

鋼橋床版の炭素繊維シート補強におけるシート貼付け順序に関する一考察

A Consideration to Order of Attaching the Carbon Fiber Sheets on RC slabs

松井繁之*、板野次雅**、鈴木研二***、小林 朗****

Shigeyuki MATSUI, Tsugumasa ITANO, Kenji SUZUKAWA, Akira KOBAYASHI

*工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 **鹿島建設㈱関西支店・南海泉佐野 JV 工事事務所

東レ㈱産業資材開発センター *日鉄コンポジット㈱

For strengthening of deteriorated RC slabs on highway bridges, new material and new method are attempted to application. Recently, carbon sheet attaching method is going up for strengthening method instead of steel plate attaching method, due to easy construction work, its light weight and its high strength. Also, 5 years ago, a series of fatigue tests of RC slabs repaired with the carbon sheet method were carried out with Wheel Running Machine, and the effectiveness of carbon sheet to increase the fatigue durability was firstly expressed. Then some problems on the method such as how design, how many layers should be attached, difference of effectiveness by Young's modulus or tensile strength, etc, have been investigated. However, some practical problems such as which direction should be attached as the first layer, necessity of attaching the sheet over the haunch part, expressions of the effectiveness are remaining to be investigated. In the paper, those last problems were investigated experimentally.

Key words : strengthening of deteriorated slab, order of attaching carbon fiber sheets, fatigue test, wheel running machine, deterioration rate

1. まえがき

炭素繊維シート(以下 CF シート)接着工法は損傷を受けた道路橋床版を下面から補強する工法の一つとしてその地位を確保している。大阪大学では平成7年度より、この工法について研究を行っており、その成果は阪神高速道路公団の指針に採用されている。輪荷重の作用下において RC 床版に生ずるひび割れは、曲げ、ねじりモーメント及びせん断力の交番作用によって「開き」「ずれ」「段差」という3次元的な挙動を示す³⁾。この3次元挙動の繰り返し作用の結果、ひび割れ発生初期に存在しているひび割れ面のかみ合わせ部はこすられ、たたかれて、摩耗されてスリット化が進行していく。ひび割れ面がスリット化することにより、橋軸方向の曲げ剛性はもちろん、せん断剛性も低下し、床版のたわみは増大する。ひび割れ面が摩耗した床版はねじり剛性も低下する⁴⁾。これまでの研究から、CF シート補強の最大の効果は、ひび割れ面の動きの抑制であることが確認されている。

一般に、炭素繊維シートの貼り付け枚数は縦横一層ずつの2層でよいと考えている。しかし、その2層をどの順序で貼り付ければよいのかが問題となっている。上記阪神高速道路公団では橋軸方向が先で、橋軸直角方向を後から貼るように規定している¹⁾。一方、建設省と炭素繊維補強研究会との共同研究で発表された指針ではその逆となっている²⁾。しかし、このような両指針の違いによる補強効果の違いについての試験資料が無い状態である。本研究にお

いて、この違いを2種類の供試体において輪荷重走行試験機による疲労実験を行い、考察を加えた。加えて、本実験では、施工上の問題から、シートをハンチ下端まで貼り付ける必要性の有無についても比較している。

2. 一方向性炭素繊維シートの貼付順序をパラメータとした試験

i) 供試体

供試体は3体とし、床版厚14cm、橋軸方向3m、橋軸直角方向2mとした。床版スパンを1.8mの2辺単純支持、2辺弾性支持版とした。

鉄筋は全てSD30BのD13を使用し、配筋状況を図-1に示す。コンクリートの養生後、CFシート補強を施す2体には樹脂モルタルで高さ5cmのハンチを追加している。1体は無補強のまま載荷してCFシート補強2体との比較に用いる目的であったのでハンチは追加していない。

CFシート補強は床版をある程度劣化させてから施工するのが通常であるが、予備載荷終了時の疲労損傷の個体差が懸念されたため今回は予備載荷を行わず、新設の床版にCFシートを貼り付けることにした。CFシート貼り付け順序は目的どおり2種類とし、橋軸方向(配力鉄筋方向)を先に貼り付けたものをCarbon in Longitudinal directionの頭文字をとってCL、橋軸直角方向(主鉄筋方向)を先に貼り付けたものをCarbon in Transverse directionからCTとする。補強効果比較用の無補強RC床版はRC14とする。貼

