

タイトル	CFRPシートを曲げ補強材として用いたRCはりの曲げ挙動について
著者	高橋，義裕；丸山，興治
引用	北海学園大学工学部研究報告，31：75-85
発行日	2004-02-20

CFRP シートを曲げ補強材として用いた RC はりの曲げ挙動について

高 橋 義 裕*・丸 山 興 治**

Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Sheet

Yoshihiro TAKAHASHI* and Kohji MARUYAMA**

1. はじめに

1.1 本研究の背景

鉄筋コンクリート（以下“RC”と呼ぶ）は、都市構造物を建設するために必要不可欠な材料の1つであり、様々なところで使用されている。鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートが非常に強力な付着力により、外力に対して抵抗する複合構造物である。

鉄筋は靱性に富み、引張強度が高い。また、コンクリートは圧縮強度が高く、重力が大きく、アルカリ性で鉄筋との熱膨張係数もほぼ等しい。さらに、コンクリート中の鉄筋は腐食することがない。

現在、耐震などによる鉄筋コンクリート構造物の補強に関する研究が海外および国内で多数報告されている^{1)~6)}。その中でも連続繊維補強材を利用した補強方法が注目されている。連続繊維補強材を鉄筋コンクリートにおける鉄筋代替の補強材として、また、プレストレストコンクリートのPC鋼材に代わる緊張材として使用するための技術開発と研究が活発に行われ、成果を挙げつつある。

以前より貼付補強として、鋼板を用いる方法が行われてきた。しかし、鋼板は非常に重く、作業性の大変さ、腐食などによる耐久性の低下、鋼板とエポキシ樹脂との接着力の低下などの

* 北海学園大学工学部土木工学科

Department of Civil Engineering, Hokkai-Gakuen University

** 株式会社ホーク

HORK Co.

問題があることが指摘されてきた。それに対し、連続繊維補強材シートによる貼付補強の利点としては、軽量で作業性が高く、鋼板と比較して耐候性に優れている点などが挙げられる。

1.2 本研究の目的

補強材の一つとして高い引張強度を持ち、耐食性に優れている炭素繊維シート（以下“CFRPシート”と呼ぶ）を既設構造物に用いた事例が増えつつあり、現在合理的な補強設計法の確立に向けての積極的な検討がなされている。

そこで本研究では、CFRPシートを用いた既設RC構造物の合理的な曲げ補強設計手法の確立に向けた基礎的な情報を得るために、同一寸法のRCはり供試体を13体作成し、それぞれについてはり下面部にCFRPシートを貼付することにより、曲げ補強を行い静的载荷実験を行った。その際、補強方法（補強形態）を変化させることにより、実験供試体の力学的特性、変形性状や破壊性状を実験的に検討した。

また、断面分割法を用いた計算値と実測値の比較検討も行った。

2. 実験概要

図-1は実験供試体の形状寸法を示したものである。

幅20 cm×高さ30 cm×長さ220 cmのRC実験供試体で、主鉄筋にはD19を2本使用、せん断補強鉄筋（スターラップ）にはD10を10 cm間隔で配置した。また、ダイヤルゲージにて中央および载荷点直下（中央から10 cmの位置）の変位を5 KN毎に測定した。

