に増加して輪荷重走行試験を行った。本試験において初期荷重である 60kN に換算した累加走行回数で 350 万回以上の疲労耐久性を示し、輪荷重作用位置付近で押抜きせん断破壊する結果となった。また、各荷重レベルで支点部の維ひずみ分布は概ね直線性を保っており、CFRP ロッドの抜け出しも発生していないことから、実床版を模擬した輪荷重作用下においても十分な疲労耐久性能を有していることがわかった。

「第7章 結論」では、本研究の主な成果を要約するとともに、今後の課題についてとりまとめた。

Summary of the Doctoral Dissertation

Bond Improvement of High-Modulus CFRP Rods and Applicability for Strengthening of Cantilever RC Slabs

Hiroaki HASEGAWA

There are 0.7 million bridges in Japan and the 20 % bridges of them aged over 50 years. The number of aged bridges will grow up to 70% in 2 decades. On the other hand, the national budget for construction has been decreased since 1998, and now reached 7.1 trillion yen that was half of 1998. So, it is important to use those aged bridges as long as possible, rather than scrapping and rebuilding.

Bridge deck slab is damaged significantly, because of directly subjected to heavy traffic loads. In generally, reinforced concrete (RC) over-lay method is usually conducted to strengthen upper surface of deck slab, but there are several issues. One of them is increase of dead load, because approximately 100 mm covering concrete was casted to prevent the rebar corrosion.

Previous studies focus on a near-surface-mounted (NSM) technique using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) material to strengthen RC deck slab. It is well known that NSM technique by CFRP is effective for strengthening RC structures, such as non-corrosive characteristics, light weight and significantly high strength. Almost of NSM studies usually use epoxy resin to attach CFRP material. So, the traffic can't be recovered on following day, because of curing 2 or 3 days to harden the epoxy resin.

This study focused on cantilevered RC deck slab and aims to develop a strengthening technique of upper surface of deck slab in shorter construction term by using ultra-high-early strength polymer cementitious mortar (PCM) and high modulus CFRP rod. The CFRP rods manufactured by PURTRUSION method have little shear-resistance rib, hence the bond performance in PCM is significantly low. The purposes of this study are to research bond improving technique and to investigate the applicability for cantilevered RC deck slab. This thesis consists of 7 chapters, and the contents of each chapter are shown below;

Chapter 1," Introduction": This chapter described the deterioration of RC deck slab and general strengthening method included NSM technique for those structures. The several fiber materials used in NSM technique were indicated and those properties were described. Based on the background mentioned above, the purpose of this study and outline of this thesis were exhibited in this chapter.

Chapter 2," Previous studies": This chapter reviewed the previous studies about fatigue durability of RC deck slab by moving-wheel load test and flexural property of RC member strengthened by NSM technique. Especially, several studies about flexural property of cantilevered RC slab used FRP strip or FRP rod were described.

Chapter 3," Investigation of bond improving method of high modulus CFRP rod": The main purpose of this chapter is to research effective processing method to improve bonding performance of

CFRP rod. To improve the bond performance, CFRP rods coated with an epoxy adhesive incorporating silica sand (epoxy-sand-coating), and CFRP rods which have artificial ribs made of glass fiber reinforced polymer (GFRP) sleeves, were prepared in the experimental investigation. And a pull-off test and a flexural loading test of concrete members embedded CFRP rods were conducted to examine bond performance. The test results confirmed that attachment of GFRP ribs to the CFRP rod is relatively effective to improve the bond performance, but the fracture strength of CFRP rod with GFRP ribs of 6.0 mm thick were approximately 50 % of tensile strength because of stress concentration at GFRP rib.

Chapter 4,” Investigation of GFRP rib dimension with best bond performance”: The main purpose of this chapter is to research the most adequate dimension of GFRP rib. To examine bond performance of CFRP rod with GFRP rib, the pull-off test of CFRP rod embedded in mortar was conducted. The test result confirmed that the CFRP rod with GFRP rib of 1.5 mm thick and 75 mm long had same bond strength as deformed bar.

Chapter 5,” Experiment on flexural performance of RC beam with bond improved CFRP rod”: The main purpose of this chapter is to research the flexural fatigue durability of RC beam embedding the bond-improved CFRP rods. To examine the fatigue durability, the monotonic and cyclic loading tests were conducted by using 15 beam specimens. RC beam embedding the CFRP rods without GFRP ribs was ruptured by diagonal cracking at the shear-span, which was caused by the slip from concrete. However, beams strengthened with bond-improved CFRP rods were ruptured by flexure failure and achieved a higher capacity than the designed load capacity at steel-yielding. The flexural fatigue test confirmed that the strengthened beams endured 2 million cycles loading of 75 % load-carrying capacity at monotonic loading test, and the CFRP rods were firmly bonded in concrete, even under a repeated load.

Chapter 6,” Investigation of fatigue durability of cantilevered RC deck slab with CFRP rod by moving wheel loading test”: The main purpose of this chapter is to research the applicability of bond improved CFRP rod for strengthening of cantilever RC slab. To examine the fatigue durability, a moving-wheel load test for a cantilevered deck slab embedding the bond improved CFRP rods was conducted. The fatigue load was applied for approximately 1.16 million cycles with variable load intensities, such as 60 kN for 1 million cycles, 70 kN for 120,000 cycles, and 80 kN for 43,400 cycles. Based on Miner's linear damage rule, the ultimate fatigue life for the moving-wheel loading was approximately 3.56 million cycles for an initial load of 60 kN. The cantilever RC slab strengthened with bond improved CFRP rods achieved excellent fatigue durability when subjected to successive wheel loadings.

Chapter 7,” Summary”: The conclusions of this thesis were briefly summarized and future problems of the study were described at end of the paper.

第 1 章

序 論

1.1. 研究背景

1.1.1. 日本の社会インフラの現状

我が国における橋長 2m 以上の道路橋は約 73 万橋あるといわれ、その多くが 1960 年代から 1970 年代の高度経済成長期に建設されている（**図 1-1**）。従来コンクリート構造物の設計耐用年数は 50 年といわれており、現時点で建設から 50 年を経過した橋梁は 25%程度となっているが、10 年後には 50%を超えると思込まれる（**図 1-2**）。

2012 年に発生した笹子トンネル天井板崩落事故に伴い、2014 年より道路構造物の 5 年点検が義務化された。2019 年度に初回の 5 年間の点検が終了される予定であり、2018 年度までの 4 年間の点検結果が国土交通省 道路局より道路メンテナンス年報〔国土交通省道路局，2018〕として公表されている。同年報では予防保全的な措置を行う必要があると判定された区分Ⅱ以上に判定された橋梁は 60%程度であり，“早期に”もしくは“緊急に”措置を講ずる必要がある橋梁は全体の 10%程度にのぼる（**図 1-3**）。今後 1970 年代の高度経済成長期に建設された橋梁が、徐々に建設後 50 年を迎え橋梁の老朽化の進行につれその割合は増加するものと見込まれる。

一方、国土交通省の公共事業関係費の推移〔国土交通省，2019〕をみると 1998 年の 14.9 兆円をピークに徐々に減少しており、2018 年度は 7.6 兆円でピーク時の約 51%、2019 年度予算では補正費を含めても 6.9 兆円（対 1998 年度 46%）となった（**図 1-4**）。今後対策措置が必要な橋梁が増加すると見込まれ、少ない予算で多くの橋梁を維持管理するためには架け替えではなく、補修・補強による橋梁の延命化が重要と考えられる。

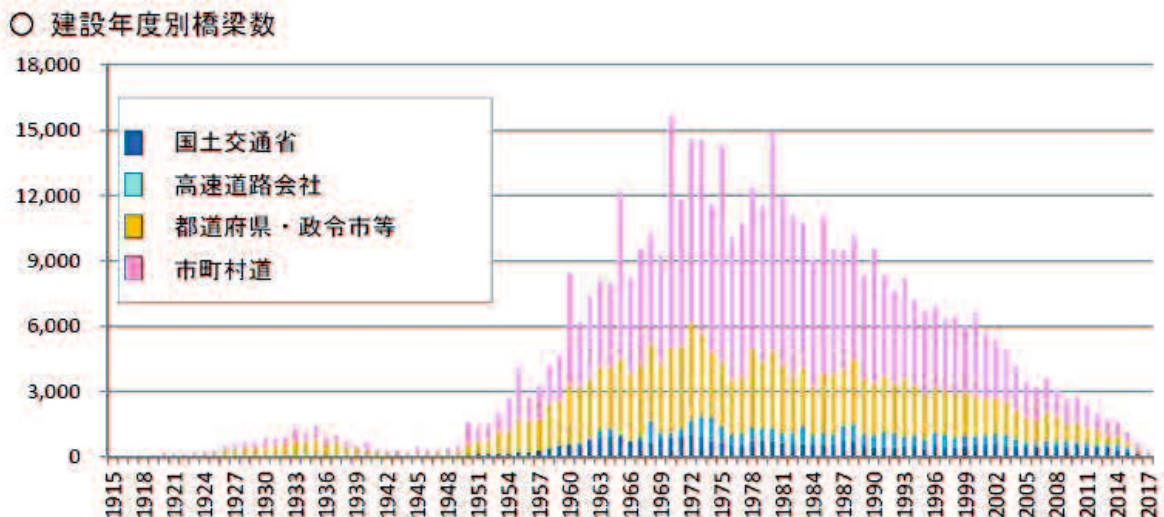
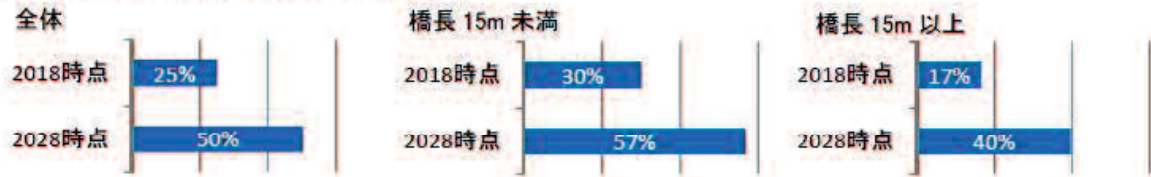


図 1-1 建設年度別橋梁数 [国土交通省道路局, 2018]

○ 建設後 50 年を経過した橋梁の割合



※この他、古い橋梁など記録が確認できない建設年度不明橋梁が約 23 万橋ある。

(出典)道路局調べ(H30.3 末時点)

図 1-2 建設後 50 年を経過した橋梁の割合 [国土交通省道路局, 2018]

○ 橋梁

	点検実施数 (H26~29 合計)	判定区分(H26~29 合計) 上段:実数、下段:割合			
		I	II	III	IV
国土交通省	30,541	18,182 60%	9,608 31%	2,747 9%	4 0.01%
高速道路会社	18,424	1,379 7%	15,175 82%	1,870 10%	0 0%
都道府県・政令市等	148,801	57,546 39%	74,183 50%	17,045 11%	27 0.02%
市町村	393,096	164,370 42%	192,258 49%	35,956 9%	512 0.1%
合計	590,862	241,477 41%	291,224 49%	57,618 10%	543 0.1%

図 1-3 道路構造物点検結果判定区分の割合 [国土交通省道路局, 2018]

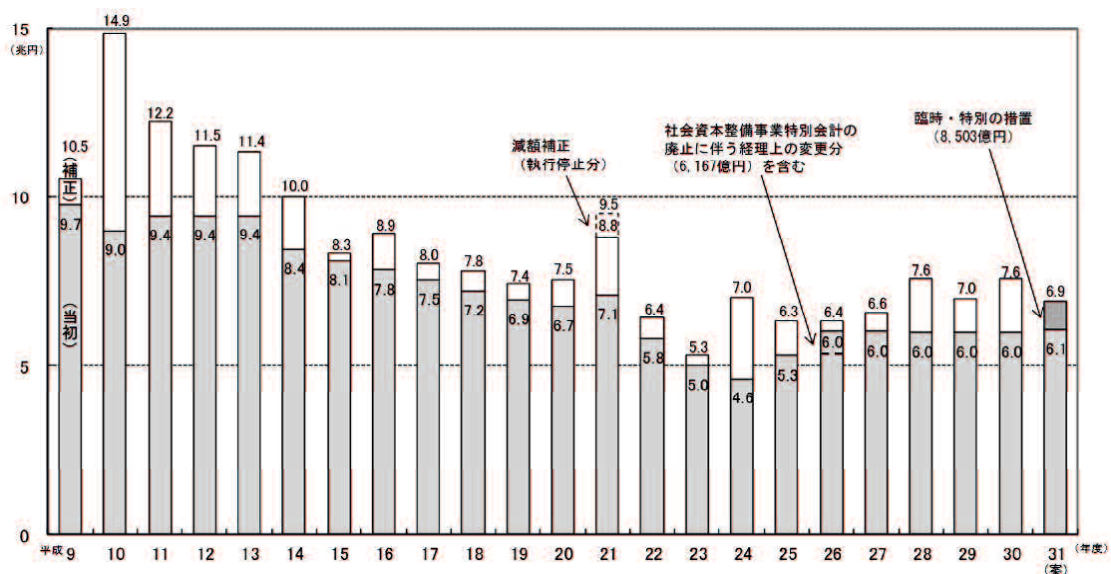


図 1-4 公共事業関係費の推移 [国土交通省, 2019]

1.1.2. 道路橋の損傷状況

2008年に国土技術政策総合研究所(国総研)より報告された橋梁の架替に関する調査結果IV [国土交通省 国土技術総合政策研究所, 2008]によると上部構造の損傷による架替理由の内訳は、鋼橋、鉄筋コンクリート(RC)橋、プレストレストコンクリート(PC)橋ともに鋼材の腐食、コンクリート桁の亀裂・剥離(塩害による破損も含む)が大きな主要因となっており、全体の50%以上を占める。これらの要因は外部から供給される水分および塩分(飛来塩分や凍結防止剤)により鋼材の腐食(図1-6(a))やコンクリート中の鉄筋の発錆に伴うコンクリートひび割れや剥離(図1-6(b))と考えられる。

その次に多い損傷要因は床版の破損が挙げられ、RC床版を有する鋼橋やRC橋では全体の30%程度となっており、PC橋においても全体の10%程度を占める。近年は損傷した床版が増加していることから、維持補修を行う優先順位を決定する研究も実施されている(古市ら[2008])。床版損傷の要因は車両の大型化に伴う活荷重の増加と配力鉄筋量の不足による疲労損傷(図1-7(a))や床版上面からの水の侵入によるコンクリートの土砂化(図1-7(b))が挙げられる。特に1964年(昭和39年)の鋼道路橋設計示方書で設計されたRC床版は配力鉄筋の鉄筋量も少なく、床版厚も薄いため床版の劣化が進行しやすい。疲労損傷によりひび割れが進行し、さらに床版上面からの水の侵入した場合、床版の陥没(図1-7(c))も報告されておりコンクリート床版の維持補修が急務である。

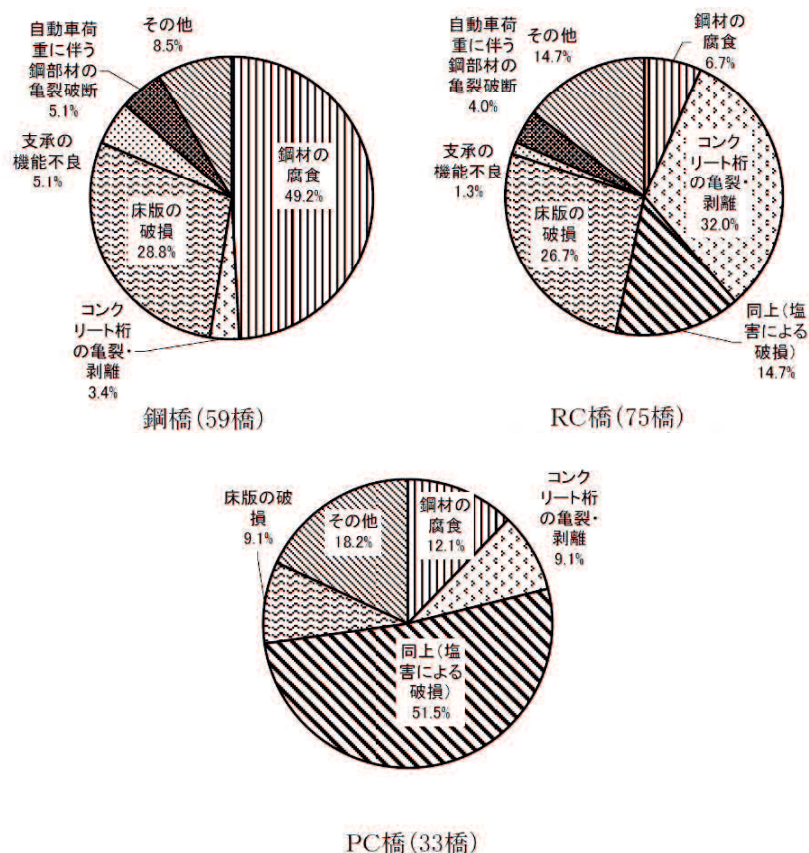


図 1-5 上部構造の損傷による架替理由の内訳 [国土交通省国土総合政策研究所, 2008]



(a)桁端部滞水に伴う鋼桁桁端部損傷例



(b)塩害環境下でのコンクリート桁損傷例



(c)シース内水の侵入にともなる PC 桁損傷例

図 1-6 主桁損傷事例 [国土交通省国土総合政策研究所, 2008]



(a)疲労損傷による床版下面損傷例 (ひび割れ)



(b)水の侵入に伴う床版上面損傷例 (土砂化)



(c)疲労損傷の進行に伴う床版の陥没

図 1-7 床版損傷例 [国土交通省国土総合政策研究所, 2008]

1.2. 道路橋床版の補修・補強

1.2.1. 補修・補強工法の現状

道路橋の床版は直接輪荷重が直接作用するため、劣化・損傷を受けやすい部材である。前述の通り、劣化の進行した RC 床版は抜け落ちの事例もあり、床版の補修・補強は急務である。これまで RC 床版の補強に関し多くの研究が実施され、様々の補強工法が開発されてきた。

既設の RC 床版の補修・補強工法を体系立てて整理したものを図 1-8 に示す。床版の損傷メカニズムや損傷程度により補修工法と補強工法に大別でき、比較的損傷程度が低い場合は補修対策が実施される場合が多い。床版の補強工法ではその特徴から床版下面から補強を行う工法と上面から補強を行う工法とに分類することができる。床版下面から補強を行う工法は不足する鉄筋量を新たに配置する補強材で補う工法と、床版の支間を短くし、作用する断面力（曲げモーメント）を低減させる工法がある。各補強工法の概要を以下に述べる。

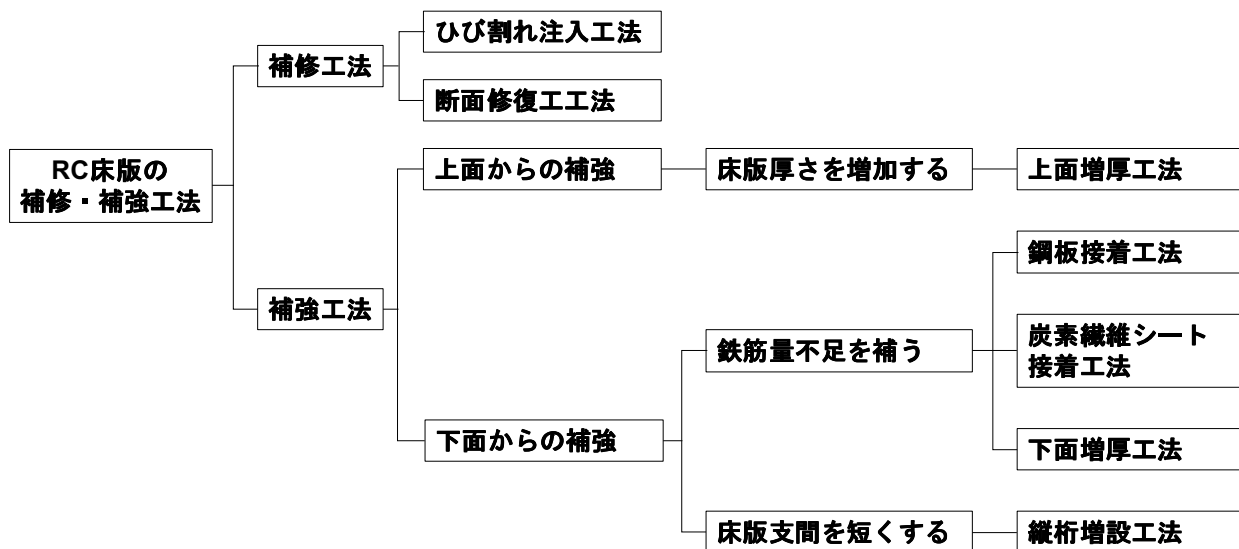


図 1-8 既設 RC 床版の補修・補強工法 [国土交通省国土技術総合政策研究所, 2002]

(1) 上面増厚工法

床版コンクリート上面を 10 程度切削し、ショットブラスト等で切削面の脆弱部を取り除いた後、鋼繊維コンクリートを 70mm から 100mm 程度打ち増す工法である。増厚することで床版の剛性が高まり、曲げおよびせん断耐力を向上させることができる。コンクリートを打ち増すため、死荷重の増加や路面高の変更等に対し配慮が必要である。近年では、低弾性のポリエステルポリマーコンクリート（PCC）を用いて上面増厚と舗装コンクリートを兼用させる研究 [文屋ら, 2016 ; 阿部ら, 2019] や高強度緻密モルタルを用いて薄層で上面増厚する研究 [大垣ら, 2018] も実施されている。

(2) 鋼板接着工法

床版下面の下地処理を行った後、4.5mm 厚程度の鋼板をアンカーボルトで床版下面側に固定し、鋼板とコンクリートの隙間にエポキシ樹脂を注入し一体化させる工法である。床版下面に剛性の高い鋼板を接着させることで床版の曲げ剛性を向上させることができる。鋼板の自重分の死荷重が増加する点と、設置後鋼板の腐食を防ぐために定期的に塗装等を行う必要がある。

(3) 炭素繊維シート接着工法

床版下面の下地処理を行った後、軽量の炭素繊維シートをエポキシ樹脂で接着し一体化を図る工法である。剛性の高い炭素繊維を貼り付けた場合、床版内部の鉄筋の応力緩和に効果的である。軽量で錆びない炭素繊維を使用するため死荷重の増加がなく耐腐食性に優れる。接着剤にエポキシ樹脂を使用するため、施工時に温湿度管理が必要となる。

(4) 下面増厚工法

床版下面の下地処理を行った後、床版下面に鉄筋等の補強鋼材をアンカー等で取り付け、モルタルを 30mm 程度増厚する工法である。増厚モルタルが 30mm 程度と薄いため、配置する補強材に防錆処理を行う必要があり、増厚分のモルタル自重が増加するため設計時の配慮も必要である。

(5) 縦桁増設工法

既設床版の支持桁間に 1～2 本の縦桁を増設して、床版支間を短くする工法である。床版支間が短くなるため輪荷重によるたわみ抑制効果があり、床版の劣化損傷を遅らせる効果がある。増設縦桁分の死荷重が増加するため設計時の配慮が必要となる。

1.2.2. Near Surface Mounted (NSM) 工法

Near Surface Mounted (NSM) 工法の概要図および実施工時の写真を図 1-9, 図 1-10 に示す。NSM 工法は補強材配置面を 10~30mm 程度切削し, 耐腐食性に優れる FRP 補強材をかぶりコンクリート内に配置し補強する工法である。補強材をかぶりコンクリート内に収めるため, 床版上面の施工の場合も路面高の変更や死荷重の増加がないといった特徴がある。補強材を配置する部分の切削は筋状に切削する場合 (図 1-9 (a)) と床版上面のようにある程度の範囲を切削する場合 (図 1-9 (b)) の 2 種類がある。FRP 補強材と既設コンクリートとの一体化はエポキシ樹脂による接着が主流であるため, 床版上面施工の場合は樹脂の硬化で 1 週間程度の養生が必要であり, 早期交通開放ができないといった課題がある。

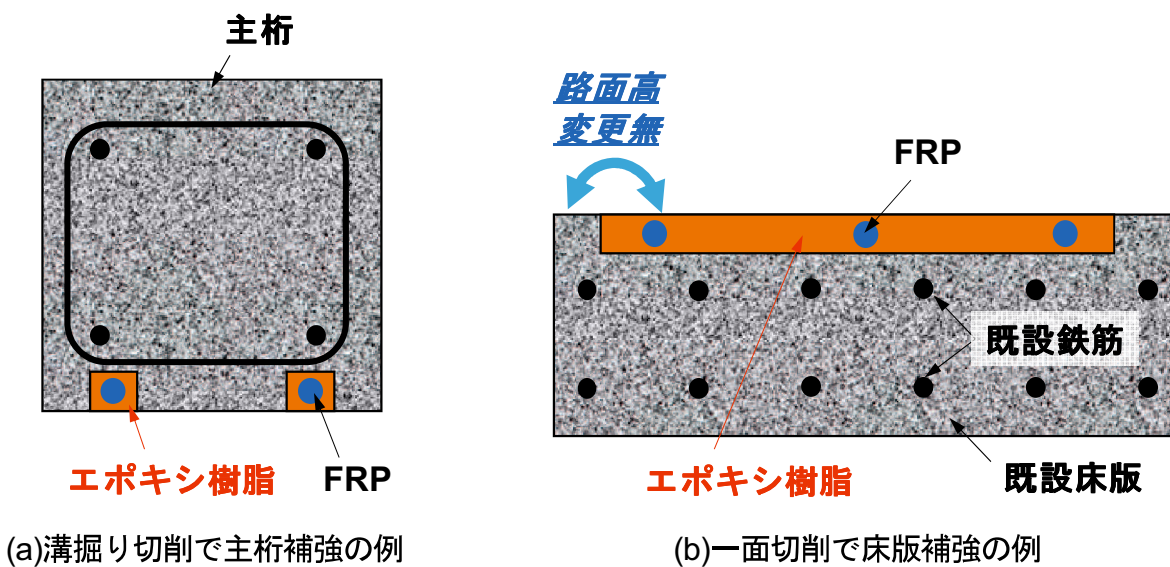


図 1-9 NSM 工法概要図



図 1-10 CFRP ロッドにて NSM 補強を行った施工例

1.2.3. NSM 工法に使用される連続繊維補強材

土木学会発刊のコンクリートライブラリー88「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」の定義では、連続繊維補強材とは連続繊維にエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂などの繊維結合材を含浸させ、硬化させて成形し、コンクリートを補強する目的で使用する一方向強化材や連続繊維のみを束ねたもの、または織ったものの総称と定義されている〔土木学会、2000〕。同ライブラリー内では連続繊維とは炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維と定義されているが、近年の研究ではバサルト繊維も構造物の補強材料として研究が進められており（土屋ら〔2002〕）、以下にバサルト繊維も含めた各連続繊維の特徴を記す。

(1) 炭素繊維

ISO では「有機繊維を焼成して得られる炭素含有量が 90%以上の繊維」を炭素繊維として定義している。炭素繊維の特徴としては「軽量」で「高強度」といった特徴がある。比重は 1.8 前後で鋼材の 1/4 程度の重量であり、引張強度は 4000MPa 以上の繊維も製造可能で、鋼材の 10 倍以上の強度がある。炭素繊維は原料となる有機繊維の種類や製造方法によって PAN 系炭素繊維とピッチ系炭素繊維の 2 種類に大別され、それぞれ違った特性を持つ。以下にそれぞれの繊維の特徴を記す。

<PAN 系炭素繊維>

PAN 系炭素繊維は、PAN（ポリアクリロニトリル）を原料とする炭素繊維である。アクリロニトリルを重合、紡糸を行い、PAN 繊維にした後、200℃から 3000℃の範囲で耐炎化、炭化、黒鉛化を行うことで炭素繊維となる。PAN 系炭素繊維の力学特性はヤング係数が鋼材と同程度から 2 倍程度であるが、強度が 3500Mpa 以上と高く鋼材の 10 倍以上の引張強度の繊維も製造可能である。高強度の特性を活かして橋脚の耐震補強や桁のせん断補強に使用されることが多い。

<ピッチ系炭素繊維>

ピッチ系炭素繊維は石油ピッチや石炭タールを原料とした炭素繊維である。原料の熔融紡糸を行い、150℃から 3000℃の範囲で不融化、炭化、黒鉛化を行うことで炭素繊維となる。ピッチ系炭素繊維の力学特性は PAN 系炭素繊維と比べ引張強度が小さく、ヤング係数が 650GPa 程度と鋼材の 3 倍以上の繊維も製造可能である。ピッチ系炭素繊維はヤング係数が高いため、部材の変形を効率的に抑えることができ、上部工の曲げ補強に使用されることが多い。

(2) アラミド繊維

アラミド繊維は分子内にアミド結合をもつ芳香族ポリアミドを使った高分子繊維である。アラミド繊維には強度の高いパラ系アラミド繊維と耐熱性に優れるメタ系アラミド繊維がある。構造物の補修・補強用途においては強度が高く耐衝撃性に優れるパラ系アラミド繊維が主に使用される。ヤング係数は 120GPa 程度で PAN 系炭素繊維の半分程度であり、引張強度が 2000MPa

程度で鋼材の7倍程度で伸び能力が高いため、橋脚のじん性補強に使用されることが多い。

(3) ガラス繊維

ガラス繊維は原料となるけい砂や石灰石を高温で溶融し高速で紡糸ノズルから引き出すことで製造される。ガラス繊維にはその組成からいくつか種類があるが、土木建築用途に使用される場合は比較的強度が高く、安価であることからEガラスが使用されることが多い。引張強度はアラミド繊維と同程度であるが、ヤング係数はアラミド繊維の60%程度で75GPa程度である。海外では経済性の点から補強材料として使用される場合もあるが、日本国内では主に剥落対策等の補修用途に使用される場合が多い。

(4) バサルト繊維

バサルト繊維は火山岩の一種である玄武岩を原料としており、玄武岩を1500°C程度で融解させ紡糸することで製造する。ガラス繊維と比べると若干高価となるが、耐熱性や耐薬品性に優れるといった特徴がある。繊維の力学特性はヤング係数がガラス繊維と同程度で、引張強度が2000MPaから3000MPaで製造元によりばらつきがある。近年土木建築用途への使用に向けて研究が進められているが、日本国内では実構造物への適用はほとんどない。

以上がNSM工法に使用される連続繊維補強材であり、各材料の力学特性を引張強度、ヤング係数の観点でマッピングした図を図1-11に示す。

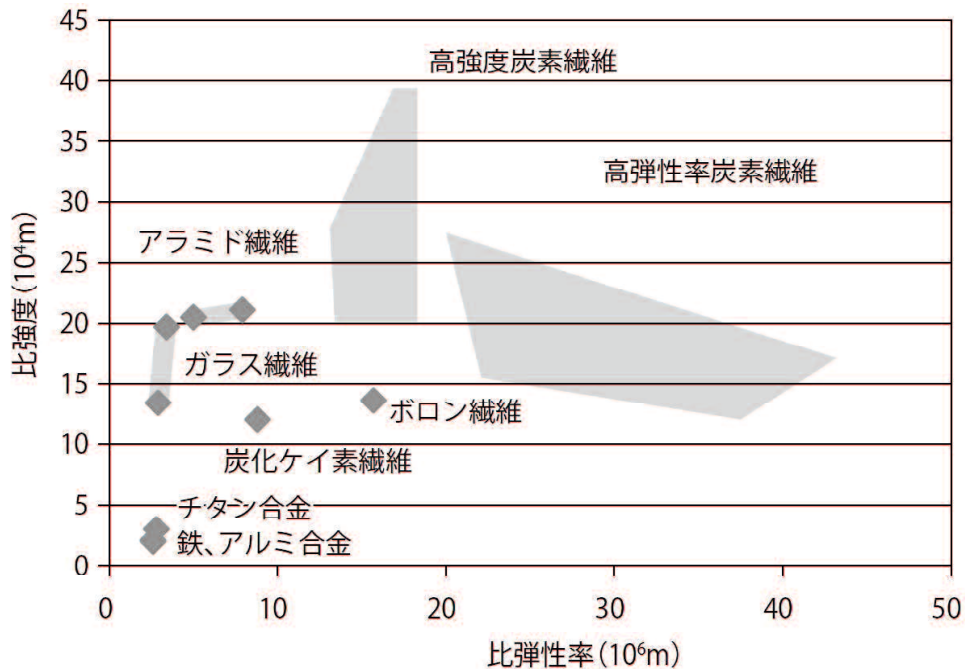


図1-11 連続繊維補強材の力学特性 [平松, 2015]

1.3. 本研究の目的

床版補強に関しては様々な工法が開発され、現在も数多くの橋梁の維持補修が行われている。負曲げの作用する張出し床版では地覆の改修や遮音壁の設置等で床版上面側の補強が必要となる場合がある。また、車両の大型化に伴い設計荷重が引き上げられたことで、高速道路や歩道のない橋梁で張出し床版先端に輪荷重が作用した場合には、許容応力度以上の鉄筋応力度が発生するケースがある。通常、床版上面補強の場合、鉄筋を配置し 100mm 程度のコンクリートを打ち増す上面増厚工法が主流であるが、路面高の変更や死荷重の増加といった課題が残る。近年、腐食しない Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) 補強材を床版表層のかぶりコンクリート内に配置する NSM 工法に関する研究が進められているが、既存コンクリートとの一体化にエポキシ樹脂を使用するため、樹脂の硬化に 1 週間程度の養生が必要で早期交通開放ができないといった課題がある。

本研究では耐腐食性に優れる CFRP ロッドを超早強ポリマーセメントモルタル (Polymer Cement Mortar: PCM) 内に埋設することでこれらの課題をクリアさせることとした (図 1-12)。しかしながら炭素繊維系にエポキシ樹脂を塗布し、引抜きながら金型内を通す「引抜成形法」で製造された CFRP ロッドは表面の凹凸がなく、超早強 PCM との付着性能が低いといった課題が残る。そこで、CFRP ロッドに Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) リブを装着させ付着性能を改善した。本研究では GFRP リブ形状を様々に変化させ、引抜き試験および RC はりの曲げ載荷試験により最適なリブ形状を調べるとともに、輪荷重走行試験にて張出し RC 床版の補強に使用した場合の疲労耐久性能を実験的に調べた。

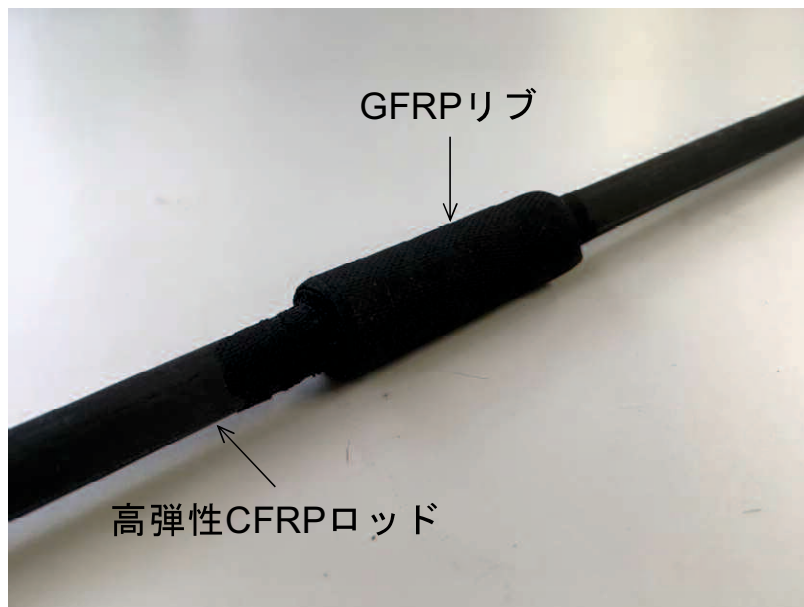


図 1-12 GFRP リブ装着により付着性能を改善した CFRP ロッド

1.4. GFRP リブを装着した CFRP ロッドに求められる性能

本研究では GFRP リブによる付着性能向上効果を調べるため、①引抜き耐力試験および②RC はりの曲げ載荷試験を実施し、張出し RC 床版の補強に使用した場合の疲労耐久性能を調べるため、③輪荷重走行試験を実施した。①②③それぞれの試験の目的をまとめると以下の通りとなる。

① 引抜き耐力試験	: GFRP リブ 1 ヶ所当たりの付着耐力の調査
② RC はり曲げ載荷試験	: RC はり内に埋設補強した場合の曲げ性能調査
③ 輪荷重走行試験	: 張出し RC 床版の補強に使用した場合の安全性調査

平成 29 年の道路橋示方書の規定では床版の設計は耐荷性能の照査と耐久性能の照査に分けて実施される（日本道路協会 道路橋示方書・同解説 I～V [2017]）。耐荷性能の照査では鉄筋の降伏耐力もしくは曲げ圧縮破壊耐力に部分係数を乗じて安全側に設計され、耐久性能の照査では供用荷重時に発生する鉄筋応力度を 140MPa (20MPa 程度の余裕を持たせることが理想) に制限することで部材の安全性を担保している。

本研究で使用する CFRP ロッドの引張強度は 950MPa 以上あり、鉄筋の降伏強度の 3 倍程度の強度を有している。道路橋床版に使用する場合は鉄筋降伏以上の応力が作用しないように設計されるため、GFRP リブを装着する CFRP ロッドに求められる付着耐力は最低でも鉄筋の降伏耐力以上が必要であり、部材の安全性を考慮すると CFRP の破断耐力以上とすることが理想的である。また、CFRP ロッドに間隔をあけて GFRP リブを装着するため、RC 部材の補強に使用した場合にリブ部に有害なひび割れが発生しないことが求められる。

そこで本研究で検討を行う付着性能を改善した CFRP ロッドに求められる性能は、付着耐力とひび割れ分散性の観点から以下の 2 項目とした。

○鉄筋の付着耐力および降伏耐力以上の耐力を有する (CFRP ロッドの破断耐力以上の付着耐力を有することが理想的)
○GFRP リブを装着することでリブ部に有害なひび割れが発生しないこと

1.5. 本論文の構成

本論文の構成を図 1-13 に示す。まず第 1 章において研究背景と研究目的に関して概説し、第 2 章で道路橋床版の設計方法の変遷と、国内外で行われている既往の研究を取りまとめた。

第 3 章から第 6 章にて本研究で実施した実験結果をとりまとめている。まず、第 3 章から第 5 章で CFRP ロッドの付着性能改善方法に関する検討を行い、第 6 章で負曲げの作用する張出し RC 床版に適用した場合の構造性能および疲労耐久性能に関して実験的に調べた。

第 3 章では有効な付着性能の改善方法を調べるため、GFRP リブ装着以外の方法を含む様々な方法で CFRP ロッドの加工を行い付着耐力と RC はりの曲げ性能を調べた。GFRP リブ装着による改良は、第 3 章で実施した付着改善策の中でも比較的有効であったものの、リブ厚が厚い場合はリブ装着部で CFRP ロッドが早期に破断する結果となり、ロッドの付着性能を低下させない程度まで GFRP リブを小さくする必要があることが分かった。最適な GFRP リブ形状を調べるため、第 4 章ではリブ厚とリブ長を様々に変化させた場合のリブ 1 ヶ所あたりの付着耐力を調べ、第 5 章では RC はり内に埋設補強した場合の曲げ性能を調べた。第 6 章では第 4 章、第 5 章で最も付着性能改善効果の高かったリブ形状で加工した CFRP ロッドで補強した RC 張出し床版を製作し、輪荷重走行試験で実橋に使用した場合の挙動を調べた。

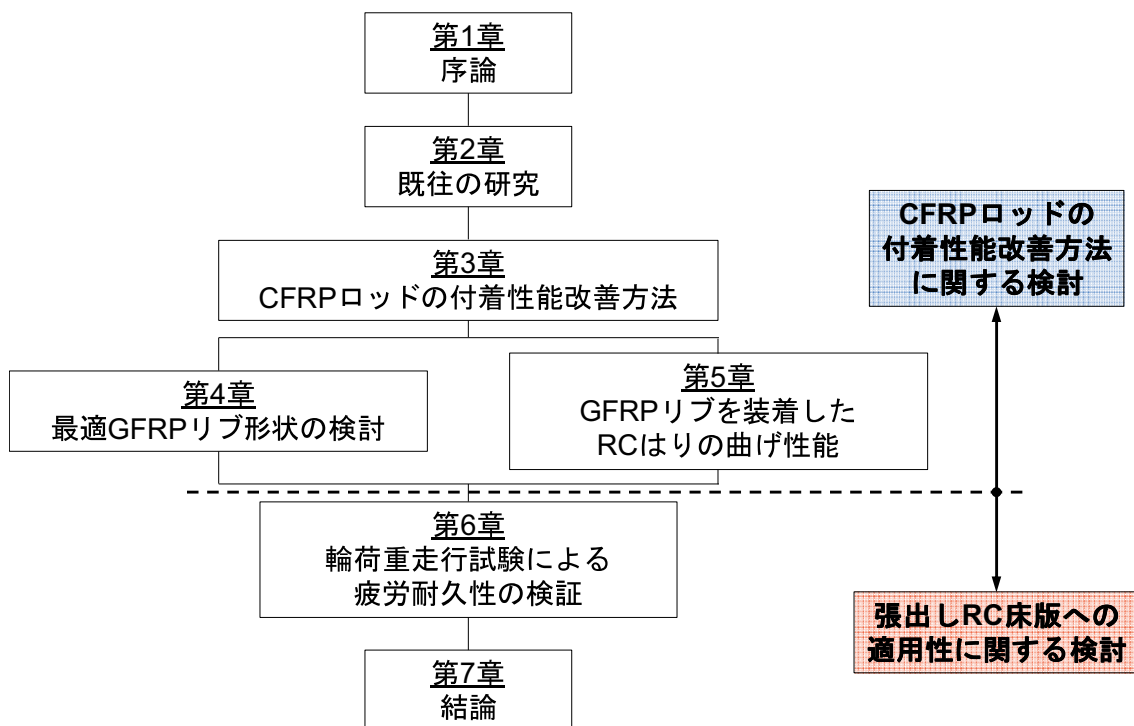


図 1-13 本論文の構成

第2章

既往の研究

2.1. 道路橋床版の設計法

日本で最初に策定された道路橋設計指針は1926年（大正15年）の「道路構造に関する細則案（内務省土木局）」にさかのぼり、当時の床版設計荷重は橋の等級により2.25tf（22kN）から4.5tf（44kN）で設計された。1939年以後、鋼道路橋設計示方書と名称を変え、1956年には1等橋の床版の設計荷重は8.0tf（78kN）に引き上げられ、平成6年度道路橋示方書以降は100kNで設計されるようになった。また、床版厚および配力鉄筋の鉄筋量も制限が設けられるようになり、1958年（昭和31年）の鋼道路橋設計示方書で最少床版厚は $t=140\text{mm}$ 、配力筋方向の鉄筋量は主筋鉄筋の25%と規定された。しかしながら、早期の床版劣化がみられたことから配力筋方向の鉄筋量は主鉄筋の70%と規定された。しかしながら、早期の床版劣化がみられたことから配力筋方向の鉄筋量は主鉄筋の70%、最少床版厚も160mmに引き上げられた。現在の道路橋示方書では、前田ら[1976]の研究をもとに主筋方向、配力鉄筋方向ともに床版支間に応じた断面力を算出し（表2-2）、鉄筋応力度を140MPa（20MPa程度の余裕を持たせることが理想）に抑えるように配置鉄筋を決定している。