り付け範囲に関しては橋軸方向は両端まで、橋軸直角方向はハンチ下端までとした。貼り付け順、貼り付け範囲の詳細を図-2に示す。また、CFシートの材料物性を表-1に示す。

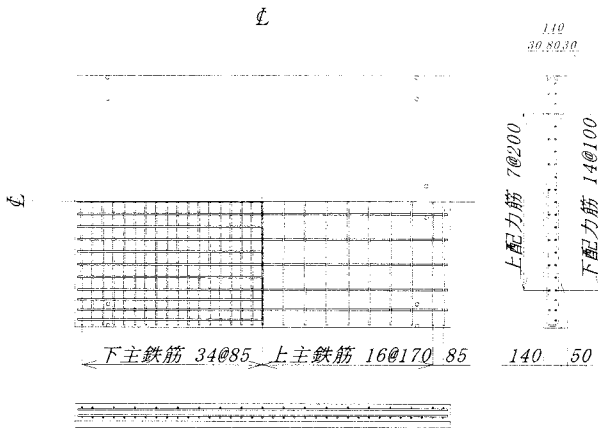


図-1 供試体形状図

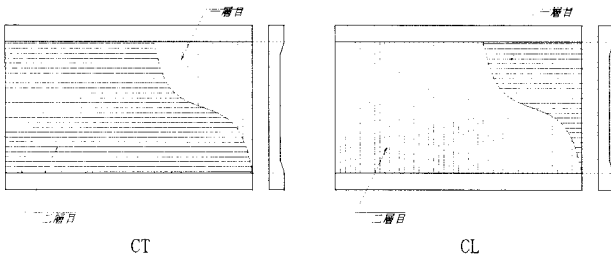


図-2 CFシート貼り付け順

表-1 CFシートの材料物性

試験条件	使用材料
試験方法: JIS K 7073に準拠	CFシート: (目付 300g/㎡)
試験装置: オートグラフAG-5000A	
硬化板作製: 1998.10.28	
試験日: 1998.11.26	
試験速度: 1mm/分	
試験数: N=5	
積層数: 2層	
	試験結果
	引張強度 σ (N/mm ²) 4234
	引張弾性率 E(N/mm ²) 257740

注、引張強度、引張弾性係数はCF純断面積当たりの性能値

ii) 載荷荷重

今回の実験で用いる床版は床版厚が14cmと薄いために、載荷荷重は15tfを基準とすることにした。CT,CLについては最初12tfで100,000回走行させた後、荷重を15tfに上げた。この荷重条件で800,000回走行させた後は、さらに荷重を18tfに上げて載荷走行を継続した。RC14は最初8tfで500,000回走行させた後、荷重を10tfに上げて500,000回走行、さらに荷重を12tfに上げおよそ160,000回走行させて一旦試験を終了した。後日、荷重を15tfとして再度載荷走行を行なった。全供試体とも破壊まで輪荷重走行試験を行うことを前提としたが、予定日数に達しても供試体が破壊しない場合は、そこで載荷を中止した。本実験における載荷荷重履歴を図-3に示す。

iii) 考察

図-4に床版中央点の活荷重たわみの変化図を示す。走行回数が90万回の段階ではCT,CLの荷重は15tfで、RC14の荷重は2/3の10tfであるにもかかわらず、たわみがほとん