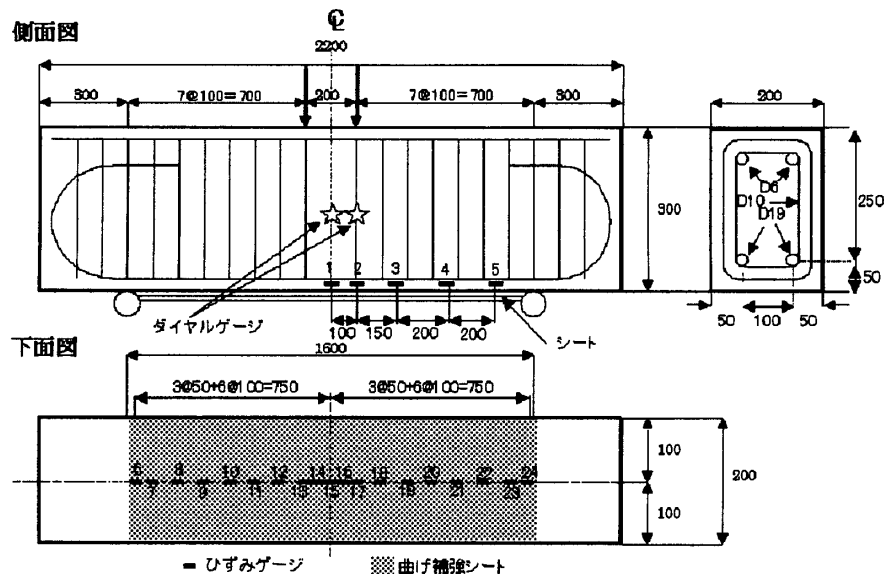


図-1 実験供試体

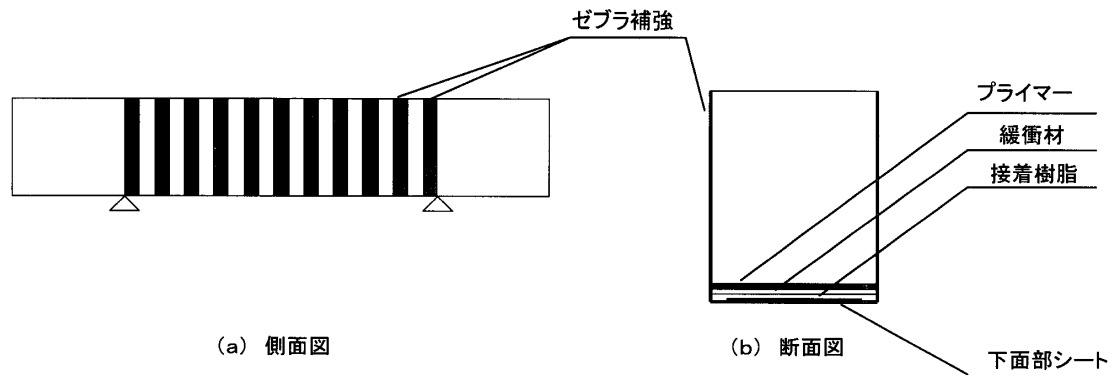


図-2 供試体補強状況

表-1 実験結果一覧

No.	供試体名	シート層数	ゼブラ補強	緩衝材	圧縮強度 f_c' (MPa)	最大耐力 (KN)	備考 (破壊状況)
01	S0	——	——	——	47.5	213	曲げ引張破壊
02	S1	1	——	——	35.8	227	シート剥離
03	S2	2	——	——	40.2	244	シート剥離
04	S3	3	——	——	39.0	270	シート剥離
05	S1Z	1	○	——	42.6	247	シート+ゼブラ剥離
06	S2Z	2	○	——	46.3	279	シート+ゼブラ剥離
07	S3Z	3	○	——	46.2	318	シート+ゼブラ剥離
08	S1K	1	——	○	50.3	254	シート中央で破断
09	S2K	2	——	○	50.3	278	かぶりコンクリート割裂
10	S3K	3	——	○	49.5	311	かぶりコンクリート割裂
11	S1KZ	1	○	○	50.1	249	シート中央で破断
12	S2KZ	2	○	○	40.4	291	一部ゼブラ破断
13	S3KZ	3	○	○	46.3	330	一部ゼブラ破断

ゲージ長 5 mm の一軸ひずみゲージを使用し、5ヶ所の主鉄筋ひずみを測定した（ただし、中央より片側1方向のみ）。同様に、計 19ヶ所のシートひずみの測定も行った（ただし、NO. 11～NO. 13 の供試体においては、6, 14, 16, 24 番のひずみゲージを除く計 15ヶ所）。

図-2 は供試体の補強状況を示したものである。

シート貼付の際は、あらかじめ CFRP シート貼付位置をディスクグラインダーで研磨し、下面処理としてプライマーを含浸させた。

その後、緩衝材（エポキシ樹脂 EE 50）を塗布し、乾燥後にエポキシ樹脂を用いて CFRP シートを供試体下面部に貼付した。さらに幅 5 cm のシートを、はりをくるむようにはり高さまでゼブラ状に巻き上げ補強を行った（以下“ゼブラ補強”と呼ぶ。緩衝材及びゼブラ補強の有無については、表-1 参照）。

なお、シート寸法は 17 cm×154 cm、緩衝材の厚さは 0.5 mm を目度とし、支持はコンクリー

トを直接支持した。

以上の施工方法により計 13 体の供試体を作成た。No. 01 供試体は、何も補強を行わない基準供試体である。

3. 実験結果及び考察

3.1 最大耐力及び破壊状況

表-1 は実験結果一覧について示したものである。

表-1 より、以下のことが明らかとなった。

- (1) 同じ補強形態で比較すると、シート層数の増加に伴い最大耐力も増加している。
- (2) 同じシート層数で比較すると、「ゼブラ補強のみ」の場合 (NO. 5 ~ NO. 7) と「緩衝材の使用のみ」の場合 (NO. 8 ~ NO. 10) において、最大耐力がほぼ等しい。
- (3) 緩衝材を用いた場合のシート 1 層補強 (NO. 8 と NO. 11) においては、供試体終局時 (最大耐力時) に「シート中央での破断」が発生した (写真-2 参照)。
- (4) NO. 9, NO. 10 では供試体終局時に「かぶりコンクリートの割裂」が生じ、NO. 12, NO.