表2-1 RC床版設計基準の変遷

基準		後輪軸重(tf)	活荷重曲げモーメント(tf・m)※1		配力鉄筋量	許容応力度(kgf/cm ²)		最小版厚(cm)		
			主鉄筋	配力鉄筋		鉄筋	コンクリート			
1926(大15)	道路構造に関する細則案(内務省)	P=4.5(T-12) ~ P=2.25(T-6)	-	-	-	1200	45	-		
1939(昭14)	鋼道路橋設計示方書(案)(内務省)	P=5.2(T-13). P=3.6(T-9)	-	-	-	1300	$\sigma_{28}/3$ ≤ 65	-		
1956(昭31)	鋼道路橋設計示方書(日本道路協会)	P=8.0(T-20). P=5.6(T-14)	$(1+i) \times (0.4 \times P \times (L-1)/(L+0.4))$ ただし、 $2.0 < L \leq 4.0$	-	主鉄筋の25%以上	1300	$\sigma_{28}/3$ ≤ 70	14 (有効版厚11)		
1964(昭39)	鋼道路橋設計示方書(日本道路協会)					1400	$\sigma_{28}/3$ ≤ 80			
1967(昭42)	鋼道路橋一方鉄筋コンクリート床版の配力鉄筋設計要領(建設省)				主鉄筋の70%以上		-			
1968(昭43)	鋼道路橋の床版設計に関する暫定基準(案)(日本道路協会)									
1971(昭46)	鉄筋コンクリート床版の設計について(建設省)				$0.8 \times (0.12 \times L + 0.07) \times P$	$0.8 \times (0.10 \times L + 0.04) \times P$	左記に対する照査により決定		-	$\sigma_{28}/3$ ≤ 100
1973(昭48)	道路橋示方書(日本道路協会)	大型車交通量1000台/日・方向以上で20%増し	$0.8 \times (0.10 \times L + 0.04) \times P$	1400(余裕200)	3L+11 \geq 16(大型車交通量、不等沈下考慮)					
1978(昭53)	道路橋鉄筋コンクリート床版の設計、施工について(建設省)			1400	3L+11 \geq 16					
1980(昭55)	道路橋示方書(日本道路協会)			1400	3L+11 \geq 16					
1990(平2)	道路橋示方書(日本道路協会)	P=10.0(T荷重片側)	付加曲げモーメントを割増し	付加曲げモーメントを生じる場合は別途	-	-	-	3L+11 \geq 16(大型車交通量、不等沈下考慮)		
1994(平6)	道路橋示方書(日本道路協会)								2.5 < L ≤ 4.0で、1.0 + (L - 2.5)/12を割増し	1400(余裕200)
1996(平8)	道路橋示方書(日本道路協会)								2.5 < L ≤ 4.0で、1.0 + (L - 2.5)/12を割増し	1400(余裕200)

※1: 連続版で主鉄筋が車両進行方向に直角の場合

表 2-2 平成 29 年度道路橋示方書床版モーメント算出式

床版の区分	曲げモーメントの種類	床版構造	車両進行方向に直角		床版構造	車両進行方向に並行			
			主鉄筋方向曲げモーメント	配力鉄筋方向曲げモーメント		主鉄筋方向曲げモーメント	配力鉄筋方向曲げモーメント		
単純版	支間曲げモーメント	RC (PC, 合成)	$0 < L \leq 4$ ($0 < L \leq 8$)	$+(0.12L + 0.07)P$	$+(0.10L + 0.04)P$	RC (PC)	$0 < L \leq 4$ ($0 < L \leq 6$)	$+(0.22L + 0.08)P$	$+(0.06L + 0.06)P$
連続版	中間支間曲げモーメント	RC (PC, 合成)	$0 < L \leq 4$ ($0 < L \leq 8$)	$+($ 単純版の80%)	$+($ 単純版の80%)	RC (PC)	$0 < L \leq 4$ ($0 < L \leq 6$)	$+($ 単純版の80%)	$+($ 単純版と同じ)
	端支間曲げモーメント							$+($ 単純版の90%)	$+($ 単純版と同じ)
	中間支点曲げモーメント	RC PC 合成	$0 < L \leq 4$	$-($ 単純版の80%)	---	RC (PC)	$0 < L \leq 4$ ($0 < L \leq 6$)	$-($ 単純版の80%)	---
片持版	支点曲げモーメント	RC PC 合成	$0 < L \leq 1.5$	$\frac{-P \cdot L}{(1.30L + 0.25)}$	---	RC (PC)	$0 < L \leq 1.5$ ($0 < L \leq 3.0$)	$-(0.70L + 0.22)P$	---
		PC 合成	$1.5 < L \leq 3.0$	$-(0.60L - 0.22)P$					
	先端付近曲げモーメント	RC (PC, 合成)	$0 < L \leq 1.5$ ($0 < L \leq 3.0$)	---	$+(0.15L + 0.13)P$	RC (PC)	$0 < L \leq 1.5$ ($0 < L \leq 3.0$)	---	$+(0.16L + 0.07)P$

ここに

RC : 鉄筋コンクリート床版およびPC合成床版

PC : プレストレスとコンクリート床版

合成 : 鋼コンクリート合成床版

L : T荷重に対する床版の支間 (m)

P : T荷重の片側荷重 (100kN)

2.2. 道路橋床版の疲労耐久性に関する研究

RC 床版の劣化損傷の主要因は車両の過積載車を含む大型化した車両の繰り返し走行による疲労劣化であり、コンクリートの押抜きせん断耐力により床版の疲労耐力が決定すると考えられている。前田ら [1984] の研究では圧縮領域のせん断耐力と引張鉄筋のダウエル作用の相乗効果で押抜きせん断耐力を評価しており、長屋ら [2008] の研究では押抜きせん断耐力には圧縮領域のコンクリートのアーチ機構が関係していることが報告されている。また、角田ら [1982] の研究では一方向 RC スラブの支間中央の定点の繰り返し載荷試験により押抜きせん断耐力が大きく低下し、静的載荷試験の 55%程度となることが報告されている。

床版の疲労耐久性能はひび割れの発生状況が大きく影響することから、実橋のひび割れ状況を再現するため様々な載荷方法が検討されてきた。岡田ら [1982] の報告では定点の繰り返し載荷では放射線状のひび割れパターンであったものに対し、一定の繰り返し回数ごとに載荷位置を移動させる多点移動載荷疲労試験で実床版のひび割れ正常に近い亀甲状のひび割れを再現することが可能となった (図 2-1)。その後、鉛直方向の交番せん断力やねじりモーメントの影響を再現するため、前田ら [1984] により輪荷重走行試験方法 (図 2-2) が提案された。輪荷重走行による疲労試験方法が確立されたことにより、実際の交通荷重に近い状態で亀甲状のひび割れパターンを再現することが可能となり、輪荷重走行試験により床版の疲労寿命予測に対する研究が数多く実施されるようになった。松井ら [2007] の研究では式 2-1 により異形鉄筋を用いた RC 床版の疲労寿命評価方法が提案され、赤代ら [2011] の研究では丸鋼を用いた RC 床版の疲労寿命評価方法として式 2-2 が提案された。これらの研究はすべて正曲げモーメントが作用する中間床版を対象とした疲労耐久性能評価方法となっているが、街道ら [2008] の研究では負曲げモーメントが作用する張出床版の疲労耐久性能においても同式が適用可能であることが報告されている。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \cdot \log N + \log C \quad \text{式 2-1}$$

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.09121 \cdot \log N + \log C \quad \text{式 2-2}$$

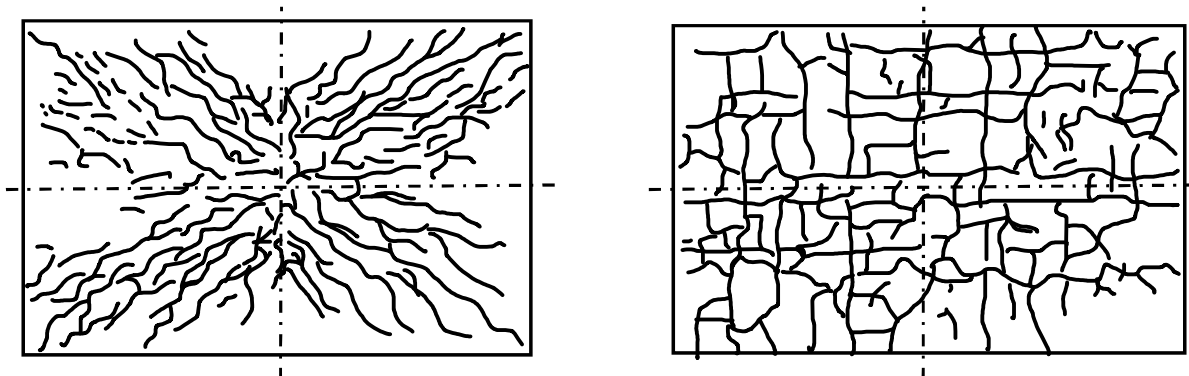
ここに

P : 載荷荷重

P_{sx} : 押抜きせん断耐力

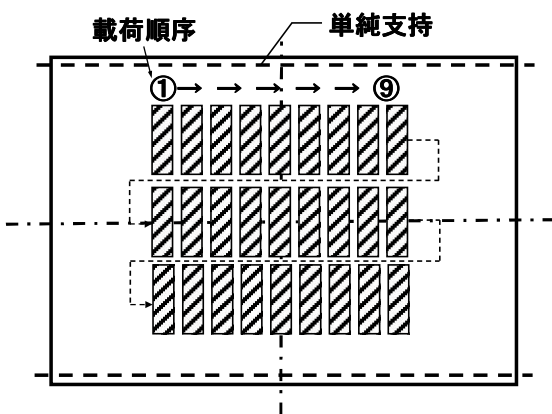
N : 押抜きせん断破壊載荷回数

C : 係数 (湿潤状態=1.23 乾燥状態=1.52)

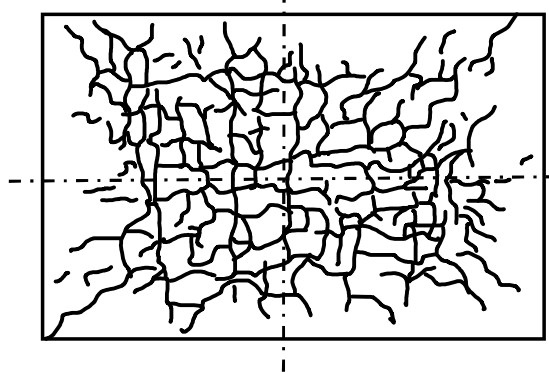


(a) 定点载荷での放射状ひび割れパターン

(b) 実橋の格子状ひび割れパターン



(c) 多点移動载荷疲労試験



(d) 多点移動载荷疲労試験のひび割れパターン

図 2-1 载荷方法によるひび割れパターンの相違 [松井ら, 2007]

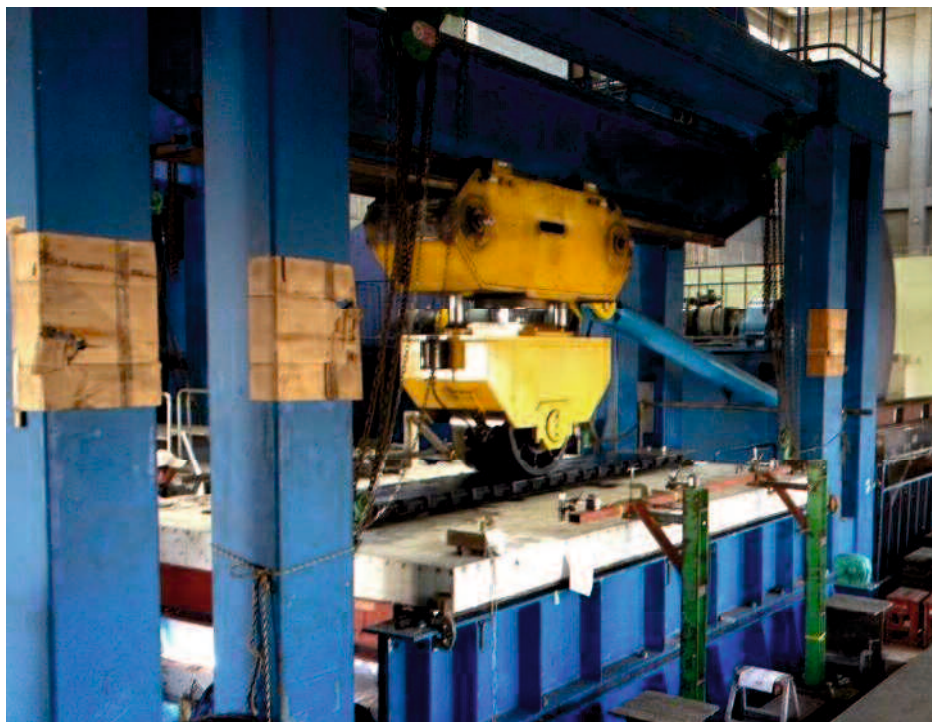


図 2-2 輪荷重走行試験機

2.3. 連続繊維補強材による床版補強に関する研究

炭素繊維シートやアラミド繊維シートによる構造物補強工法は、1995年の阪神淡路大震災がきっかけとなり様々な研究がおこなわれてきた。

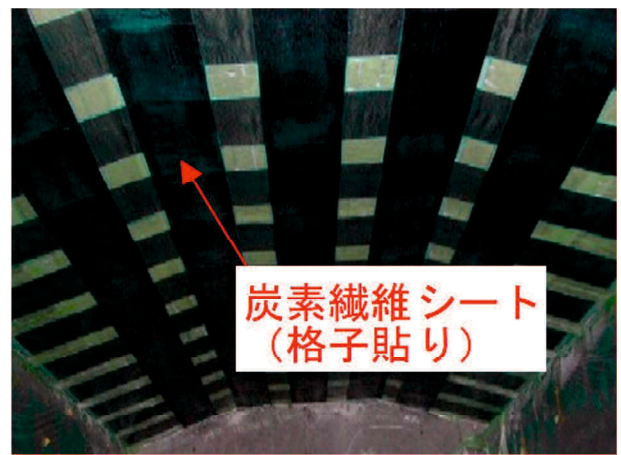
土木研究所 [1999] で実施した研究では様々な補強量の炭素繊維シートを床版下面に貼り付け輪荷重走行試験を実施し、繊維目付量 300g/m^2 の高強度型炭素繊維シートを主筋方向、配力筋方向ともに 2 層ずつ床版全面に貼り付けることで床版の疲労耐久性能を大きく向上させることができると報告されている。岡田ら [2003] の研究では炭素繊維シートを $100\text{mm}\sim 150\text{mm}$ 程度の間隔をあけて貼り付けた場合 (図 2-3) の疲労耐久性能向上効果を、小林ら [2005] の研究では中弾性炭素繊維シート用いた格子接着補強において岡田らの研究より補強量を落とした場合においても無補強試験体の 5 倍程度まで疲労耐久性能が向上することが報告されている。

近年は高弾性炭素繊維シートによる床版の疲労耐久性能向上効果に関する研究も実施されており、田中らの研究では RC はりの下面に高弾性炭素繊維シートを接着させ、静的載荷試験および疲労載荷試験 [田中ら, 2017] と RC 床版の下面に主筋方向のみ、配力筋方向のみ貼り付けた輪荷重走行試験 [田中ら, 2016] を実施している。RC はり下面に高弾性炭素繊維シートを貼り付けた曲げ試験 [田中ら, 2017] では、高弾性炭素繊維シートはヤング係数高いため、破断ひずみが高強度炭素繊維シートより小さく、はく離発生前にシートの破断が発生する可能性があることを報告おり、床版下面に高弾性炭素繊維シートを貼り付けた輪荷重走行試験 [田中ら, 2016] では、配力筋方向に繊維シートを貼り付けた場合であっても主筋方向の鉄筋応力緩和効果があることを報告している。

アラミド繊維シートによる床版補強においても様々な研究が実施されており、中島ら [2004] の研究や三上ら [2005] の研究により 2 方向に配向した 1 層のアラミド繊維シートを床版補強に使用した場合の疲労耐久性能を輪荷重走行試験により調べている。同研究により 2 方向に配向されたアラミド繊維シートを床版補強に使用した場合においても、炭素繊維シートを使用した場合と同様に疲労耐久性能が向上することが報告されている。その後、アラミド繊維シートの間隔をあけて格子補強した RC 床版の輪荷重走行試験も実施し、神田ら [2008] の研究では格子接着補強においても松井らの提案した床版疲労耐久性能評価方法 [2007] と同様の評価が可能であり、無補強試験体と比較し、10 倍以上の疲労耐久性能を有していることが報告されている。

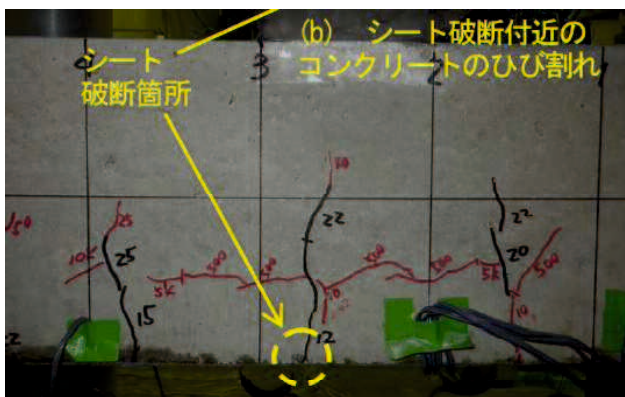


(a) 炭素繊維シート全面貼り補強

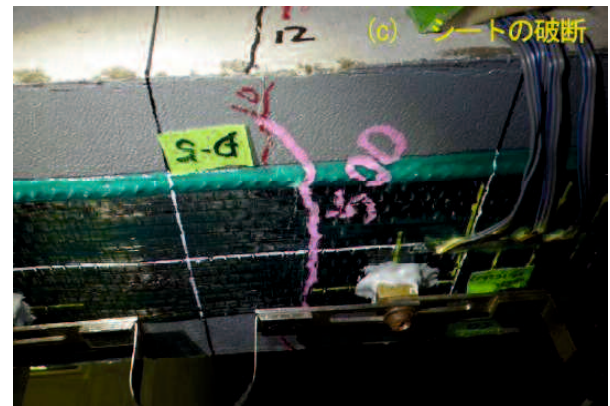


(b) 炭素繊維シート格子貼り補強

図 2-3 全面貼付補強と格子貼付補強の比較

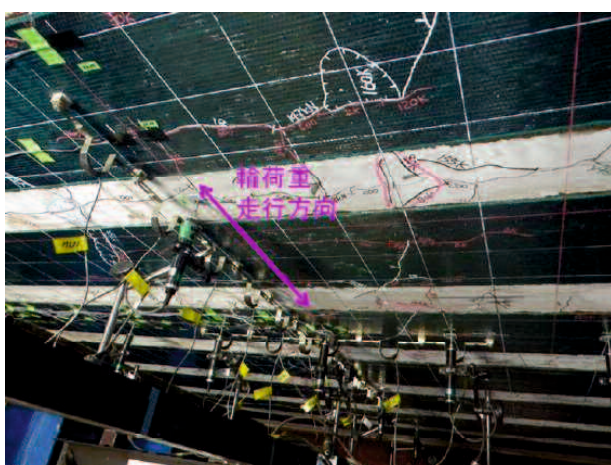


(a) 炭素繊維シート破断状況 (破断位置)



(b) 炭素繊維シート破断状況

図 2-4 RC はり載荷試験における高弾性炭素繊維シート破断状況 [田中ら, 2017]



(a) 主筋方向補強試験体



(b) 配力筋方向補強試験体

図 2-5 1方向のみ補強を行ったRC床版 [田中ら, 2016]

2.4. 炭素繊維成形品（プレート/ロッド）による床版補強に関する研究

2.4.1. 炭素繊維成形品の製造方法

炭素繊維は軽量で強度の高い材料であるが、繊維単体で補強の硬化を発揮することは難しく、ある程度の量の繊維を樹脂で一体化させた Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) 材料としてその機能を発揮する。繊維を Fiber Reinforced Polymer (FRP) 化する方法はいくつもあり、その用途や形状に応じて適切な加工方法を選定している。以下に各成形法の特徴を述べる。

(1) ハンドレイアップ成形法

大きな成形機械を必要とせず、初期投資も少ないことから、もっとも古くから実施されている成形法である。まず、成形したい形状の製品型を製作し、炭素繊維シートを型に配置し含浸樹脂をハケやローラーで塗布して常圧で成形を行う工法である。人力により成形する方法であるため、大量生産には不向きで多品種小数量の製造に適している。土木建築現場で実施されている炭素繊維シート接着工法も同工法の一つである。

(2) プレス成形法（図 2-6 (a)）

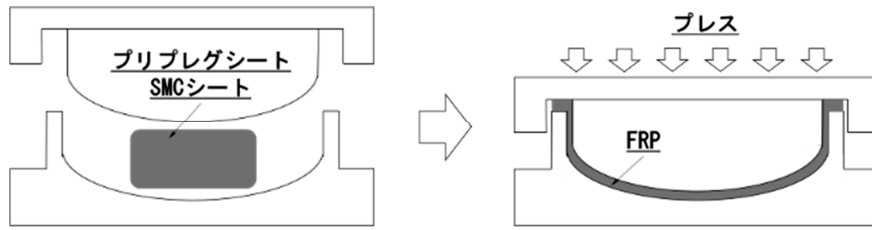
炭素繊維に樹脂を含浸させたプリプレグシートを金型に積み重ね、プレス機により加熱、加圧して成形を行う工法である。プレス機、金型の準備に大きな投資が必要であるが、同形状の製品を多数製造する場合に適している。短冊状に切り刻んだ炭素繊維をランダムに配向させた SMC (Sheet Molding Compound) シートを使用すると疑似等方性の FRP の製造も可能である。

(3) フィラメントワインディング (Filament Winding) 成形法（図 2-6 (b)）

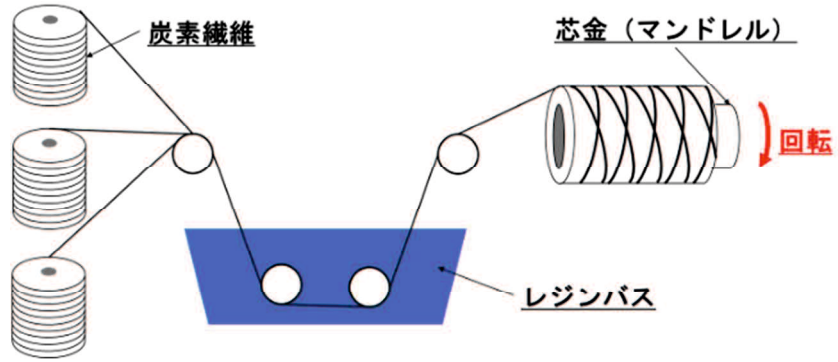
樹脂を含浸させた炭素繊維糸を芯金（マンドレル）に巻き付けながら成形する方法で、筒状の FRP を成形するのに適した方法である。プラントの配管用パイプや釣り竿の成形に利用されている。本成形法はパイプ軸と直角方向の繊維量が多くなることから、近年では水素ガス等を貯蔵する圧力タンクの製造にも使用されている。

(4) 引抜成形法（図 2-6 (c)）

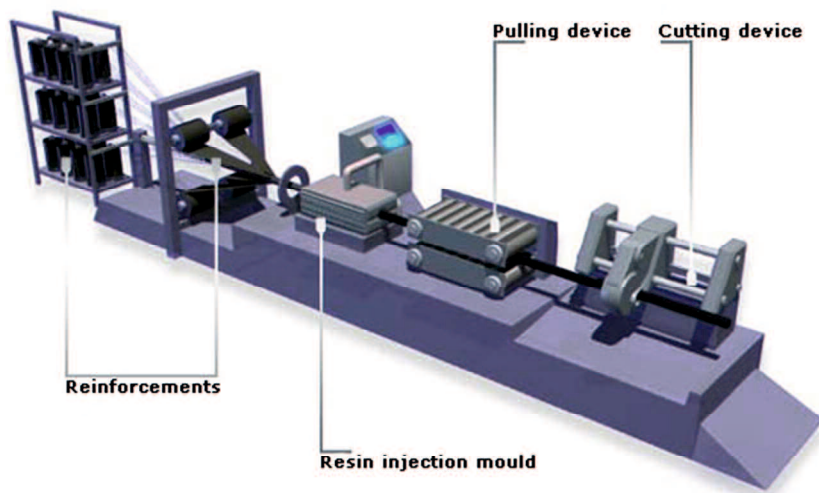
引抜成形法は樹脂を含浸させた炭素繊維の束を金型の中を通して板状、棒状に加工する方法である。直線的に引っ張りながら成形する方法であるため、同形状の FRP を長尺品の製造に適している。また、製品引抜方向の繊維量が支配的となるため、長手方向の強度や弾性率を向上させたい場合に適した製造方法である。



(a) プレス成形法



(b) フィラメントワインディング成形法



(c) 引抜成形法

図 2-6 CFRP 成形方法

2.4.2. 炭素繊維成形品を使用した床版補強

2.3 項にてシート状に加工した炭素繊維やアラミド繊維を用いた床版補強に関する既往の研究を述べた。シートを用いた補強工法は現場での樹脂含浸作業が必要であり、現場での作業を極力省力化させるためプレート (図 2-7 (a)) や棒状 (図 2-7 (b)) , すだれ状 (図 2-7 (c)) に加工した成形品を補強材として使用する研究も実施されている。

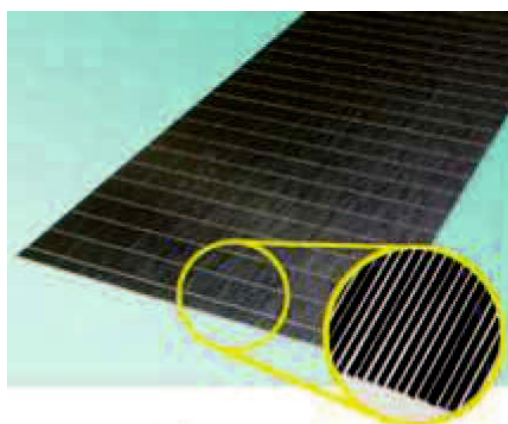
炭素繊維プレートを用いた研究として、加藤ら [2013] は床版下面にヤング係数 170GPa 程度の高強度炭素繊維プレートを格子状に貼り付け、輪荷重を床版中央と床版ハンチ付近に偏心載荷した場合の補強効果を調べている。輪荷重走行試験の結果、無補強試験体と比較して、中央載荷で約 40 倍、偏心載荷で約 20 倍の疲労耐久性向上効果があることを報告しており、さらには、前述の松井ら [2007] の研究で提案されている式 2-1 による疲労耐久性評価式において評価可能であることも報告している。表ら [2007] の研究では炭素繊維プレート (図 2-7 (a)) と、すだれ状に編んだ炭素繊維ストランドシート (図 2-7 (c)) を床版下面に貼り付けた場合 (図 2-8) の疲労特性の差異を輪荷重走行試験にて調べており、炭素繊維プレートで補強した場合はストランドシートを使用した場合より接着面積が少ないため、プレートとコンクリートのはく離面積が大きくなったが、疲労耐久性に関しては概ね同程度であったと報告されている (図 2-9) 。



(a) CFRP プレート

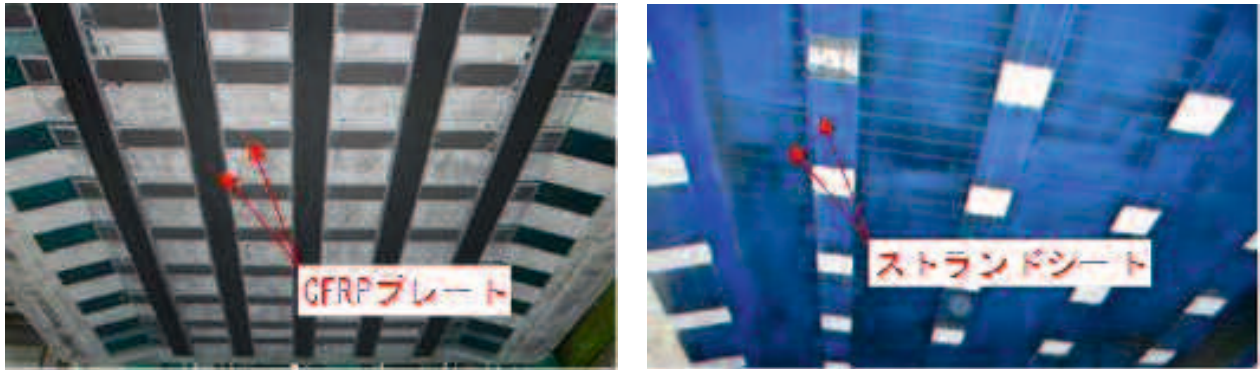


(b) CFRP ロッド



(c) すだれ状に編んだ炭素繊維ストランドシート [表ら, 2007]

図 2-7 炭素繊維成形品



(a) CFRP プレートによる床版補強例

(b) ストランドシートによる床版補強例

図 2-8 炭素繊維成形品による床版補強例 [表ら, 2007]

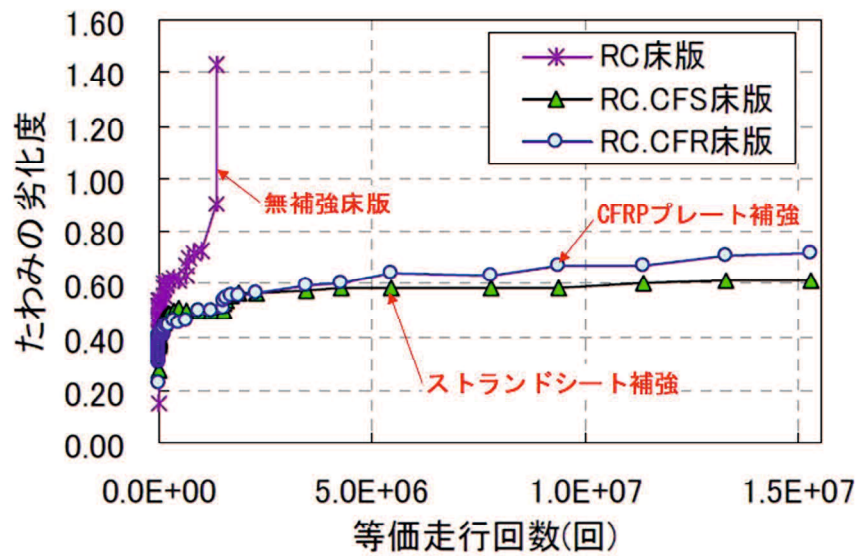


図 2-9 CFRP プレートとストランドシート補強による床版劣化度の比較 [表ら, 2007]

棒状に加工した炭素繊維ロッドを用いた研究に関してもいくつか報告されており，久部ら [2002] の研究では，エポキシ樹脂モルタル内にロッドを埋設補強した際の補強効果を RC はりの静的曲げ試験 (図 2-10) により調べており，ロッド埋設部の切削方法により終局耐力に差異があるものの，引張部コンクリートを無視して計算した一般的な曲げ理論で評価可能である点が報告されている．その後，上縁引張となる張出し床版を模擬した試験体にて定点繰返し载荷を行い (図 2-11)，供用荷重レベルで 200 万回以上の疲労耐久性を有していることを報告している [久部ら，2009] ．

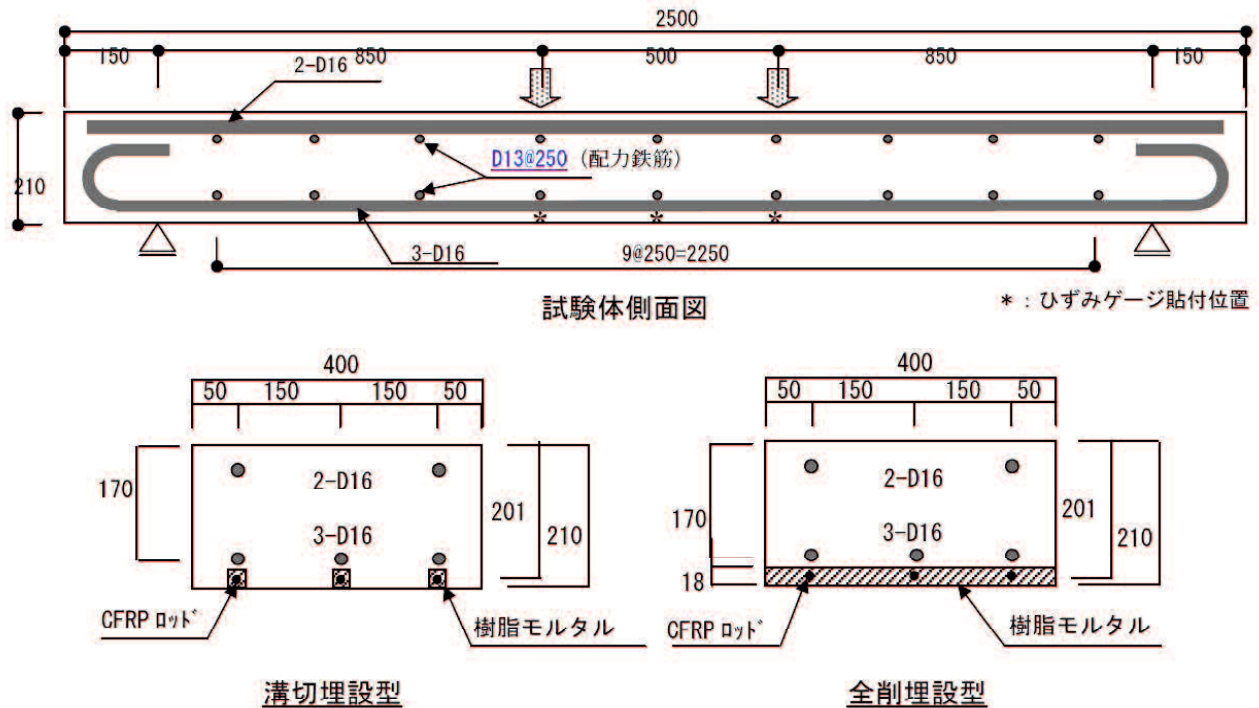


図 2-10 CFRP ロッドで補強した RC はり概要 [久部ら，2002]

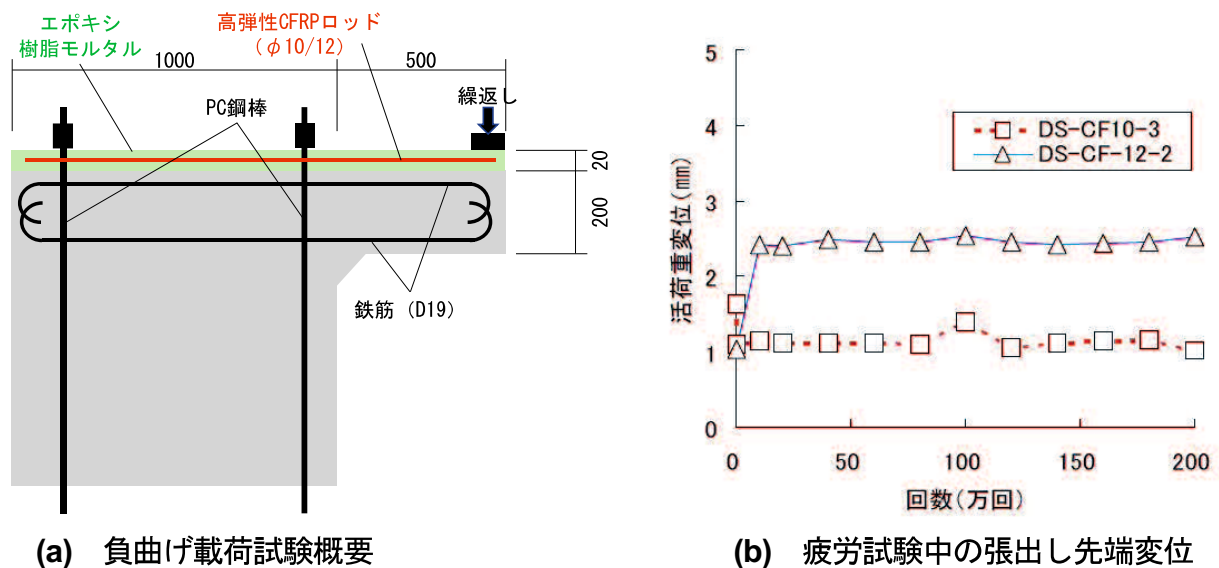


図 2-11 CFRP ロッドで補強した RC 部材の負曲げ载荷試験 [久部ら，2009]

近年では加工技術が向上し、直線以外の格子形状の CFRP (図 2-12) も製作が可能となった。格子形状であるため、格子格間内にセメント系モルタルを充填することができれば、エポキシ樹脂接着による定着を行う必要がない。笠倉ら [2007] の研究では吹付けモルタルで定着した試験体の引抜き試験により CFRP 格子筋の定着特性を、宮内ら [2019] は RC はり側面に吹付けモルタルで定着した場合のせん断補強効果を調べている。林ら [2019] の研究では、プレキャストコンクリート部材の定着部に CFRP 格子筋を配置し、高流動コンクリートを打設した場合の接合性能を調べている。

また、これまでの研究では FRP に成形する際の含浸樹脂は、一般的に熱硬化型のエポキシ樹脂が使用されてきたが、近年では熱可塑性樹脂を使用した FRP 成型品も製造されるようになった。熱可塑性樹脂は加熱すると柔らかくなる樹脂であるため、引抜成形で製造した FRP ロッドを加熱し、束ねてねじりを加えると PC 鋼材のようなストランド形状も製造可能である (図 2-13)。ストランド状の加工が可能となったことで、これまで鉄筋代替として使用されていた FRP 補強材がプレストレストコンクリート (PC) 構造物の緊張材への適用拡大も検討されている [石井ら, 2019 ; 三加ら, 2019] 。



図 2-12 CFRP 格子筋 [林ら, 2019]

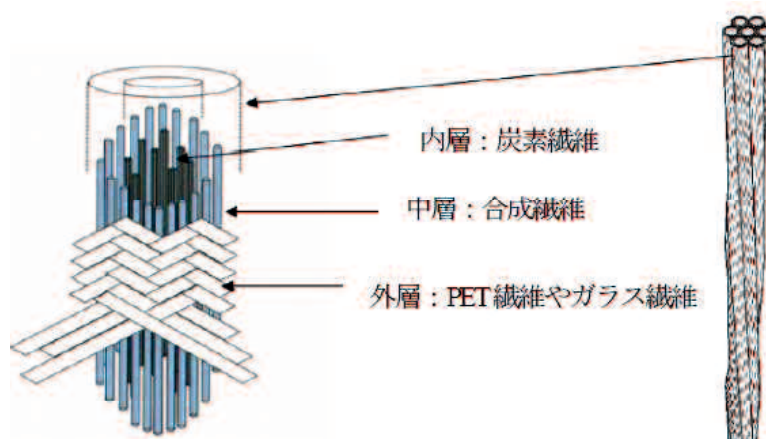


図 2-13 熱可塑性樹脂を使用した炭素繊維ストランド [櫻井ら, 2018]

2.5. Near Surface Mounted 工法に関する研究

床版上面補強を行う場合、補強前後で路面高を変化させないため、床版表層部分的にもしくは床版全面を切削し、かぶりコンクリート内に補強材を配置する“Near Surface Mounted (NSM)”補強方法が検討されている。