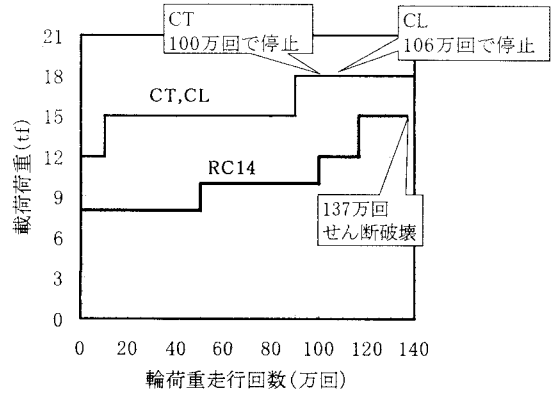


図-3 載荷荷重履歴

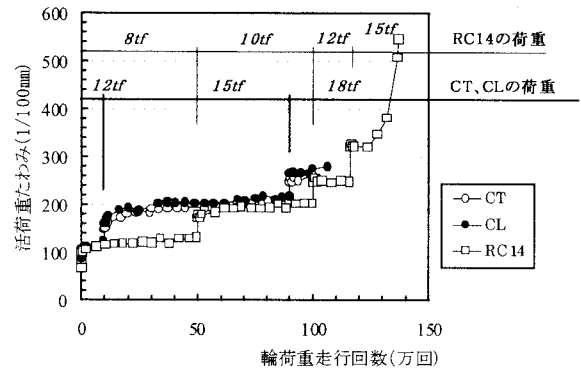


図-4 床版中央点の活荷重たわみ一回数曲線

ど同じとなっており、CFシートの効果の大きいことが確認できる。RC14で荷重を15tfに上げると約17万回で破壊に至ったが、この15tf時のたわみはCT,CLの約1.5倍である。この比率で床版の曲げ剛性が大きくなっていることを示している。

図-5にたわみによる劣化度の変化図を示す。たわみによる劣化度とは次式により表され、材料条件の異なる床版同士の比較を容易にするものである。1.0に達する点が使用限界であると考えられるものである³⁾。

$$D\delta = \frac{w - w_0}{w_c - w_0}$$

- w : ある時点での活荷重たわみ
- w₀ : 全断面有効とした場合の理論活荷重たわみ
- w_c : 引張側コンクリートを無視した場合の理論活荷重たわみ

図-5では大きな荷重を受けているはずのCT,CLの方が試験中、一貫してRC14よりも小さな劣化度を示しており、CFシートによる補強効果をはっきりと見て取れる。CLとCTの劣化度はほぼ同じ値で推移しており、試験終了時はおよそ0.75で使用限界まではまだ余裕を残している。RC14においては8tf載荷時の劣化度はCT,CLと同等であるが、10tf載荷を開始すると劣化度が0.6から0.8程度まで急に増えている。そして15tf載荷に上げた直後、劣化度が1.0に達して、その後17万回でせん断破壊を起こした。図-6に床版中央縦断面における橋軸方向のたわみ分布

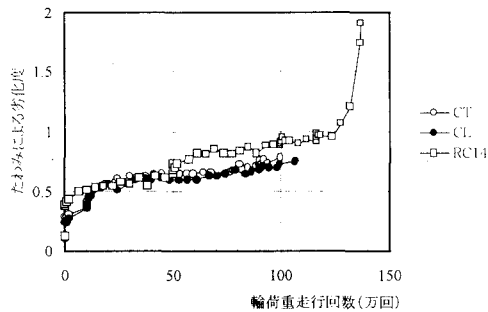


図-5 たわみによる劣化度一回数曲線

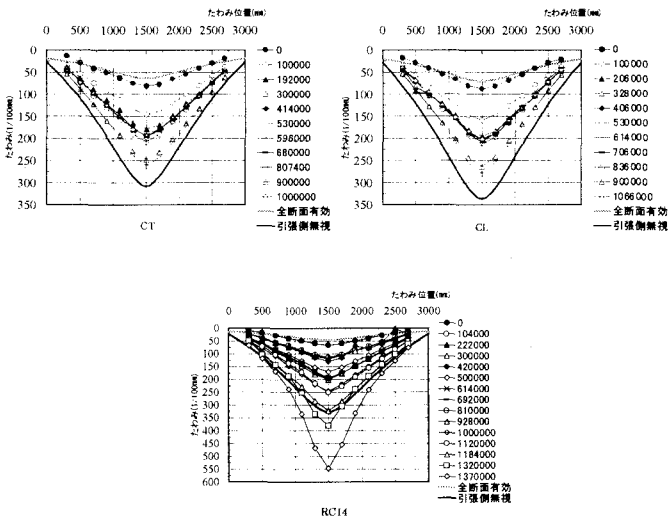


図-6 橋軸方向のたわみ分布曲線

曲線を示す。この図より、RC14は走行回数1,184,000回で断面剛性を引張側コンクリート無視としたときのたわみに達しているが、CT、CLは試験終了後もまだ余裕を残していることが分かる。

次にCTとCLの貼り付け順序の違いが及ぼす補強効果への影響について検討する。貼り付け順序をパラメータとして試験を行った理由は、貼り付け順序によって床版の梁状化の原因となる橋軸直角方向の貫通ひび割れの抑制効果が異なるのではないかとこの疑問があったためである。この抑制効果は床版の、橋軸方向の荷重分配の違いに現れ、たわみ曲線の形状に差が出てくると考えられる。CT、CLのたわみ分布形状の比較を、適当な回数ごとに床版中央のたわみを1としたたわみ比の分布で行うことにした。その一例を図-7に示す。たわみ比の分布形状は走行回数が進んでも2体ともほぼ同じであり、ここで、この2体に差は無いといえる。