写真-1 シート剥離による破壊例

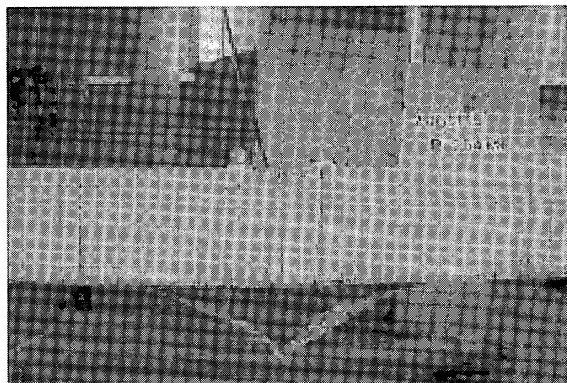


写真-2 シート破断による破壊例



写真-3 かぶりコンクリート割裂による破壊例

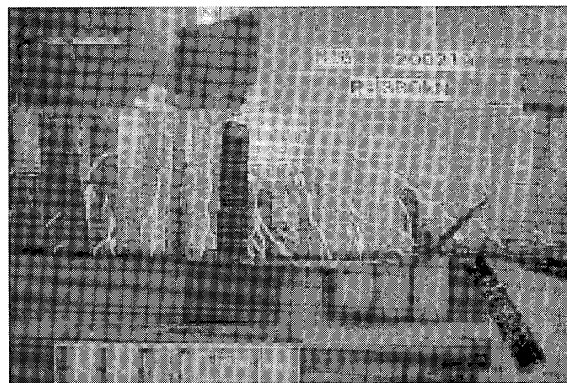


写真-4 ゼブラ破断による破壊例

13においては一部に「ゼブラ破断」が確認された(写真-3, 写真-4 参照)。

- (5) 同じ補強形態で比較すると、「接着樹脂のみ」の場合より「緩衝材+接着樹脂」の場合の方が耐力は増加傾向にある。
- (6) NO.13はNO.1と比較して約65%の耐力増加となり、最大耐力の増加率が最も大きかった。

3.2 中央位置での荷重—変位関係

図-3～図-9は供試体中央位置における荷重—変位関係を表したものである。図中には断面分割法による計算値も示してある。ただし、計算値についてはコンクリートとシートの完全付着を仮定しており、シート剥離やシート破断については考慮されていない。実測値と比較し

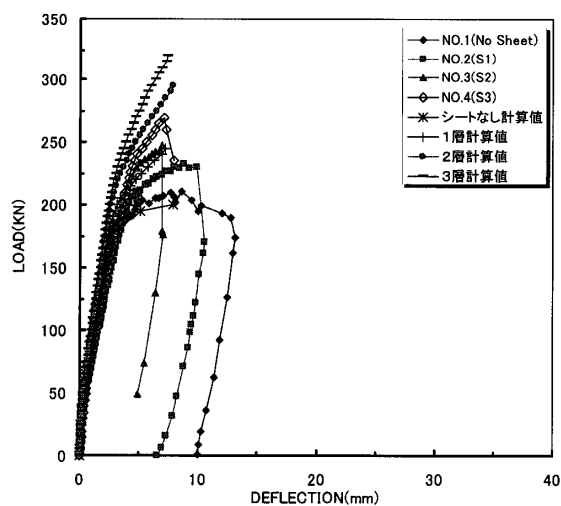


図-3 荷重—変位関係 (シート層数比較)

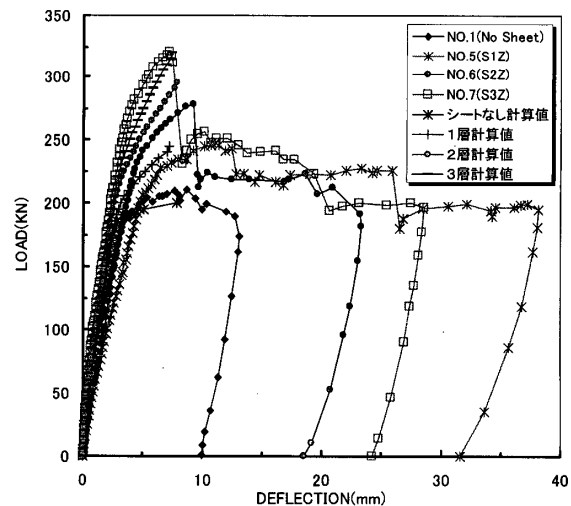


図-4 荷重—変位関係 (ゼブラ補強比較)