Sharaky ら [2013, 2014, 2015] や Obaidi ら [2020] の研究ではかぶりコンクリートを溝形に切削し、径の異なる CFRP ロッドや GFRP ロッドをエポキシ樹脂により埋設補強し、引抜き試験を実施している (図 2-14)。Sharaky ら [2013, 2014, 2015] の研究では FRP ロッドの直径とロッド表面の凹凸が付着性能に大きく影響を与えていると報告している (図 2-15)。また、Zhang ら [2015] の研究ではアルミリブを CFRP ロッドに装着し、コンクリートに埋設して引抜き試験を実施している。Zhang ら [2020] が実施した試験では、アルミリブを 1ヶ所装着した場合、CFRP ロッドの付着耐力が 15%程度向上すると報告している (図 2-16)。

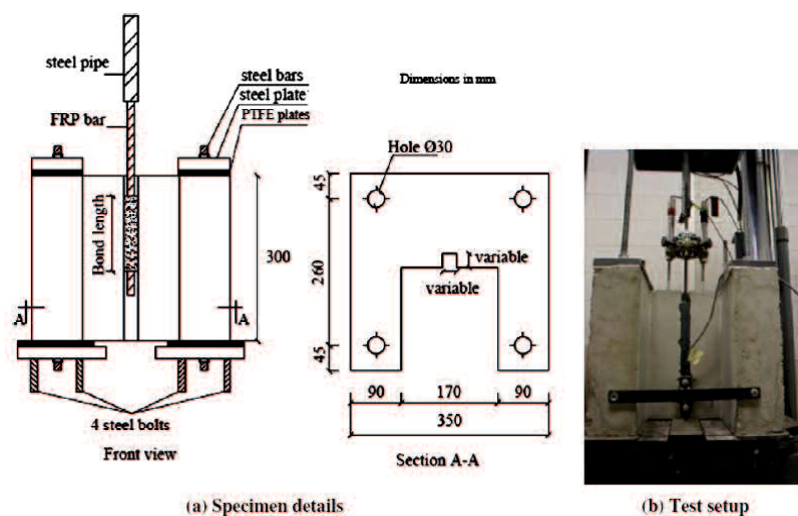


図 2-14 溝形切削し FRP ロッドを埋設した引抜き試験 [Sharaky ら, 2013]



図 2-15 埋設した FRP ロッド [Sharaky ら, 2013 ; 2014 ; 2015]



図 2-16 アルミリブを装着したCFRP ロッド [Zhang ら, 2015]

NSM 補強に関しては引抜試験による耐力評価のほか RC はりに埋設補強した場合の曲げ性能の評価を行っている。Barris ら [2018] の研究では GFRP プレート NSM 補強した場合、Cruz ら [2018] の研究では CFRP プレート NSM 補強した場合の RC はりの曲げ載荷試験を実施しており、Slaitas ら [2018] は FRP プレート NSM 補強した場合の試設計を行っている。

FRP プレートの NSM 補強のほか FRP ロッドを用いた NSM 補強にも多く実施されている。El-Gamal ら [2016] や Sharaky ら [2014] の研究ではエポキシ樹脂内に埋設する FRP 補強ロッドの材質を変えた場合、使用するエポキシ樹脂の種類を変えた場合の RC はりの曲げ補強効果に関する研究を実施している。Sharaky ら [2014] の研究では埋設する FRP ロッドの材質や使用するエポキシ樹脂の種類は RC はりの耐力には影響しないが、FRP ロッドのヤング係数、埋設本数は変形性能に大きく影響を与えると報告している。Choi ら [2014] の研究では部分的に未接着させた CFRP ロッドを T 型 RC はりに埋設し、曲げ載荷試験を行っている。Choi ら [2014] の実験では、定着長が長くなるにしたがって最大耐力が向上し、全接着させた場合は CFRP ロッドの破断が発生すると報告している (図 2-17)。

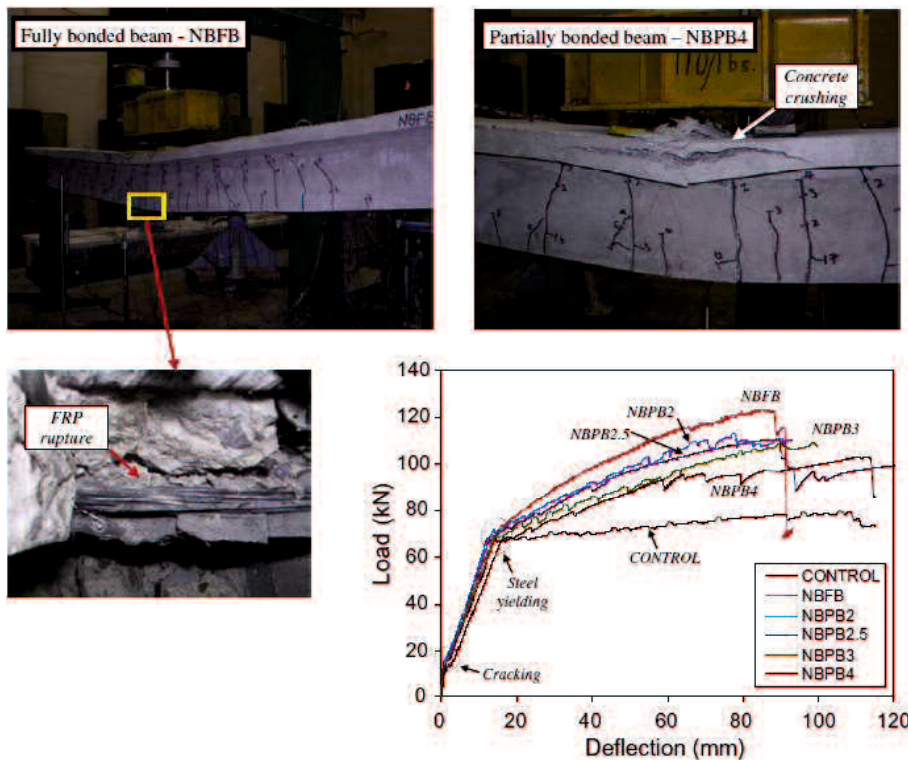


図 2-17 部分接着させた CFRP ロッドを埋設した RC はりの破壊状況 [Choi ら, 2014]

Abdallah ら [2020] の研究では RC はりの側面に溝形切削を行い，CFRP ロッドを埋設補強した場合を (図 2-18)，Firas ら [2009] の研究では定着長を変化させた CFRP ロッドを RC はり下面に埋設補強した場合 (図 2-19) の曲げ载荷試験を実施している．彼らの研究では CFRP ロッドの埋設の際にエポキシ樹脂に加え，無機系モルタル内にも埋設し比較を行っている．いずれの研究においても無機系モルタル内に埋設した場合は早期に CFRP ロッドの抜け出しが発生しており，Firas ら [2009] の実験では無機系モルタルに埋設した場合の RC はりの最大耐力は，エポキシ樹脂を使用した場合の 80%程度になると報告している (図 2-20) ．

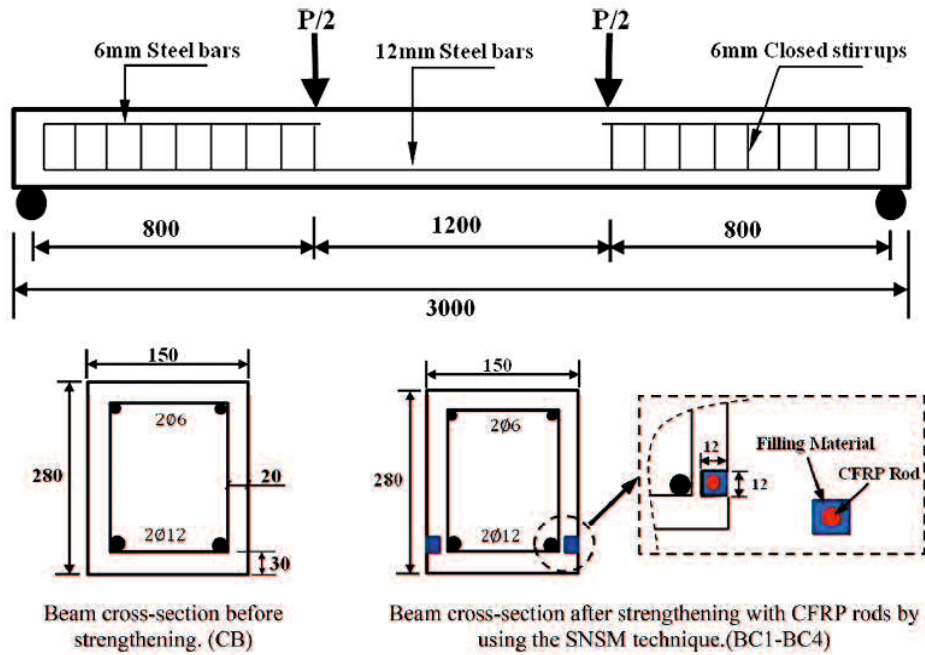


図 2-18 側面 NSM 補強を行った RC はり [Abdallah ら, 2020]

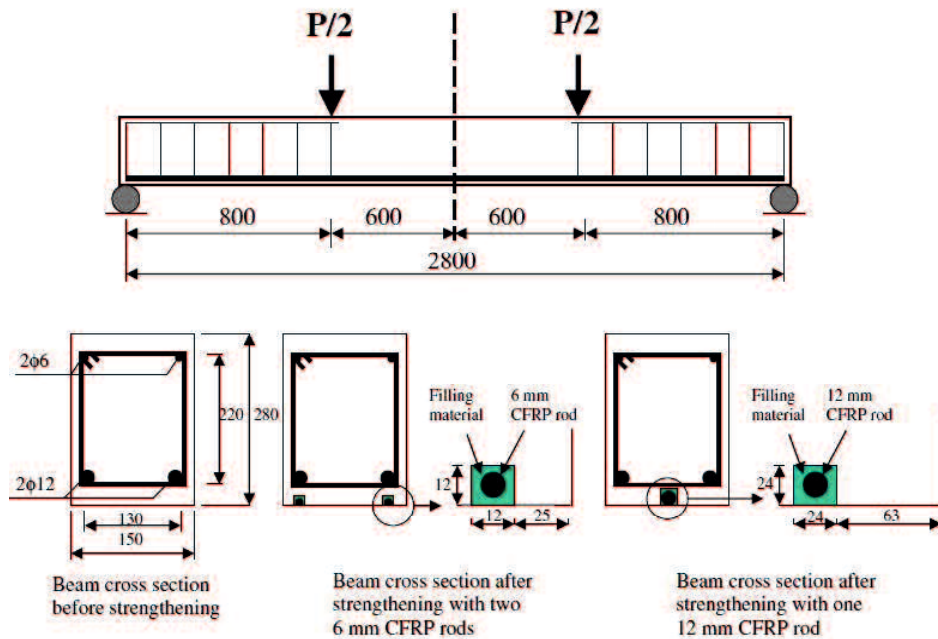
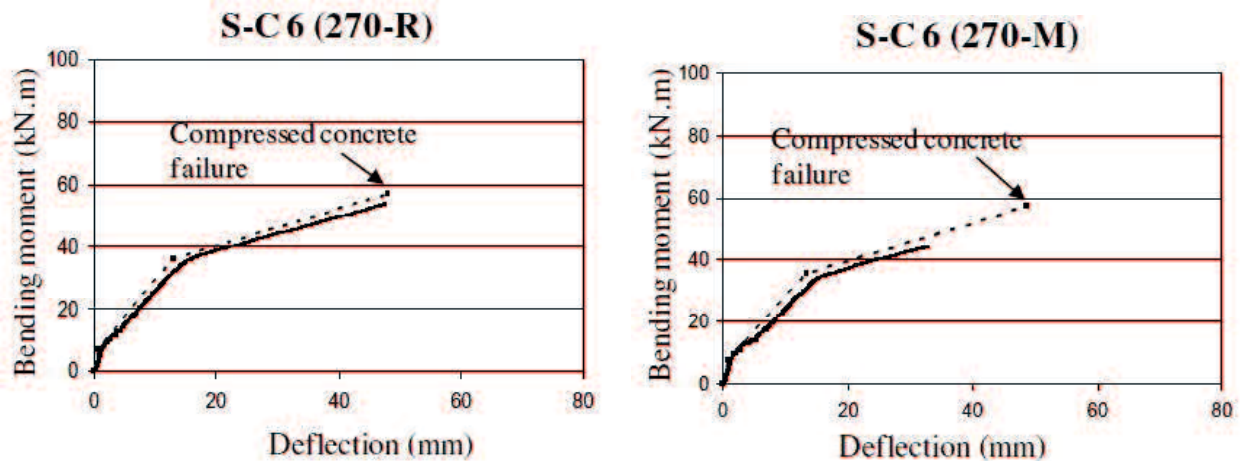


図 2-19 底面 NSM 補強を行った RC はり [Firas ら, 2009]



(a) エポキシ樹脂定着を行った場合

(b) 無機系モルタル定着を行った場合

図 2-20 エポキシ樹脂定着、無機系モルタル定着を行った場合の荷重-たわみ関係の比較
[Firas ら, 2009]

NSM 補強を行った RC はりの曲げ性能に関する研究は、静的曲げ載荷試験のほかに繰返し荷重や持続荷重下での長期変形性能に関する研究もおこなわれている。Arockiasamy ら [2000] の研究では NSM 補強を行った RC はりに持続荷重を載荷させ、長期的なたわみ変化を調べており、Cheng ら [2017] の研究では繰返し載荷が作用する RC はりの疲労設計を行っている。Arockiasamy ら [2000] の報告ではコンクリートのクリープ、乾燥収縮を考慮した ACI モデルで予測を行った場合でもある程度の精度で変形予測が可能であると報告している。

本研究で対象とする負曲げの作用する RC 床版に関する研究に関してもいくつか研究がおこなわれており、Lee ら [2011] の研究では炭素繊維やガラス繊維から製造した FRP ロッドの表面に種々の加工を施し、負曲げの作用する張出し RC 床版の定点繰返し載荷試験によりその疲労耐久性能を調べている (図 2-21)。また、弓倉ら [2008] の研究では CFRP プレートで補強材最適な定着方法の検討を行い、Yoshitake ら [2010] は最適な定着方法で補強を行った張出し RC 床版を輪荷重走で疲労耐久性能を調べている (図 2-22)。

NSM 補強の技術は鉄筋の代替として使用する場合に加え、プレストレストコンクリート (PC) 部材の緊張材として使用した場合の検討も行われている。Moataz ら [2009 ; 2011] の研究では緊張材として CFRP ロッドを使用し、エポキシ樹脂の接着力により緊張力を与えた PC 部材の構造性能に関する研究を実施している。

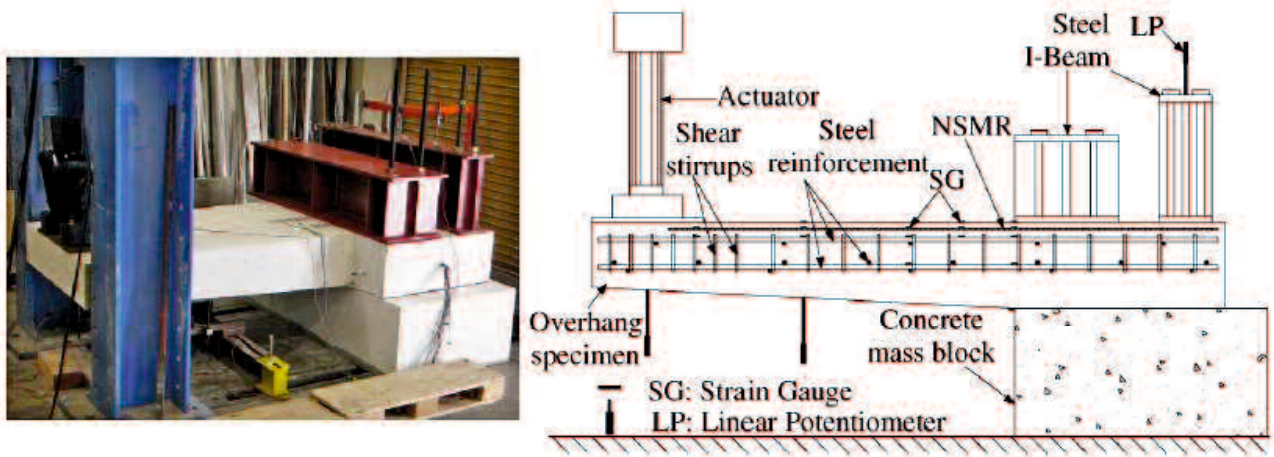


図 2-21 NSM 補強を行った RC 床版の負曲げ载荷試験 [Lee ら, 2011]

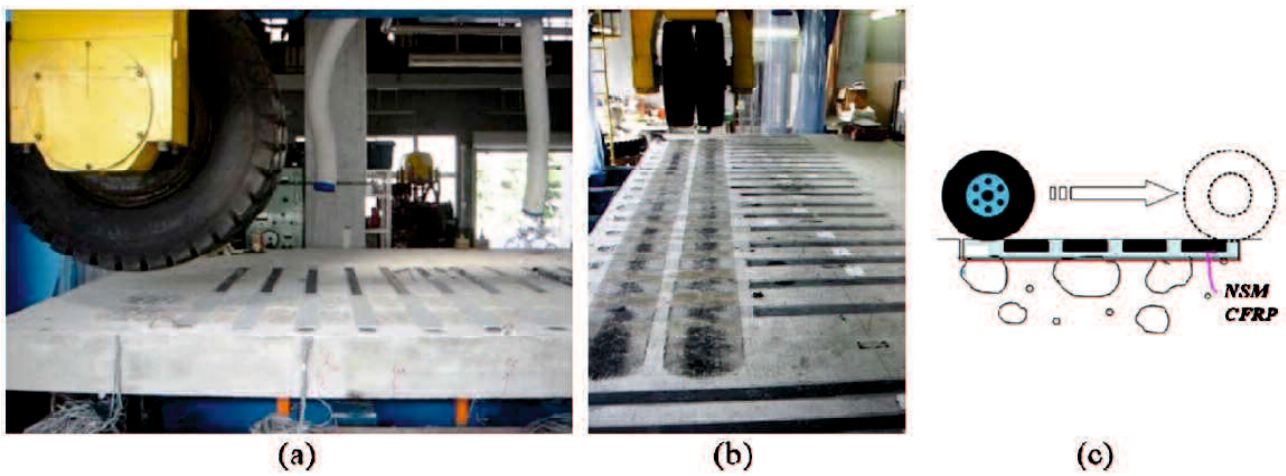


図 2-22 NSM 補強を行った RC 床版の負曲げ輪荷重走行試験 [Yoshitake ら, 2010]

第 3 章

CFRP ロッドの付着性能の改善方法

3.1. はじめに

CFRP ロッドの付着性能改善方法にはいくつかの方法が考えられる。本研究では、短時間での施工を目的とした超早強 PCM 内への CFRP ロッド埋設を前提としているため、モルタルとロッドの化学的な接着力を向上させることは難しい。そこで CFRP ロッド側に加工を施し機械的な付着力を向上させる方法を検討することとした。本章では CFRP ロッドの付着性能を向上させることに効果的な加工方法を検討するため、種々の改良を施した CFRP ロッドを製作し、付着試験および RC はりの曲げ試験により、それぞれの付着性能を調べた。

3.2. 付着性能改善方法

付着性能の改善方法は、GFRP リブを CFRP ロッドに装着することで機械的なズレ止めを設ける方法と、CFRP ロッドの付着面積を大きくする方法とした。GFRP リブ装着方法は、予め工場で製作した筒状の GFRP スリーブを CFRP ロッドに通し、スリーブとロッドの隙間にエポキシ樹脂（圧縮強度：60MPa 程度）を注入する方法（GE Type）と、筒状のスリーブとロッドの隙間に膨張モルタル（膨張圧：50MPa 程度）を充填し、膨張圧にて固定させる方法（GS Type）とした。CFRP ロッドの付着面積を大きくする方法ではロッド周囲にエポキシ樹脂パテを塗布し 12mm 径のロッドを 25mm 径まで拡大し、その表面に珪砂を散布し、大径化した（EC Type）。それぞれの加工を施した CFRP ロッドを図 3-1 に示す。

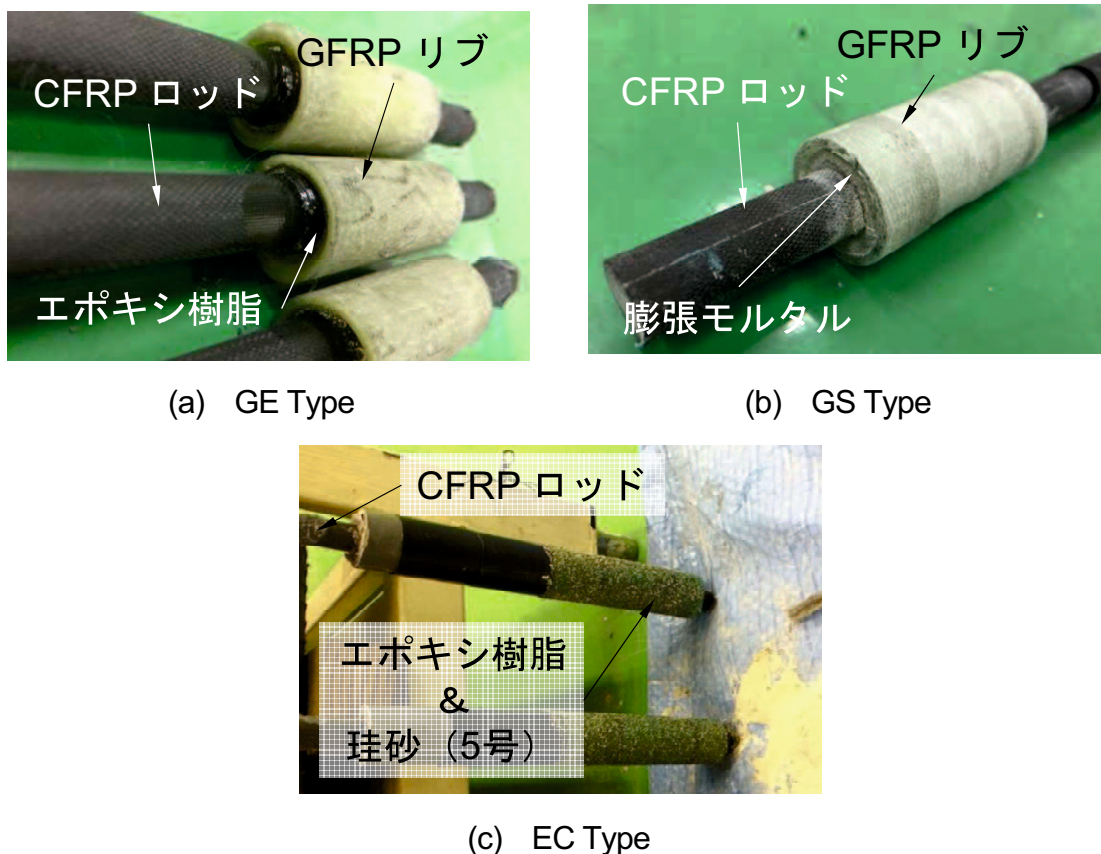


図 3-1 付着性能改善方法

3.3. 引抜き実験による付着性能の改善効果

3.3.1. 試験体一覧

本章で用いた引抜き試験体一覧を表 3-1 に示す。表中の試験体名称は図 3-2 に示す通り、最初の項を CFRP ロッド種類と径（高弾性 CFRP ロッド 12mm 径は HM12）、次に付着性能改善方法（3.2 項で述べた GE, GS, EC）とリブを装着した場合のリブ肉厚（6.0mm）、最後の項は GFRP リブを装着した場合のリブ長（10, 30, 50, 70mm）を表している。表中には使用した CFRP ロッドの機械特性および埋設したコンクリートの試験時圧縮強度を併せて示す。

引抜き試験は2回に分けて実施し、Series-1 にて上記の付着性能改善を行った CFRP ロッドの引抜き試験を実施し、効果的な付着性能改善方法を調べた。Series-1 の試験で GS Type の付着性能改善効果が高かったことから、Series-2 で GFRP リブの長さによる影響を調べるため、GS Type のリブ長を 10mm から 70mm まで変化させた試験体の引抜き試験を実施した。

表 3-1 引抜き試験体一覧

Series	試験体名	Type	埋設材料				GFRP リブ			試験長 (mm)	コンクリート	
			直径 (mm)	σ_y (MPa)	E_f (GPa)	厚 (mm)	直径 (mm)	長 (mm)	σ_c (MPa)		E_c (GPa)	
1	Control	—	SD295	13	365	—	—	—	—	110	23.5	—
	HM12	—	HM12	12	1550	418.0	—	—	—	110		
	HM12-GE6.0-50	GE	HM12	12			6.0	24	50	110		
	HM12-GS6.0-50	GS	HM12	12			6.0	24	50	110		
	HM12-EC	EC	HM12	12			—	25	—	110		
2	HM12-GS6.0-10	GS	HM12	12			1550	418.0	6.0	24	10	70
	HM12-GS6.0-30	GS	HM12	12	6.0	24			30	90		
	HM12-GS6.0-50	GS	HM12	12	6.0	24			50	110		
	HM12-GS6.0-70	GS	HM12	12	6.0	24			70	130		

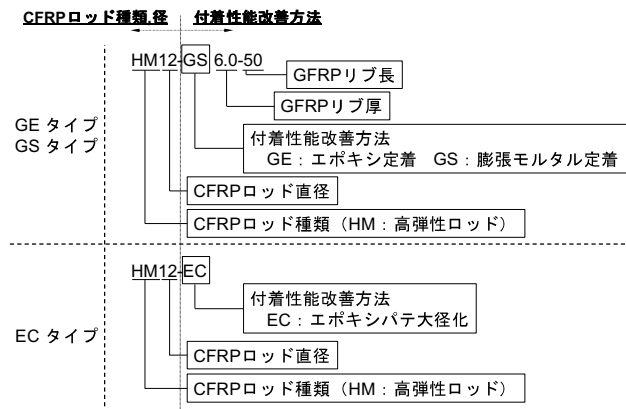


図 3-2 試験体名称

3.3.2. 載荷方法

図 3-3 および図 3-4 に試験体概要， 載荷試験状況を示す． 試験体断面は骨材寸法 20mm のコンクリートを打設した場合でも十分なあきを確保できるように， 断面 100mm×100mm の四角柱とした． 加力側 50mm にブチルゴムテープを貼り付け非接着区間を設け， 非接着区間より上側を試験区間とした． GFRP リブを装着しない Control， HM12 および HM12-EC 試験体の試験区間は 110mm とし， GFRP リブを装着させた試験体はリブ長と上下 30mm の CFRP ロッドのみの付着区間を合わせた範囲とした．

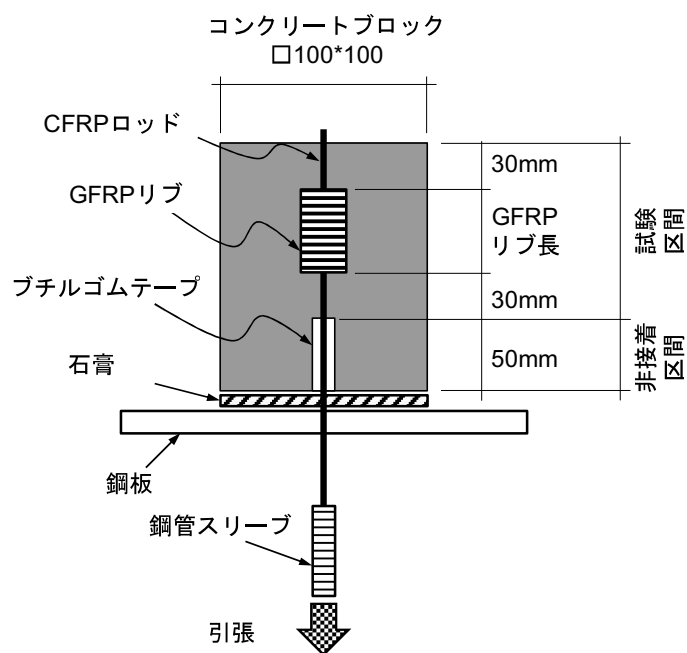


図 3-3 引抜き試験体概要

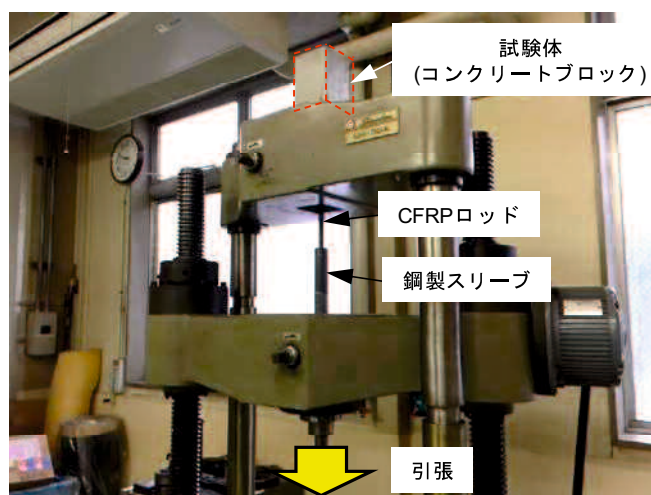


図 3-4 引抜き試験状況

3.3.3. CFRP ロッドの付着性能改善方法 (Series-1 試験)

Series-1 では GE Type, GS Type, EC Type の 3 種類の付着試験を行い、最も効果的な改善方法の選定を行った。なお、GFRP リブを装着した GE Type, GS Type の試験体はリブ長を 50mm としており、すべての試験体で非接着区間を含めた試験体長が 160mm となっている。

引抜き試験結果を表 3-2 および図 3-5 に示す。みかけの付着強度 (付着強度-1) は、最大荷重 (P_{max}) を試験区間の CFRP ロッドの表面積で除して求めた。また、表 3-2 中の平均付着強度の括弧内数値はエポキシ樹脂パテにて太径化した直径 (25mm) を使用して算出した数値であり、図 3-5 中の付着強度-2 を表している。図 3-5 中の数値 (%) は、鉄筋埋設試験体 (Control) に対する比率を示したものである。

CFRP ロッドの付着性能の改善を行わなかった HM12, GFRP リブをエポキシ樹脂接着剤にて取り付けた HM12-GE6.0-50 に関しては、Control 試験体の 42%, 72% 程度の付着強度となった。一方、GFRP リブを膨張モルタルで定着した HM12-GS6.0-50 試験体は Control 試験体の 142% の付着強度を示した。膨張モルタルでは、膨張圧により CFRP ロッドを拘束する力が加わるが、エポキシ樹脂接着剤では接着力のみの付着作用となるため、エポキシ樹脂接着剤を用いた GE が相対的に低い付着性能を示したものと考えられる。

エポキシ樹脂パテで太径化した HM12-EC 試験体に関しては CFRP ロッド直径 (12mm) を使用して付着強度を算出すると Control 試験体の 172% の付着強度を示した。なお、太径化した真の直径 (25mm) を使用すると、Control の 83% の付着強度となり、付着面積に応じた引抜き耐力は得られなかった。

破壊形態に関しては、太径化した HM12-EC 試験体は埋設コンクリートの割裂破壊に至ったが、その他の試験体はすべてコンクリートから CFRP ロッドが抜け出す破壊となった。それぞれの代表的な破壊形態を図 3-6 に示す。これは、図 3-7 に示すように HM12-EC では CFRP ロッドの太径化に伴い、引抜き反力が作用するコンクリート面積が減少し、さらに破壊時の最大荷重が大きいため、相対的に引抜き反力が高くなり割裂破壊に至ったものと考えられる。圧縮強度 23MPa 程度のコンクリートにおいては、直径 25mm 以上にロッドを太径化しても付着耐力が向上しないことがわかった。

表 3-2 引抜き試験結果一覧 (Series-1 試験)

試験体名	P_{max} (kN)	付着強度		比率 (%)	破壊形式
		実験値 (MPa)	平均値 (MPa)		
Control	44.590	9.93	9.88	100	抜け出し
	44.737	9.96			
	43.806	9.75			
HM12	16.023	3.86	4.19	42	抜け出し
	15.190	3.66			
	20.923	5.05			
HM12-GD6.0-50	24.059	5.80	7.09	72	抜け出し
	30.184	7.28			
	33.908	8.18			
HM12-GS6.0-50	56.203	13.55	14.03	142	抜け出し
	56.840	13.71			
	61.495	14.83			
HM12-EC	64.190	15.48	17.04 (8.18)	172 (83)	割裂
	77.469	18.68			
	70.266	16.94			

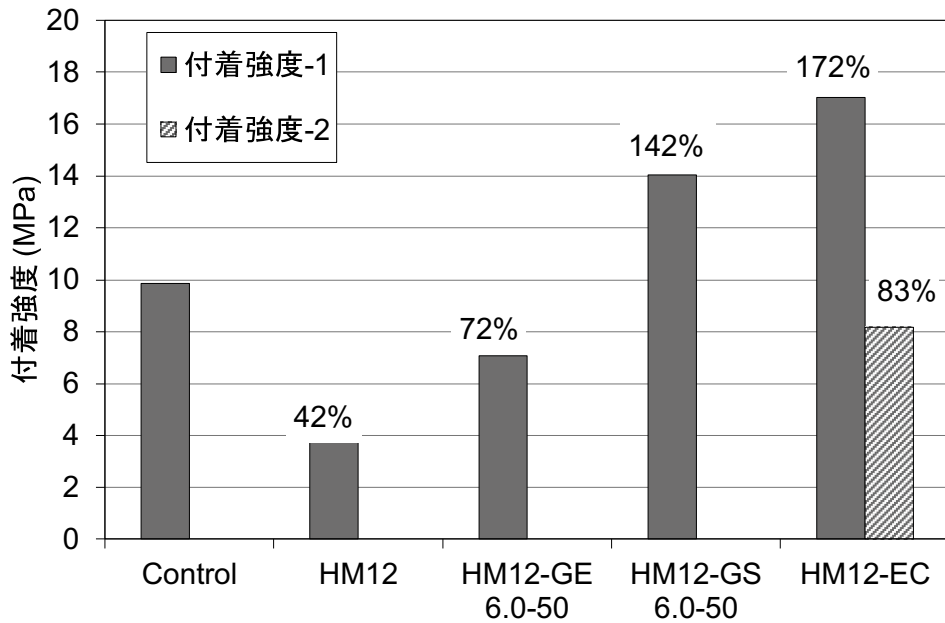


図 3-5 引抜き試験結果 (Series-1)

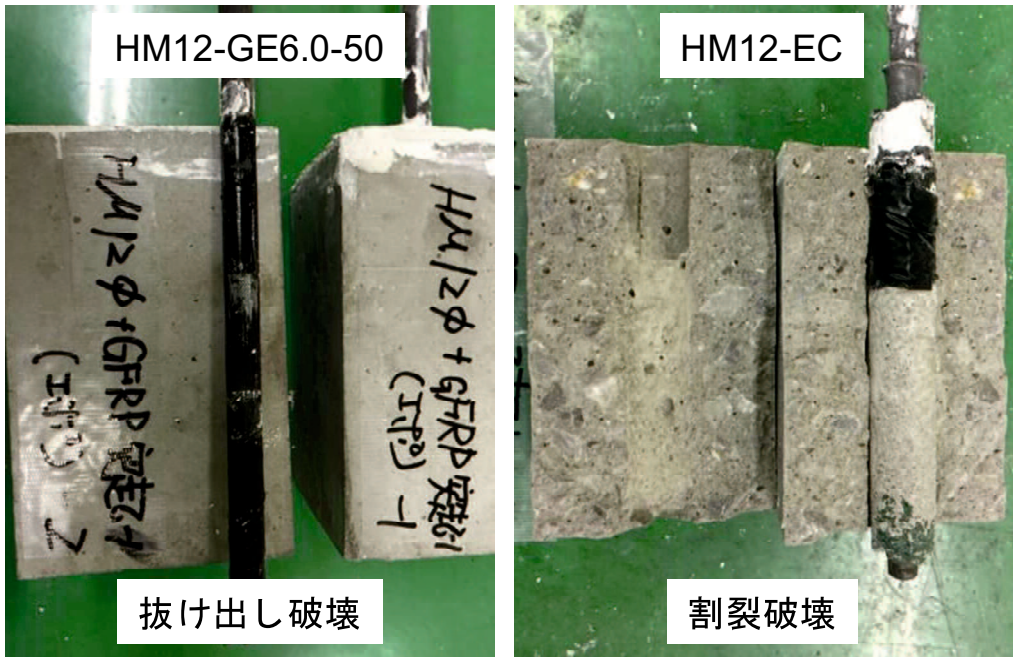


図 3-6 破壊モード

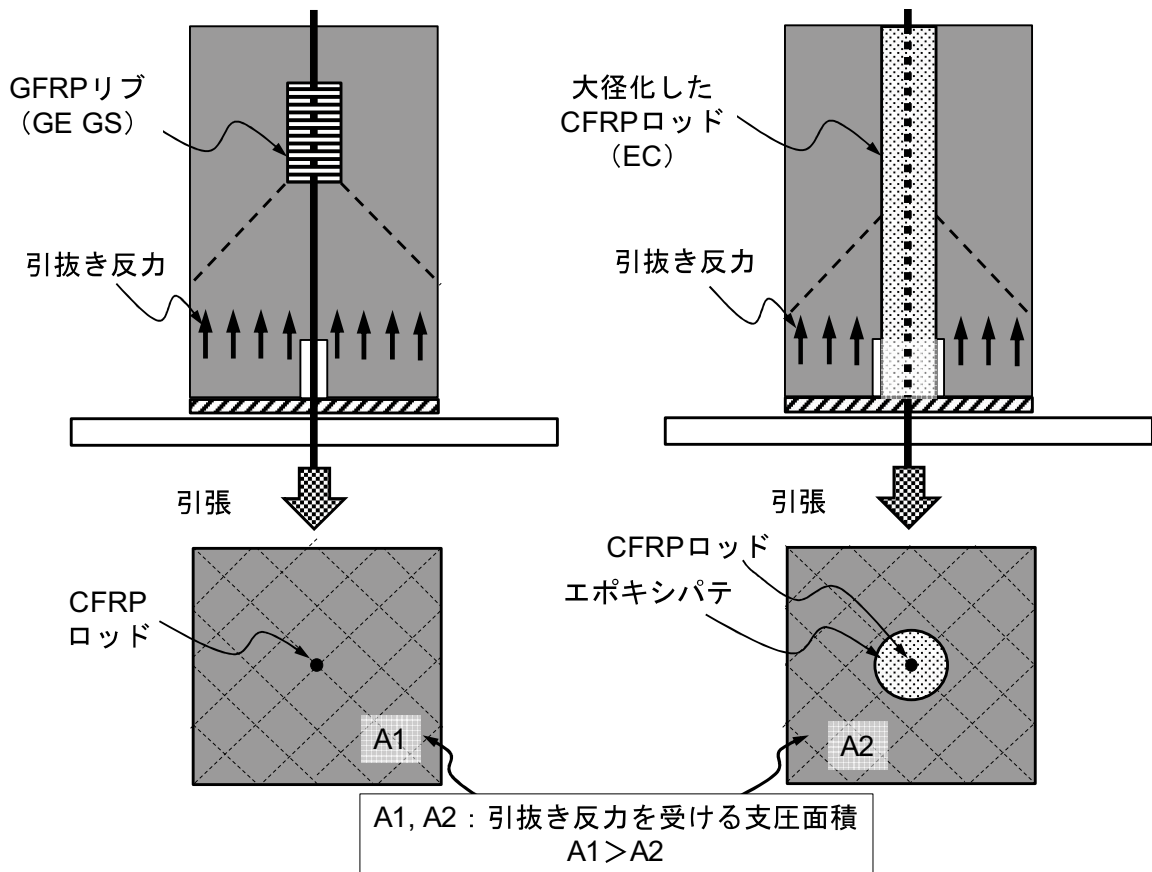


図 3-7 破壊モードに与える支圧面積の影響

3.3.4. GFRP リブ寸法による影響 (Series-2 試験)

Series-2 では Series-1 で検討した GFRP リブを膨張モルタルで固定した試験体 (GS Type) に関し、最適なリブ長を検討するためリブ長を変化させて引抜き試験を実施した。

Series-1 の試験と同様に GFRP リブ厚を 6.0 mm 一定とし、GFRP リブ長を 10mm, 30mm, 50mm, 70mm の 4 種類に変化させた場合の試験結果を表 3-3 および図 3-8 に示す。Series-1 と Series-2 では使用したコンクリート強度が異なるが、参考値として Series-1 で実施した鉄筋の付着強度に対する比率も表 3-3 中に示してある。図 3-8 中の P_{cfu} は CFRP ロッドの引張保証強度に断面積を乗じて算出した計算上の破断荷重である。

厚さ 6.0mm の GFRP リブを装着した場合、リブ長が 50mm までは線形的に付着耐力が増加したが、70mm までリブ長を伸ばしても付着耐力は向上しなかった。付着耐力が最も大きかった HM12-GS6.0-50 試験体においても CFRP 破断荷重 (P_{cfu}) の 72%であった。

破壊形態に関してはリブ長 10mm, 30mm の試験体は CFRP ロッドが GFRP リブから抜け出す破壊形態であったのに対し、リブ長 50mm 以上の試験体はコンクリートが割裂破壊する結果となった。これはリブ長が長くなったことで最大荷重も高くなったものの、GFRP リブから CFRP ロッドの抜け出しが発生しなかったため、コンクリートに作用する引抜き反力が大きくなったことによるものと考えられる。図 3-9 に抜け出しで破壊した試験体と割裂により破壊試験体の写真を例示する。

厚さ 6.0mm の GFRP リブを膨張モルタルで装着する場合、リブ長を 50mm 以上とすると、コンクリートの割裂破壊が支配的となり、圧縮強度 27MPa 程度のコンクリートでは付着体力が向上しない結果となった。