図-8にCFシートのひずみの変化状況を示す。先に貼ったシートの繊維方向のひずみが直角方向のシートのひずみよりも大きくなっている。ひずみゲージは二方向とも外側のシートに貼り付けざるをえないが、今回使用しているCFシートは一方方向性のものであるために一方は繊維方向、他方は繊維直交方向となり各々のひずみはほぼ正確に捉えていると考えられる。図-9にCFシート表面のひずみ分布を示す。橋軸直角方向ひずみにはほとんど差が無い

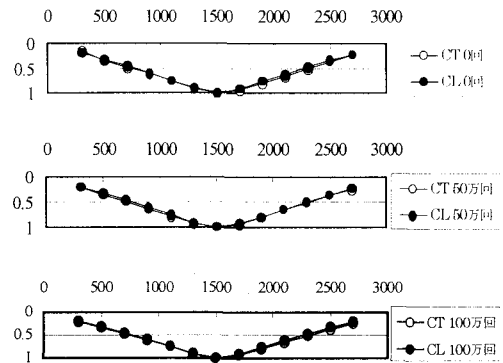


図-7 橋軸方向のたわみ比分布曲線

と言える。橋軸方向ひずみについても載荷直後ではほとんど両供試体に差は無いが、床版の劣化が進行するとCL中央部のひずみの増加率が大きくなっている。次にひずみの分布形状を見るためにCFシート表面のひずみの比を図-10に示す。橋軸直角方向のひずみの比を見るとCLの方が中央部のひずみ比分布が高くなっており、荷重分配がCTより若干良いと見れる。両供試体とも回数が増加するにつれて中央部付近が上昇していく傾向が見える。一方、橋軸方向のひずみの比については17.5cmの点では0回では両供試体ともに同じ0.32程度を示しているが、500,000回走行後ではCTが0.6に上昇するのに対しCLは0.2に低下している。傾向的にはCLの橋軸方向でのひずみの比の分布は中央が極端にとがったような形となっており、橋軸方向の荷重分配作用が大きく低下していったといえる。CFシートの多層貼り付けの場合、シート間に剛性の低いエポキシ層を挟むためエポキシ層のせん断変形が起こり、1枚目のシートの剛性が支配的になると考えられる。したがって今回の場合、CLでは橋軸方向の回復剛性が大きくなり異方性が改善されたために、この方向で大きなモーメントを分担することとなり、疲労が進むと橋軸直角方向の内部コンクリートのひび割れによる剛性低下があったと推察される。