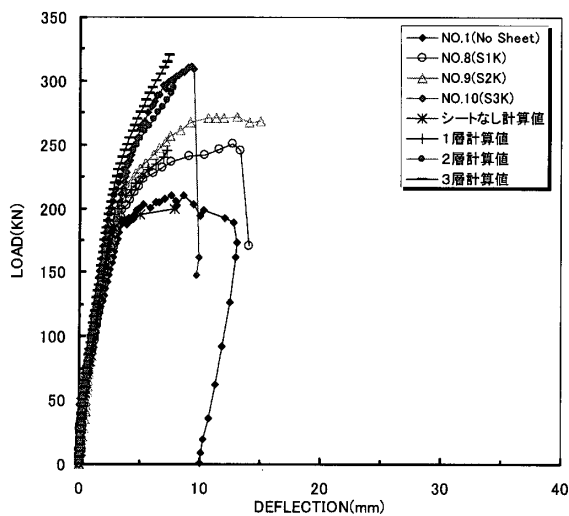


図-5 緩衝材使用時のシート層数比較

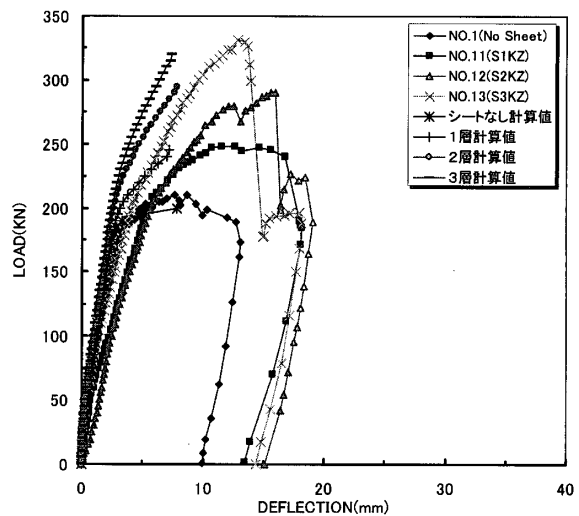


図-6 荷重—変位関係 (緩衝材有+ゼブラ補強)

で計算値の方が、曲げ剛性がやや大きめに算出されているのはこのためである。

図-3は中央位置における荷重-変位関係をシート層数別に比較したものである。シート層数を増加させることにより供試体の曲げ剛性が増加し、その結果、最大耐力も増加している。これは、計算値においても同様の傾向が見られる。最大耐力到達時を終局時と仮定するならば、終局時以降の耐力増加は一切見られず、耐力は急激に減少している。これは、シート剥離により、最大耐力到達時以降のシート補強効果が失われているためであると思われる。

図-4は中央位置における荷重-変位関係をゼブラ補強別に比較したものである。シート層数を増加させることにより曲げ剛性が増加し、その結果、最大荷重も増加している。これはゼブラ補強なしの場合と同様である。しかし、ゼブラ補強を行った場合は、最大荷重時以降に耐力はある程度減少するものの、その後は一定値を保っている。これは、最大耐力到達後もシートは完全には剥離せず、部分的な剥離を繰り返すことにより、シート補強効果がある程度持続されているためと考えられる。

図-5は中央位置における荷重-変位関係を示したものであり、緩衝材使用時のシート層数比較をしたものである。緩衝材を使用しなかった場合(図-3参照)と比較して、全体的に最大荷重の増加が見られ、最大荷重時の変位が大きくなっている。これは、緩衝材を使用することにより、シートへの荷重伝達が滑らかとなり、その結果、シート剥離が抑制されたためであると思われる。No.8(緩衝材使用時のシート1層補強)においては、終局時に中央でのシート破断が発生した。

図-6は中央位置における荷重-変位関係を示したものであり、緩衝材使用時のゼブラ補強比較をしたものである。前述同様、コンクリート下面部とシートの間に緩衝材を用いたことにより、終局変位が増加している。No.8と同様にNo.11においても、終局時に中央でのシート破断が発生した。全体的にシート層数の増加に対する最大荷重の増加率が大きいことが特徴である。特に、No.13(緩衝材使用時のシート3層ゼブラ補強)においては、No.1(シート補強なしの基準供試体)と比較して約65%の最大荷重増加となり、全供試体中最も増加率が大きかった。また、図-4のような部分的な剥離の繰り返しは見られない。