表 3-3 引抜き試験結果一覧 (Series-2 試験)

試験体名	P_{max} (kN)	付着強度		比率 (%)	破壊形式
		実験値	平均値		
		(MPa)			
HM12-GS6.0-10	14.40	5.46	6.400	65	抜け出し
	20.58	7.80			
	15.68	5.94			
HM12-GS6.0-30	53.61	15.80	15.828	160	抜け出し
	53.41	15.74			
	54.10	15.94			
HM12-GS6.0-50	74.19	17.89	18.764	190	割裂
	79.38	19.14			
	79.87	19.26			
HM12-GS6.0-70	80.56	16.44	15.691	159	割裂
	70.27	14.34			
	79.87	16.30			

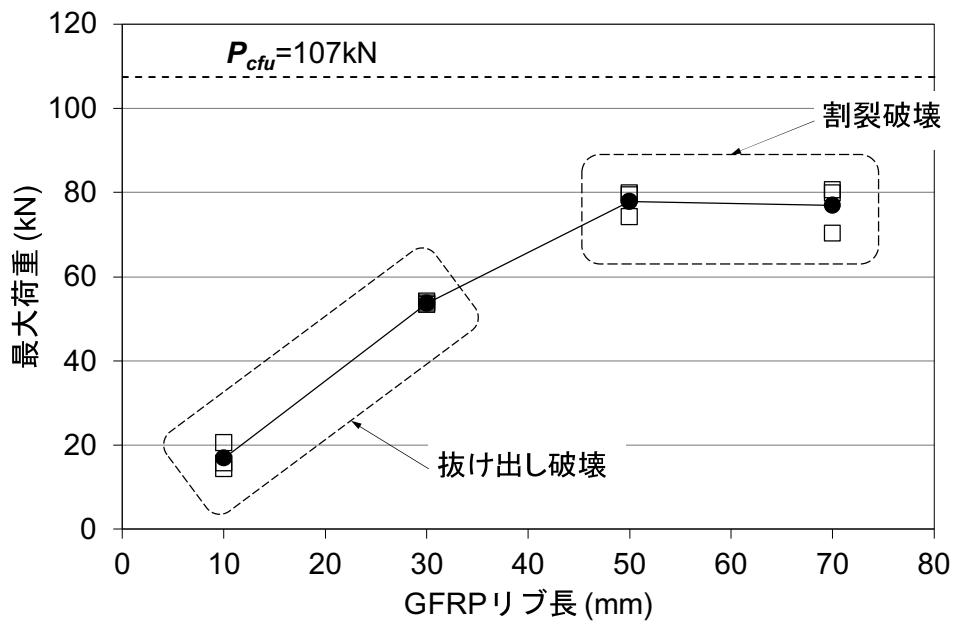


図 3-8 引抜き試験結果 (Series-2)

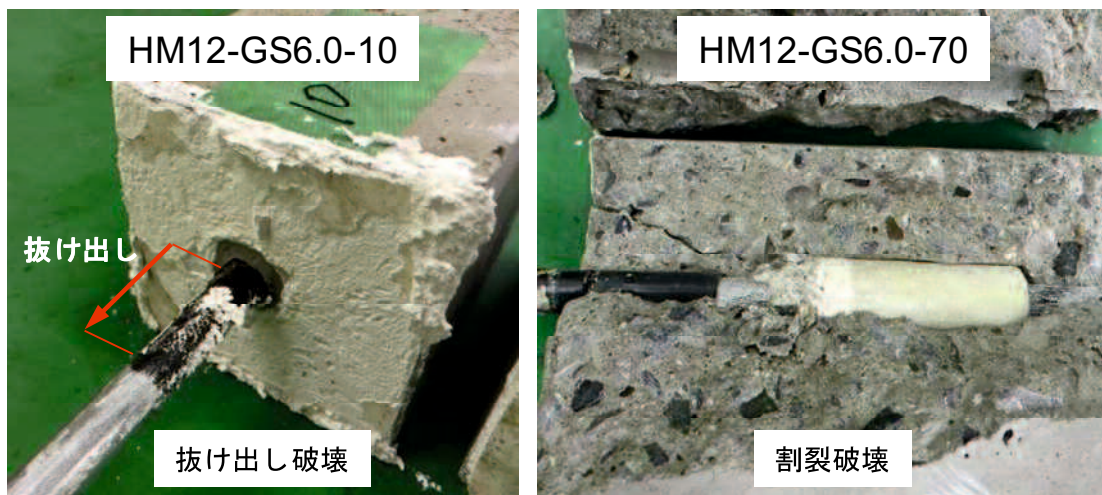


図 3-9 破壊モード

3.4. RC はりの曲げ試験による補強効果

3.4.1. 使用材料および試験体一覧

3.3 節で実施した引抜試験で付着性能の改善効果の高かった GS Type, EC Type の加工を施した CFRP ロッドについて RC はり内部に配置した場合の補強効果を調べた。試験体一覧を表 3-4 に示す。No.1 試験体は CFRP ロッドを配置しない無補強試験体を表し, No.2—No.5 は 12mm 径の高弾性 CFRP ロッドを配置した試験体である。CFRP ロッドの付着性能改善方法は, No.2 試験体は加工を施さない場合であり, No.3, No.4 試験体は厚さ 6.0mm, 長さ 50mm の GS Type リブを 300mm 間隔, 200mm 間隔で配置した場合, No.5 試験体はエポキシ樹脂パテで 25mm 径に大径化 (EC Type) した場合である。使用したコンクリート, モルタル, 鉄筋, CFRP ロッドの機械特性を表 3-5 に示す。

表 3-4 RC はり試験体一覧

No.	試験体名	鉄筋		埋設補強材料			Type	GFRP リブ			
		種類	公称径 (mm)	種類	公称径 (mm)	断面積 (mm ²)		厚 (mm)	直径 (mm)	長 (mm)	間隔 (mm)
1	Control	SD295	D10	—	—	—	—	—	—	—	—
2	HM12	SD295	D10	HM12	12	113.1	—	—	—	—	—
3	HM12-GS6.0-50-300	SD295	D10	HM12	12	113.1	GS	6.0	24	50	300
4	HM12-GS6.0-50-200	SD295	D10	HM12	12	113.1	GS	6.0	24	50	200
5	HM12-EC	SD295	D10	HM12	12	113.1	EC	—	25	—	—

表 3-5 使用材料

	公称径 (mm)	断面積 (mm ²)	強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
コンクリート*1	—	—	23.8	28.6
モルタル*1	—	—	43.4	26.5
鉄筋*2	10	71.33	374	206
CFRP ロッド*3	12	113.1	1550	418

※1-3 は以下の物性値を示す。

※1：圧縮強度 ※2：降伏点 ※3：引張強度

3.4.2. 試験体製作

試験体製作フローを**図 3-10** に示す. まずベースとなるコンクリートはりを製作した (**図 3-10 (a)**). 表層の脆弱コンクリート(レイタンス)をウォータージェットでハツリとり (**図 3-10 (b)**), CFRP ロッドを配置してモルタルにて埋め戻した (**図 3-10 (c)**). なお本試験においては, 一般的なモルタルを用いて充填したため, 28 日養生後に載荷試験を実施した.



(a) ベースコンクリート打設



(b) 打継面下地処理 (Water-Jet)



(c) CFRP ロッド配置 モルタル打設

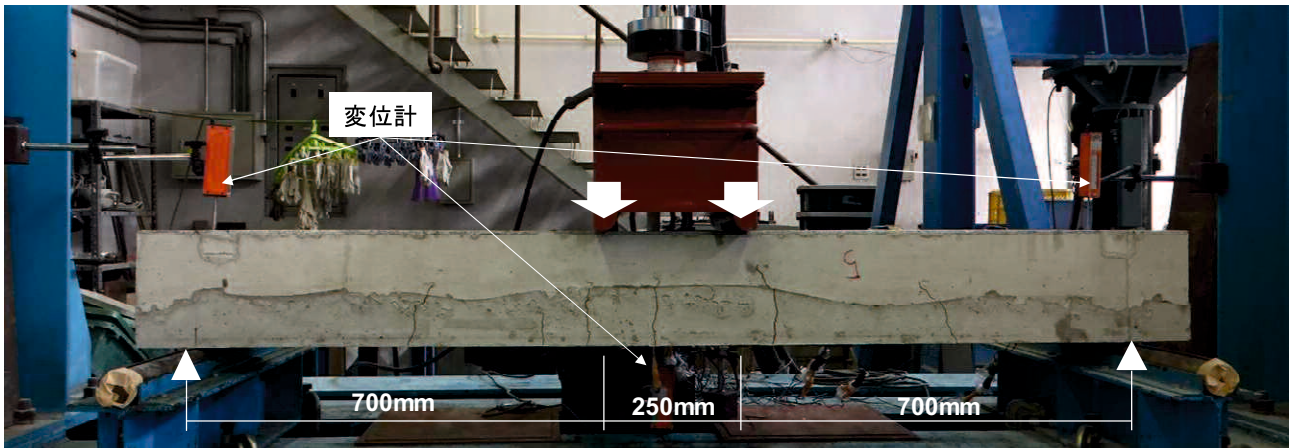


(d) 完成

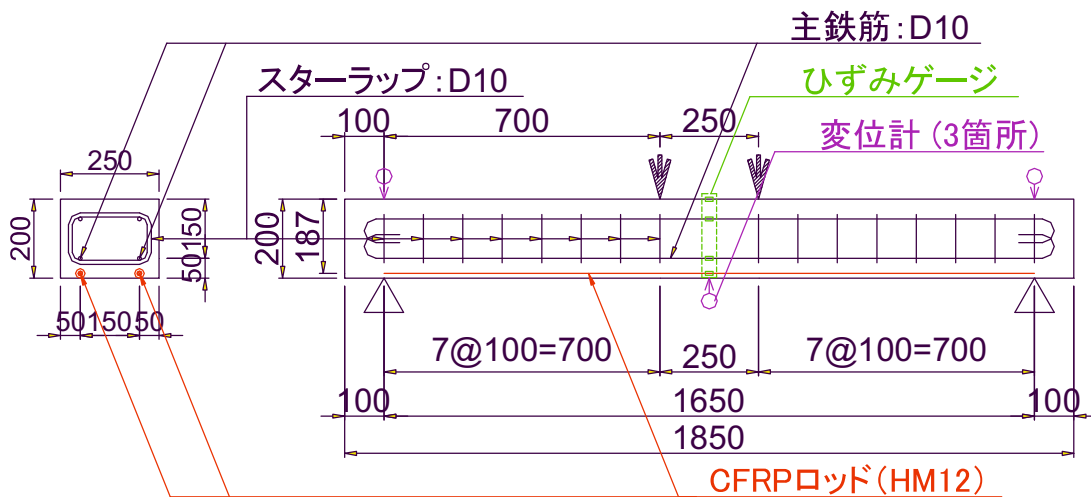
図 3-10 試験体製作フロー

3.4.3. 載荷方法および計測方法

試験体寸法および載荷状況の写真を図 3-11 (a), (b)に示す。断面寸法は 250mm 幅 × 200mm 高, 引張鉄筋および CFRP ロッドの高さは, 圧縮縁からそれぞれ 150mm, 187mm とした。CFRP ロッド高は大径化した CFRP ロッド (EC Type 直径 25mm) の表面がモルタル仕上がり面となる様に配置してある。RC はりの全長は 1850mm で等曲げ区間は 250mm, せん断スパンは 700mm とした。計測項目は載荷荷重のほか支間中央部と支点の変位, 圧縮鉄筋, 引張鉄筋, CFRP ロッド, 圧縮コンクリートのひずみとした。



(a) 載荷試験状況



(b) 試験体寸法および計測位置

図 3-11 RC はり載荷試験

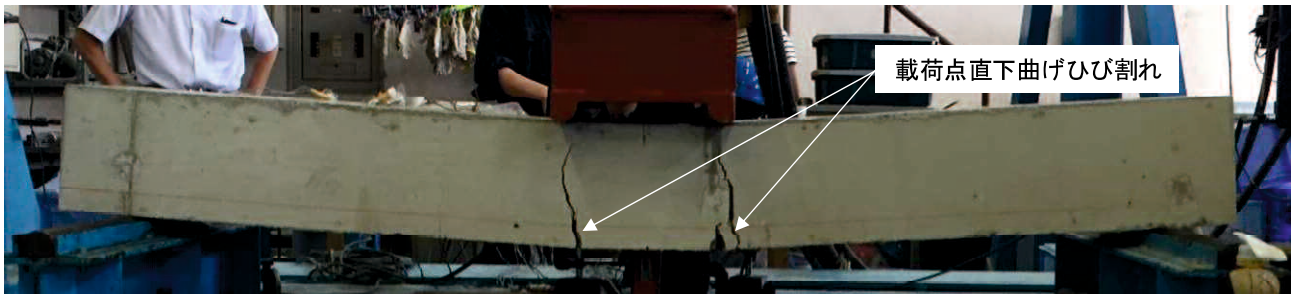
3.4.4. 最大耐力および破壊性状

表 3-6 に試験結果一覧を示す。表中には平面保持の仮定のもと計算した鉄筋降伏荷重と曲げ圧壊荷重も併せて示す。CFRP ロッドの付着性能を向上させた No.3—No.5 試験体に関しては計算上の曲げ圧壊荷重の 80-95%程度の荷重でせん断破壊する結果となった。GFRP リブを装着した No.3, 4 試験体に関してはリブ間隔を 300mm (No.3) とした方が、リブ間隔を 200mm (No.4) とした試験体より最大荷重が 20%程度低下する結果となった。これはリブ間隔を広げた場合、1 ヶ所当たりのリブが負担する付着力が大きくなり、ベースコンクリートと後打ちモルタルの界面に発生するせん断力が相対的に大きくなったためと考えられる。一方、CFRP ロッドに加工を施さずに埋設補強した No.2 試験体は、68kN 程度の荷重で CFRP ロッドの抜け出しが発生したことで載荷支点直下の曲げひび割れが進展し、CFRP ロッドの破断（等曲げ区間）を伴う曲げ破壊となった。

図 3-12 (a), (b), (c), (d) に各試験体の破壊状況の写真を示す。GFRP リブを装着した CFRP ロッドを埋設した No.3, No.4 試験体は同様の破壊形態であったため、代表して No.4 試験体の破壊状況を示す。Control 試験体は載荷点直下の曲げひび割れのみが大きく進展する破壊形態となったが、CFRP ロッドで補強した試験体 (No.2—No.5) はせん断スパンの斜めひび割れも大きく進展していた。これは CFRP ロッドで補強することで曲げ耐力が向上し、RC はりに作用するせん断力が相対的に上昇したためと考えられる。CFRP ロッドの付着性能を向上させた No.3—No.5 試験体は、せん断破壊荷重時に作用する CFRP ロッド付着応力度以上の強度を保有していたため CFRP ロッドの抜け出しは発生せず、はりのせん断破壊で終局に至ったものと考えられる。GFRP リブを装着した No.3, No.4 試験体に関してはせん断破壊部分で CFRP ロッドの破断も発生している。埋設した CFRP ロッド径が 12mm であるのに対し、GFRP リブ装着部は 24mm と約 2 倍の太さとなっていることから、リブ部分の急激な断面変化による応力集中が発生し、CFRP ロッドの破断が発生したと考えられる。

表 3-6 試験結果一覧

No.	試験体名	計算値		実験値		破壊形態
		鉄筋降伏 (kN)	曲げ圧壊 (kN)	鉄筋降伏 (kN)	最大荷重 (kN)	
1	Control	21.3	43.9	26.0	38.0	曲げ破壊
2	HM12	135.7	111.0	—	68.6	曲げ破壊
3	HM12-GS6.0-50-300			—	87.0	せん断破壊
4	HM12-GS6.0-50-200			—	105.6	せん断破壊
5	HM12-EC			—	100.6	せん断破壊



(a) No.1 試験体 (Control) 破壊状況



(b) No.2 試験体 (HM12) 破壊状況



(c) No.4 試験体 (HM12-GS6.0-50-200) 破壊状況



(d) No.5 試験体 (HM12-EC) 破壊状況

図 3-12 RC はり試験体破壊状況

3.4.5. たわみ性状

図 3-13 に各試験体の荷重－変位関係を示す。図中の数値は破壊荷重時の変位を示しており、CFRP ロッドを配置しない No.1 試験体 (Control) に関しては後述の鉄筋降伏時 (鉄筋ひずみ勾配が変化した点) のたわみを示している。

CFRP ロッドで補強を行った No.2－No.5 試験体のたわみは Control 試験体 (No.1) と比較すると小さくなっており、CFRP ロッドによるたわみ抑制効果が表れていることが分かる。CFRP ロッドを大径化 (EC Type) した No.5 試験体のたわみは No.2-No.4 試験体と比較すると若干たわみが小さくなっているが、これは大径化により CFRP ロッド自身のダウエル効果が向上し、せん断変形が小さくなったためと考えられる。破壊後の変形挙動に関しては、せん断破壊した No.3－No.5 試験体は最大荷重到達後、急激に荷重が低下しているが、曲げ破壊をした No.2 試験体はなだらかに荷重が低下しており、徐々に CFRP ロッドの抜け出しが発生していることが分かる。

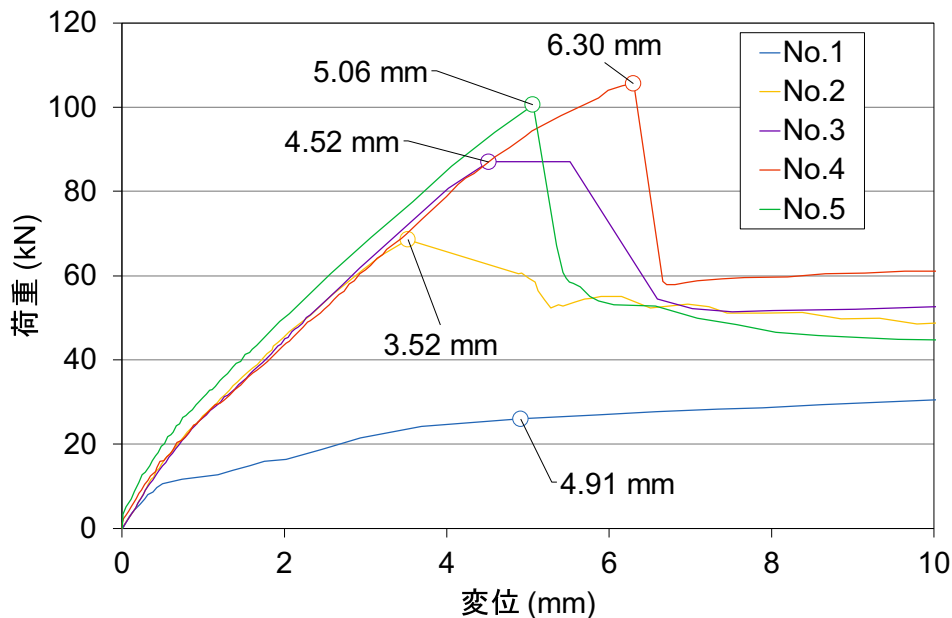


図 3-13 荷重－変位関係

3.4.6. ひずみ性状

図 3-14 に荷重-鉄筋ひずみ関係、図 3-15 に荷重 CFRP ロッドひずみ関係を、またそれぞれの試験体で得られた破壊時ひずみ一覧を表 3-7 に示す。それぞれの図中の数値は図 3-13 と同様に破壊荷重時の鉄筋、CFRP ロッドのひずみ数値を示している。

図 3-14 中の No.1 試験体 (Control) の鉄筋ひずみは 1666×10^{-6} と 1894×10^{-6} を境にひずみ勾配が変化していることが分かる。使用した鉄筋の材料物性 (表 3-5) から推定する鉄筋の降伏ひずみは 1816×10^{-6} 程度と考えられるが、ひずみ計測位置と試験体の鉄筋降伏発生位置が異なる可能性があるため、最初のひずみ勾配変化点 (1666×10^{-6}) の荷重を鉄筋降伏荷重 (破壊荷重) と定義した。

加工を施した CFRP ロッドを埋設した No.3-5 試験体に関しては鉄筋ひずみ、CFRP ひずみとも最大荷重 (破壊荷重) までひずみが線形的に増加し、最大荷重到達後急激に荷重とひずみが低下していることが分かる。一方、加工を施さない CFRP ロッドを埋設した No.2 試験体は最大荷重到達後 CFRP ロッドひずみが減少しているが、鉄筋ひずみはある程度の荷重を保持したまま徐々にひずみが増加していることが分かる。最大荷重到達後の CFRP ひずみの勾配についても No.3-5 試験体は最大荷重前のひずみ勾配より大きくなっているが、No.2 試験体は勾配が小さくなっており、CFRP ロッドの抜け出しにより、CFRP ロッドの負担している荷重が鉄筋側に移行しているものと推察される。

GFRP リブを装着した No.3, No.4 試験体の最大荷重時の CFRP ロッドひずみは概ね 1500×10^{-6} ~ 1700×10^{-6} 程度で使用した CFRP ロッドの破断ひずみ (3700×10^{-6}) の 40~45% 程度であった。3.4.4 節で述べた通り、リブ部で CFRP ロッドの破断も発生していることから、大きなリブを装着した場合、早期に CFRP ロッドの破断が発生する可能性があることが分かった。

表 3-7 破壊時ひずみ一覧

No.	試験体名	破壊荷重		破壊時 たわみ (mm)	鉄筋降伏時 ひずみ	最大荷重時ひずみ	
		鉄筋降伏 (kN)	最大荷重 (kN)		鉄筋 ($\times 10^{-6}$)	鉄筋 ($\times 10^{-6}$)	CFRP ($\times 10^{-6}$)
1	Control	26.0	38.0	4.91	1666	3086	—
2	HM12	—	68.6	3.52	—	1103	1165
3	HM12-GS6.0-50-300	—	87.0	4.52	—	1317	1515
4	HM12-GS6.0-50-200	—	105.6	6.30	—	1429	1750
5	HM12-EC	—	100.6	5.06	—	1462	1512

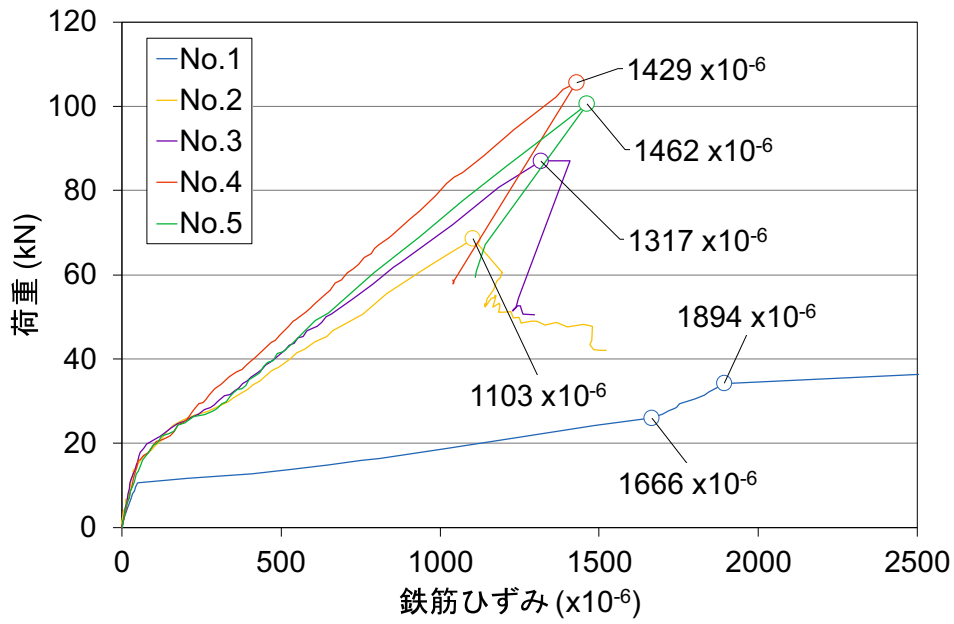


図 3-14 荷重—鉄筋ひずみ関係

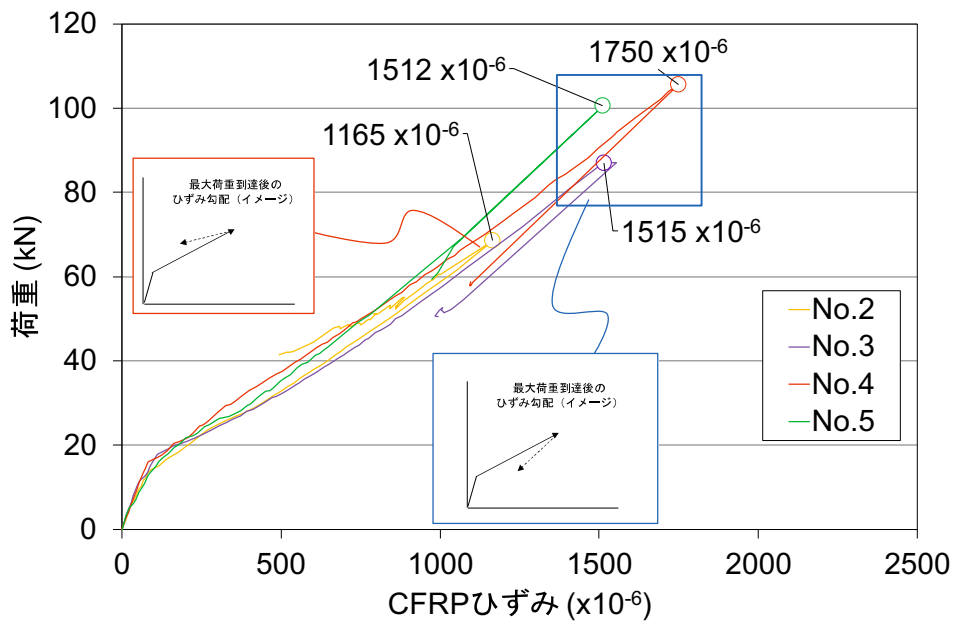


図 3-15 荷重—CFRP ひずみ関係

3.5. 第3章のまとめ

本章ではCFRP ロッドの付着性能改善方法を検討するため種々の改良を施したCFRP ロッドを製作し、引抜き試験とRC はりの曲げ載荷試験を実施し効果的な改良方法の検討を行った。これらの試験で得られた知見を以下に示す。

<引抜き試験で得られた主な知見>

- GFRP スリーブを静的破砕材で定着させたGS Typeの改良方法と12mm径のCFRP ロッドを25mmまで大径化させるEC Typeの改良は、CFRP ロッド径の12mmの付着面積で算出した付着強度は鉄筋以上の付着強度が得られることが分かった。
- 大径化した25mmの径の表面積を用いて算出したEC Typeの付着強度は鉄筋の付着応力度以上とはならず、付着面積を増加させることによる付着耐力向上策は鉄筋の付着強度以上とはならないことが分かった。
- GS Typeのリブでリブ長を長くした場合、リブ長に応じて付着耐力は向上するものの、埋設コンクリートの割裂耐力以上の耐力は得られず、24~27MPa程度のコンクリートに埋設する場合はGFRP リブ長を50mm以上としても付着耐力が向上しないことが分かった。

<RC はりの曲げ試験で得られた主な知見>

- GFRP リブを装着しないCFRP ロッドで補強した場合、端部のCFRP ロッド抜け出しが発生したため曲げ耐力が向上せず、等曲げ区間の変形が進展し曲げ破壊する結果となった。
- 付着性能を改善したCFRP ロッドでRC はりを補強した場合、CFRP ロッド補強で曲げ破壊耐力（コンクリート圧縮破壊）が向上し、計算上の曲げ耐力の90%程度の耐力を示した。しかしながら、CFRP 補強で曲げ耐力が向上したため、せん断破壊に至る結果となった。
- GFRP リブを装着したCFRP ロッドを埋設した場合、リブ装着部でロッドの剛性が大きく変化するため、リブ近傍に大きな曲げとせん断力が集中し、CFRP ロッドの破断強度の40~45%程度でリブを起点としたCFRP ロッドの破断が発生した。

<第3章で得られた知見に基づく検討課題>

6.0mmのGFRP リブを装着した場合、引抜き耐力、RC はりの曲げ耐力は向上し、計算上の曲げ破壊耐力（コンクリート圧縮破壊耐力）の90%となったものの、CFRP ロッドの破断強度の50%程度でロッド破断が発生する結果となった。CFRP ロッドの性能を最大限発揮させるためにはCFRP ロッドの付着性能を低下させない程度までGFRP リブを小さくし、局所的な剛性変化をなくしたCFRP ロッドを開発する必要があることが分かった。第4章以降でGFRP リブ形状を小さくした場合の補強性能を検討することとした。

第4章

最適 GFRP リブ形状の検討

4.1. はじめに

第3章において種々の改良を施し、付着性能を改善させたCFRP ロッドの付着性能確認試験およびRC はりによる曲げ性能試験を実施した。第3章の試験結果からCFRP ロッドを大径化するEC Typeの加工、GFRP リブを膨張モルタルで固定するGS Typeの加工が付着性能の向上に有効であることが分かった。一方、CFRP ロッドの大径化や、GFRP リブを長くすると、埋設コンクリートに作用する支圧応力が大きくなり、割裂破壊する可能性があることも分かった。RC はり試験体における曲げ性能試験においてもリブ厚を6.0mm程度まで厚くすると、リブ装着部分でCFRP ロッドの剛性が大きく変化するため、CFRP ロッドの破断が早期に発生する可能性があることが窺えた。本章ではCFRP ロッドの付着性能を低下させない程度までリブ厚を薄くし、最適なリブ厚、リブ長を把握するため第3章で実施したような引抜き耐力試験を実施した。しかしながら、GFRP リブ厚を6mm以下とする必要があるため、あらかじめ製作した筒状のGFRP スリーブとCFRP ロッドの隙間に膨張モルタル等を充填させることは難しい。そこで本章で検討するGFRP リブ加工方法は0.2mm程度のガラス繊維プリプレグシート（熱硬化樹脂をガラス繊維に含浸させた未硬化の状態のガラス繊維シート）をCFRP ロッドに直接巻き付け、加温養生により接着固定させる方法とし、本研究ではGD Typeの加工方法と定義した。GFRP リブの取り付け方法と取り付け後のGFRP リブを図4-1に示す。

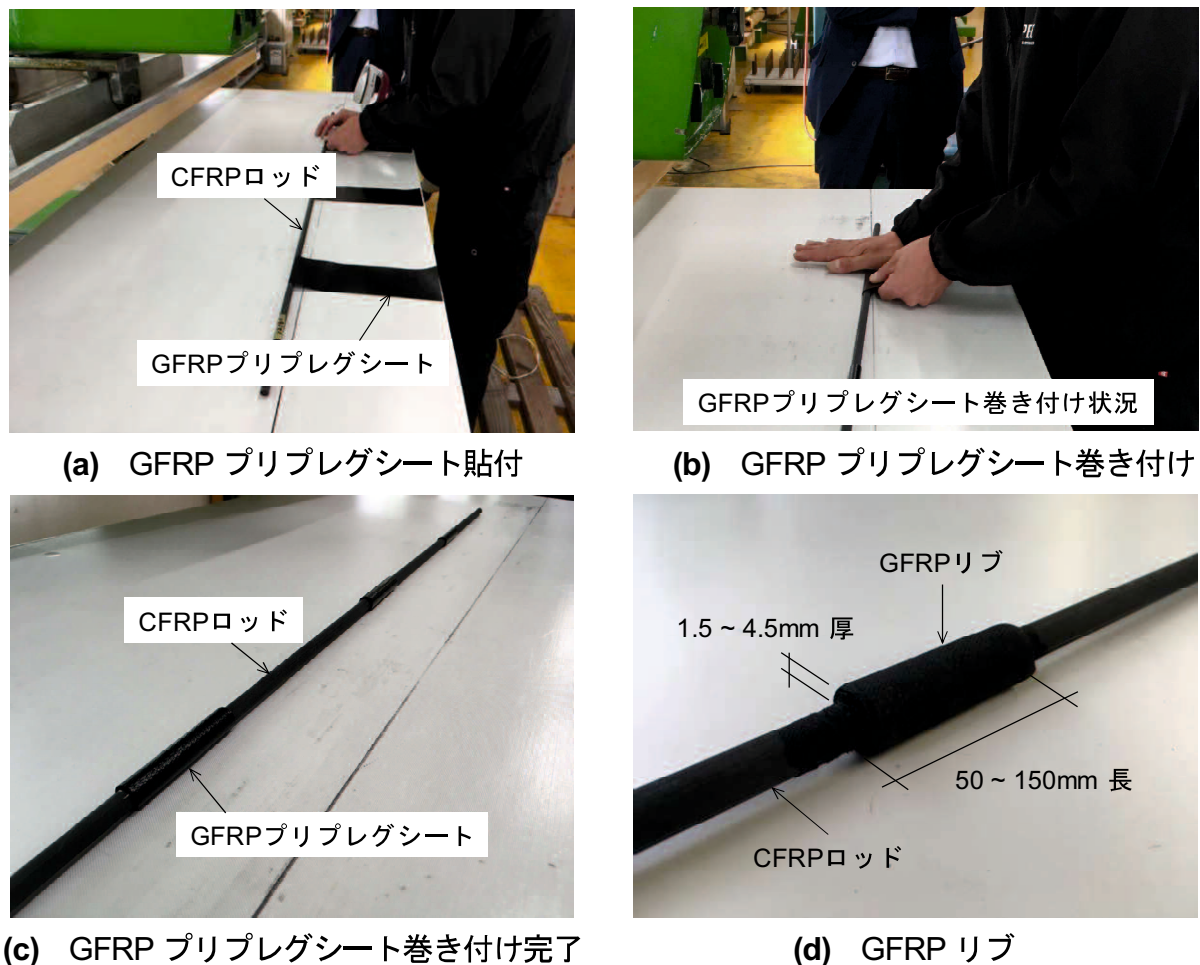


図4-1 GD Type GFRP リブ取り付け状況

4.2. 実験方法

GFRP リブの最適形状を検討するため、リブ長とリブ厚を変化させた 13 種類の試験体を製作し、3.1 項の引抜き試験と同様の試験を実施した。3.3 項で実施した引抜き試験は、付着性能を改善させた CFRP ロッドをコンクリートに埋設したが、本項では実際の使用方法に合わせるため、GFRP リブを装着させた CFRP ロッドを超早強ポリマーセメントモルタル (PCM) に埋設した。なお、3.3 項の引抜き試験で一部の試験体でコンクリートの割裂で破壊に至ったため、本項では割裂破壊を防止するため肉厚 1mm 程度の円柱鋼管を型枠代わりに使用し、円柱鋼管を取り外さずに载荷試験を実施した。試験体概要図を図 4-2 に示す。3.3 項の引抜き試験と同様に载荷側 50mm に未接着区間を設け、リブ長とリブ前後の 30mm 区間を試験区間とした。

製作した試験体一覧を表 4-1 に示す。試験パラメータは GFRP リブ長と GFRP リブ厚とし、リブ長は 50, 75, 100, 150mm の 4 種類、リブ厚は 1.5, 3.0, 4.5mm の 3 種類とした。本試験で実施した CFRP ロッドの付着性能改善方法を GD Type とし、試験体名称は 3.3 項 (図 3-2) と同様に定義した。GFRP リブを装着した試験体に加え、D13 鉄筋 (SD345) を埋設した試験体 (Control) も制作し、合計 13 種類の試験体を製作した。表 4-1 中には試験に使用した CFRP ロッド、鉄筋、モルタルの諸物性も併せて示す。

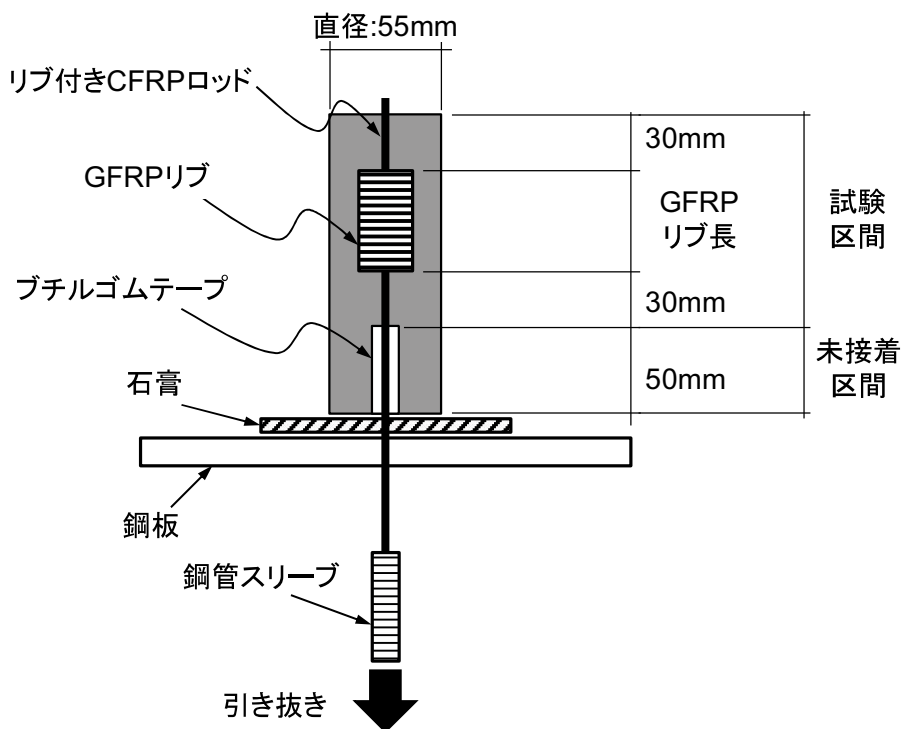


図 4-2 引抜き試験体概要

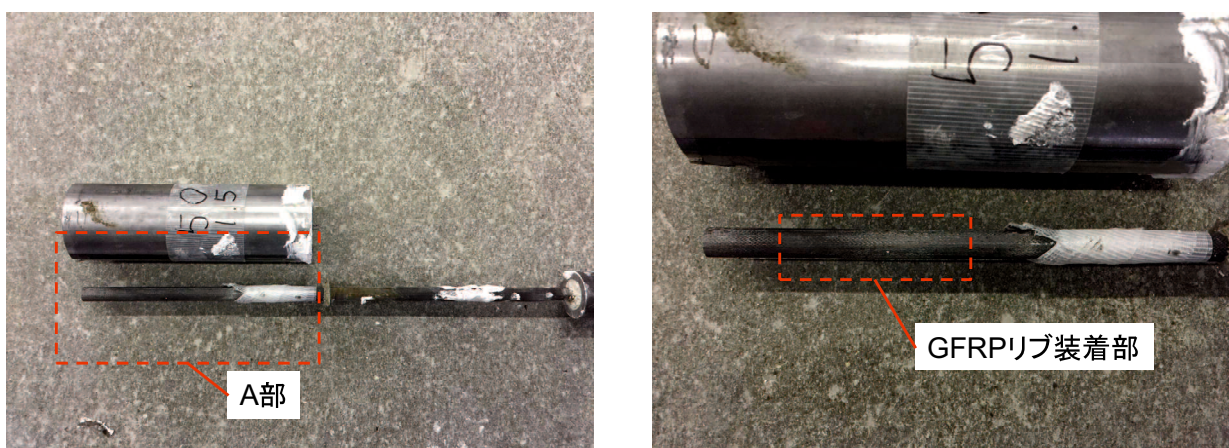
表 4-1 引抜き試験体一覧

試験体名	Type	埋設材料				GFRP リブ			試験長 (mm)	モルタル	
			直径 (mm)	σ_y (MPa)	E (GPa)	厚 (mm)	直径 (mm)	長 (mm)		σ (MPa)	E (GPa)
Control	—	SD345	13	372	—	—	—	—	110	27.3	18.4
HM10-GD1.5-50	GD	HM10	10	1270	415.0	1.5	13	50	110		
HM10-GD1.5-75	GD	HM10	10			1.5	13	75	135		
HM10-GD1.5-100	GD	HM10	10			1.5	13	100	160		
HM10-GD1.5-150	GD	HM10	10			1.5	13	150	210		
HM10-GD3.0-50	GD	HM10	10			3.0	16	50	110		
HM10-GD3.0-75	GD	HM10	10			3.0	16	75	135		
HM10-GD3.0-100	GD	HM10	10			3.0	16	100	160		
HM10-GD3.0-150	GD	HM10	10			3.0	16	150	210		
HM10-GD4.5-50	GD	HM10	10			4.5	19	50	110		
HM10-GD4.5-75	GD	HM10	10			4.5	19	75	135		
HM10-GD4.5-100	GD	HM10	10			4.5	19	100	160		
HM10-GD4.5-150	GD	HM10	10			4.5	19	150	210		

4.3. 付着耐力

本試験で実施した引抜き試験結果一覧を表 4-2 に示す。表中の付着強度は最大荷重 (P_{max}) を試験区間の CFRP ロッド表面積で除した値を、比率は鉄筋埋設試験体 (Control) の付着強度を 100%とした場合の各試験体の比率を%で示している。破壊形態はすべての試験体で CFRP ロッドが GFRP リブから抜け出す破壊であった。破壊後の CFRP ロッド抜け出し状況を図 4-3 に示す。

図 4-4 に最大荷重とリブ長の関係を示す。リブ長 75mm の試験体が最も付着耐力が高く、CFRP ロッドの破断荷重 (P_{cfu}) の 95%程度で、リブ長 75mm 以上としても付着強度が向上しないことが分かった。これは、GD タイプで取り付けた場合の GFRP リブと高弾性 CFRP ロッドの有効付着長 (GFRP リブが受けた支圧力を CFRP ロッドにせん断力として伝達する長さ) が 75mm 程度であったことから、リブ長を 75mm 以上としても付着耐力が向上しなかったものと考えられる。図 4-5 に最大荷重とリブ厚の関係を示す。本試験の範囲においては 1.5mm のリブ厚の試験体の付着耐力が最も高く、リブ厚を厚くすると耐力が低下する傾向がみられた。これは GFRP リブを厚くすると、引抜き力にともなうリブ自体のせん断変形が大きくなったことが一因と考えられる。