iv) ひび割れ状況

実験終了後に各床版をセンターラインで切断し、その断面を観察した。主鉄筋断面を見るとRC14では約20cmの

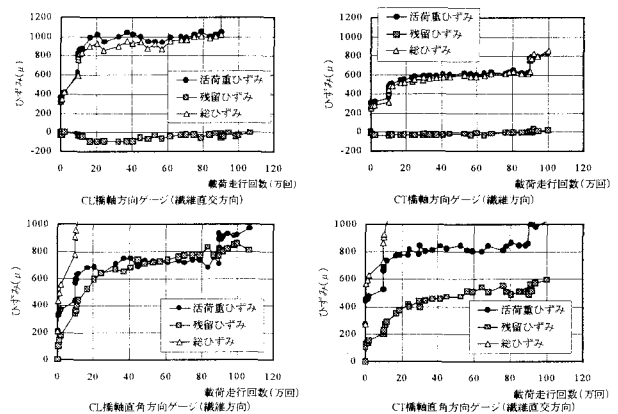


図-8 CFシートのひずみ一回数曲線

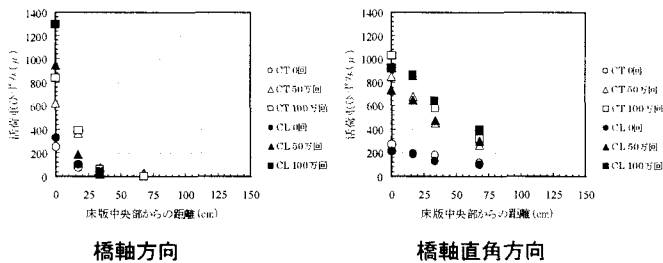


図-9 CFシートのひずみ分布

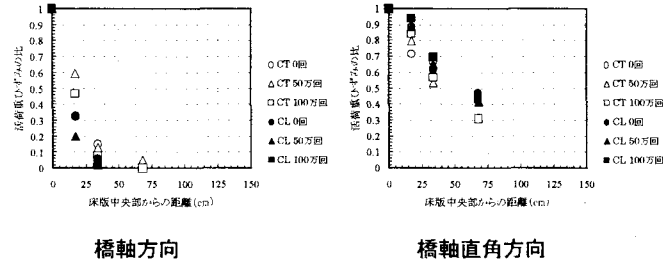


図-10 CFシートのひずみの比

間隔で圧縮側主鉄筋位置に達したひび割れが発生しており、輪荷重の走行によって梁状化していたことが確認できる。さらにRC14で圧縮側主鉄筋位置に沿った水平ひび割れが発達していた。これはRC14が疲労してせん断破壊を起こしたときに圧縮側主鉄筋のダウエル効果によってできたものである。また、配力鉄筋断面を観察するとせん断破壊を示す、載荷位置から45度方向に伸びる斜めひび割れをはっきりと見ることができた。これに対して、CFシートで補強されたCT,CLでは目視でひび割れを発見することは困難であった。本試験ではCTとCLともにCFシート補強は予備荷重を行わないで、新設の床版に対して行ったため、ひび割れのスリット化が進展しなかったと推定できる。

v) 断面量の推定による疲労劣化状況の定量的考察

床版の疲労劣化状況を定量的に考察することを目的として、床版の断面剛性の低下をたわみ量から推定した。ただし、版一様に直交2方向の剛性は分布すると仮定した。

図-11に推定された I_x, I_y の推移を示す。どのケースも試験開始から走行回数20万回付近までで I_x, I_y が急激に減少しており、20万回付近までが初期の曲げひび割れの進展段階であることがうかがえる。

I_x (主鉄筋断面) について考察する。載荷荷重に差はあるが、CFシート補強をしているにもかかわらず試験開始直後のCT,CLの I_x はRC14のそれとほとんど変わらない。一通り損傷が進展したと予想される20万回では20%程度CT,CLの方の剛性が大きい。それ以降RC14が直線的に右下がり減少するの比べCT,CLはほとんど変化が無く横ばい状態が続く。100万回の時点でRC14の荷重が10tf、CT,CLの荷重が約2倍の18tfであるにもかかわらず、このように大きな剛性を残し、かつ安定しているのはCFシートのひび割れ進展に対する優れた拘束効果であると言えよう。CTとCLにおいて差は無く、貼り付け順の違いに有為の差は無いと言える。

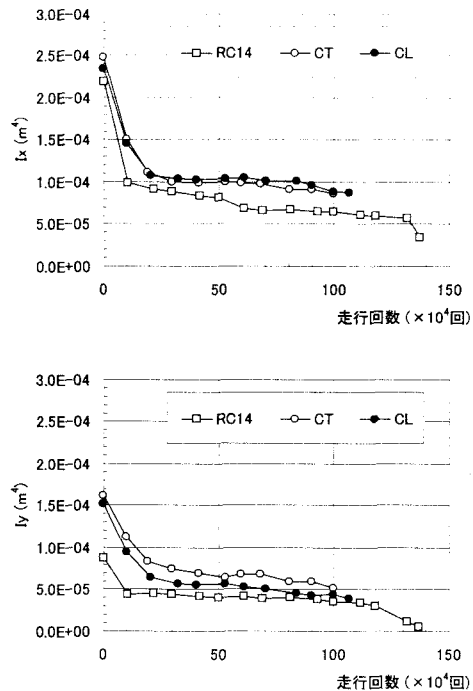


図-11 I_x, I_y の推移

I_y (配力鉄筋断面) について考察する。試験開始の段階でCFシート補強の床版とRC14の間に大きな差ができており、20万回の時点ではっきりと $CT > CL > RC14$ となっており、CTの残留剛性はRC14の1.6倍程度も大きい。これはひび割れの深さの違いやねじり剛性係数(β)の違いであると言える。ただし、 I_x の場合と違ってCFシート補強床版においても右下がり剛性は低下していくようである。80万回付近からCLがRC14と変わらないようなところまで低下し、同様の推移をしている。