3.3 中央位置での荷重-主鉄筋ひずみ関係

図-7~図-10は供試体中央位置における荷重-主鉄筋ひずみ関係を表したものである。図中には断面分割法による計算値も示してある。なお、明らかに主鉄筋が降伏している場合、降伏後以降の挙動(ひずみ値として $5000\mu\epsilon$ 以降)については検討の対象外と判断し、グラフ上省略した。

図-7は中央位置における荷重-主鉄筋ひずみ関係を示したものであり、シート層数比較をしたものである。図中には断面分割法により算出したシートなし、1層~3層補強時の計算値

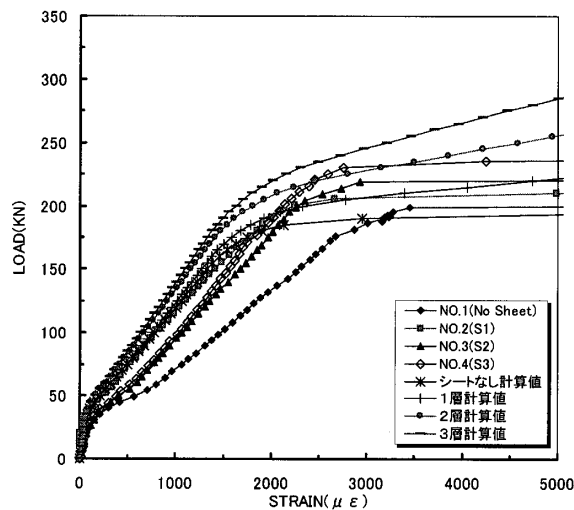


図-7 荷重-鉄筋ひずみ関係

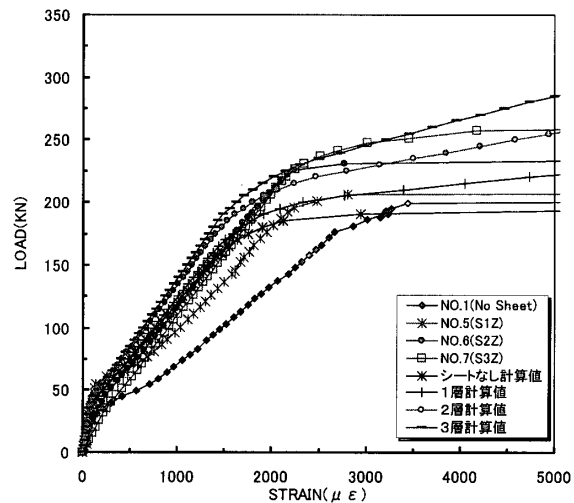


図-8 荷重-鉄筋ひずみ (ゼブラ補強有)

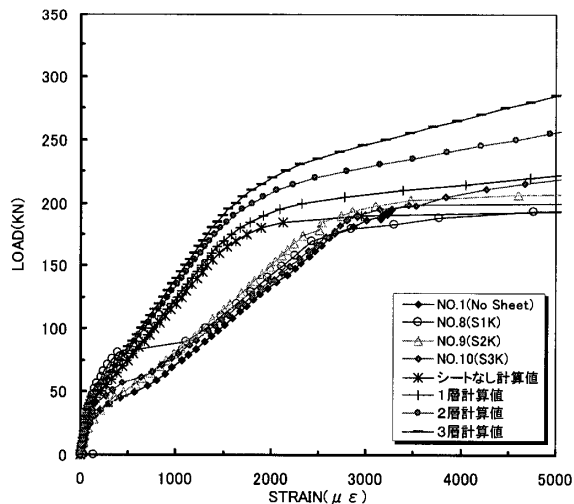


図-9 荷重-鉄筋ひずみ (緩衝材有)

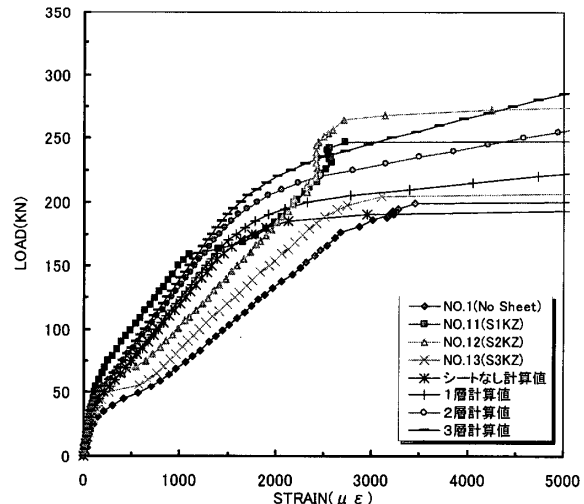


図-10 荷重-鉄筋ひずみ (緩衝材+ゼブラ補強)