(a) 引抜き試験後試験体状況 (外観)

(b) A 部詳細

図 4-3 引抜き試験後試験体破壊状況

表 4-2 引抜き試験結果一覧

試験体名	GFRP リブ		試験区間 (mm)	P_{max} (kN)	付着強度		比率 (%)	破壊形式
	厚 (mm)	長 (mm)			実験値	Ave. (MPa)		
Control	—	—	110	68.99	15.38	14.99	100	抜け出し
				65.95	14.68			抜け出し
				67.13	14.94			抜け出し
HM10-GD1.5-50	1.5	50	110	52.72	15.26	16.00	107	抜け出し
				59.78	17.30			抜け出し
				53.41	15.46			抜け出し
HM10-GD1.5-75	1.5	75	135	68.50	16.15	16.51	110	抜け出し
				71.54	16.87			抜け出し
				—	—			—
HM10-GD1.5-100	1.5	100	160	63.70	12.67	13.72	91	抜け出し
				71.44	14.21			抜け出し
				71.74	14.27			抜け出し
HM10-GD1.5-150	1.5	150	210	65.56	9.94	10.53	70	抜け出し
				65.46	9.92			抜け出し
				77.42	11.74			抜け出し
HM10-GD3.0-50	3.0	50	110	51.55	14.92	14.43	96	抜け出し
				49.98	14.46			抜け出し
				48.02	13.90			抜け出し
HM10-GD3.0-75	3.0	75	135	63.90	15.07	14.93	100	抜け出し
				62.72	14.79			抜け出し
				—	—			—
HM10-GD3.0-100	3.0	100	160	62.72	12.48	12.13	81	抜け出し
				59.68	11.87			抜け出し
				60.47	12.03			抜け出し
HM10-GD3.0-150	3.0	150	210	67.62	10.25	10.18	68	抜け出し
				66.64	10.10			抜け出し
				67.13	10.18			抜け出し
HM10-GD4.5-50	4.5	50	110	45.28	13.10	12.43	83	抜け出し
				41.45	12.00			抜け出し
				42.14	12.19			抜け出し
HM10-GD4.5-75	4.5	75	135	55.86	13.17	13.77	92	抜け出し
				60.96	14.37			抜け出し
				—	—			—
HM10-GD4.5-100	4.5	100	160	65.46	13.02	12.56	84	抜け出し
				60.76	12.09			抜け出し
				—	—			—
HM10-GD4.5-150	4.5	150	210	61.74	9.36	9.78	65	抜け出し
				65.95	10.00			抜け出し
				65.95	10.00			抜け出し

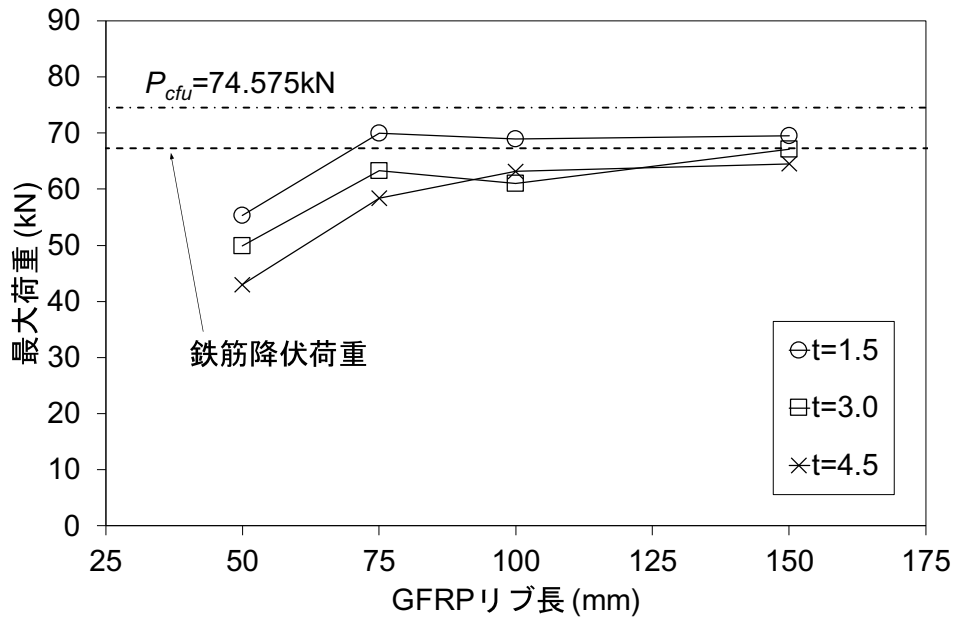


図 4-4 最大荷重—GFRP リブ長関係

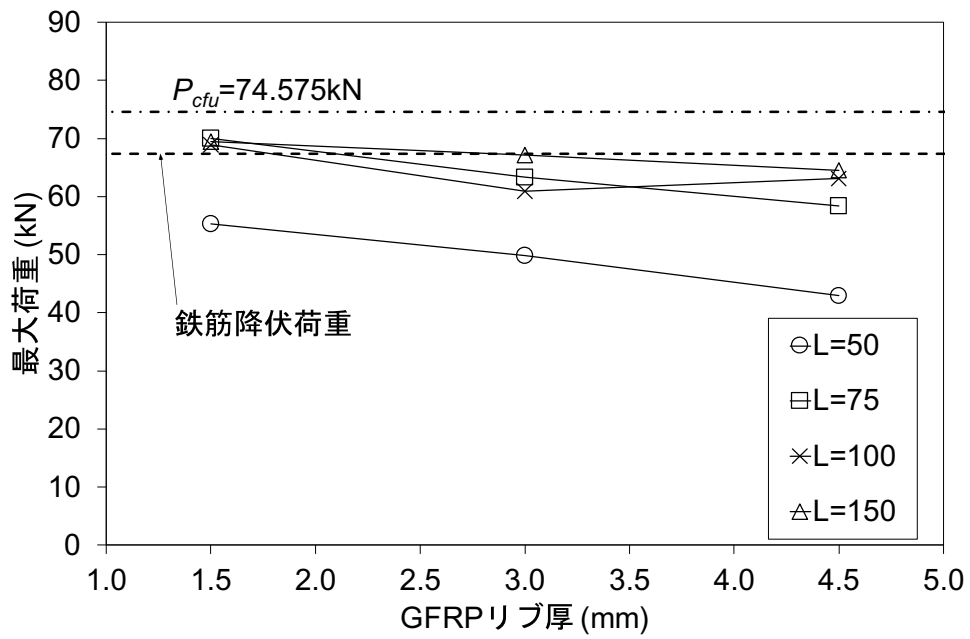


図 4-5 最大荷重—GFRP リブ厚関係

4.4. 第4章のまとめ

本章では最適な GFRP リブ形状を把握するため、ガラス繊維プリプレグシートを CFRP ロッドに直接巻き付けるリブ加工方法 (GD Type) により、リブ厚を 6.0mm 以下とした場合のリブ 1 ヶ所当たりの付着耐力を引抜き試験により調べた。本章で実施した試験により得られた知見を以下に示す。

<第4章で実施した試験 (引抜き試験) で得られた主な知見>

- GD Type で製作した GFRP リブの場合、1.5mm 厚のリブ厚としても GFRP リブと CFRP ロッドの付着切れにより最大耐力が決定し、使用するガラス繊維プリプレグシートの付着強度で CFRP ロッドの付着耐力が決定されることが分かった。
- 本試験で使用したガラス繊維プリプレグシートと超早強 PCM (圧縮強度 : 27MPa 程度) を用いた場合、GFRP リブを 75mm 以上としても付着耐力が向上しないことが分かった。
- GFRP リブ厚を 1.5mm 以上に厚くすると、GFRP リブ自体のせん断変形により付着耐力が低下することが分かった。
- GFRP リブ厚を 1.5mm、リブ長を 75mm とすることで鉄筋の付着強度と同等以上の強度が得られることが分かった。

<第4章で得られた知見に基づく検討課題>

前述の通り、本試験で使用したガラス繊維プリプレグシートと超早強 PCM を用いた場合、リブ厚 1.5mm、リブ長 75mm 程度で鉄筋の付着耐力以上、CFRP ロッドの破断耐力の 95%程度 の付着耐力が得られることが分かった。第5章で、この GFRP リブを有する CFRP ロッドを RC はりの補強材に使用した場合の付着性能を検証し、第6章で RC 張出し床版補強に使用した場合の適用性について検討することとした。

第5章

GFRP リブを装着した RC はりの曲げ性能

5.1. はじめに

第4章にて、リブ厚1.5mm、リブ長75mm程度で鉄筋の付着耐力以上、CFRPロッドの破断耐力の95%程度の付着耐力が得られることが分かった。本章ではRC構造物の補強に使用した場合の部材性能を調べるため、厚さ4.5mm以下のGFRPリブを装着したCFRPロッドで補強したRCはりの曲げ性能を静的載荷試験および定点繰返し載荷試験において調べた（**図5-1**）。

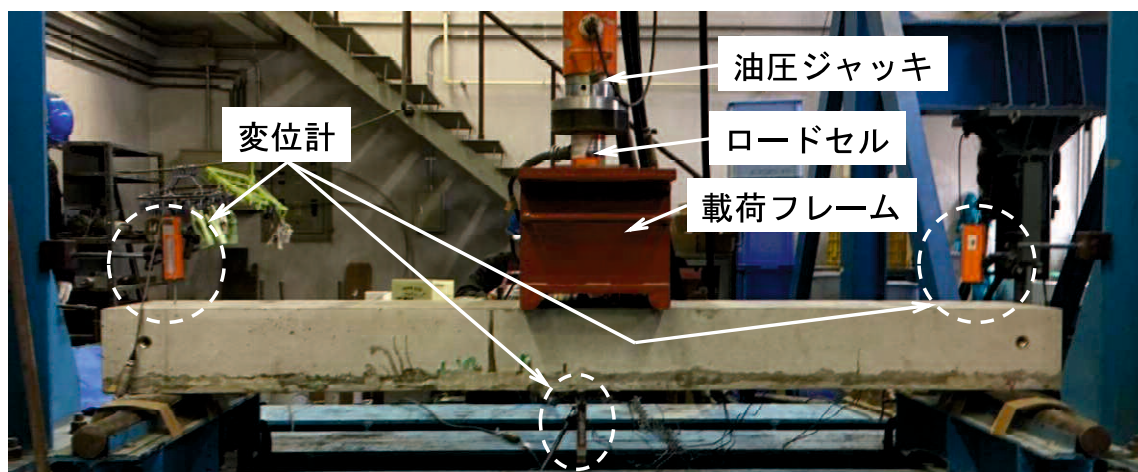


図5-1 RCはり載荷試験状況

5.2. 使用材料および試験体作製

図5-2 に試験体製作手順の写真を示す。試験体の製作方法は第3章で実施したRCはりの製作方法と概ね同じであるが、本章では実施工により近い状態で試験を行うため、第4章の試験と同様に超早強PCM内にCFRPロッドを埋設した。通常、床版上面を超早強PCMで断面修復をする際は、モルタルのはく離を抑制するため、打継面に接着増強用エポキシ樹脂を塗布することが一般的である。本試験においても一般的に使用されている打継用エポキシ樹脂を塗布することとした（**図5-2(c)**）。また、第3章の試験結果では打継部に水平方向に入るひび割れを起点としたせん断破壊が発生しており、打継面に局部的に大きなせん断力が作用していることがうかがえた。本章では打継界面のせん断抵抗に対する安全性も調べるため、かぶりコンクリート除去時に引張鉄筋を露出させず、表層モルタルのみ小型チップパーでハツリ取り、打継面は比較的平滑に仕上げた（**図5-2(b)**）。

GFRPリブ長は50mm、75mmの2種類、リブ厚は1.5mm、3.0mm、4.5mmの3種類とし、リブ間隔は200mm、300mmの2種類とした。リブ長、リブ厚、リブ間隔の組み合わせは**表5-1**に示す5種類とした。製作した試験体は静的載荷試験用に10体、繰返し載荷試験用に5体製作した。**表5-2**、**表5-3**にRCはりの試験体一覧と使用した材料の諸物性を示す。なお、コンクリート、モルタルの物性値は材齢28日の試験結果を示している。



(a) ベースコンクリート打設



(b) 表層かぶりコンクリート除去



(c) 打継用エポキシ接着剤塗布



(d) 超早強ポリマーセメントモルタル打設

図 5-2 RC はり試験体作成状況

表 5-1 GFRP リブ寸法

Type	CFRP ロッド			GFRP リブ		
	公称径	引張強度	ヤング係数	厚さ	長さ	間隔
A	8.0 mm	1310 MPa	468 GPa	N/A	N/A	N/A
B	8.0 mm	1310 MPa	468 GPa	4.5 mm	50 mm	200 mm
C	8.0 mm	1310 MPa	468 GPa	3.0 mm	50 mm	200 mm
D	8.0 mm	1553 MPa	455 GPa	1.5 mm	50 mm	200 mm
E	8.0 mm	1553 MPa	455 GPa	1.5 mm	75 mm	300 mm

表 5-2 RC はり試験体一覧（静的載荷試験）

No.	試験体名	コンクリート		モルタル		鉄筋			CFRP Type
		圧縮強度 MPa	ヤング係数 GPa	圧縮強度 MPa	ヤング係数 GPa	公称径 mm	引張強度 MPa	ヤング係数 GPa	
M1	control	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	N/A
M2	control	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	N/A
M3	HM8	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	A
M4	HM8-GD4.5-50-200	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	B
M5	HM8-GD3.0-50-200	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	C
M6	HM8-GD3.0-50-200	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	C
M7	HM8-GD1.5-50-200	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	D
M8	HM8-GD1.5-50-200	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	D
M9	HM8-GD1.5-75-300	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	E
M10	HM8-GD1.5-75-300	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	E

表 5-3 RC はり試験体一覧（繰返し載荷試験）

No.	試験体名	コンクリート		モルタル		鉄筋			CFRP Type
		圧縮強度 MPa	ヤング係数 GPa	圧縮強度 MPa	ヤング係数 GPa	公称径 mm	引張強度 MPa	ヤング係数 GPa	
F1	HM8-GD3.0-50-200	33.1	28.4	42.5	28.0	6.0	371	206	C
F2	HM8-GD1.5-50-200	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	D
F3	HM8-GD1.5-50-200	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	D
F4	HM8-GD1.5-75-300	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	E
F5	HM8-GD1.5-75-300	34.0	36.5	50.1	26.9	6.0	381	206	E

5.3. 載荷方法および計測方法

試験体寸法図を図5-3に示す。第3章で実施したRCはりの載荷試験ではCFRPロッドで補強することで曲げ耐力が向上し、せん断破壊する結果となったため、本章の試験でははり高を低くし、引張鉄筋およびCFRPロッド径を細くすることとした。断面寸法は250mm幅×160mm高、引張鉄筋およびCFRPロッドは圧縮縁からそれぞれ110mm、150mmとした。支間長1650mm、純曲げ区間250mm、せん断スパン長700mmは第3章の試験体寸法と同様とした。

計測項目は載荷荷重、支間中央および支点部の変位、圧縮側コンクリート、鉄筋（圧縮側/引張側）、CFRPロッドのひずみとした。せん断スパン部の挙動を把握するため引張鉄筋、CFRPロッドのひずみは、支間中央部のほかせん断区間も3断面計測を行った。

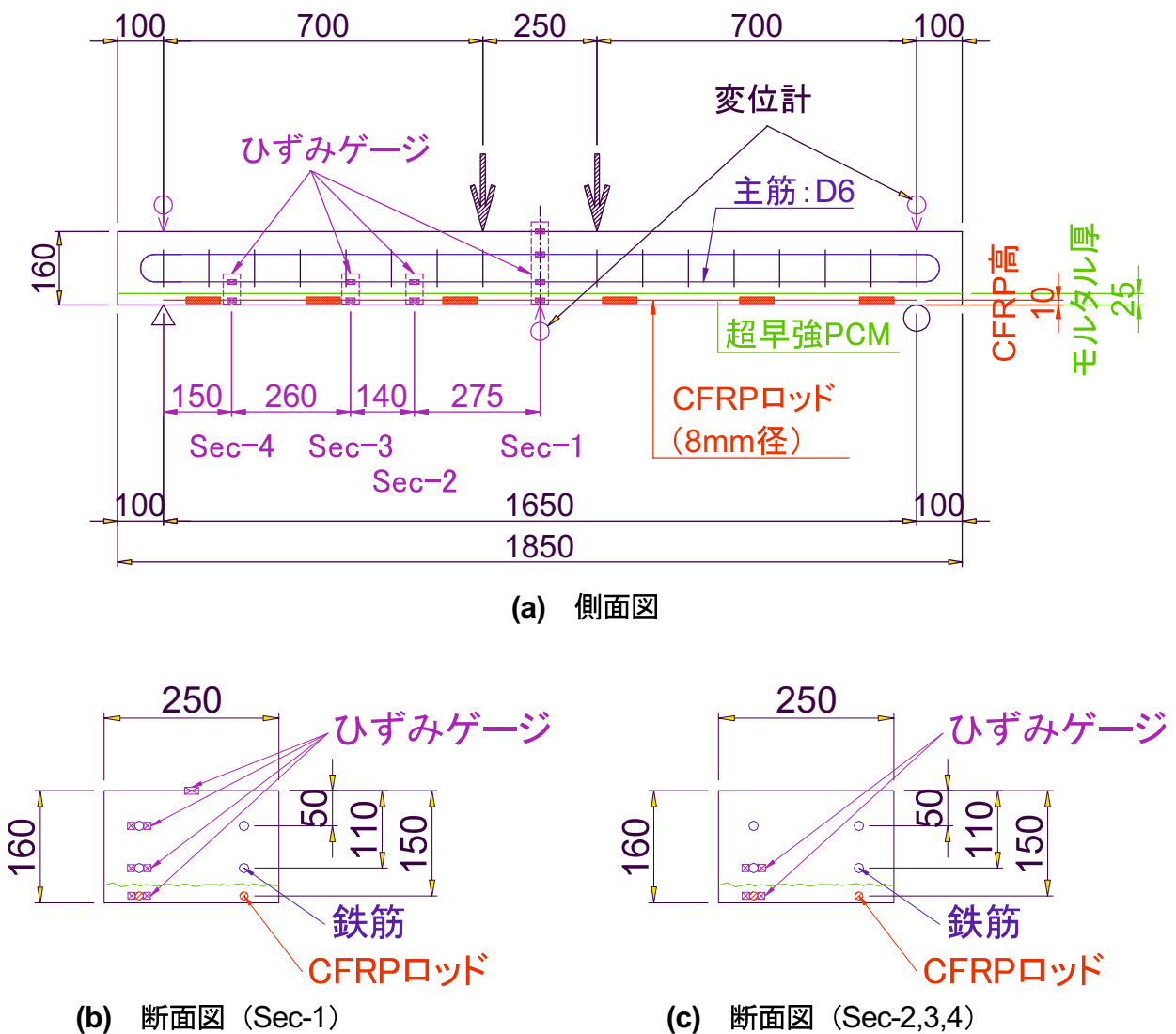


図5-3 試験体寸法および計測位置

5.4. 静的曲げ試験による補強効果

5.4.1. 最大耐力および破壊性状

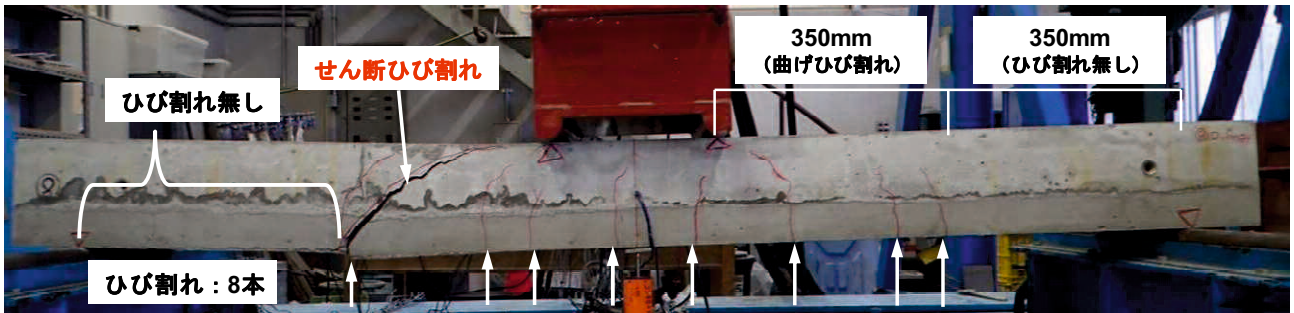
試験結果一覧を表 5-4 に示す。表中の P_{sy} は通常の曲げ理論を元に計算した鉄筋降伏荷重を表し、 P_{cfr} は表 5-2 に示す CFRP ロッド引張強度作用時の計算上の破壊荷重を示す。 P_{su} はコンクリート標準示方書に準拠した RC はりのせん断耐力を示している。

無補強試験体の Control (M1, M2) は鉄筋降伏後圧縮側コンクリートの圧縮破壊で終局に至る結果となった。CFRP ロッドの破断ひずみは 2700×10^{-6} 以上と鉄筋の降伏ひずみ (1700×10^{-6}) の 1.5 倍以上あるため、CFRP ロッドに十分な付着強度がある場合は CFRP 鉄筋降伏耐力以上の耐力が得られると考えられる。しかしながら、GFRP リブのない試験体 (M3) の最大耐力は計算鉄筋降伏耐力 (P_{sy}) の 85%程度であった。破壊形態に関しては M3 試験体のみせん断破壊しており、CFRP ロッドに十分な付着耐力がなかったため、せん断スパン内で CFRP ロッドの抜け出しが発生したと考えられる。GFRP リブを装着した M4-M10 試験体の最大耐力は、CFRP ロッド配置位置、鉄筋位置の誤差により同一形状の試験体であっても 10%程度のばらつきはあるものの、すべて計算上の鉄筋降伏荷重以上の耐力を示した。

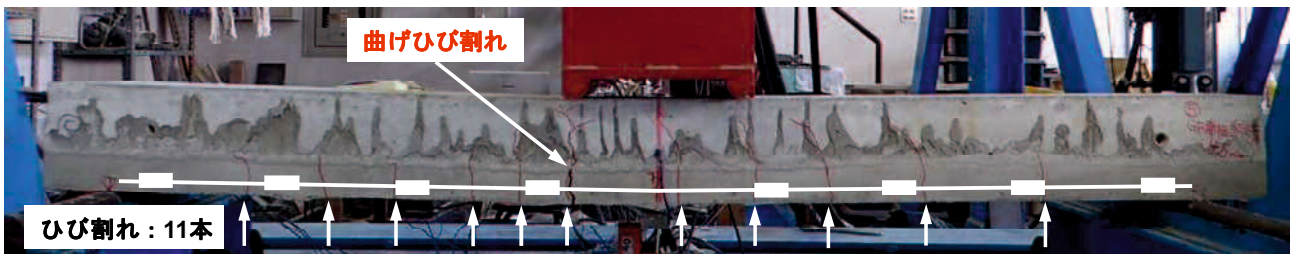
表 5-4 静的載荷試験結果一覧

No.	試験体名	CFRP Type	計算値			実験値 (kN)	破壊形態
			P_{sy} (kN)	P_{cfr} (kN)	P_{su} (kN)		
M1	control	N/A	6.97	N/A	110.58	15.99	曲げ破壊
M2	control	N/A	6.97	N/A	110.58	15.16	曲げ破壊
M3	HM8	A	54.17	53.59	110.58	45.82	せん断破壊
M4	HM8-GD4.5-50-200	B	54.17	53.59	110.58	56.48	曲げ破壊
M5	HM8-GD3.0-50-200	C	54.17	53.59	110.58	57.64	曲げ破壊
M6	HM8-GD3.0-50-200	C	54.17	53.59	110.58	58.81	曲げ破壊
M7	HM8-GD1.5-50-200	D	53.84	64.64	110.81	65.84	曲げ破壊
M8	HM8-GD1.5-50-200	D	53.84	64.64	110.81	59.84	曲げ破壊
M9	HM8-GD1.5-75-300	E	53.84	64.64	110.81	58.05	曲げ破壊
M10	HM8-GD1.5-75-300	E	53.84	64.64	110.81	62.84	曲げ破壊

図 5-4 に GFRP リブを装着しない M3 試験体と GFRP リブを装着した試験体として M5 試験体の破壊状況の写真を示す。M3 試験体はせん断スパンの端部 350mm 区間にひび割れが発生しておらず、最端部のひび割れが荷重点方法に進展してせん断破壊していることが分かる。一方曲げ破壊した M5 試験体は概ね等間隔で曲げひび割れが発生し、荷重点直下のひび割れが大きく進展して曲げ破壊していることが分かる。これは、M3 試験体に用いたロッドはリブを装着していないため、せん断区間の端部 350mm の範囲で CFRP ロッドの抜け出しが発生し、図 5-5 (a)に示すような CFRP ロッドの抜け出しに伴うせん断破壊が発生したものと考えられる。一方 GFRP リブを装着した試験体は図 5-5 (b)に示すようにせん断区間で CFRP ロッドの抜け出しが発生しないため、等曲げ区間の曲げひび割れが進展し、CFRP ロッドの破断を伴う曲げ破壊となったと考えられる。図 5-5 (b)中には GFRP リブ装着位置も示している。リブとリブの間にも複数本のひび割れが発生しており、リブを薄くすることでひび割れが分散して発生していることが分かる。

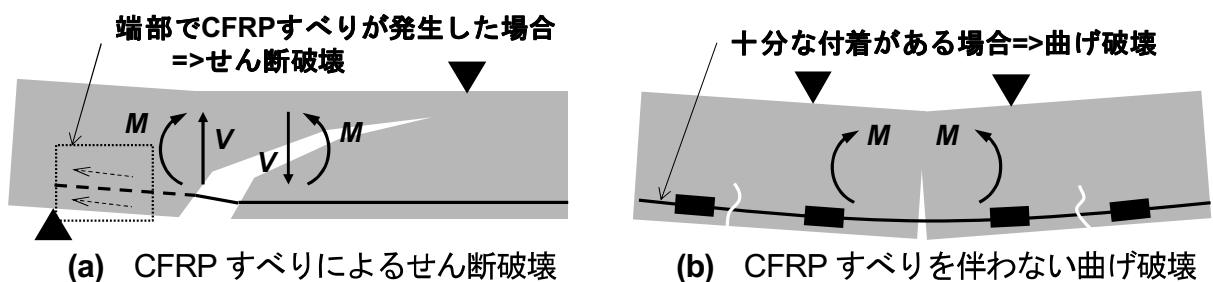


(a) M3 試験体破壊状況 (せん断破壊)



(b) M5 試験体破壊状況 (曲げ破壊)

図 5-4 RC はり試験体破壊状況



(a) CFRP すべりによるせん断破壊

(b) CFRP すべりを伴わない曲げ破壊

図 5-5 破壊機構

5.4.2. たわみ性状

図 5-4 に各試験体の荷重－変位関係を示す．なお，同一条件で 2 体製作した M2, M6, M8, M10 試験体に関してはもう一方の試験体と同様の傾向であったため，代表となる 1 体 (M1, M5, M7, M9) のみを表示した．また， P_{s-y} は表 5-4 に示す計算上の鉄筋降伏荷重 (M3－M6) を示している．

M7, M9 試験体はひび割れ発生が遅かったため，他の試験体と比較し支間中央変位は小さくなったものの，ひび割れ発生後の変位勾配は他の GFRP リブ装着試験体 (M4－M6) と同程度で破壊荷重まで線形的に増進し，計算上の鉄筋降伏耐力 (P_{s-y}) 以上の耐力を示した．一方，GFRP リブを装着しない試験体 (M3) は，ひび割れ発生直後の勾配は GFRP リブ装着試験体と同程度のたわみ勾配であったが，40kN 程度で荷重が減少し徐々にたわみが増加しており，CFRP ロッドの抜け出しが発生していることが分かる．

以上の結果より 6.0mm 未満のリブ厚でも鉄筋降伏耐力以上の付着性能を有することが分かった．

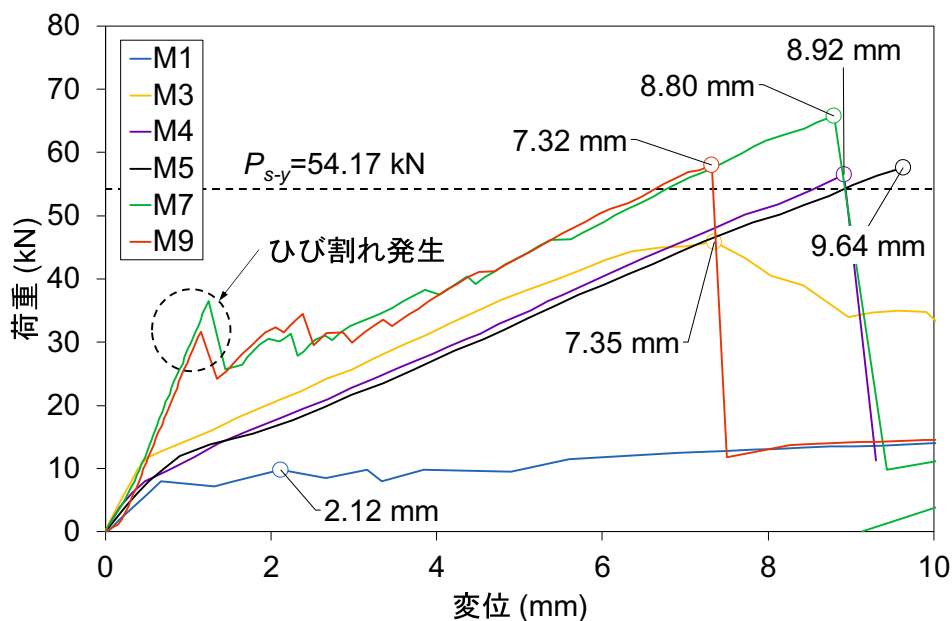
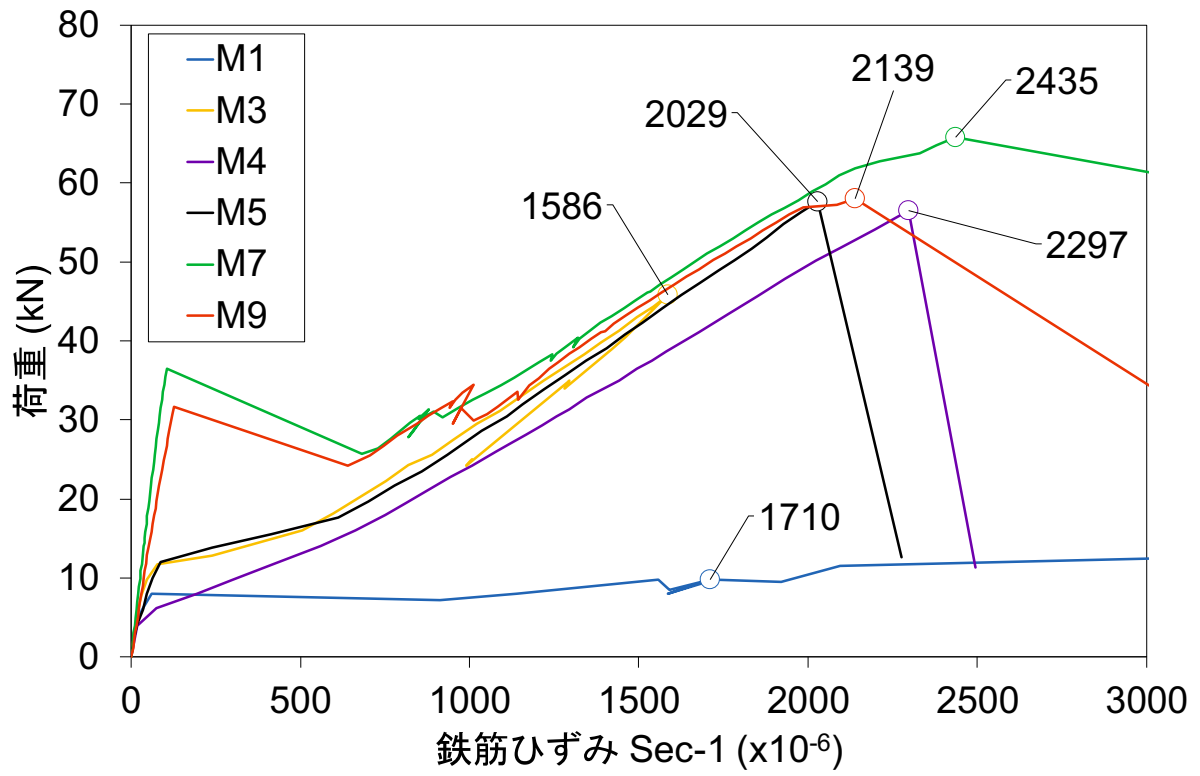


図 5-4 荷重－変位関係

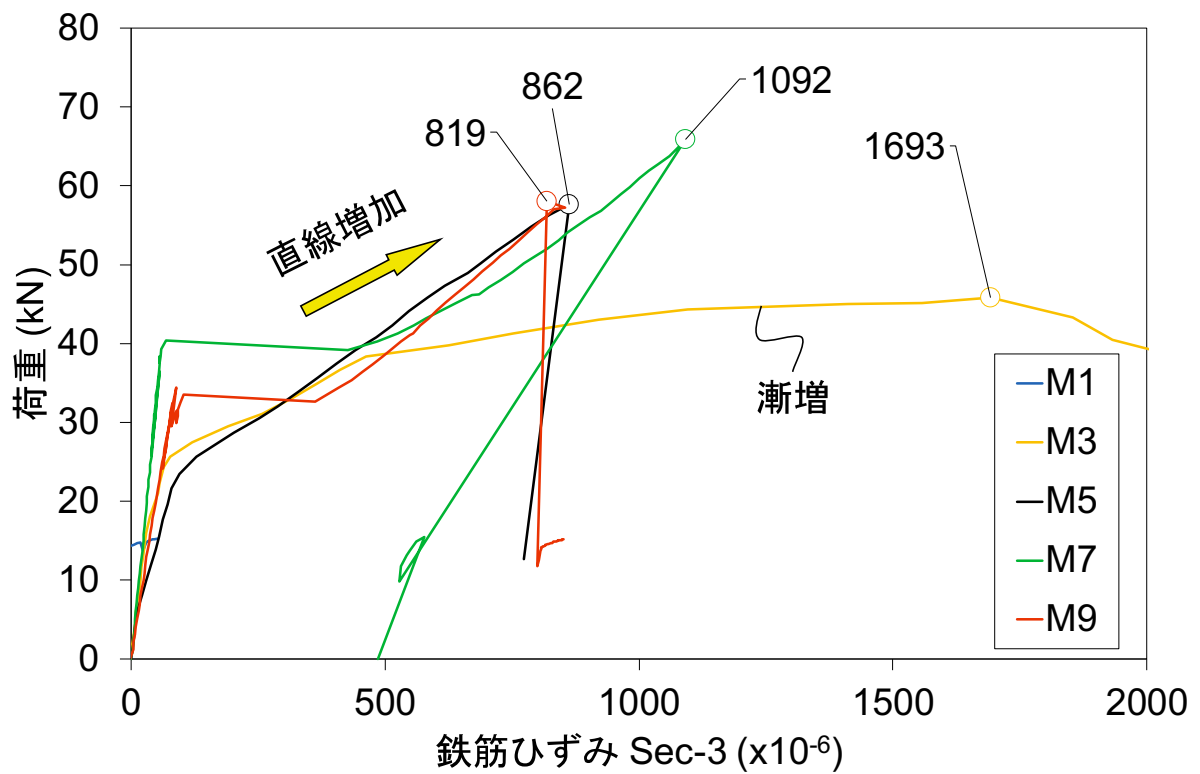
5.4.3. ひずみ性状

図 5-5 (a)に支間中央断面 (Sec-1) での荷重—鉄筋ひずみ関係, 図 5-5 (b)にせん断スパン中央断面 (Sec-3) での荷重—鉄筋ひずみ関係, 図 5-6 (a)に支間中央断面 (Sec-1) での荷重—CFRP ロッドひずみ関係, 図 5-6 (b)にせん断スパン中央断面 (Sec-3) での荷重—CFRP ロッドひずみ関係をそれぞれ示す. なお, M4 試験体の Sec-3 断面の鉄筋ひずみはひずみゲージの断線によりデータが得られなかったため, 記載していない. 鉄筋ひずみ, CFRP ロッドひずみともに Sec-1 断面では直線勾配となっているが, Sec-3 断面では GFRP リブを装着しない M3 試験体は荷重の増加とともにひずみが大きくなり, 徐々にひずみ勾配が変化していることが分かる. M3 試験体は GFRP リブを装着していないため, せん断スパン内で CFRP ロッドの抜け出しが発生したものと考えられる.

図 5-7 (a)に Sec-1 断面での最大荷重時の鉄筋ひずみと CFRP ロッドひずみを, 図 5-7 (b)に Sec-3 断面での最大荷重時の鉄筋ひずみと CFRP ロッドひずみを取りまとめたものを示す. なお, 図 5-7 (b)中の M4 試験体鉄筋ひずみに関してはひずみゲージの断線によりデータが得られなかったため, 記載していない. また, グラフ中には鉄筋の降伏ひずみと, 表 5-3 に示す引張強度とヤング係数から算出した CFRP ロッドの破断ひずみも併記している. GFRP リブを装着した M4~M10 試験体はすべて鉄筋の降伏ひずみ以上の鉄筋ひずみを示した. また, CFRP ロッドひずみに関しては M4, M5, M6 試験体は破断ひずみ以上となり, M9 試験体に関しても破断ひずみの 80%程度となった. Sec-1 断面ではすべての試験体で鉄筋ひずみより CFRP ロッドのひずみの方が 30~50%程度大きくなる結果となったが, Sec-3 断面では M3 試験体は鉄筋ひずみと CFRP ロッドひずみが概ね同程度となり, CFRP ロッドの抜け出しにより鉄筋の荷重負担割合が大きくなったものと考えられる.