表-2に示した異方性度 α について比較するとCTの方が明確に10%程度大きくなっており、異方性の進行が抑制されているといえる。

以上の定量的な比較・考察の結果、CTの貼り付け順のほうが若干、効果的であると結論づけられる。

表-2 I_x, I_y の推定結果一覧

CT						CL					
回数 ($\times 10^4$)	I_x (m^4)	I_y (m^4)	α	β		回数 ($\times 10^4$)	I_x (m^4)	I_y (m^4)	α	β	
0	2.484E-04	1.614E-04	65%	1.00		0	2.340E-04	1.521E-04	65%	1.00	
10	1.508E-04	1.131E-04	75%	1.00		10	1.456E-04	9.461E-05	65%	1.00	
19.2	1.110E-04	8.324E-05	75%	1.00		20.6	1.075E-04	6.448E-05	60%	1.00	
30	9.996E-05	7.497E-05	75%	1.00		32.8	1.039E-04	5.716E-05	55%	1.00	
41.4	8.912E-05	6.939E-05	70%	1.00		40.6	1.024E-04	5.632E-05	55%	1.00	
53	8.995E-05	6.497E-05	65%	1.00		53	1.039E-04	5.716E-05	55%	1.00	
59.8	8.837E-05	6.886E-05	70%	1.00		61.4	1.053E-04	5.263E-05	50%	1.00	
68	8.687E-05	6.781E-05	70%	1.00		70.6	1.015E-04	5.076E-05	50%	1.00	
80.74	9.068E-05	5.894E-05	65%	1.00		83.6	1.016E-04	4.573E-05	45%	1.00	
90	9.068E-05	5.894E-05	65%	1.00		90	9.674E-05	4.353E-05	45%	1.00	
100	8.569E-05	5.141E-05	60%	1.00		100	8.816E-05	4.408E-05	50%	1.00	
						106.6	8.725E-05	3.926E-05	45%	1.00	

RC14					
回数 ($\times 10^4$)	I_x (m^4)	I_y (m^4)	α	β	
0	2.190E-04	8.761E-05	40%	1.00	
10.4	9.863E-05	4.438E-05	45%	1.00	
22.2	9.154E-05	4.577E-05	50%	1.00	
30	8.921E-05	4.460E-05	50%	1.00	
42	8.378E-05	4.189E-05	50%	0.75	
50	8.085E-05	4.043E-05	50%	0.75	
61.4	6.879E-05	4.127E-05	60%	0.25	
69.2	6.606E-05	3.963E-05	60%	0.25	
81	6.713E-05	4.028E-05	60%	0.25	
92.8	6.400E-05	3.840E-05	60%	0.25	
100	6.421E-05	3.531E-05	55%	0.25	
112	6.124E-05	3.368E-05	55%	0.25	
118.4	5.973E-05	2.986E-05	50%	0.25	
132	5.654E-05	1.131E-05	20%	0.25	
137	3.480E-05	5.221E-06	15%	0.25	

4. 炭素繊維シート接着工法の施工性の簡素化に関する実験的研究

i) 供試体

本実験では供試体は2体とし、寸法、配筋などの仕様は前述の実験で用いた供試体と同一にした。なお、ハンチは最初から一体として施工している。

この実験で使用する供試体は予備載荷を行い、疲労損傷を与えてからCFシート補強を行うことにした。CFシートは二層貼り付けで、貼り付け順序は前述の実験と同様の2種類とし、橋軸方向(配力鉄筋方向)を先に貼り付けたものをNCL、橋軸直角方向(主鉄筋方向)を先に貼り付けたものをNCTとする。CFシートの貼り付け範囲は、橋軸方向は前回と同様、床版端部までとし、橋軸直角方向はハンチ上端の角折れ部までの等厚部分だけとしてハンチ補強は行わなかった。通常、CFシート補強の施工においてはハンチ上端部での応力集中を懸念して、貼り付け範囲はハンチ下端までと規定されている¹²⁾。しかし、この場合、ハンチ上端の角折れ部でCFシートの折れ曲がりを防ぐ目的でR加工を施さねばならない。施工においてこれは非常に手間となるので、貼り付け範囲をハンチ上端までとして、R加工の手間を省いた場合の安全性を検討することにした。表-3にCFシートの材料物性を示す。また、図-12に貼り付け順序および貼り付け範囲の概要を示す。

表-3 CFシートの材料物性

引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	目付け量 (g/m ²)	厚さ (mm)
43500	2460000	300	0.167