も示してある。シート補強なしの場合とシート補強ありの場合を比較すると、後者の方が明らかに主鉄筋ひずみが減少している。このことから、シートの補強効果が伺える。また、いずれの補強形態においても、荷重が約 40 KN 付近にひび割れ発生開始と思われる 1 次変曲点の存在が確認できる。このことは、供試体のひび割れ発生荷重がシート層数に依存しない可能性を示唆している。

図-8 は中央位置における荷重-主鉄筋ひずみ関係を示したものであり、ゼブラ補強比較をしたものである。図中には断面分割法により算出したシートなし、1 層～3 層補強時の計算値も示してある。シート層数比較の場合と同様に、ゼブラ補強比較においてもひび割れ発生開始と考えられる 1 次変曲点の存在が確認できる。しかし、ゼブラ補強なしの場合ほど明確ではない。図中の 2 次変曲点は主鉄筋の降伏点荷重に相当するものと思われる。シート層数の増加に

に伴い、主鉄筋の降伏点荷重も増加している。

図-9は中央位置における荷重-主鉄筋ひずみ関係を示したものであり、緩衝材使用時のシート層数比較をしたものである。図中には断面分割法により算出したシートなし、1層～3層補強時の計算値も示してある。NO.8(緩衝材使用時の1層シート補強)において、約80KN付近に急激な主鉄筋ひずみの増加が見られる。これは、シートが部分剥離を起こしたことに連動したためと推測される(図-13参照)。

図-10は中央位置における荷重-主鉄筋ひずみ関係を示したものであり、緩衝材使用時のゼブラ補強比較をしたものである。図中には断面分割法により算出したシートなし、1層～3層補強時の計算値も示してある。シート層数(シート層厚)を増加させることに伴い、主鉄筋ひずみも増加している。通常、シート層数を増加させると、主鉄筋ひずみは減少する傾向にある。つまり、他の補強形態とは正反対の現象であると言える。以上より、下面部コンクリートとシートの間に緩衝材を使用した場合のゼブラ補強においては、シート層数を増加させると靱性も増加するため、主鉄筋が負担する荷重が大きくなる可能性が考えられる。

3.4 中央位置での荷重-シートひずみ関係

図-11～図-14は供試体中央位置における荷重-シートひずみ関係を表したものである。前図までと同様に、図中には断面分割法による計算値も示してある。なお、今回使用したCFRPシートは、ひずみが約15000 $\mu\epsilon$ で破断に至ることが確認されている。

図-11は中央位置における荷重-シートひずみ関係をシート層数別に比較したものである。シート層数の増加に伴い傾きが急になっている。これは、シートが負担する応力が減少したためであると思われる。また、いずれの場合においても、荷重が約40KN付近に1次変曲点が存在

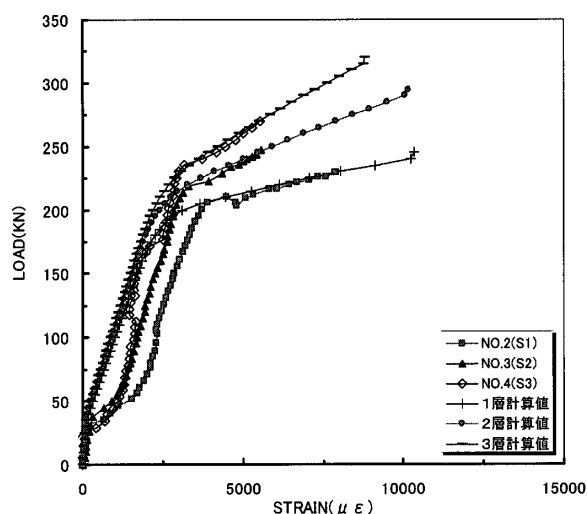


図-11 荷重シートひずみ

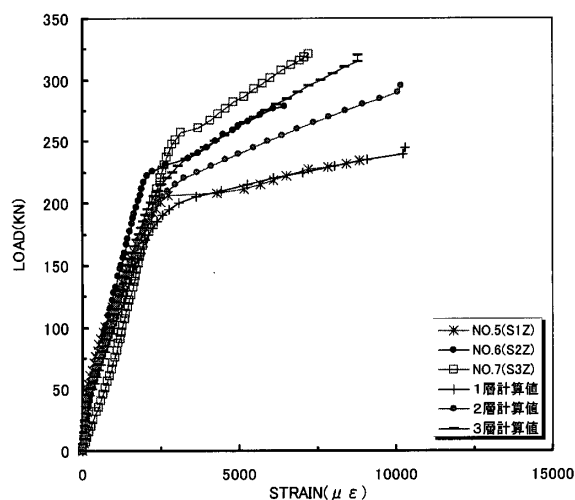


図-12 荷重-シートひずみ (ゼブラ補強)