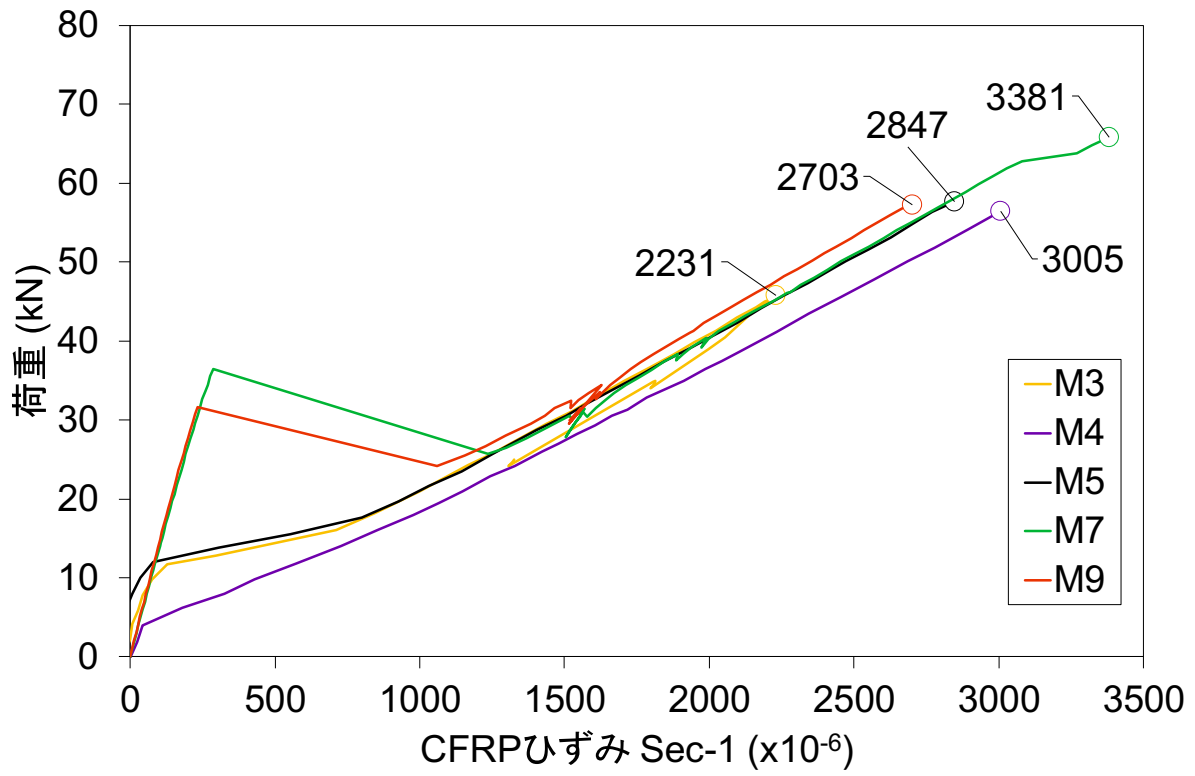


(a) Sec-1 断面

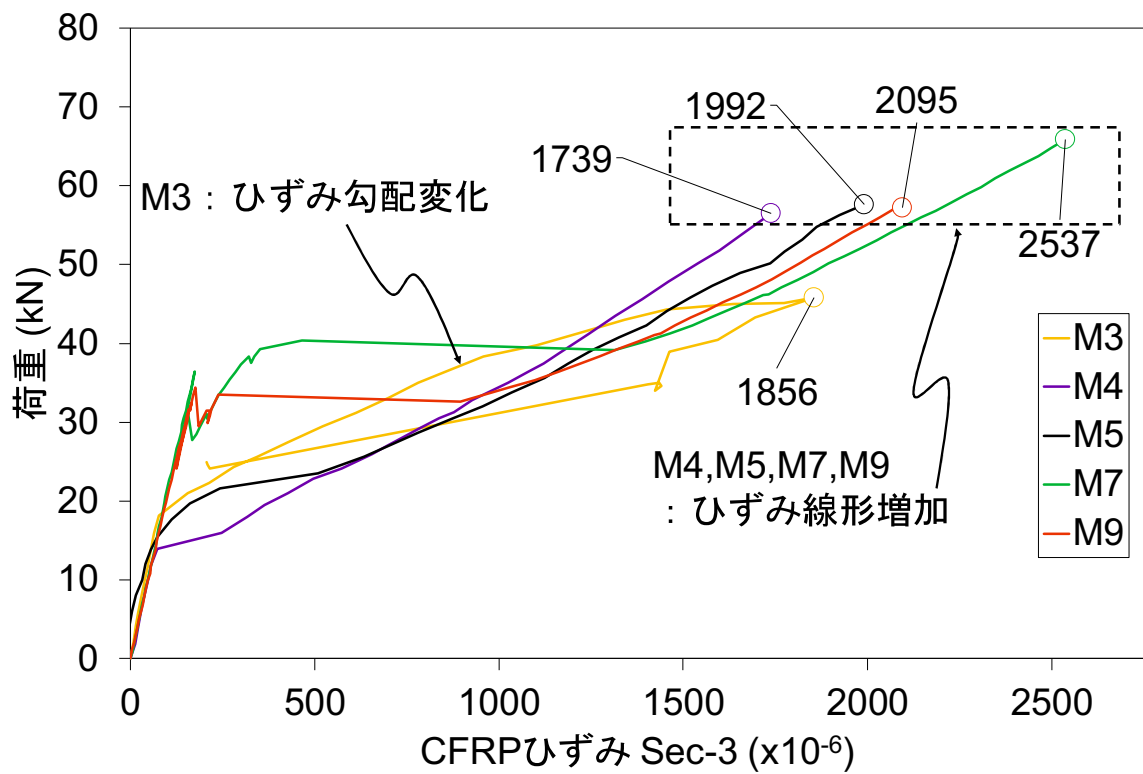


(b) Sec-3 断面

図 5-5 荷重—鉄筋ひずみ関係

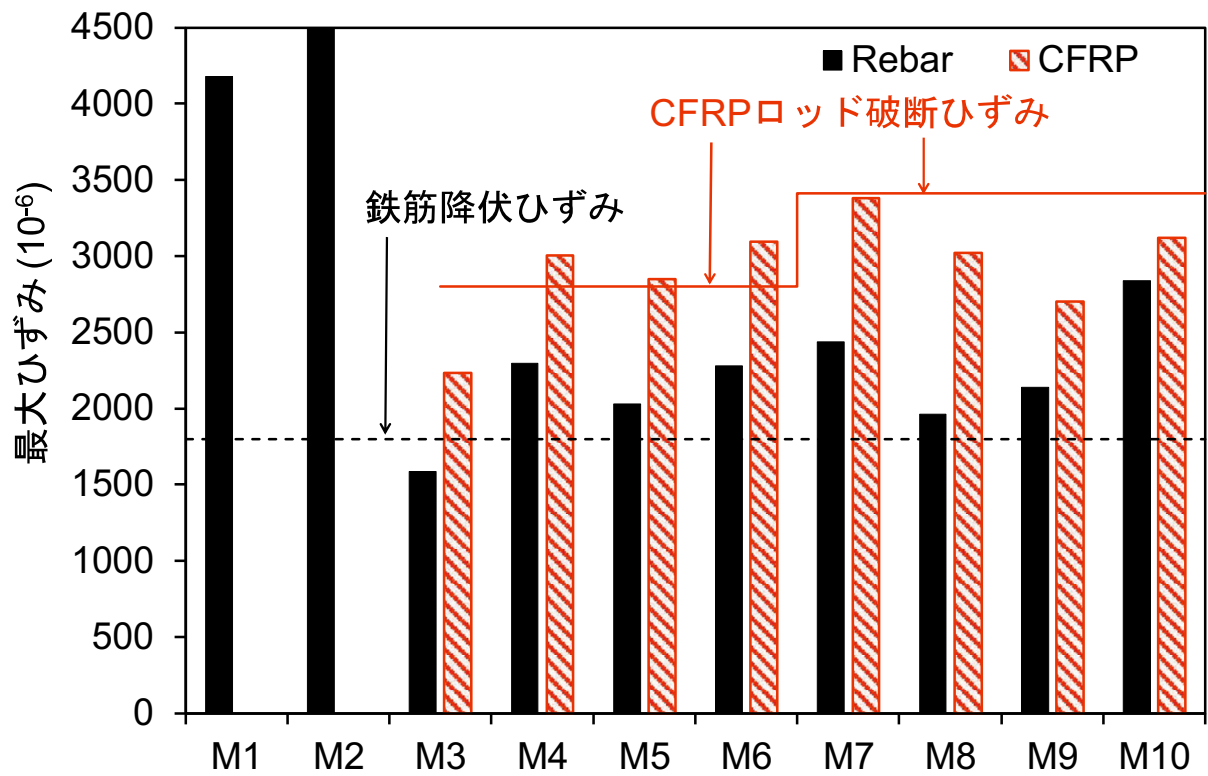


(a) Sec-1 断面

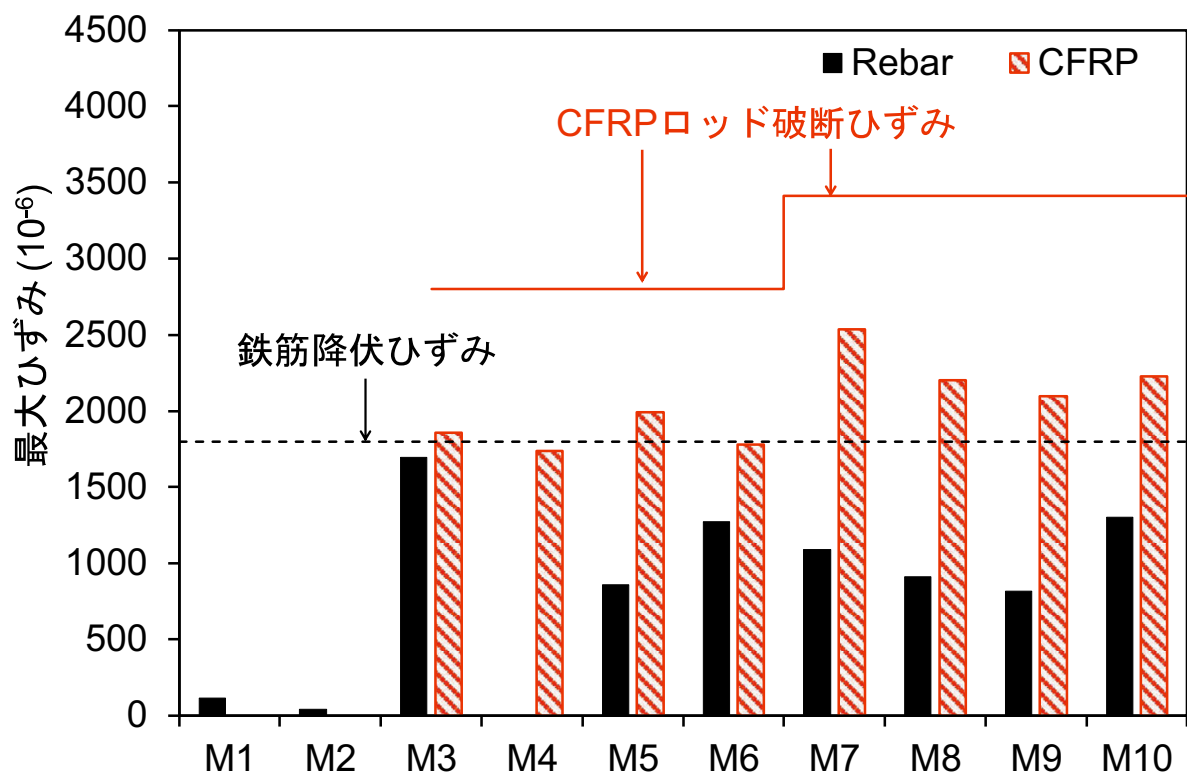


(b) Sec-3 断面

図 5-6 荷重-CFRP ひずみ関係



(a) Sec-1 断面



(b) Sec-3 断面

図 5-7 最大荷重時鉄筋ひずみおよび CFRP ロッドひずみ

5.5. 繰返し載荷試験による疲労耐久性能

5.5.1. 繰返し荷重および繰返し回数

各試験体の載荷荷重の設定は 5.4 項で実施した静的載荷試験により得られた静的耐力の 33~75%の範囲で設定した。なお、静的耐力の 33.7%を繰返し荷重の上限荷重に設定した F1 試験体は計算上の鉄筋応力度が 140MPa 程度となり、道路橋示方書で規定されている鉄筋許容応力度レベルの荷重となっている。静的耐力の 75%を上限荷重とした F3, F4 試験体は計算上の鉄筋降伏耐力の 80%程度の荷重となっている。

F3 試験体に関しては載荷装置の故障により繰返し載荷中に異常荷重が作用したため 14 万回で破壊する結果となったが、その他の試験体は 200 万回まで破壊することはなかった。200 万回繰返し載荷で破壊に至らなかった試験体 (F1, F2, F4, F5) に関しては繰返し荷重による耐力低下の有無を調べるため、単調載荷試験により残存耐力を調べた。残存耐力試験結果に関しては 5.6 項にて述べる。

表 5-4 繰返し載荷荷重および載荷回数

No.	試験体名	CFRP Type	静的耐力 kN	繰返し荷重				繰返し回数 万回	残存耐力 kN	破壊形式
				最小荷重		最大荷重				
				kN	%	kN	%			
F1	HM8-GD3.0-50-200	C	58.2	5.8	10.0%	19.6	33.7%	200	55.6	曲げ破壊
F2	HM8-GD1.5-50-200	D	62.8	6.3	10.0%	22.0	35.0%	200	67.8	曲げ破壊
F3	HM8-GD1.5-50-200	D		6.3	10.0%	47.1	75.0%	14	—	—
F4	HM8-GD1.5-75-300	E	60.4	6.0	10.0%	36.3	60.0%	200	64.8	曲げ破壊
F5	HM8-GD1.5-75-300	E		6.0	10.0%	45.3	75.0%	200	58.8	せん断破壊

5.5.2. 繰返し载荷による疲労耐久性能

図 5-8 に繰返し载荷による支間中央たわみの変化を示す。なお、F1 試験体と F2 試験体は載荷荷重が概ね同程度であったことから、代表して F2 試験体のみ示している。また、繰返し荷重の静的耐力との比率は試験体名と併せて括弧内に併記してある。

載荷開始直後は繰返し荷重によりたわみが大きく増進したが、20 万回を境に概ね一定となり、20 万回以降は繰返し载荷による疲労の蓄積でたわみが徐々に増加する結果となった。20 万回載荷時から 200 万回の載荷終了時までのたわみ増加の割合は F2 試験体で 28%、F4 試験体で 21%、F5 試験体で 22% となり、載荷荷重によらず 20~30% 程度の増加量となった。

図 5-9 に圧縮縁コンクリートのひずみ変化を、図 5-10 に引張鉄筋のひずみ変化を、図 5-11 に CFRP ロッドのひずみ変化を示す。静的耐力の 75% の荷重で繰返し载荷を実施した F5 試験体は 100~200 万回の間鉄筋が降伏したため、鉄筋ひずみが大きく減少する結果となったが、CFRP ロッドひずみに関しては 100 万回以降も概ね一定の値となった。配置鉄筋が D6 で細径であったため、鉄筋が負担している荷重が小さかったため、CFRP ロッドのひずみに与える影響が小さかったためと考えられる。F5 試験体の 100 万回以降の鉄筋ひずみ変化を除き、すべての試験体の鉄筋、CFRP ロッドのひずみ変化は 20 万回以降概ね一定の値となっているが、圧縮縁コンクリートひずみは 20 万回以降も徐々に増加しており、20~30% 程度の増加量となっている。20 万回以降のたわみ増加量とコンクリート圧縮ひずみの増加量は概ね一致しており、20 万回以降のたわみ増加は、繰返し荷重によるコンクリートの損傷が要因と考えられる。

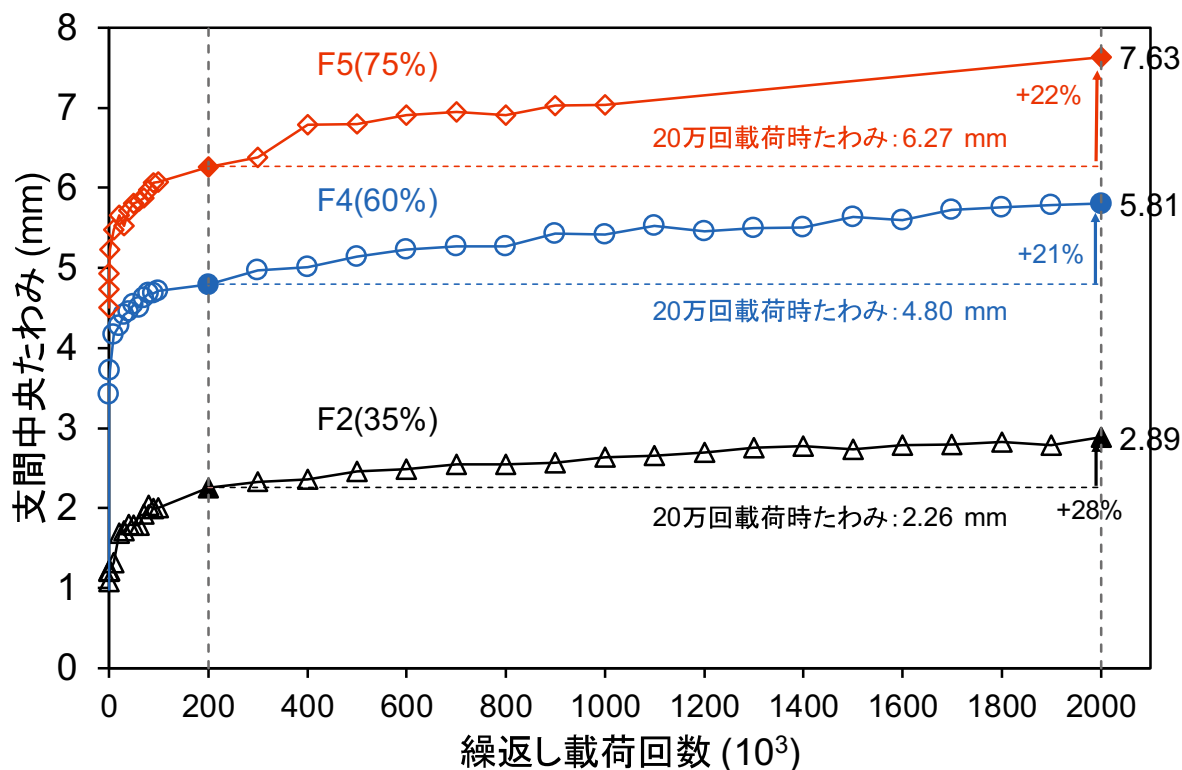


図 5-8 繰返し载荷によるたわみ変化

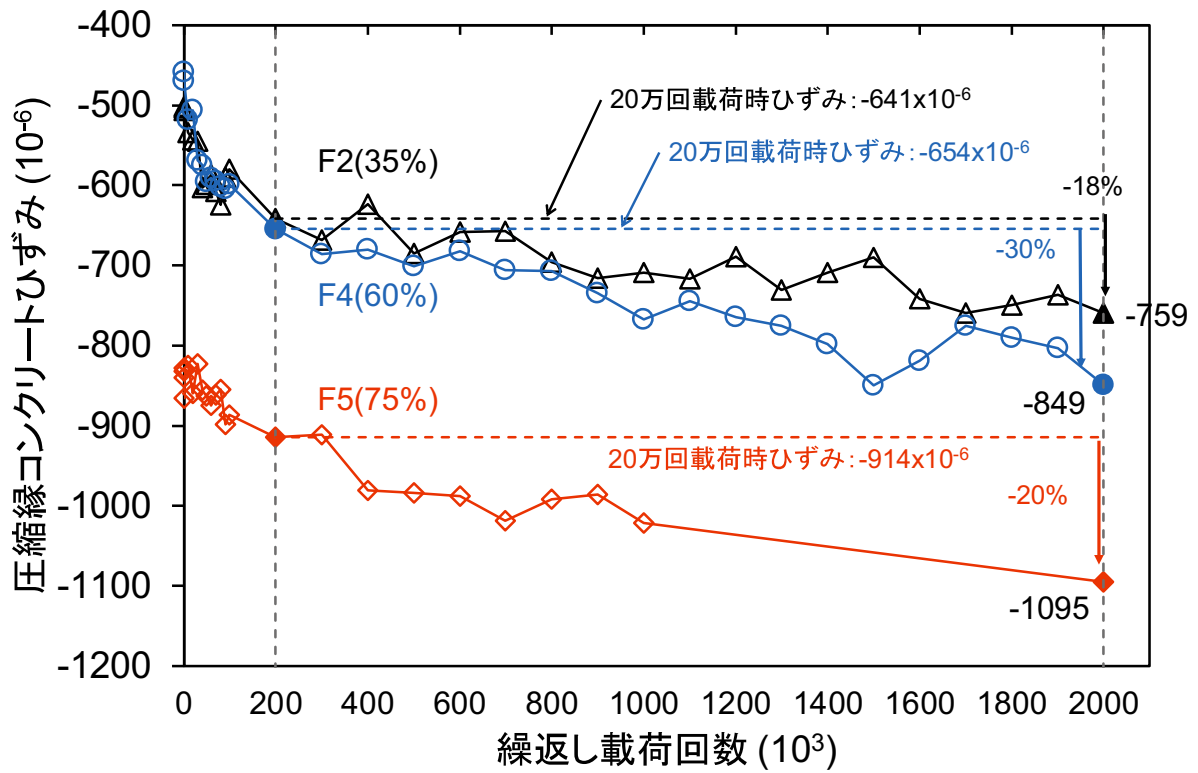


図 5-9 繰返し载荷による圧縮縁コンクリートひずみ変化

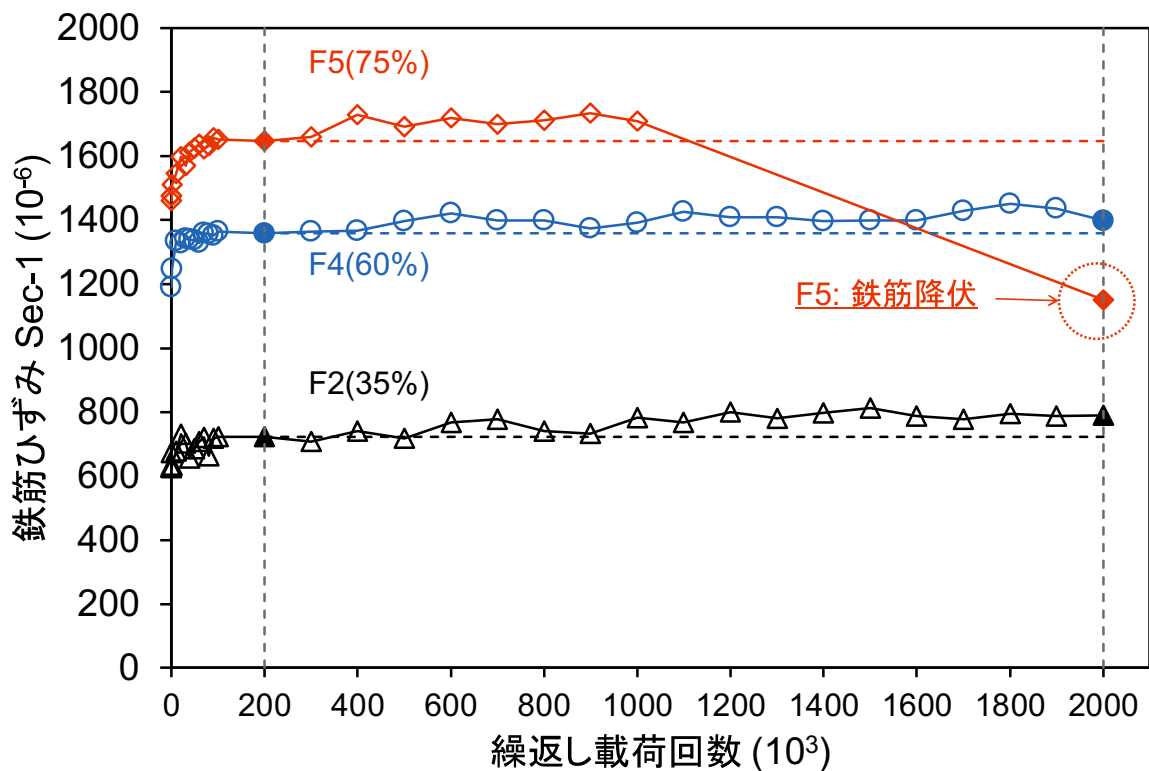


図 5-10 繰返し载荷による引張鉄筋ひずみ変化

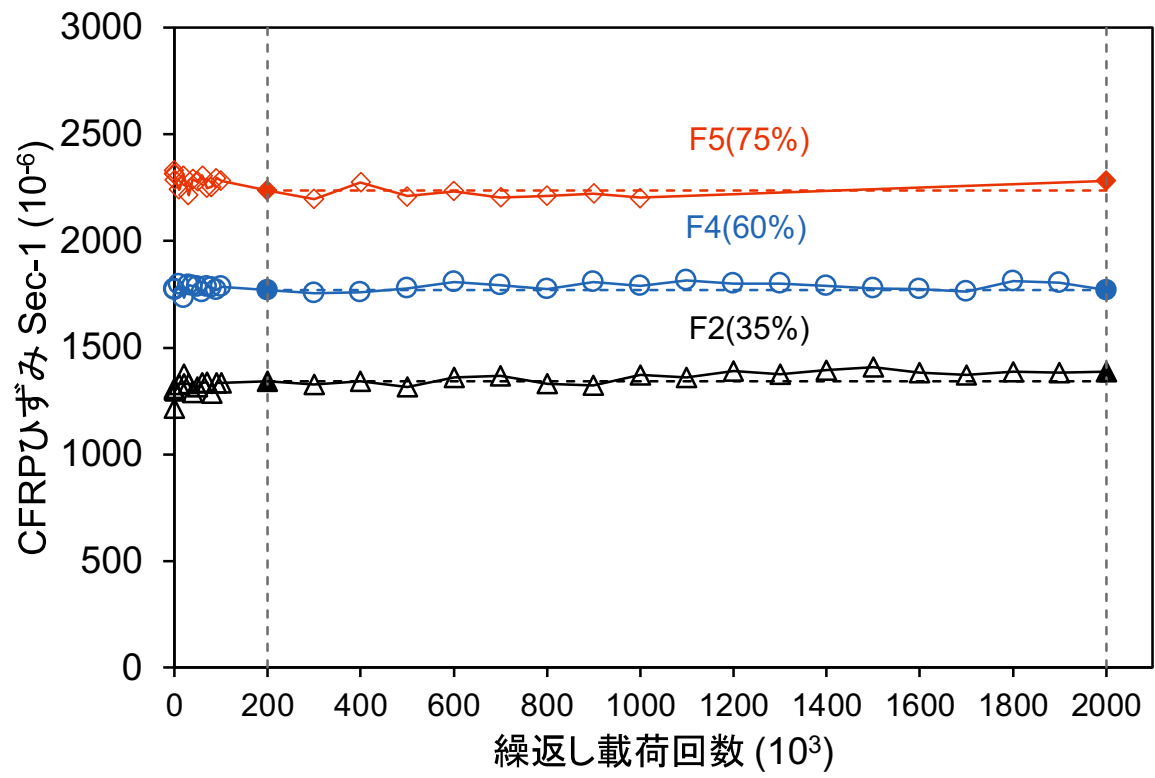


図 5-11 繰返し载荷によるCFRP ロッドひずみ変化

5.6. 繰返し载荷試験後の残存耐力試験

5.6.1. 残存耐力

200 万回载荷で破壊に至らなかった試験体 (F1, F2, F4, F5) の残存耐力試験結果を**図 5-12** に示す. 図中の白抜きは同形状のリブを装着した静的载荷試験結果を示している. 静的耐力試験結果ではリブを装着した試験体はすべて CFRP ロッドの破断を伴う曲げ破壊であったが, 残存耐力試験では繰返し荷重が最も大きかった F5 試験体 (静的耐力の 75%の荷重で繰返し载荷) はせん断破壊する結果となった. せん断破壊した要因は繰返し载荷期間中に鉄筋が降伏したため, 変形が大きくなりせん断ひび割れが卓越したためと考えられる.

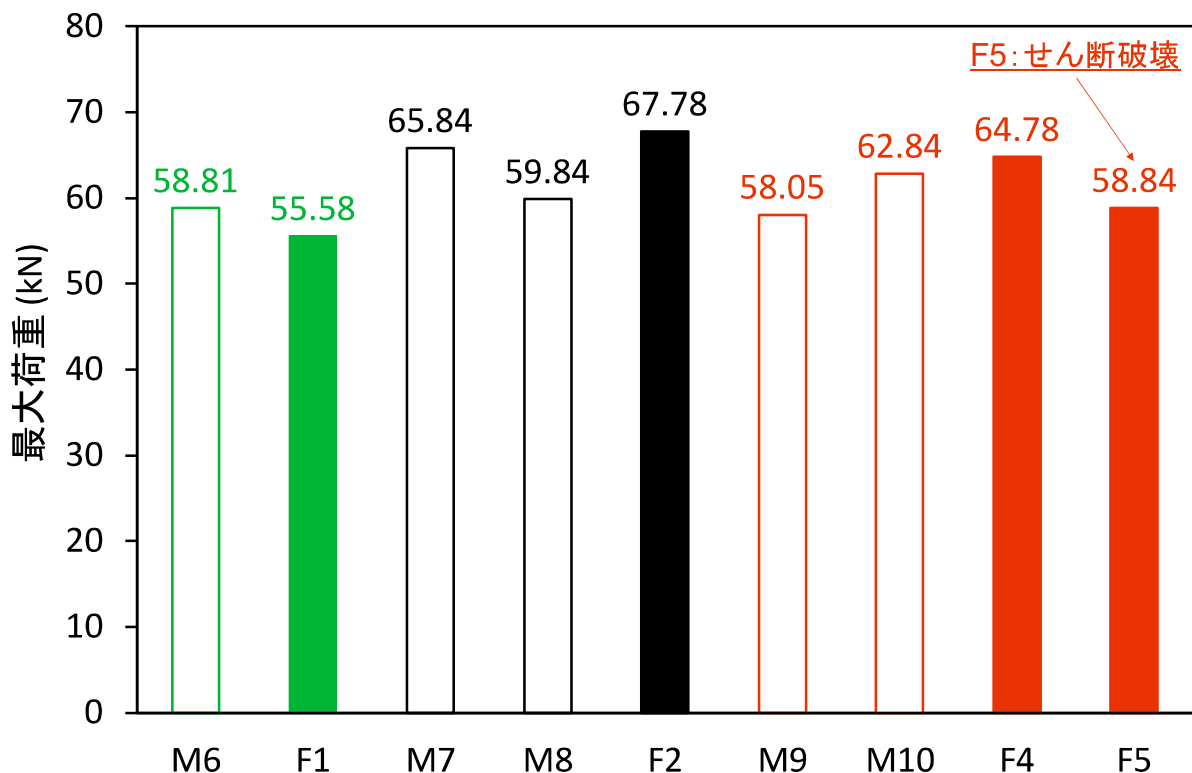


図 5-12 200 万回载荷後残存耐力

5.6.2. 200 万回载荷後のひずみ性能

図 5-13 に残存耐力試験における荷重—鉄筋ひずみ関係, **図 5-14** に荷重—CFRP ロッドひずみ関係をそれぞれ示す. 図中には静的耐力試験結果を代表して M10 試験体の荷重—ひずみ関係も併記する. F5 試験体に関しては繰返し载荷中に鉄筋が降伏したため, M10 試験体のひずみ勾配と比較すると残存耐力試験においても鉄筋ひずみが小さくなる傾向となったが, CFRP ロッドひずみに関しては M10 試験体と同程度となり, 繰返し载荷により CFRP ロッド付着性能が低下していないことが分かった.

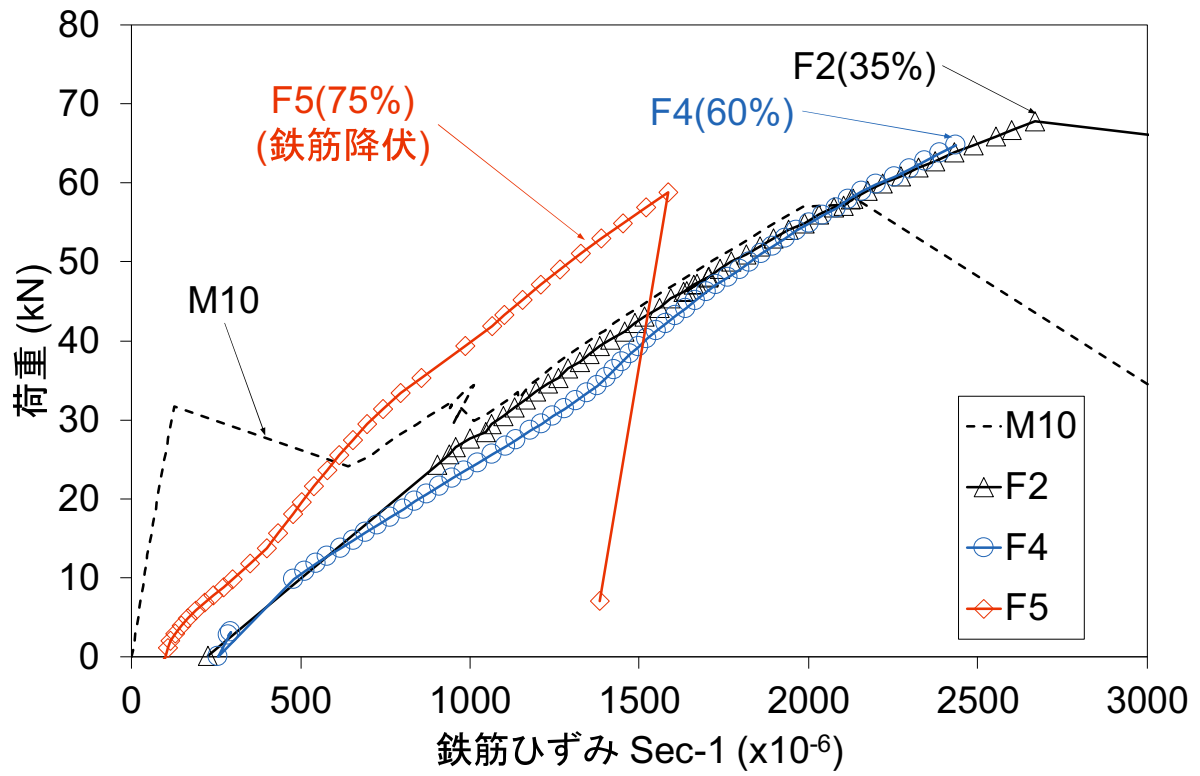


図 5-13 200 万回載荷後の荷重—鉄筋ひずみ関係

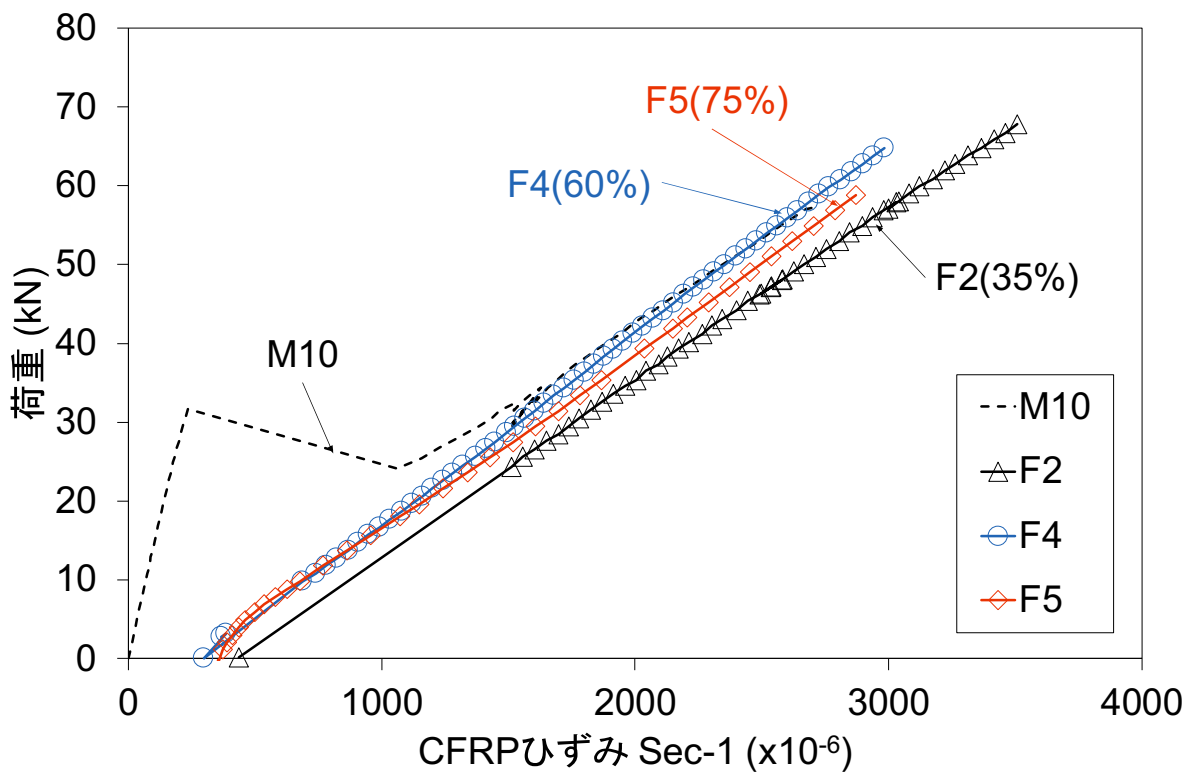
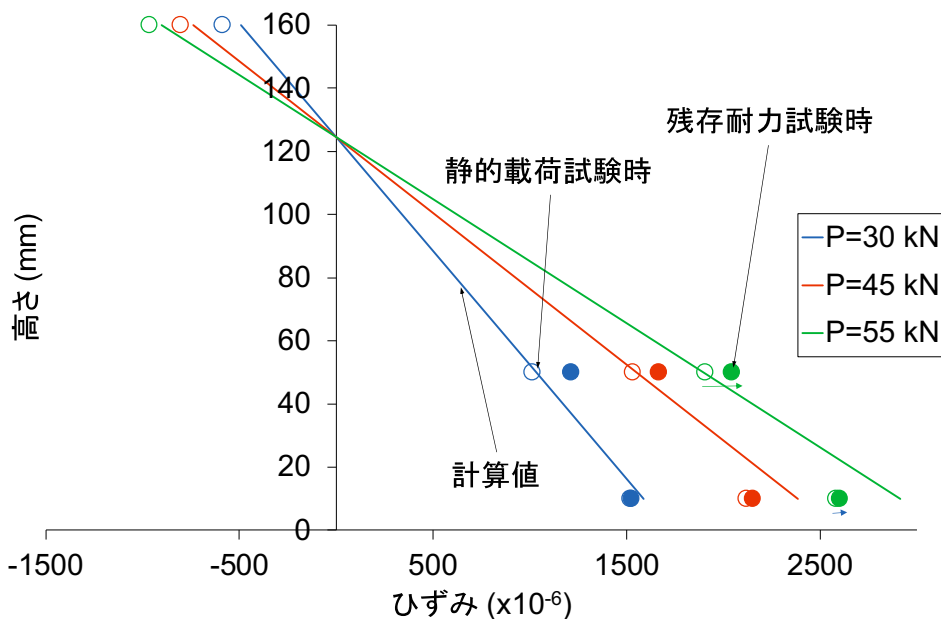


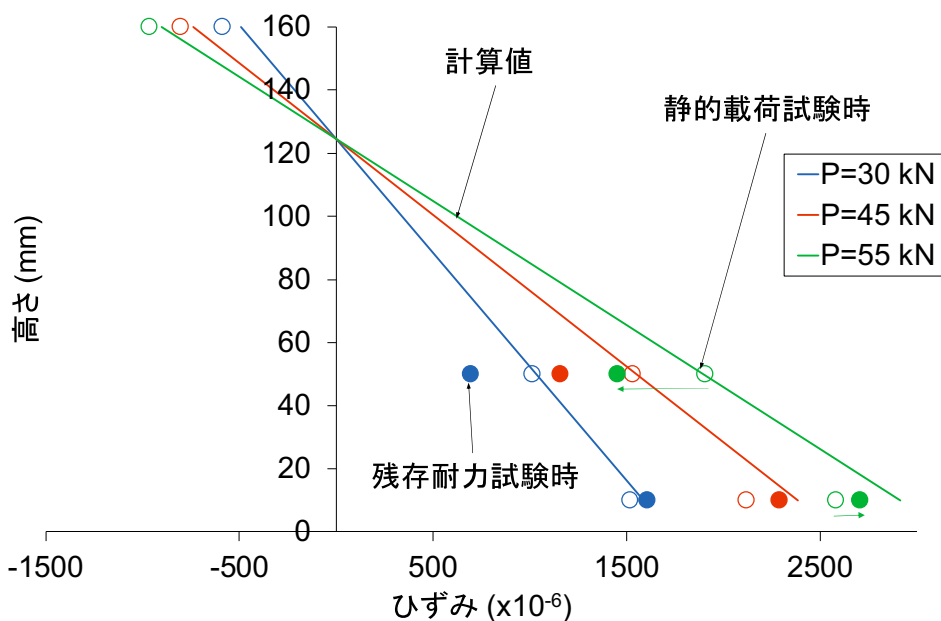
図 5-14 200 万回載荷後の荷重—CFRP ロッドひずみ関係

5.6.3. 曲げ理論の適用性の検討

CFRP ロッドのすべりが生じていないことを確認するため、一般的な曲げ理論に基づく断面高さ方向の維ひずみ分布を **図 5-15** に示す。F5 試験体に関しては繰返し载荷中に鉄筋降伏が発生したため鉄筋ひずみは計算値より小さくなる傾向があったが、F4 試験体に関しては 200 万回 载荷後も概ね計算値と同程度のひずみとなり、通常曲げ理論を元にひずみの計算が可能であることが分かった。



(a) F4 試験体維ひずみ分布



(b) F5 試験体維ひずみ分布

図 5-15 断面高さ方向の維ひずみ分布

5.6.4. せん断スパン内付着影響範囲

GFRP リブを装着した CFRP ロッドの付着影響範囲を調べるため、**図 5-16** にせん断スパン内の CFRP ロッドひずみ分布を荷重ステップ毎に示す。**図 5-16 (b)** に静的載荷試験結果を代表して M9 試験体を、**図 5-16 (c)** に 200 万回載荷後の残存耐力試験結果を代表して F4 試験体を示す。各グラフの横軸 0 点は支間中央を示しており、荷重点部および支点部には▲を記している。いずれの試験体の橋軸方向ひずみ分布は、荷重点部から Sec-2 にかけて緩やかにひずみが減少する $\Delta 1$ と、Sec-2 から Sec-3 にかけて急激にひずみが減少する $\Delta 2$ 、最後に支点に向けて緩やかにひずみが 0 となる $\Delta 3$ の 3 区間に大別できる。Sec-1, Sec-2 位置のひずみは支間中央部のひずみの 85-90%程度であるが、Sec-3 位置では支間中央部の 5-10%まで低下しており、支間中央部の CFRP ロッドに作用した引張力に対し、付着で抵抗する有効付着範囲は荷重点部から Sec-2 と Sec-3 の間までの 550mm 程度であると推察される。