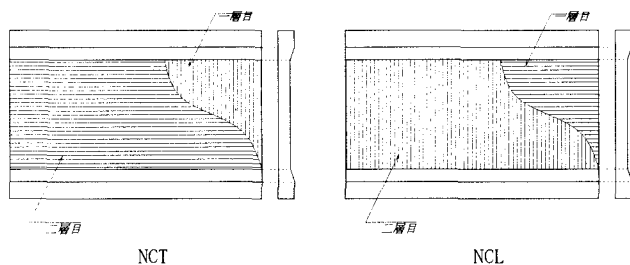


図-12 貼り付け順序および貼り付け範囲

ii) 荷重、走行位置の設定

予備載荷ではNCT、NCLどちらの床版も8tfで40,000回の載荷を行うことにした。CFシート補強後の本載荷はNCLから先に行い、12tfで100,000回の走行の後、荷重を15tfに増やして800,000回、さらに18tfで300,000回の輪荷重走行試験を行った。しかし、このような載荷に関わらずNCLには特筆すべき問題点は見られなかった。実橋では輪荷重が床版のスパン中央部分だけではなくハンチ付近を走行する場合もある。スパン中央を走行する場合よりも大きなせん断力がCFシートに作用するため剥離する可能性が大きくなる。よって、本実験におけるNCT、NCLではCFシート補強をハンチ上端までしか行っていないことから輪荷重がハンチ付近を走行したときを想定して、中央載荷に続いて18tfの輪荷重を偏心載荷する疲労試験を行

った。偏心載荷における輪荷重の走行位置を図-13に示す。NCTは15tfで100,000回の走行後、18tfで300,000回の走行を行って中央載荷を終了した。偏心載荷の荷重は中央載荷に引き続き18tfとし、原則として床版が破壊に至るまで載荷を継続した。

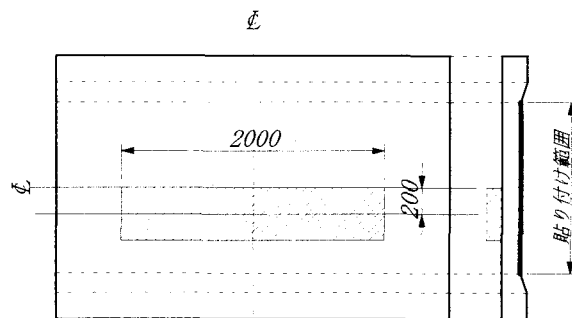


図-13 偏心載荷における輪荷重走行位置

iii) 中央載荷試験における考察

予備載荷における、たわみによる劣化度を図-14に示す。予備載荷終了時の劣化度はNCLが0.27、NCTは0.19であった。図-15に床版中央の主鉄筋の活荷重ひずみを示す。NCTはおよそ250μで推移しているが、NCLは300μから350μの間で変化している。劣化度と主鉄筋のひずみでそれぞれ2体の比をとってみると、どちらもおよそ1.4でありNCLの方が、劣化が進行している。

シート補強後における、たわみによる劣化度の変化を図-16に示す。この図にはCT、CLの劣化度もプロットしている。NCTは劣化度がおよそ0.5に落ち着いたところで本載荷を終了した。NCLは荷重を15tfに上げるとすぐに劣化度が0.5に上がるが、その後は安定している。しかし、90万回で荷重を18tfに変更すると疲労劣化が徐々に進行し、載荷終了時の劣化度はおよそ0.64となった。NCT、NCLと

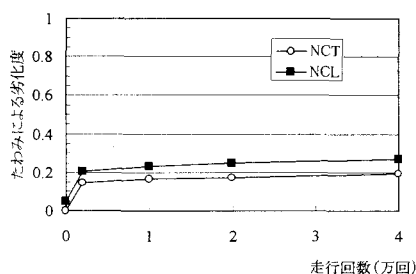


図-14 予備載荷におけるたわみによる劣化度

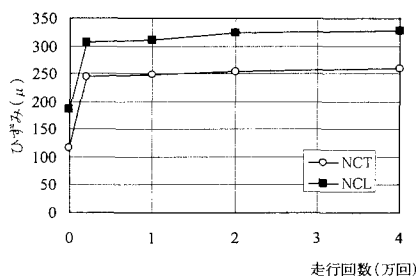


図-15 予備載荷における主鉄筋のひずみ(床版中央)