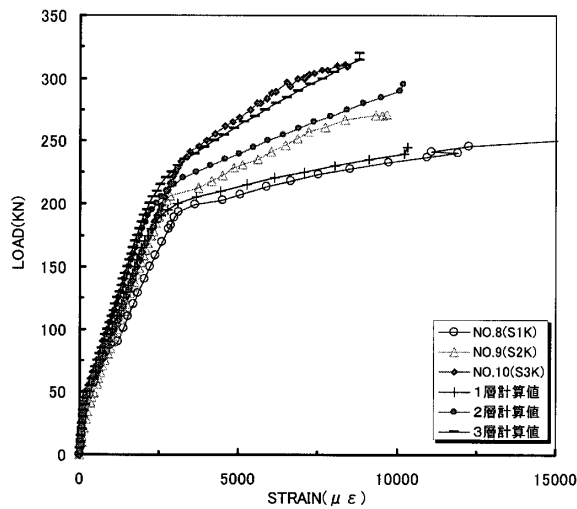
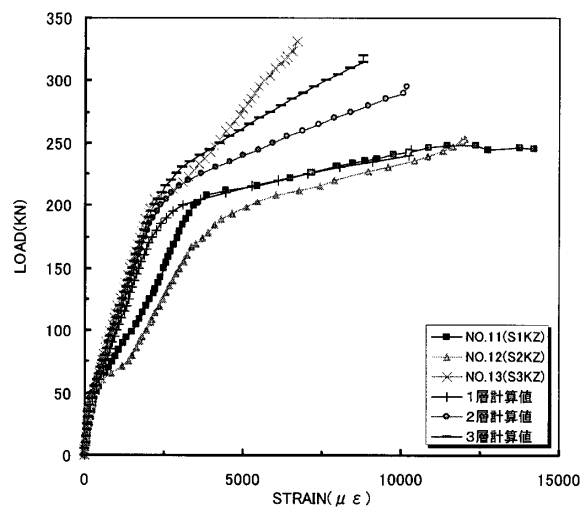


図-13 荷重-シートひずみ (緩衝材有)

図-14 荷重-シートひずみ
(緩衝材+ゼブラ補強)

在している。これは、供試体にひび割れが発生し、その荷重がシートに伝達されたためと推測される。また、図中の2次変曲点は主鉄筋の降伏点荷重とほぼ等しい結果となった(図-7参照)。

シート終局時近傍は、各計算値に近い値となった。

図-12は中央位置における荷重-シートひずみ関係をゼブラ補強別に比較したものである。ゼブラ補強なしの場合と比較すると、明確な1次変曲点の存在は確認できず、全体的にシートひずみが減少している。これは、ゼブラ補強を行ったことにより下面部シートが軸方向から拘束されたためであると考えられる。また、NO.5(シート1層ゼブラ補強)においては、ほぼ計算値の挙動に近い。

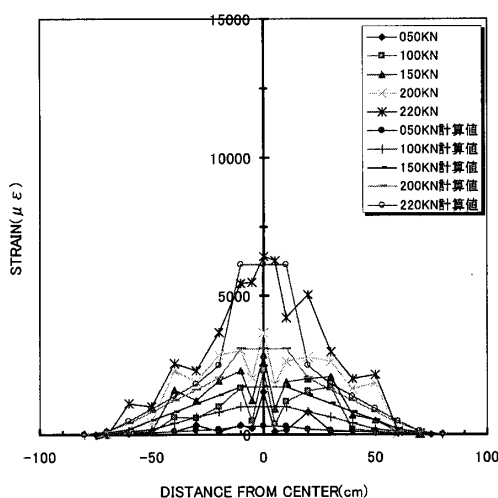
図-13は中央位置における荷重-シートひずみ関係を緩衝材使用時のシート層数別に比較したものである。緩衝材なしの場合と比較すると、ひび割れ発生開始点と思われる1次変曲点のはっきりとは見られない(図-11参照)。これは、緩衝材を使用することによりシートへの急激な荷重伝達が抑制されたためと推測される。また、緩衝材なしの場合よりも実測値と計算値が酷似している。これは、今回使用した計算プログラムがコンクリートとシートの完全付着を仮定しており、緩衝材使用時の方がより仮定に近かったためであると考えられる。