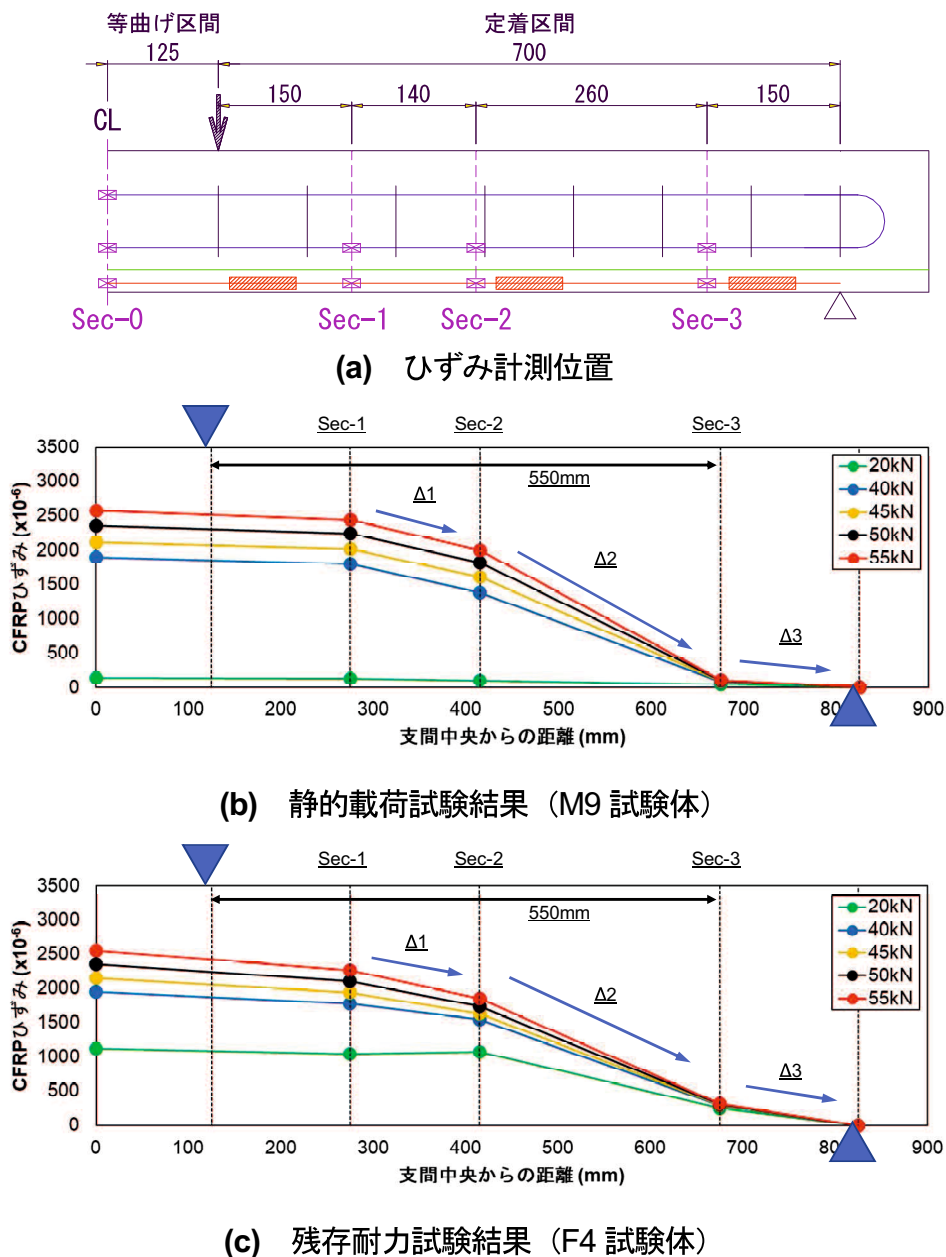


図 5-15 断面高さ方向の縦ひずみ分布

5.7. 第5章のまとめ

本章では静的載荷試験および繰返し載荷試験により 6.0mm 厚未満の GD Type のリブを装着した CFRP ロッドを RC はりの補強材に使用した場合の適用性を調べた。これらの試験で得られた知見を以下に示す。

<静的載荷試験により得られた知見>

- GFRP リブを装着しない CFRP ロッドを使用した場合、計算上の鉄筋降伏荷重の 85%程度の荷重でせん断スパン内で CFRP ロッドの抜け出しが発生し、鉄筋降伏荷重前にせん断破壊することが分かった。
- GFRP リブを装着した CFRP ロッドを使用した場合、すべて計算上の鉄筋降伏荷重以上の耐力を示し、計算上の CFRP ロッドの破断荷重の 80%以上の耐力があることが分かった。
- GFRP リブを装着した CFRP ロッドの荷重—CFRP ロッドひずみ関係は支間中央部、せん断スパン内ともに最大荷重まで線形的に増加し、CFRP ロッドの抜け出しが発生しないことが分かった。

<繰返し載荷試験および残存耐力試験により得られた知見>

- GFRP リブを装着した CFRP ロッドで補強した RC はりは、静的耐力の 75%程度の荷重を上限荷重として繰返し載荷を行っても 200 万回以上の疲労耐久性があることが分かった。
- 静的耐力の 75%の荷重で繰返し載荷を行った場合、100 万回から 200 万回の間鉄筋が降伏し、ひずみが減少したものの、CFRP ロッドひずみに関しては 200 万回載荷まで概ね一定であり、繰返し載荷により CFRP ロッドの滑りが発生しないことが分かった。
- 繰返し載荷に支間中央たわみが 20~30%程度増加するものの、繰返し載荷中の鉄筋ひずみ、CFRP ロッドひずみは概ね一定であり、たわみ増加の要因は圧縮縁コンクリートの損傷であることが分かった。
- 200 万回載荷後の残存耐力試験では一部試験体はせん断破壊したものの、静的耐力と概ね同程度の耐力となっており、静的耐力の 35~75%の荷重で繰返し載荷を行っても、RC はりの耐力低下がないことが分かった。
- 200 万回載荷後の荷重—CFRP ロッドひずみ勾配は静的載荷時と同程度となっており、繰返し載荷により CFRP ロッドの付着性能が低下しないことが分かった。
- 断面高さ方向のひずみ分布は静的載荷試験、残存耐力試験ともに曲げ理論により計算した理論値と概ね同程度となっており、通常の曲げ理論により応力計算可能であることが分かった。
- GFRP リブを装着した CFRP ロッドの有効付着範囲は概ね 550mm 程度であり、200 万回載荷後の残存耐力試験においても同程度の範囲であり、繰返し載荷により付着性能が低下しないことが分かった。

第6章

輪荷重走行試験による 疲労耐久性の検証

6.1. はじめに

前章までにおいて CFRP ロッドの付着性能改善方法を引抜試験および RC はりの曲げ試験により調査してきた。これまでの結果より 1.5mm 厚、75mm 長の GFRP リブを 300mm 間隔で装着した場合、RC はりの定点曲げ疲労試験では静的耐力の 75% の繰り返し荷重下でも十分な疲労耐久性を有していることが分かった。

本章では実際の張出し RC 床版の補強に使用した際の適用性を調べるため、CFRP ロッドで補強した張出し RC 床版の輪荷重走行試験（**図 6-1**）を実施し、その疲労耐久性を調べた。

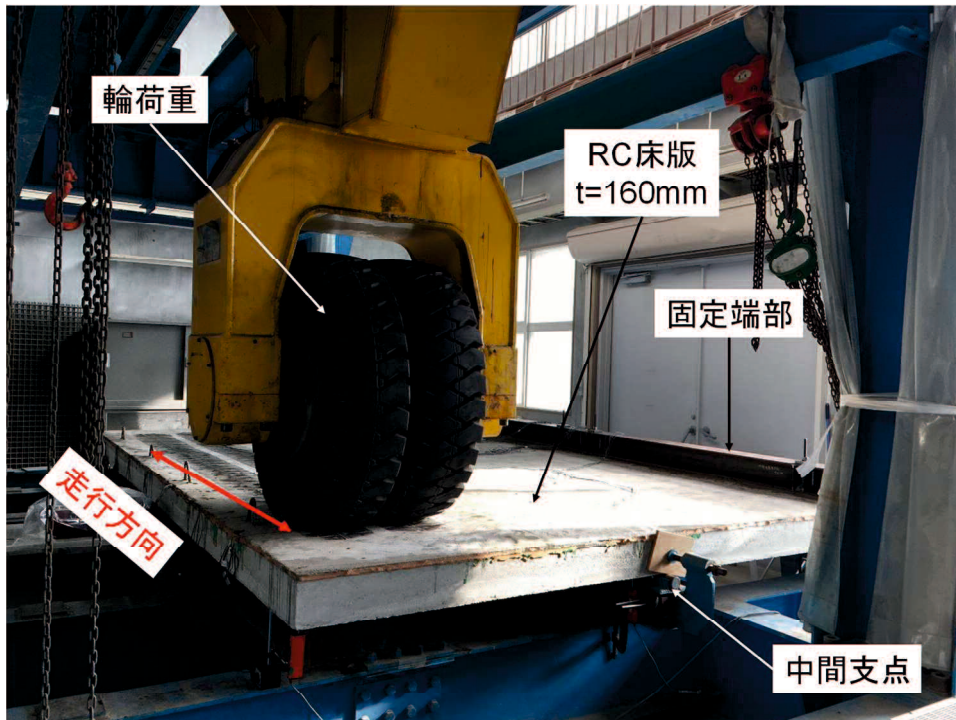


図 6-1 輪荷重走行試験状況

6.2. 使用材料

輪荷重走行試験に使用したコンクリートは呼び強度 18MPa (W/C=70%) , 最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを, CFRP ロッドを埋設するモルタルは第 4 章, 第 5 章の試験と同様に, 3~4 時間で所定の強度を発現する超早強 PCM を使用した. モルタル内に埋設する CFRP ロッドは公称径 8mm の高弾性 CFRP ロッドとし, 鉄筋は SD345 (D13) とした. 輪荷重走行試験に使用した材料を表 6-1 に示す. なお, コンクリート, モルタルの物性値は標準養生を行った材齢 28 日の物性値を示している. コンクリートの圧縮強度は 30MPa, ヤング係数は 32GPa 程度となっている. 埋設モルタルのヤング係数は 30GPa 程度となっており, 既設のコンクリートのヤング係数と同程度となっている. 使用する高弾性 CFRP ロッドはヤング係数 440GPa 程度であり, 鉄筋の 2.2 倍程度のヤング係数となっている.

使用した CFRP ロッドの付着性能改善方法は, 1.5mm 厚, 75mm 長, 300mm 間隔で設置する方法とした.

表 6-1 使用材料一覧

	公称径 mm	断面積 mm ²	強度 MPa	ヤング係数 GPa
コンクリート	---	---	29.5 ^{*a}	32.45
モルタル	---	---	55.9 ^{*a}	30.84
鉄筋 (SD345)	13	126.7	406 ^{*b}	206
CFRP ロッド	8	50.3	1386 ^{*c}	440

*a: 圧縮強度

*b: 降伏点

*c: 引張強度

6.3. 試験体製作

試験体寸法は3050mm幅、4500mm長、160mm厚とした。下面側鉄筋はD13 ctc 300mm、上面側鉄筋はD13 ctc 150mmで、下面側（圧縮縁）からそれぞれ50mm、110mmの位置に配置した。埋設するCFRP ロッドは下面側（圧縮縁）から145mmの位置に200mm間隔で配置した。図6-2に配筋要領試験体の配筋要領、CFRP ロッド配置要領を示す。

図6-3に試験体製作フローを示す。まず、輪荷重走行試験機上で鉄筋型枠を組み立て（図6-3(a)）、コンクリートを打設した（図6-3(b)）。コンクリート打設翌日にウォータージェットで研削し表面の脆弱部を除去した（図6-3(c)）。超早強PCM打設直前に接着増強エポキシ樹脂を塗布し、エポキシ樹脂が硬化する前に（30分以内を目安）モルタル打設およびCFRP ロッド埋設を行った。その後超早強PCMの養生後、型枠を解体し、端部を固定して輪荷重走行試験を開始した。なお、輪荷重走行開始時のコンクリート、モルタルの材齢は84日、32日となっている。

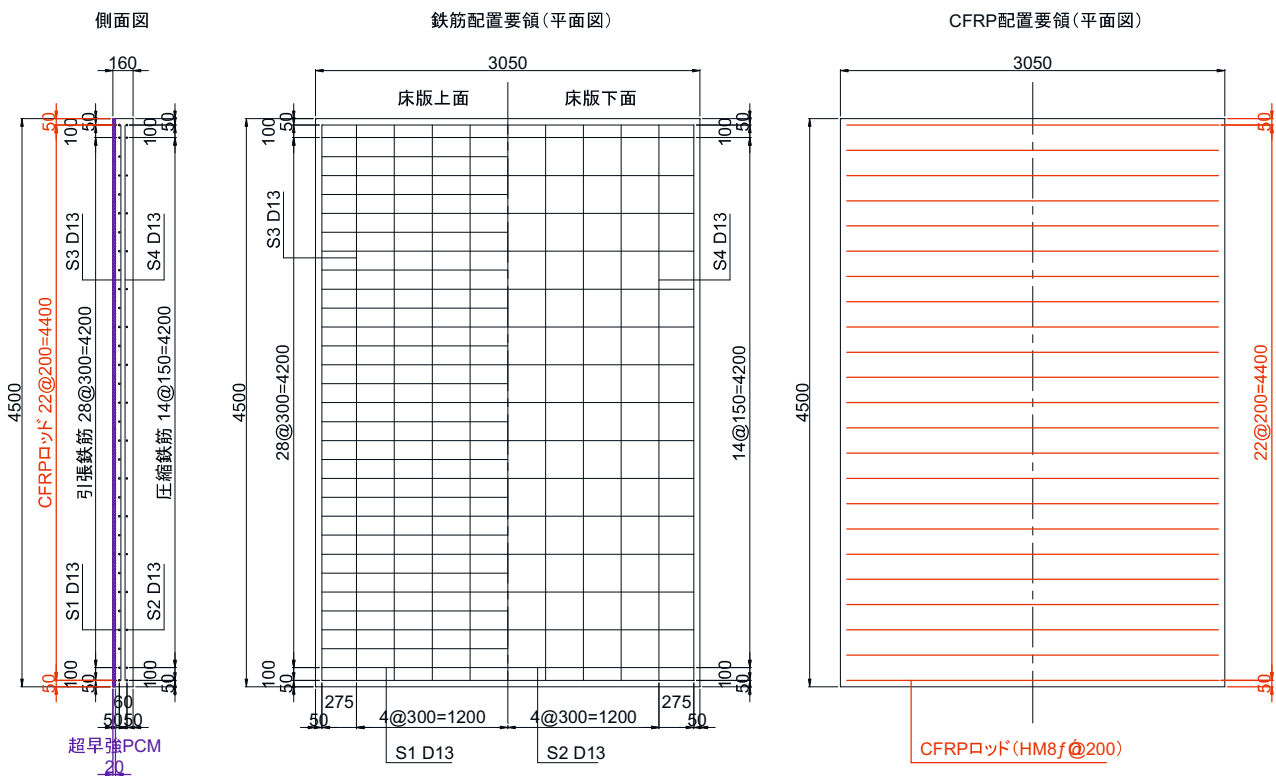


図6-2 鉄筋およびCFRP ロッド配置要領



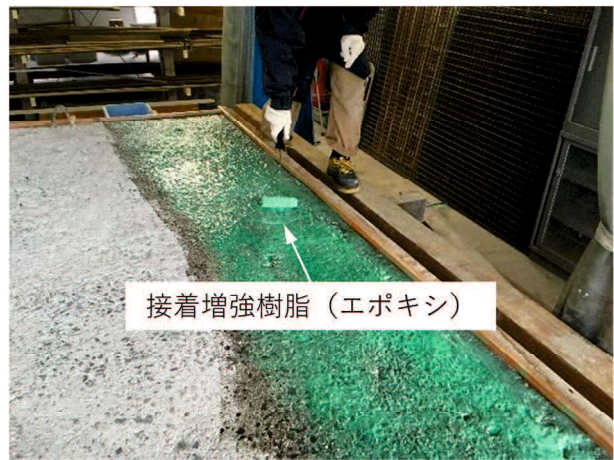
(a) 鉄筋型枠組立完了



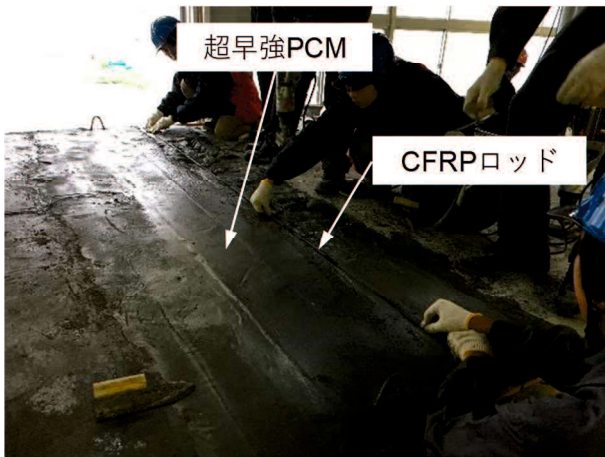
(b) ベースコンクリート打設



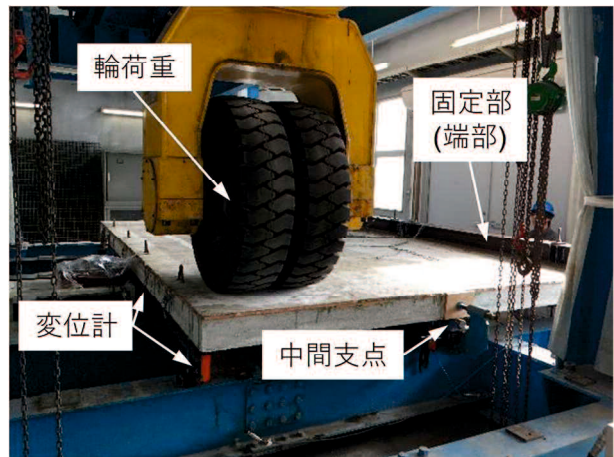
(c) 表層脆弱部除去



(d) 接着増強エポキシ樹脂塗布



(e) 超早強 PCM 打設



(d) 輪荷重走行試験開始

図 6-3 輪荷重走行試験体製作フロー

6.4. 輪荷重走行試験载荷方法

型枠解体後 H 型鋼 (150H) と 13mm 径の PC 鋼棒 (SBPR) (6ヶ所) にて端部を固定し, 張出床版の支点となる中間支点は固定側版端部から 1600mm の位置にピン支点を設置した. 輪荷重走行位置は中間支点から 1.0m の位置にゴム製タイヤ (幅 0.5m) を試験体長手方向に 3.6m の範囲を往復走行させて試験を行った (図 6-4) .

データの計測は所定の走行回数载荷後, 試験体長手方向中央に荷重を载荷させた際に計測を行っている. 計測項目は張出床版先端の変位 (3ヶ所), 中間支点断面の圧縮鉄筋, 引張鉄筋, CFRP ロッドのひずみとした. CFRP ロッドのひずみに関しては定着範囲のひずみ分布を計測するため, 中間支点後方に 150mm 間隔で 5ヶ所のひずみも測定した.

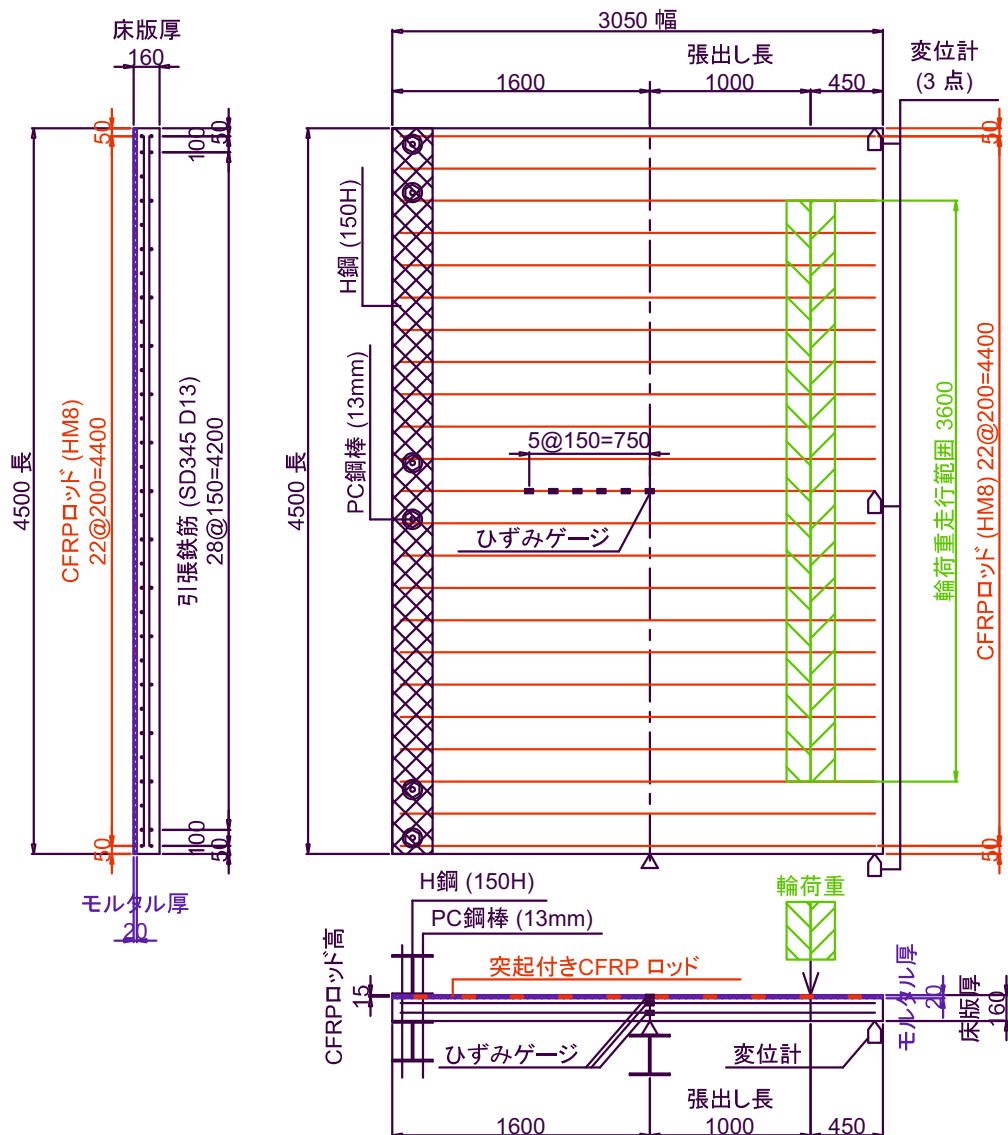


図 6-3 载荷試験および計測位置図

6.5. 荷重プログラムおよび載荷回数

荷重プログラムは 100 万回までは 60kN で載荷走行を行い、その後 70kN で 12 万回、80kN で破壊するまで (4.34 万回) の載荷走行を行った。60kN の載荷荷重は CFRP ロッドで補強を行わない無補強試験体での計算上の鉄筋降伏荷重の 130%程度の荷重レベルとなっている。なお、CFRP ロッド補強後の床版では道路橋示方書 [日本道路協会, 2012] で規定されている鉄筋許容応力度 (140MPa) の 150%程度の応力が発生する荷重となっている。無補強試験体での鉄筋許容応力度作用時 (Case-1), 鉄筋降伏時 (Case-2) の計算荷重と CFRP 補強試験体での鉄筋許容応力度作用時 (Case-3), 60kN (Case-4), 70kN (Case-5), 80kN (Case-6) 載荷時, 鉄筋降伏時 (Case-7) の計算上の曲げモーメント, コンクリート応力度 (圧縮), 鉄筋応力度 (引張), CFRP ロッド応力度を表 6-2 に示す。なお, 曲げモーメントの算出は道路橋示方書 [日本道路協会, 2012] で記載の片持ち版支点曲げモーメント算出式を使用している (式 6-1)。

表 6-2 載荷荷重ケースと作用応力度

Case	対象	荷重 kN	曲げモーメント kN・m	コンクリート MPa	鉄筋 MPa	CFRP ロッド MPa
1	無補強時	18.4	11.9	8.1	140	N/A
2		45.3	29.2	19.8	345	N/A
3	CFRP 補強時	40.8	26.3	11.7	140	446
4		60.0	38.7	17.6	206	656
5		70.0	45.2	20.5	241	765
6		80.0	51.6	23.4	275	875
7		100.0	64.8	29.4	345	1098

$$M = \frac{-P \cdot L}{1.30 \cdot L + 0.25}$$

式 6-1

ここに

M : 片持ち版支点曲げモーメント

P : 載荷荷重

L : T 荷重に対する床版の支間 (張出し床版長)

本研究では段階的に荷重を漸増させる載荷方法で試験を行ったが、松井らの研究[松井, 2007]で提案された押抜きせん断耐力予測式(式6-2)を元にマイナー則を用いて(式6-3)で各荷重段階の走行回数を初期荷重(60kN)での走行回数に換算すると表6-3になる。

実際の走行回数の合計は116万回程度であるが、初期荷重(60kN)に換算すると356万回の走行回数となり、無補強時の鉄筋降伏荷重レベル(45.3kN)に換算すると1.2兆回以上の走行回数に相当する。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -k \cdot \log N + \log C \quad \text{式 6-2}$$

$$n_{eq1} = \sum \left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot n_i \quad \text{式 6-3}$$

ここに

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| P : 載荷荷重 | P_{sx} : 押抜きせん断耐力 |
| k : 係数 (=0.07835) | N : 押抜きせん断破壊載荷回数 |
| C : 係数 (湿潤状態=1.23 乾燥状態=1.52) | n_{eq1} : 等価走行回数 |

表 6-3 実走行回数と換算走行回数

載荷荷重		kN	60.0	70.0	80.0	累計
実走行回数		回	1,000,000	120,000	43,400	1,163,400
換算 走行回数	60.0kN 換算	回	1,000,000	858,300	1,706,527	3,564,827
	45.3kN 換算	回	36,123,729	31,005,011	61,646,102	128,774,842

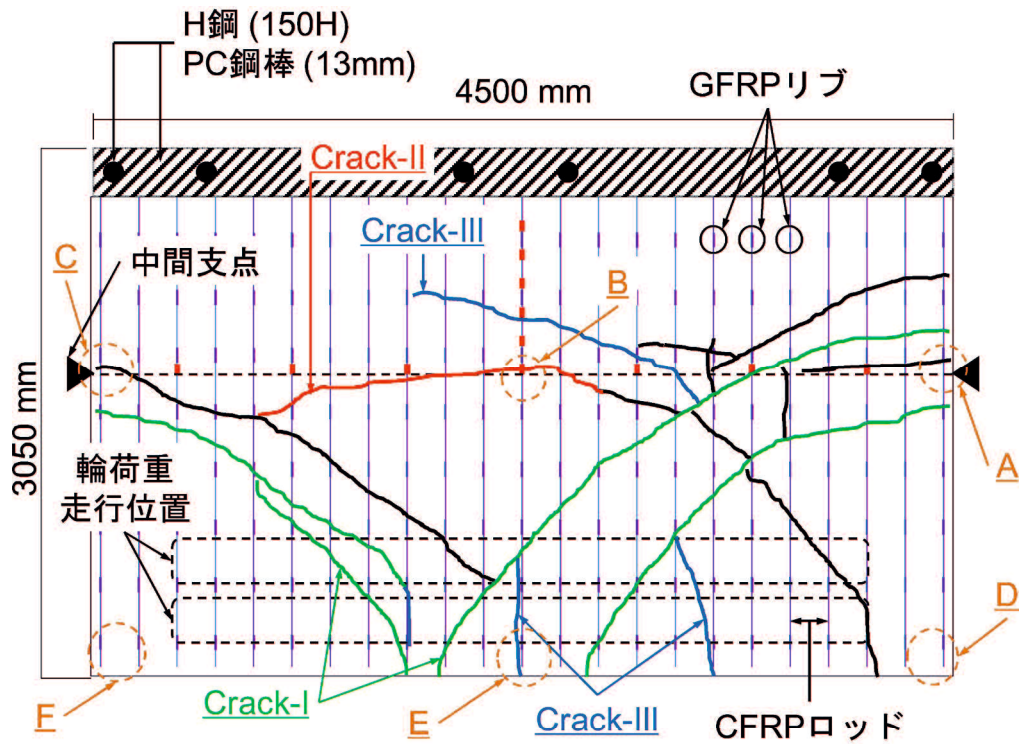
6.6. ひび割れ進展状況および破壊状況

図 6-4 (a)に 60kN で 100 万回載荷完了時のひび割れ図を、図 6-4 (b)に載荷完了時のひび割れ図を、各載荷ステップで発生したひび割れの模式図を図 6-5 に合わせて示す。まず、載荷初期 (1000 回未満) に図中の D 点, F 点を中心に中間支点 (A 点, C 点) と張出し床版中央先端部 (E 点) を結ぶ円弧状の Crack-I が発生した。これは、張出し床版端部 (D 点, F 点) は床版が連続していないため輪荷重作用時の抵抗断面が小さく、床版端部に輪荷重が作用した際の最短のモーメントアーム長は張出し床版長であることから、張出し床版長を半径とする円弧状のひび割れとなったと考えられる (図 6-5 (a))。その後 15 万回載荷時に中間支点上を床版延長方向に貫通する Crack-II が発生し (図 6-5 (b))、60 万回載荷時に輪荷重走行位置に CFRP ロッドと並行に発生するひび割れ (Crack-III) と中間支点から固定側の定着区間に床版延長方向に発生するひび割れ (Crack-III) が発生した。

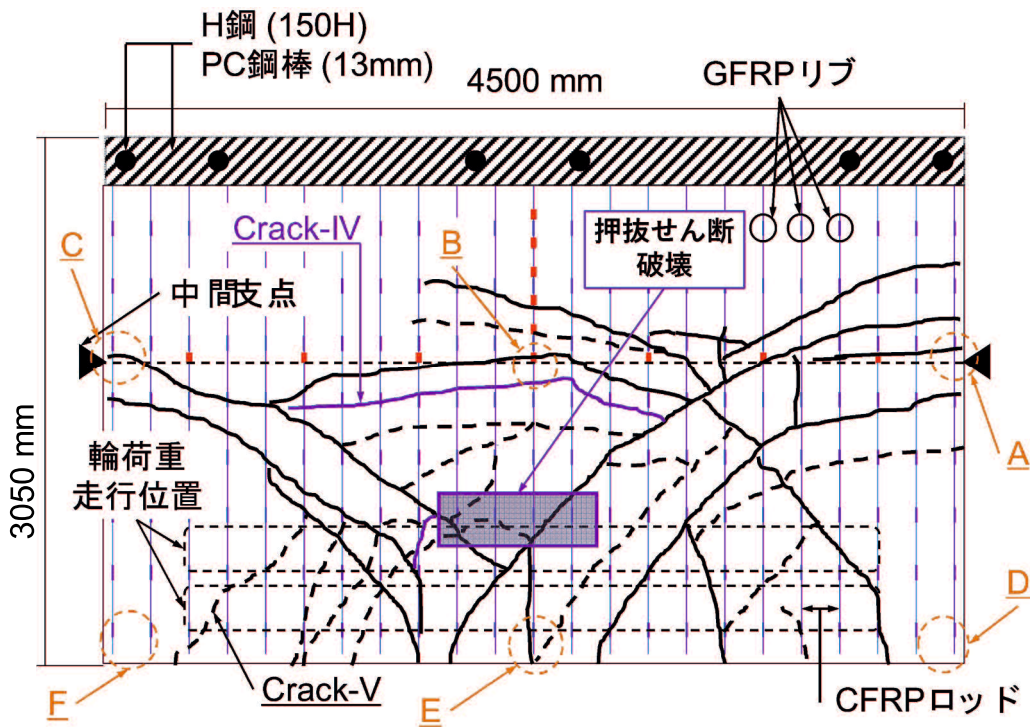
70kN 載荷時 (60kN 換算回数 100~185 万回) は大きなひび割れは発生せず、80kN に荷重を上げた直後 (60kN 換算回数 210 万回) 中間支点上を床版延長方向に貫通する Crack-IV が発生し、その後 80kN 走行時に床版損傷による亀甲状のひび割れ (Crack-V) が進展し、最終的には輪荷重走行付近の床版延長方向中央で押抜きせん断破壊する結果となった (図 6-5 (c))。

図 6-6 (a)に載荷完了時の破壊状況を、図 6-6 (b)に押抜きせん断破壊面を通る A-A 断面で切断した断面の破壊状況を示す。押抜きせん断破壊位置は面外方向のずれ変形が発生するため、CFRP ロッドの破断が発生しているが、モーメントが最も大きくなる中間支点部の CFRP ロッドは破断しておらず、ロッド周囲に付着に影響を及ぼすような大きなひび割れも確認されなかった。中間床版等の両端支持の床版では下面方向への押抜きせん断破壊が数多く発生しているが、張出し床版では支点部の曲げモーメントが卓越するため、押抜きせん断破壊で破壊した事例はほとんどない。しかしながら、本研究で実施したような 160mm 程度で薄く、鉄筋量が少ない床版の場合は輪荷重作用時に押抜きせん断破壊する可能性があることが分かった。

本研究では無補強の張出し RC 床版の輪荷重走行試験を実施していないため、無補強時のひび割れ発生状況との比較を行うことはできないが、破壊時のひび割れ状況をみても CFRP ロッドに沿ったひび割れや GFRP リブを起点とするひび割れは発生しておらず、GFRP リブを装着した CFRP ロッドを埋設することで、張出し RC 床版のひび割れに性能に悪影響を与えることはなかったと考えられる。



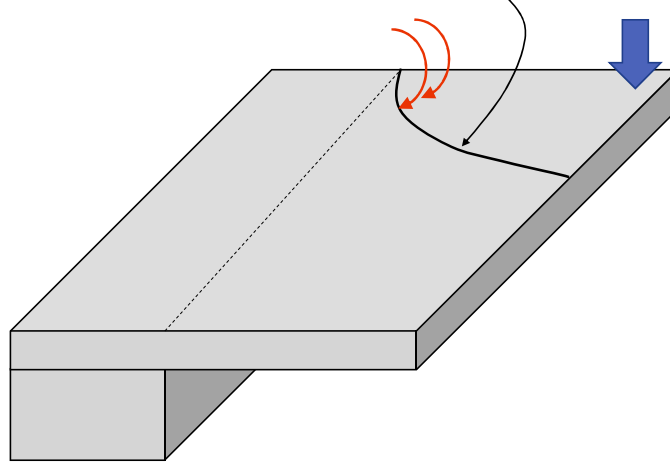
(a) 60kN 100万回走行後ひび割れ状況



(b) 破壊時ひび割れ状況

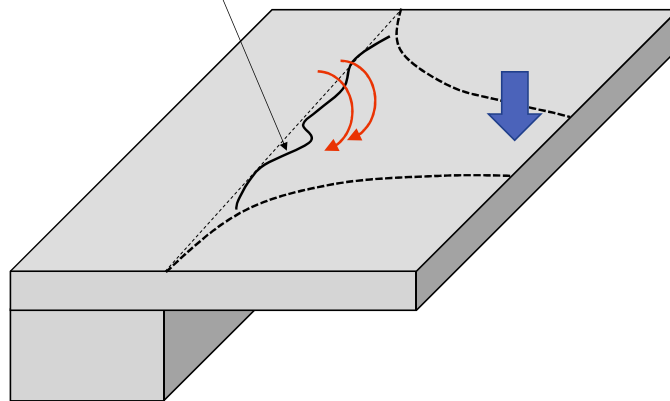
図 6-4 ひび割れ進展状況

版 端部に荷重が作用した際のひび割れ



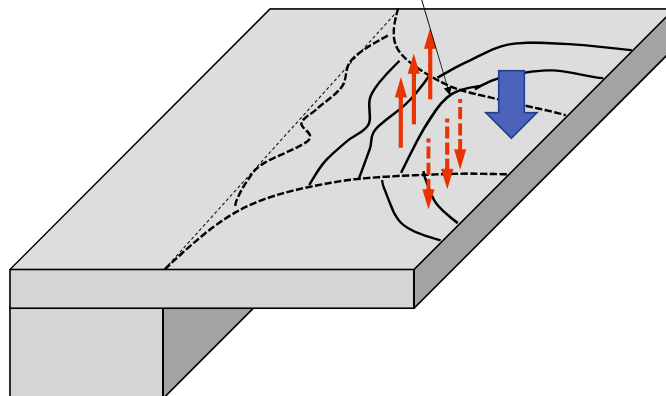
(a) 床版端部に荷重が作用した場合のひび割れ発生イメージ（载荷初期）

繰返し荷重による床版損傷で発生した床版長手方向ひび割れ



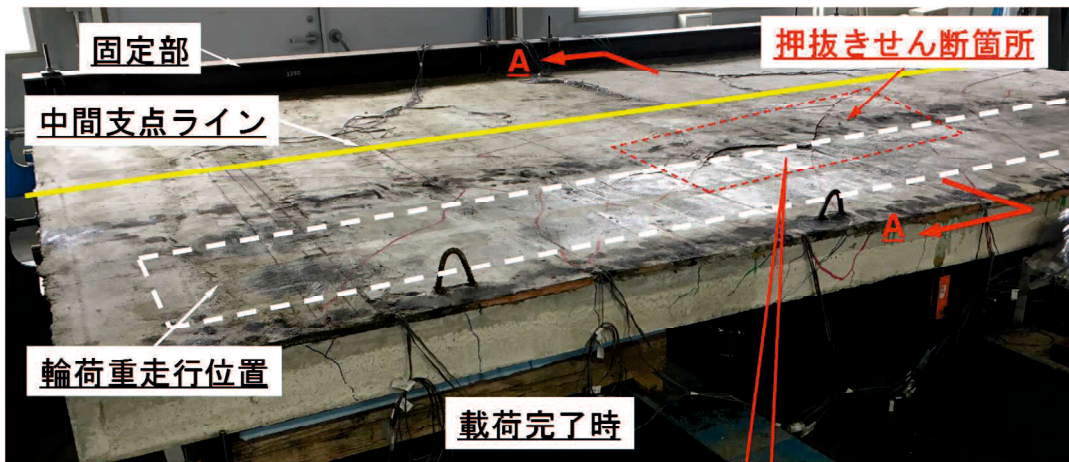
(b) 床版損傷が進展し長手方向に発生したひび割れ発生イメージ（载荷中期）

床版を押し抜こうとして発生したひび割れ



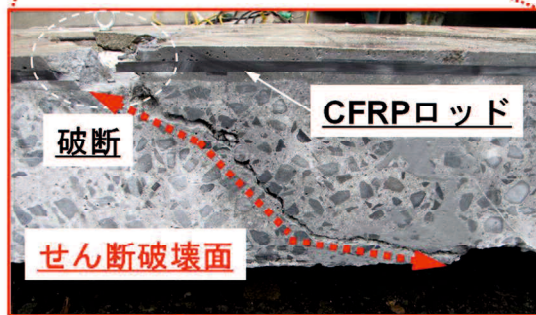
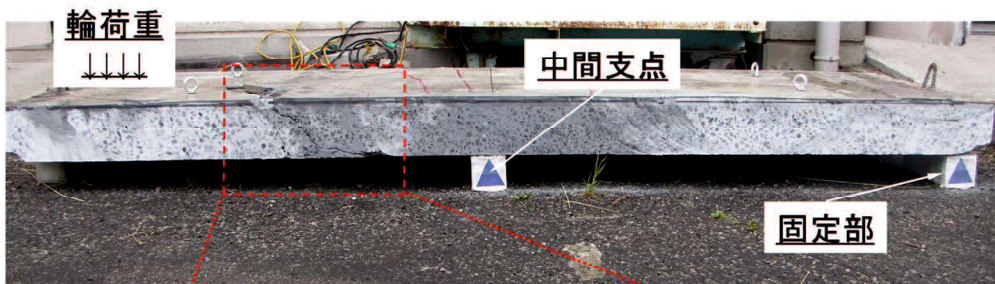
(c) 床版損傷が蓄積し版としての機能が失われた際のひび割れ発生イメージ（载荷後期）

図 6-5 各载荷ステップ毎の作用荷重とひび割れ発生イメージ



推抜きせん断破壊部

(a) 破壊時試験体状況



(b) A-A 断面ひび割れ状況

図 6-6 破壊状況

6.7. 繰返し荷重による張出し床版先端たわみ進展

図 6-7 に張出し床版先端たわみ (図 6-4 中 E 点) と換算走行回数との関係を示す。なお、横軸の換算走行回数は初期荷重 (60kN) に換算した走行回数を示している。図中の全たわみは所定回数走行後に E 点に載荷した際の張出し床版先端 (E 点) たわみを示しており、残存たわみは除荷時のたわみを示している。活荷重たわみに関しては全たわみから残存たわみを控除したたわみとなっており、載荷荷重によるたわみ増加量を示している。

中間支点上にひび割れ (Crack-II) が発生した 15 万回載荷時にたわみが微増していることが分かる。その後、80kN に荷重増加直後 (60kN 換算回数 210 万回) で Crack-IV の発生に伴いたわみが増加し、60kN 換算回数 280 万回以降で残存たわみが急増し、356 万回載荷で押抜きせん断破壊する結果となった。これらの荷重増加ステップは前述のひび割れ進展と対応しており、試験体の損傷に応じて変位も増加していることが分かる。たわみ増加の内訳をみると、280 万回以降に残存たわみが急増しているものの、活荷重たわみはそれほど大きく変化していないことから、残存たわみが増加した 280 万回以降に床版の損傷が大きく進展したと思われる。