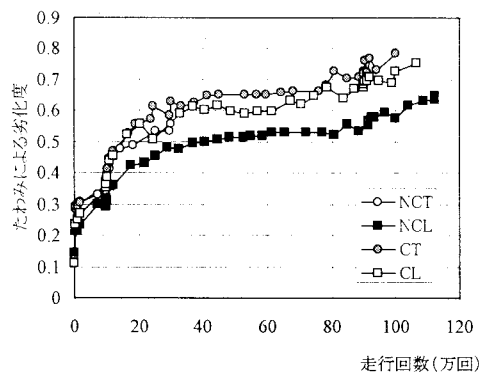


図-16 本載荷におけるたわみによる劣化度

CT,CLの4体を比較すると、CT,CLに比べNCT,NCLの方が小さな値を示し、中央に輪荷重を載荷した場合はハンチ補強が無くても十分な補強効果を保持することが分かる。

iv) 偏心載荷試験における考察

偏心載荷位置直下の活荷重たわみから算出した劣化度の推移を図-17に示す。NCTは偏心載荷によるたわみの増加は見られなかったが、偏心載荷開始後158,000回で突如大きなたわみを示したため試験を終了した。床版下面からCFシート上をたたき点検してみたところ剥離音が聞こえた。NCLは緩やかなたわみの増加を示した。偏心載荷開始後362,000回走行の時点でCFシートの剥離も観察されず、破壊の兆候も無かったため試験を終了した。

偏心載荷終了後に床版を切断し、断面の観察を行った。図-18に切断した断面の写真を示す。NCTとNCLの両方ともはり状化につながるような橋軸直角方向の貫通ひび割れは観察されなかった。NCTの配力鉄筋断面にせん断ひび割れは見られなかったが、CFシートがコンクリートを剥ぎ取り、付着端部から剥離していた。NCLの配力鉄筋断面では偏心載荷時の輪荷重重部から45度方向の斜め下方にせん断ひび割れが発生しており、CFシート付着端部から斜め上へ進展したひび割れとつながっていた。外見上は分からなかったが、せん断破壊寸前の状態であった。以上、2体の供試体であるが、シートの端部をハンチ上端で止めた場合には、ハンチ付近で載荷された場合に、せん断破壊やシートの剥離破壊が発生する可能性の高いことが確認できた。

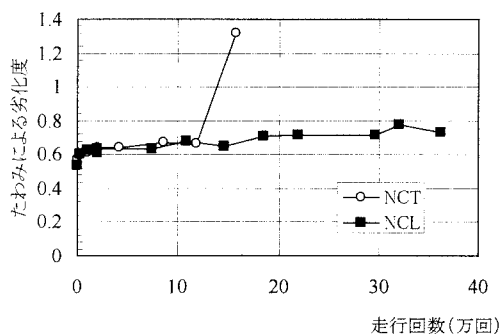


図-17 偏心載荷におけるたわみによる劣化度

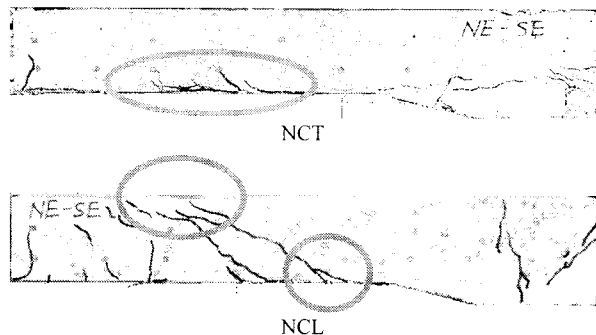


図-18 切断面

5. 結論

試験の結果、貼り付け順序に関しては大きな差は観察されなかったものの、詳細な分析により主鉄筋方向を先に貼り付けたほうが有利であることが分かった。ハンチ下端までの補強の必要性に関しては、スパン中央載荷の場合、差異は無いが、ハンチ付近での偏心載荷をした場合にはハンチ部補強なしではハンチ付近でせん断破壊を生じた。このような結果から、実橋では車両の走行位置にバラツキがあるため、シートはハンチ下端まで補強する必要があると勧告したい。

<参考文献>

- 1) 阪神高速道路公団、阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性；平成3年12月
- 2) 建設省土木研究所 炭素繊維補修・補強工法技術研究会：コンクリート部材の補修・補強に関する共同報告書(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)－；平成11年12月
- 3) 松井 繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究；大阪大学大学院 昭和59年11月 博士論文
- 4) 高井 剣：炭素繊維シートによる床版補強に関する研究；大阪大学大学院 平成8年度 修士論文