図-14は中央位置における荷重-シートひずみ関係を緩衝材使用時のゼブラ補強別に比較したものである。通常、ゼブラ補強の有無に関わらずシート層数の増加に伴い、シートひずみは減少する(グラフの傾きが急になる)。しかし、この場合に限っては1層ゼブラ補強よりも2層ゼブラ補強の方がシートひずみが増加している。以上の理由については本研究の範囲内では不明であるが、これまでの実験結果から考えると、緩衝材を使用したとしても、シート層数を増加させるとシートひずみは減少するものと考えられるので、施工不良による可能性も否定で

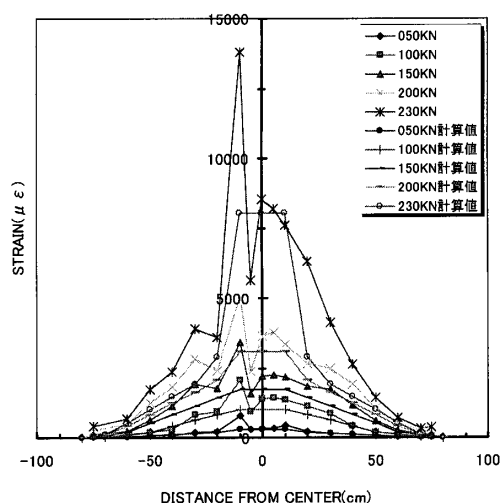
きない。

3.5 中央からの距離－シートひずみ関係

図－15, 16 は中央からの距離とシートひずみ関係を表したものである。図－16 (緩衝材使用時のシート 1 層補強時) において, 254 KN 時 (最大耐力時) には, シートひずみが約 $15000 \mu\epsilon$ に達しシート破断が発生した。以上のことは, 下面部コンクリートとシートの間に緩衝材を使用した場合の 1 層シート補強が, シート性能を最大限引き出せる補強形態である可能性を示唆している。



図－15 シート 1 層補強



図－16 シート 1 層補強 (緩衝材有)

4. 結 論

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 各供試体とも同じ補強形態で比較すると, シート層数の増加に伴い最大荷重も増加する。
- (2) 同じシート層数で比較すると, 「ゼブラ補強のみ」の場合と「緩衝材の使用のみ」の場合においては, 最大荷重がほぼ等しい。
- (3) 緩衝材を用いた場合のシート 1 層補強においては, 供試体終局時に「中央でのシート破断」が発生した。これは, コンクリートとシートの間に緩衝材を使用することにより, シート性能が最大限まで引き出される可能性が高いことを示唆している。
- (4) 同じ補強形態で比較すると, 「接着剤のみ」の場合より「緩衝材+接着剤」の場合の方が耐力は増加傾向にある。
- (5) ゼブラ補強を行うことにより, シートの脆性的な剥離を抑制できるため, シート補強効果

をある程度維持できる。

- (6) シート層数の増加に伴い、供試体の曲げ剛性も増加する。
- (7) 本研究の範囲内においてはシート補強形態に関わらず、ひび割れ発生開始荷重は約 40 KN であった。
- (8) コンクリートとシートの間に緩衝材を使用した場合のシート 1 層～3 層補強は、計算値に近い挙動となった。以上より、緩衝材を使用することにより、計算値の「シート完全付着」という仮定により近づくものと思われる。

参 考 文 献

- 1) C. Allen Ross, David M. Jerome, Joseph W. tedesco, and Mary L. Hughes: Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminate, ACI Structural Journal, 3-4, 1999
- 2) 丸山興治・栗山信吾：CFRP シートにより曲げ補強した RC はりの耐力，および変形に関する実験的研究，卒業論文（北海学園大学），2000 年 3 月
- 3) 丸山興治・高橋義裕：緩衝材を用いた CFRP シートにより曲げ補強された RC はりの曲げ挙動に関する実験的研究，土木学会 56 回年次学術講演会，pp. 1054-1055，2001 年 10 月
- 4) 丸山興治・高橋義裕：CFRP シートで曲げ補強した RC はりの静的載荷実験，平成 13 年度 土木学会北海道支部論文報告集，第 58 号，2002 年 1 月
- 5) 丸山興治・高橋義裕：CFRP シートにより補強された RC はりの曲げ挙動に関する実験的研究，土木学会 57 回年次学術講演会，pp. 705-706，2002 年 9 月
- 6) 栗橋祐介：FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に関する実験的研究，学位論文（室蘭工業大学），2002 年 3 月