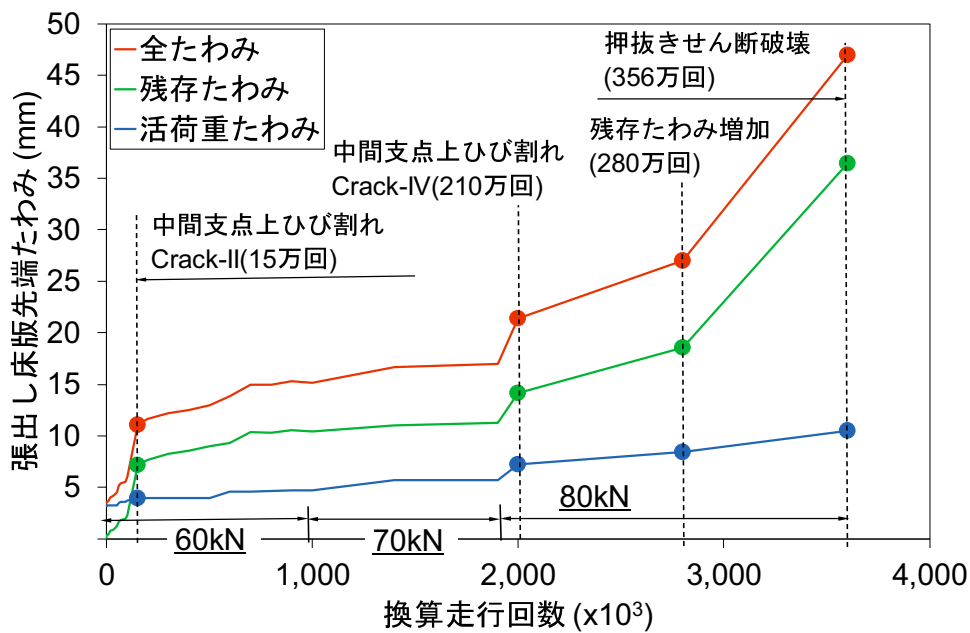


図 6-7 張出し床版先端たわみ進展状況

6.8. 繰返し荷重によるひずみ進展

図 6-8 に鉄筋ひずみと換算走行回数との関係を、図 6-9 に CFRP ロッドひずみと換算走行回数との関係を示す。図中の全ひずみは所定の荷重を載荷した際のひずみを、残存ひずみは除荷時のひずみを示している。張出し床版先端たわみと同様に、支点上にひび割れが発生した 15 万回載荷時 (Crack-II 発生)，210 万回載荷時 (Crack-IV 発生) にひずみが大きく増加していることが分かる。破壊時の鉄筋ひずみは 1060μ 程度となり，CFRP ロッドひずみは 280 万回載荷時に 1700μ 程度まで上昇し，破壊時 (356 万回載荷時) はほぼ 0μ となっていることから，押抜きせん断破壊に伴い CFRP ロッドが破断したと推察される。

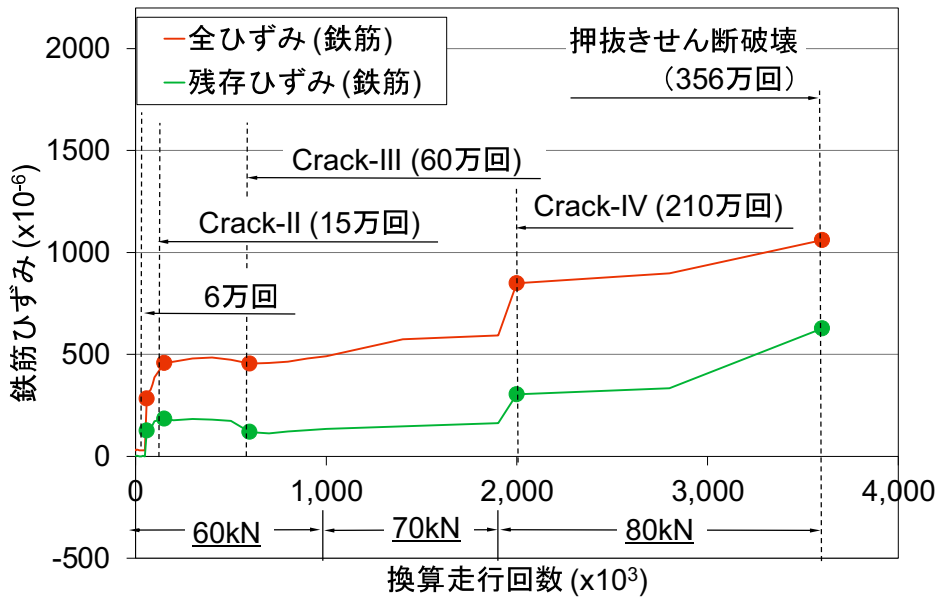


図 6-8 鉄筋ひずみ—換算走行回数関係

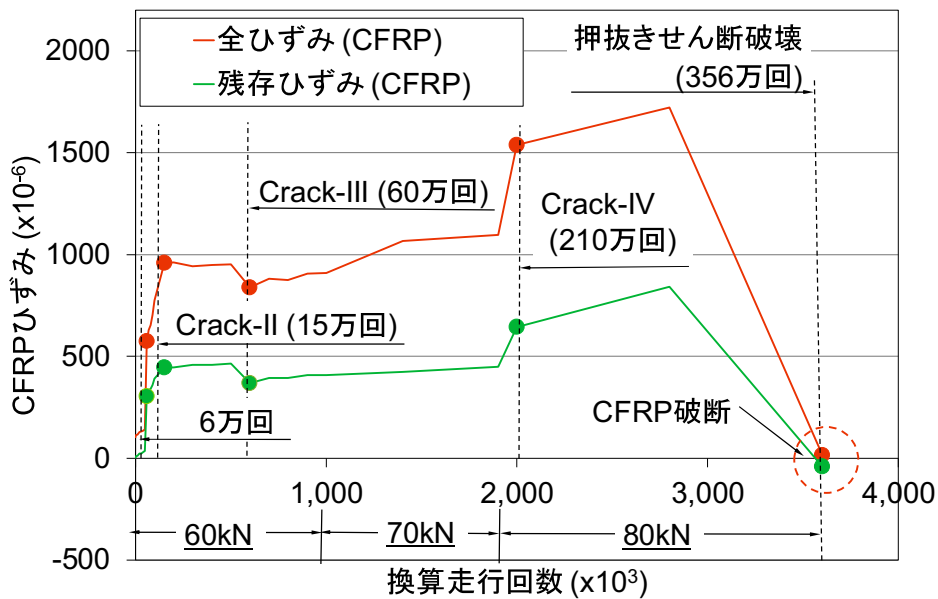


図 6-9 CFRP ロッドひずみ—換算走行回数関係

輪荷重の作用する張出し床版で CFRP ロッドの付着影響範囲を調べるため、**図 6-10** 中赤囲い部分の CFRP ロッドのひずみを計測した。計測箇所は中間支点位置から 150mm 間隔で 6ヶ所とした。**図 6-11** に換算走行回数毎の CFRP ロッドひずみ分布を示す。Crack-II の発生した 15 万回載荷時に中間支点部のひずみが増加し、60 万回載荷時に中間支点から固定側の定着区間に Crack-III が発生したため、300mm 離れた位置の CFRP ロッドひずみが増加する結果となった。70kN 載荷完了時の 190 万回までは概ね中間支点部と 300mm 離れた位置の CFRP ロッドひずみが大きく増進し、80kN に荷重を増加させた後は中間支点から 450mm の範囲のひずみが大きく増進する結果となった。載荷初期から 80kN に荷重を増加させた際も中間支点から 450mm の範囲のひずみのみ増加する結果となり、CFRP ロッドの付着影響範囲は 500mm 程度であることが分かった。

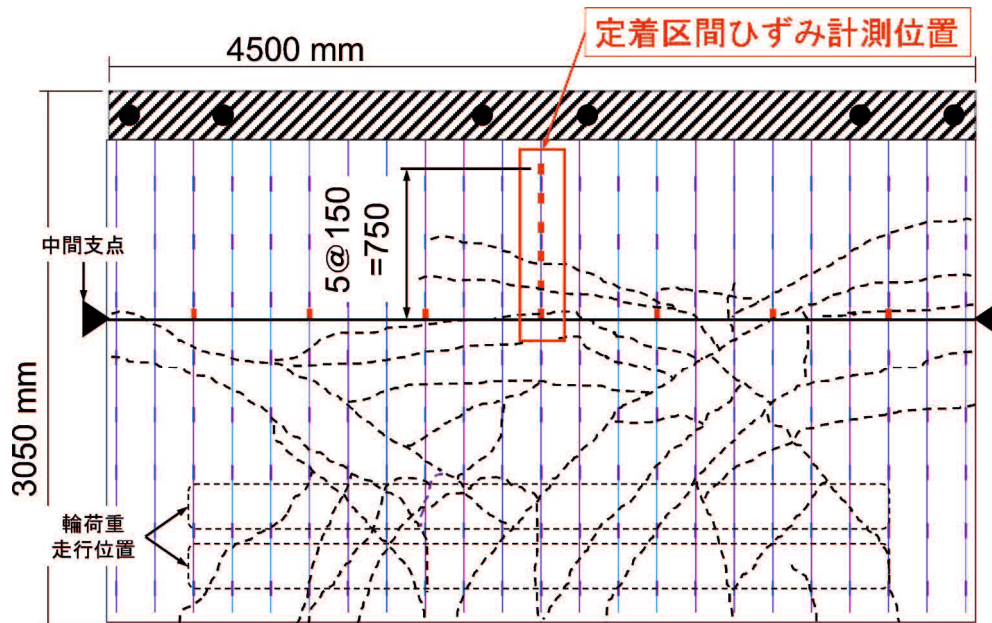


図 6-10 定着区間 CFRP ロッドひずみ計測位置

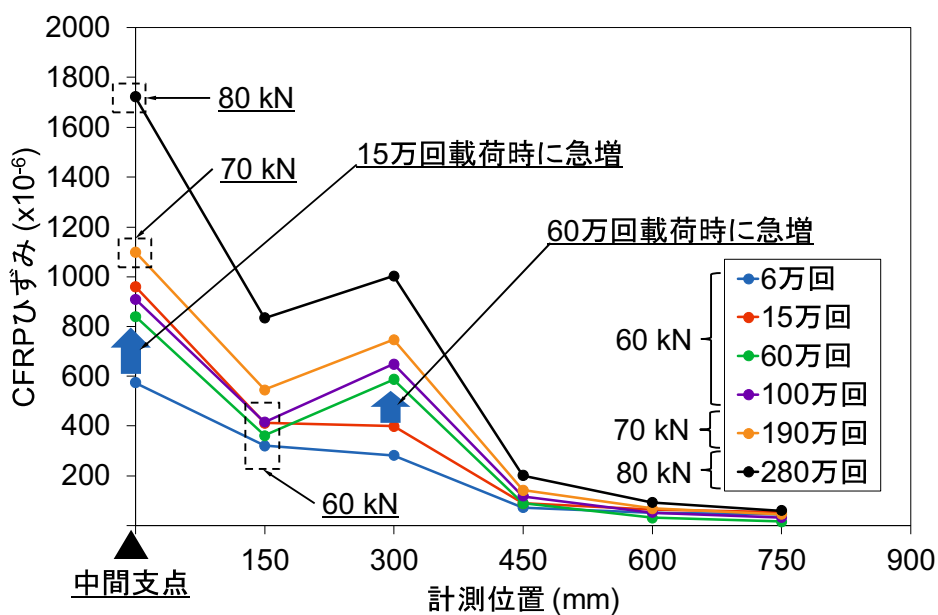


図 6-11 定着間 CFRP ロッドひずみ分布

6.9. 断面高さ方向の維ひずみ分布

図 6-12 に Crack-II の発生した 15 万回, 60kN 載荷完了時 (100 万回), 70kN 載荷完了時 (190 万回), 破壊前 (280 万回) の断面高さ方向の維ひずみ分布を示す. 荷重の増加とともに維ひずみ勾配が徐々に大きくなっているものの, すべての荷重ステップで断面高さ方向のひずみ分布は直線性を保っており, CFRP ロッドの抜け出しは発生していないことが分かる.

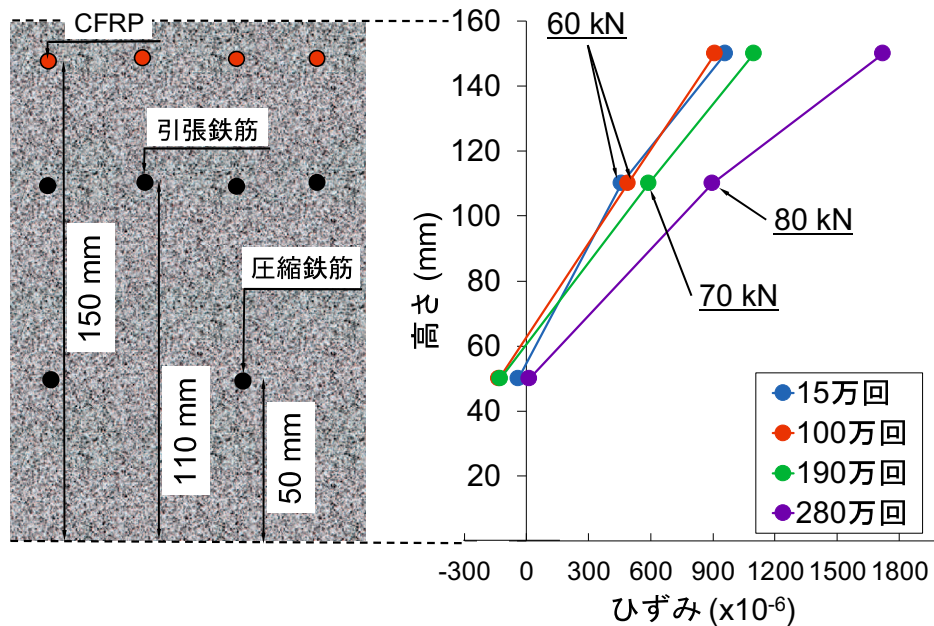


図 6-12 断面高さ方向維ひずみ分布

6.10. 第6章のまとめ

第5章で GFRP リブ加工した CFRP ロッドを RC はりの補強材に使用した場合の適用性を調べ、その安全性が確認された。本章では実際の張出し RC 床版補強に使用した場合の適用性を調べるため、CFRP ロッドで補強した張出し RC 床版を製作し、輪荷重走行試験にて疲労耐久性を調べた。本試験で得られた知見を以下に示す。

- 床版厚が 160mm 程度と非常に薄く、鉄筋量が少ない張出し床版においては輪荷重走行により押抜きせん断破壊する可能性があることが分かった。
- 張出し RC 床版のひび割れ進展は、まず床版端部に円弧状のひび割れが発生した後、支点上に床版延長方向にひび割れが貫通し、輪荷重走行による疲労の蓄積で破壊に至ることが分かった。
- CFRP ロッドで補強した RC 床版は、輪荷重作用下においても少なくとも 280 万回までは床版として機能しており、換算回数 350 万回程度の疲労耐久性を有していることが分かった。
- CFRP ロッドの付着影響範囲は RC はりの場合と同様で、概ね 500mm 程度であることが分かった。
- 断面高さ方向の維ひずみ分布はすべての荷重段階で概ね線形性を保っており、換算回数 280 万回までは CFRP ロッドの抜け出しは発生しなかった。

以上より GFRP リブ加工を行った CFRP ロッドを床版補強に使用した場合においても十分な疲労耐久性を有していることが分かった。

第 7 章

結論

7.1. 本研究のまとめ

日本の社会インフラは1970年代の高度経済成長期に建設されたものが多く、今後その多くが建設から50年を経過し、維持・更新の時期を迎えつつある。橋梁においては輪荷重を直接受ける床版の損傷が大きく、交通量の多い道路や古い橋梁では鉄筋コンクリート (RC) 床版の抜け落ちも発生している。床版補強に関しては様々な工法が開発され、現在も多数の橋梁の維持補修が行われているが、その多くがRC床版下面側の補強となっている。床版上面側の補強の場合、路面高を変更させることなく、交通規制時間もできるだけ短い補強が求められるが、それらのニーズに合致した工法はほとんどない。

本研究では耐腐食性に優れるCarbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) ロッドを、RC床版上面に敷設した超早強ポリマーセメントモルタル (Polymer Cement Mortar: PCM) 内に埋設することで、これらの課題を克服する工法を考案した。ここで引抜成形法により製造される高弾性CFRPロッドは表面の凹凸がなく、超早強PCMとの付着性能が低いといった課題が残る。そこで、Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) リブをCFRPロッドに装着することで付着性能を改善した。本研究は、この付着改善したCFRPロッドによるRC床版の補強効果について実験的に調べたものである。

第1章「序論」では、日本の社会インフラの現状を述べ、老朽化したRC床版の損傷状況に関して取りまとめた。あわせて老朽化したRC床版に対して現在実施されている補強方法についてもまとめ、その中でも本研究で採用したNear Surface Mounted (NSM) 工法の概要と同工法に使用される連続繊維補強材についても概説した。

第2章「既往の研究」では、道路橋床版の設計方法の変遷と現行の設計方法を整理し、道路橋床版の疲労耐久性に関する研究を取りまとめた。合わせて本研究に関連するNSM工法に関して既往の研究をレビューした。

第3章「CFRPロッドの付着性能改善方法」では、直径12mmのCFRPロッドに種々の付着改善策を施した引抜き耐力試験と、これを補強材に用いたRCはりの曲げ載荷試験についてまとめた。付着性能改善策は大きく分けて2種類で6mm程度の肉厚のGFRPリブを装着する方法とCFRPロッドを25mm程度まで大径化させる方法とした。

引抜き耐力試験においてはCFRPロッドの付着耐力を向上させた場合、鉄筋の付着強度以上の耐力が得られたものの、24~27MPa程度のコンクリートでは埋設コンクリートの割裂破壊が発生することがわかった。RCはりの曲げ載荷試験においては計算上の曲げ圧縮破壊耐力の90%程度の荷重までCFRPロッドの抜け出しが発生しない結果となったが、リブ部分で大きく剛性が変化することからCFRPロッドの破断ひずみで50%程度のひずみでロッドが破断する結果となった。CFRPロッドの破断ひずみ程度まで有効に機能させるためには、ロッドの付着性能を低下させない程度までGFRPリブを小さくする必要があることがわかった。

第4章「最適 GFRP リブ形状の検討」では、リブ厚を 6.0mm 未満、リブ長を 50mm 以上とした場合の引抜き耐力試験についてまとめた。試験結果より、リブ長を 75mm としても CFRP ロッドの付着耐力は向上せず、1.5~4.5mm のリブ厚の範囲ではリブ厚が厚くなると徐々に付着耐力が低下することがわかった。この試験を通じて、6.0mm 未満のリブを装着する場合は、リブ長 75mm、リブ厚 1.5mm 程度が最適の形状であることがわかった。

第5章「GFRP リブを装着した RC はりの曲げ性能」では、第4章で得られた結果を基に、GFRP リブ加工した CFRP ロッドを埋設した RC はりを用いて、静的載荷試験による曲げ耐力性能と定点繰返し載荷試験による疲労耐久性能についてまとめた。

静的載荷試験では GFRP リブ加工した CFRP ロッドで補強した RC はりは、計算上の鉄筋の降伏荷重以上の曲げ耐力を示し、CFRP ロッドの破断ひずみの 90%程度まで CFRP ロッドの抜け出しが生じないことがわかった。定点繰返し載荷試験では静的耐力の 75%の荷重を上限として繰返し載荷を行ったところ、100 万回から 200 万回の間で鉄筋が降伏したが、CFRP ロッドの抜け出しは発生しなかった。また、200 万回載荷後の残存耐力試験においても静的曲げ耐力と同程度の耐力を示しながら、CFRP ロッドの荷重一ひずみ勾配も静的載荷試験時と同程度となり、繰返し載荷による CFRP ロッドの付着性能の低下もみられなかった。以上の結果より GFRP リブ厚を 1.5mm まで薄くしても RC はりの補強材として有効と判断された。

第6章「輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証」では、実橋に使用した場合の挙動を調べるため、上記の CFRP ロッドで補強した RC 張出し床版に対する輪荷重走行試験についてまとめた。本試験では輪荷重走行下でのひび割れ進展状況、損傷が進展した際の張出し床版端部の変位増加状況、CFRP および鉄筋のひずみ進展状況を調べた。荷重レベルは補強前の鉄筋降伏荷重の 130%程度（補強後の鉄筋の許容応力度の 150%程度の荷重）となる 60kN からスタートし、80kN まで 10kN ずつ階段状に増加して輪荷重走行試験を行った。本試験において初期荷重である 60kN に換算した累加走行回数で 350 万回以上の疲労耐久性を示し、輪荷重作用位置付近で押抜きせん断破壊する結果となった。また、各荷重レベルで支点部の維ひずみ分布は概ね直線性を保っており、CFRP ロッドの抜け出しも発生していないことから、実床版を模擬した輪荷重作用下においても十分な疲労耐久性を有していることがわかった。

以上より引抜成形法で製造した CFRP ロッドに 1.5mm 厚、75mm 長の GFRP リブを装着することで超早強 PCM 内に埋設した場合の付着性能が向上することが示唆された。実際の床版補強に使用した場合でも十分な疲労耐久性を有していることが分かり、実構造物の補強に使用できることが分かった。

7.2. 今後の課題と研究展望

本研究で実施した GD Type リブ装着による CFRP ロッドの付着性能改善方法はリブ厚 1.5mm ~ 4.5mm, リブ長 50mm ~ 150mm の範囲で実施した。引抜き試験によるリブ 1ヶ所当たりの付着耐力はリブ厚 1.5mm ~ 4.5mm の範囲ではリブ厚が薄くなるほど耐力が向上する結果となった。本研究では施工時のモルタル充填不足の可能性も考慮し, 1.5mm の厚さのリブで RC はり曲げ試験, 張出し床版の輪荷重走行試験を実施したが, 1.5mm 以下のリブ厚とした場合に付着耐力が向上する可能性も考えられる。今後, 最適なリブ形状を調べるためには 1.5mm 以下のリブ厚の場合の付着耐力も検討する必要があると考えられる。また, 本研究では加工方法の関係で一定幅の GFRP リブ間隔をあけて装着したが, 鉄筋の節のように小さいリブを密に配置した方が RC 部材内に埋設したほうがひび割れ分散性に優れるものと考えられる。現在の加工技術では鉄筋の節のような加工はできないが, 図 7-1 に示すようなスパイラル状のリブ装着方法を検討する必要があると考える。併せて本研究では CFRP ロッドの付着影響範囲は RC はりのせん断スパン内のひずみ分布で考察したが, 図 7-2 のような軸方向引張試験を実施し, CFRP ロッドの付着影響範囲も検討する必要があると考えられる。

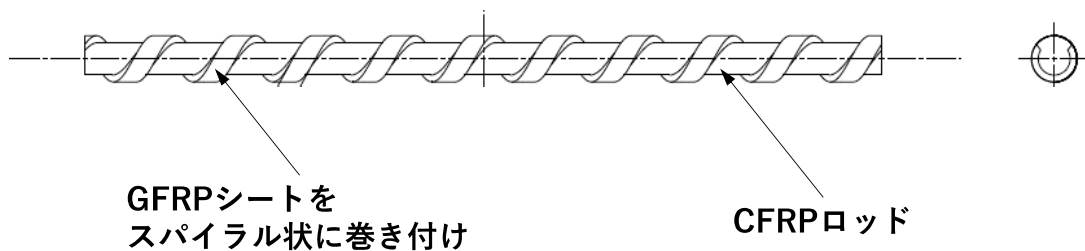


図 7-1 スパイラルリブ製作案

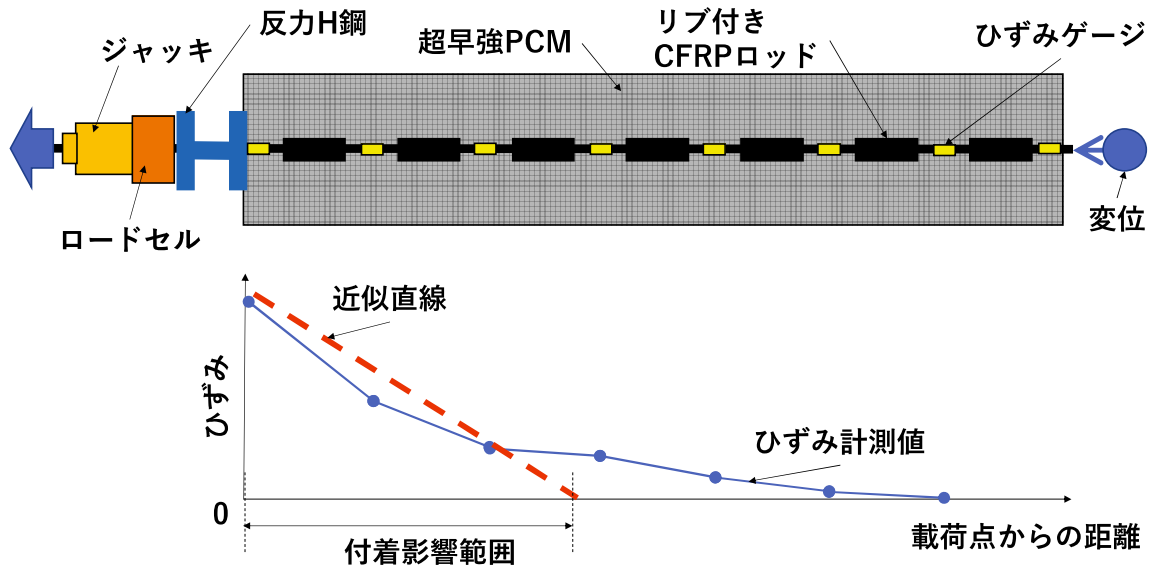


図 7-2 軸引張試験による付着影響範囲 (実験案)

参考文献

- Abdallah, M., Mahmoud, F., Boissiere, R., Khelil, A and Mercier, J : Experimental study on strengthening of RC beams with Side Near Surface Mounted technique-CFRP bars, *Composite Structures*, Vol.234, 111716, 2020
- Arockiasamy, M., Chidambaram, S., Amer, A. and Shahawy, M : Time-dependent deformations of concrete beams reinforced with CFRP bars, *Composites Part B*, Vol.31, pp.577-592, 2000
- Barris, C., Sala, P., Gomez, J. and Torres, L. : Flexural capacity of FRP RC beams strengthened with NSM technique, *Proceedings of the 9th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, pp.662-669, 2018
- Cheng, C. and Lijuan, C. : Fatigue life-based design of RC beams strengthened with NSM FRP, *Engineering Structures*, Vol.140, pp.256-266, 2017
- Choi, H., West, J. and Soudki, K : Partially bonded near-surface-mounted CFRP bars for strengthened concrete T-beams, *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp.2441-2449, 2011
- Cruz, R., Cruz, J., Borojevic, A., Kwiecien, A. and Zajac, B. : Influence of adhesive type on the flexural behaviour of RC slabs strengthened with NSM-CFRP systems, *Proceedings of the 9th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, pp.670-677, 2018
- Davalos, J., Chen, Y. and Ray, I. : Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment, *Journal of Composites for Materials*, Vol.46, No.16, pp.1899-1914, 2011
- El-Gamal, S. E., Al-Nuaimi, A., Al-Saidy, A. and Al-Lawati, A. : Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol.118, pp.52-62, 2016
- Firas, A., Arnaud, C., Raoul, F. and Christian, T. : Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods, *Composite Structure*, Vol.91, pp.138-147, 2009
- Hadad, H., Erickson, B. and Nanni, A. : Flexural analysis and design of FRCM-strengthened RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol.244, 118371, 2020
- Jia, D., Guo, Q., Mao, J., Jianfu, L. and Yang, Z. : Durability of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete under various environments, *Composite Structures*, Vol.234, 111687, 2020

Khalifa, A., Gold, J., Nanni, A. and Aziz, A. : Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members, *Journal of Composites for Construction*, Vol.2, No.4, pp.195-203, 1998

Kim, YJ. : State of the practice of FRP composites in highway bridges, *Engineering Structures*, Vol.179, pp.1-8, 2019

Lee, D., and Cheng, L. : Assessing the Strengthening Effect of Various Near-Surface-Mounted FRP Reinforcements on Concrete Bridge Slab Overhangs, *Journal of Composites for Construction*, Vol.15, No.4, pp.615-624, 2011

Moataz, B. and Khaled, S. : Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods - Experimental and analytical investigation, *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.3292-3300, 2009

Moataz, B., Noran, W. and Khaled, S. : Evaluation of the transfer length of prestressed near surface mounted CFRP rods in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp.1474-1479, 2011

Obaidi, S., Saeed, Y. and Rad, F : Flexural strengthening of reinforced concrete beams with NSM-CFRP bars using mechanical interlocking, *Journal of Building Engineering*, Vol.31, 101422, 2020

Sharaky, A., Torres, L., Baena, M. and Mias, C. : An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete, *Composite Structures*, Vol.99, pp.350-365, 2013

Sharaky, A., Torres, L., Comas, J. and Barris, C. : Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composite Structures*, Vol.109, pp.8-22, 2014

Sharaky, A., Torres, L. and Sallam, M. : Experimental and analytical investigation into the flexural performance of RC beams with partially and fully bonded NSM FRP bars/strips, *Composite Structures*, Vol.122, pp.113-126, 2015

Sharbatdar, M., Saatcioglu, M. and Benmokrane, B. : Seismic flexural behavior of concrete connections reinforced with CFRP bars and grids, *Composite Structures*, Vol.93, pp.2439-2449, 2011

Slaitas, J. and Valivonis, J. : Fracture mechanics based calculation model flexed RC elements strengthened with FRP, *Proceedings of the 9th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, pp.548-554, 2018

Wang, L., Zhang, J., Chen, W., Fu, F. and Qian, K : Short term crack width prediction of CFRP bars reinforced coral concrete, *Engineering Structures*, Vol.218, 110829, 2020

Yoshitake, I., Kim Y.J., Yumikura K. and Hamada S. : Moving-wheel fatigue for bridge decks strengthened with CFRP strips subject to negative bending, *Journal of Composites for Construction*, Vol.14, No.6, pp.784-790, 2010

Zhang, B., Zhu, H., Wu, G., Wang, Q. and Li, T. : Improvement of bond performance between concrete and CFRP bars with optimized additional aluminum ribs anchorage, *Construction and Building Materials*, Vol.241, 118012, 2020

赤代恵司, 三田村浩, 渡辺忠朋, 岸 徳光 : 丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1297-1304, 2011

阿部 忠, 伊藤清志, 中島博敬, 小堺規行 : 低弾性 PCM・PCC の性能および 2 種類の接着剤を塗布した RC 床版の薄層補修における耐疲労性の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1477-1482, 2019

石井智大, 渡瀬 博, 幸田英司, 田中 徹 : CFCC スラブの繰返し曲げ疲労に関する実験的検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会, pp.36-37, 2019

大垣賀津雄, 鈴木仁士, 中島 裕, 大久保藤和, 石田 学 : RC 床版表面における高強度緻密モルタルの適用に関する基礎実験研究, 第 10 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.177-182, 2018

岡田 清, 岡村宏一, 園田恵一郎, 島田 功 : 道路橋鉄筋コンクリート床版のひび割れ損傷と疲労性状, 土木学会論文集, Vol.321, pp.39-61, 1982

岡田昌澄, 大西弘志, 松井繁之, 小林 朗 : 格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果, 第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.175-180, 2003

小川篤生 : NEXCO 西日本における高速道路橋の維持管理の現状と今後の方針, コンクリート工学, Vol.47, No.9, pp.33-36, 2009

表 真也, 三田村浩, 渡辺忠朋, 松井繁之 : CFRP を用いた RC 床版の下面補強の疲労特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1273-1285, 2011

街道 浩, 松井繁之 : 鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労強度評価, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.1, pp.60-70, 2008

笠倉亮太, 宇治公隆, 梁 俊, 佐藤貢一 : CFRP 格子筋と吹付けモルタルを用いた補強における格子筋定着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.853-858, 2007

加藤貴久, 細川真利, 西 弘明, 渡辺忠朋 : 輪荷重試験機を用いた中央載荷・偏心載荷による CFRP プレート補強 RC 床版の疲労耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.427-432, 2013

神田信也 : アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート床版補強, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.213-214, 2008

建設省土木研究所 : コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書 (I) (II) (III) 炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案), 1999

国土交通省 : 平成 31 年度予算概要, 2019

国土交通省 国土技術総合政策研究所 : 橋梁の架替に関する調査結果 (IV) , 2008

国土交通省 国土技術総合政策研究所 : 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 2002

国土交通省 国土技術総合政策研究所 : 道路橋の定期点検に関する参考資料-橋梁損傷事例写真集-, 2013

国土交通省 道路局 : 道路メンテナンス年報, 2018

角田与史雄, 藤田嘉夫 : RC スラブの押し抜きせん断強度に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.317, pp.149-157, 1982

小林 朗, 松井繁之 : 連続繊維シート接着により補強された道路橋 RC 床版の疲労寿命算定法に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1513-1518, 2016

小林 朗, 蔡 華堅, 下西 勝, 松井繁之 : 炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1261-1271, 2005

櫻井俊太, 小林 朗, 小森篤也, 日野伸一 : RC はりの曲げ試験によるポリウレタ樹脂を用いたプレハブ式 CFRP プレート接着補強工法の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1459-1464, 2019

櫻井祥人, 持田泰秀: 熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維ストランドロッドの開発—接合部と撚り性能に関する研究—, 第7回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.80-87, 2018

田中良樹, 村越 潤: 繰返し移動荷重を受ける鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の挙動, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1124-1137, 2013

田中良樹, 村越 潤, 玉越隆史, 新藤竹文: RC 床版の主鉄筋方向挙動に及ぼす CFRP シート接着補強方向の影響, 第9回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.83-88, 2016

田中良樹, 村越 潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの破断, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.999-1012, 2017

土屋正宏, 岩田秀治, 高橋佑斗: バサルト FRP ロッド (熱硬化型) を用いたスラブ版の載荷試験による曲げ性能, 土木学会第75回年次学術講演会, pp.92-93, 2002

鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計施工指針, 1996

鉄道総合技術研究所: アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計施工指針, 1996

土木学会: コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 2000

土木学会: 複合構造シリーズ09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案), 2018

土木学会: 複合構造標準示方書, 2014

土木学会: 複合構造レポート12 FRP によるコンクリート構造の補強設計の現状と課題, 2014

中島規道, 三上 浩, 田村富雄, 角田 敦: 2 方向 AFRP シートで補強した RC 床版の移動荷重による疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.1567-1572, 2004

長谷俊彦, 和田圭仙, 後藤昭彦: 上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討, コンクリート工学, Vol.47, No.3, pp.245-253, 2012

長屋優子, 村越 潤, 田中良樹, 小堺規行: 繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.907-912, 2008

日本建築学会: 連続繊維補強コンクリート系構造設計・施工指針案, 2002

日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I～V，2012，2017

林 悠志，吉澤弘之，林田道弥：超速硬高流動コンクリートを用いて接合した CFRP 補強プレキャスト部材の曲げ，せん断試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.41，No.2，pp.1183-1188，2019

久部修弘，大友鉄平，武田三弘：高弾性 CFRP ロッドで補強されたコンクリート床版の曲げ特性に関する研究，土木学会第 64 回年次学術講演会，pp.1121-1122，2009

久部修弘，手塚光晴，谷木謙介，佐藤正一：高弾性 CFRP ロッド埋設補強工法の疲労耐久性と曲げ補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1413-1418，2002

平松 徹：よくわかる炭素繊維コンポジット入門，2015

古市 亨，松井繁之，佐光浩継，小寺 徹：疲労寿命推定理論を用いた床版の対策優先順位決定に関する一手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1699-1704，2008

文屋遼太郎，小森篤也，佐藤貢一，小林 朗，吉川弘道：PPC を用いた道路橋 RC 床版の上面増厚補強に関する梁型モデルによる実験的研究，第 9 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.133-136，2016

前田幸雄，松井繁之：道路橋 RC 床版の設計曲げモーメント式に関する一考察，土木学会論文集，Vol.252，pp.11-22，1978

前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，Vol.348，pp.133-141，1984

前田幸雄，松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.6，pp.221-224，1984

三加 崇，竹山忠臣，松田 拓，篠崎裕生：超低収縮超高強度繊維補強コンクリートを用いた PC 梁の曲げ挙動およびアラミド FRP ロッドの定着長に関する実験的検討，土木学会第 74 回年次学術講演会，pp.336-337，2019

三上 浩，田村富雄，角田 敦，廣瀬清泰，堀川都志雄：二方向アラミド繊維シート接着補強床版の疲労耐久性能の一手法，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.175-180，2003

松井繁之：道路橋床版 設計施工と維持管理，2007

宮内克之, 下枝博之, 小林 朗: 圧縮強度が 50N/mm^2 級の PCM と炭素繊維格子板を用いたせん断補強効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.901-906, 2019

宮田尚彦, 鳥取誠一, 寺田年夫, 関島謙蔵: 曲げ加工した FRP 筋の引張耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.2, pp.789-794, 1989

弓倉啓右, 吉武 勇, 浜田純夫: 負曲げ荷重を受ける RC 部材の補強に用いる炭素繊維集成板の定着方法, 土木学会論文集 A, Vol.64, pp.948-958, 2008

弓倉啓右, 吉武 勇, 三村陽一, 浜田純夫: 炭素繊維集成板を埋込貼付した RC 床版張出し部の曲げ疲労実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1339-1344, 2009

本論文に関する著者の発表論文

1. Hasegawa, H., Hisabe, N., Kuroda, Y. and Yoshitake, I. : Flexural behavior of a cantilevered RC slab strengthened with NSM CFRP rods, *7th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 2016
【本文との関連 : 第3章】
2. Kuroda, Y., Hasegawa, H., Hisabe, N. and Yoshitake, I. : Strengthening effect of a CFRP rod having ribs for a cantilevered slab, *Proceedings of 6th International Conference of GEOMATE*, pp. 420-425, 2016
【本文との関連 : 第3章】
3. 長谷川泰聡, 吉武勇, 加藤貴久 : GFRP リブを付けた高弾性 CFRP ロッドの付着特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.2, pp.89-97, 2020
【本文との関連 : 第3章, 第4章】
4. Hasegawa, H., Hisabe, N., Onari, Y. and Yoshitake, I. : Improvement of mechanical shear resistance of high modulus CFRP rod with GFRP ribs, *Proceedings of the 9th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, pp.785-793, 2018
【本文との関連 : 第4章, 第5章】
5. Yoshitake, I., Hasegawa, H. and Shimose, K. : Monotonic and cyclic loading tests of reinforced concrete beam strengthened with bond-improved carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods of ultra-high modulus, *Engineering Structures*, Vol.206, 110175, 2020
【本文との関連 : 第4章, 第5章】
6. Hasegawa, H., Onari, Y., Shimose, K. and Yoshitake, I. : Cyclic loading test of flexural RC member embedding bond-improved high modulus CFRP rods, *Proceedings of the Bridge Engineering Institute Conference 2019*, pp.478-482, 2019
【本文との関連 : 第5章】
7. Hasegawa, H., Kato, T., Shimose, K. and Yoshitake, I. : Moving-wheel load test of a cantilevered RC slab strengthened with bon -improved ultra-high modulus CFRP rods, *8th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 2021 (登載決定)
【本文との関連 : 第6章】

謝 辞

本論文は、筆者が2015年度より実施したCFRP ロッドの付着性能改善方法に関する事前検討と、山口大学大学院創成科学研究科後期課程に在籍した2017年4月から2021年3月までに実施した「高弾性CFRP ロッドの付着性能の改善と張出しRC床版の補強への適用性」に関する研究を取りまとめたものになります。

本論文の査読を務めていただきました山口大学大学院創成科学研究科准教授 吉武 勇先生には、研究の方向性、論文作成時のアドバイスをはじめ、研究者としての心構え等、多岐にわたり懇切丁寧にご指導をいただきました。深く感謝をしております。また、筆者の研究がCFRP 補強材をテーマとしており、海外でも様々な活用方法を検討されていることから、海外の学会への論文投稿を行ったほうが良いとのご助言もいただき、2回（パリ、ホノルル）の国際会議への出席の機会をいただきました。国際会議の前には何度もプレゼンテーションの練習と英語の表現方法のご指導をいただき、大変貴重な経験を得ることができました。重ねて御礼を申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授 進士正人先生、同教授 中村秀明先生、同教授 麻生稔彦先生、同准教授 渡邊学歩先生には、お忙しいところ本論文の査読をお引き受けいただきありがとうございます。多角的な視点から様々なご意見をいただくことで、長期間ひとつのテーマに絞って研究を行っている筆者の狭い視野を広げるとともに、研究の成果をより充実した中身にブラッシュアップすることができました。深く感謝いたします。

太平洋マテリアル株式会社 石田 学氏 赤江信哉氏には、本研究で使用するCFRP ロッドの埋設用ポリマーセメントモルタルの材料をご提供いただくとともに、試験体作製時には施工指導も行っていただきました。厚く御礼申し上げます。

山口大学工学部施設材料学研究室の皆様にも大変お世話になりました。現在研究室に所属している下瀬恒太氏、大西崇司氏をはじめ、卒業生の黒田祐輔氏（現 株式会社大林組）、松本祐樹氏（現 西松建設株式会社）、大成嘉希氏（現 株式会社大林組）、中島大智氏（現 防衛省）、Nyampurev Sodbayar 氏には試験体作製からデータ計測まで様々な面でご協力をいただきました。御礼申し上げます。

筆者は大学卒業後から現在に至るまでコンクリートに関する業務を行っておりますが、きっかけは大学4年時の佐藤良一先生（現 広島大学名誉教授）の研究室配属でした。研究室所属時は実験や現場見学など様々な体験をさせていただきました。学会会場に車で移動する際に高速道路の下で車を駐めて、橋梁のひび割れ観察を行った経験は一生忘れません。また、学会等でお会いした際は暖かい励ましのお言葉をいただき、博士論文公聴会の際には貴重なご意見もいただきました。大変感謝しております。

三菱ケミカルアクア・ソリューションズ株式会社 水処理事業部長 久部修弘博士（当時 三菱ケミカルインフラテック株式会社 土木・防水補強部長）には本研究を開始するきっかけをいただきました。また、三菱ケミカルインフラテック株式会社 土木・防水補強部長 梶昌彦氏、補強グループマネージャー 加藤貴久氏には学業が行いやすいよう配慮をいただきました。同部の皆さんには私の行っていた業務等を一部負担していただき、感謝しております。

私事になりますが、休日も出勤し論文執筆を行うことが多かった筆者を支えてくれた妻 裕子と息子 誠に心より感謝いたします。ありがとう。

2021年3月 長谷川泰聡