

連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究

呉 智深¹・朝倉俊弘²・吉澤弘之³・袁 鴻⁴・小林 朗⁵・高橋 徹⁶

¹正会員 工博 茨城大学工学部 助教授 (〒316-0033 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

²正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

元 (財)鉄道総合技術研究所

³正会員 工博 日鉄コンポジット(株) 土木営業部(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

元 茨城大学理工学研究科

⁴工博 茨城大学工学部 外国人研究員 (〒316-0033 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

⁵正会員 工修 日鉄コンポジット(株) トウシート部(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

⁶正会員 ショーボンド建設(株) 土木事業部(〒101-8468 東京都千代田区神田錦町 3-18)

元 (財)鉄道総合技術研究所

本研究ではコンクリート構造物からコンクリート片が剥落することを防止することを目的として、コンクリート表面に連続繊維シートを貼付けた場合のシートによる剥落防止の効果を確認するために、シートの積層構成、シートの繊維の種類、コンクリートの圧縮強度、シートの貼付長さ等をパラメータとした一連の実験的検討を実施した。また、シートとコンクリートの剥離破壊エネルギー G_c を用いた解析的手法を提案し、シートの面外剥離性状及び剥落防止効果を評価した。その結果、連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合に、押し抜き耐力が1層のみの時に比べ非常に大きくなることが判明した。さらに実験と解析結果を比較した結果、両者がよく一致することが明らかになった。

Key Words: continuous fiber sheet, peeling, spalling resistance of concrete, repair of concrete structure, interfacial fracture energy

1. はじめに

現在多くのトンネルにおいて地圧の作用や材料劣化などにより、覆工からコンクリートが剥離・剥落する現象が生じているため、対策を要するものが少なくない。また、道路・鉄道などの橋梁などから、コンクリートの劣化、鉄筋の腐食による膨張などの原因でコンクリートの小片が剥離・剥落する例も生じており、これらの剥離・剥落の対策が必要とされている。

トンネル覆工の内面補強や高架橋の床版の補強として、連続繊維シートなどによる補強・補修が近年盛んに実施されている。この連続繊維シートの補修・補強効果としては①覆工および床版の曲げ耐力の向上効果および覆工のアーチ構造の維持、②曲げひび割れの開口を抑制する効果、③コンクリート片の剥離・剥落の防止効果、などが考えられる。

覆工表面あるいは床版下面などからコンクリートの小片が剥離・剥落するのを、連続繊維シートをコンク

リートの表面に貼り付けることで防止する場合に、コンクリートと連続繊維シートの界面には面内のせん断力だけでなく、連続繊維シートに発生する引張力の分力により面外にシートを剥離させる力も作用する。この場合の剥離き裂の進展は破壊力学で言うモードIとモードIIの混合モードとなると考えられる。コンクリート構造物の曲げ補強、あるいはせん断補強を行った場合には、連続繊維シートには主としてコンクリート表面に平行な引張力が作用し、コンクリート表面と連続繊維シートの界面には面内のせん断応力が発生する。剥落するコンクリート片の荷重を連続繊維シートで保持する場合、連続繊維シートは面内のせん断力に加え、面外へ引き剥がす力を受ける。面内のせん断力のみを受け発生する連続繊維シートの剥離と、面内のせん断力および面外方向の引き剥がし力を受けて発生する連続繊維シートの剥離のメカニズムは異なるものと考えられる。面外成分を含む連続繊維シートのコンクリートからの剥離に関しては、一方向の連続繊維

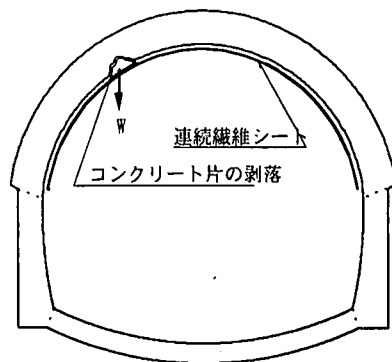
シートでは Karbhar and Engineer¹⁾が実験的検討を行っている。また金原等²⁾が実験的、解析的な検討を実施している。しかし、連続繊維シートを2層直交方向に貼付けたケース、あるいは実際に構造物からコンクリート片が剥落することを想定して実施された実験および検討はなされていなかった。

そのため著者らは、図-1(a)に示すように覆工内面などからコンクリート片が剥落する場合を想定して、図-1(b)に示すように連続繊維シートをコンクリートスラブの下面に貼付け、コンクリート片を介して押し抜き荷重を負荷し、シートを面外方向に剥離させる押し抜き試験を実施した。この際に、まず小型の供試体を用いて、連続繊維シートの配向方法、コンクリートの圧縮強度、連続繊維の種類、接着樹脂の種類等に関し検討を行ってきた³⁾。これらの試験で、押し抜き耐力が大きく、剥落の防止効果大きいことが確認された連続繊維シートを2層、直交方向に積層したケースで、実際の構造物のスケールに近いと考えられる大型の供試体を用いて、連続繊維シートの定着長さ、剥落を想定したコンクリート部の直径等をパラメータとする一連の実験を実施してきた⁴⁾。本論文では新たに有機繊維系の連続繊維シートおよびガラス繊維シート(大型試験)の試験データを加え、さらに連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合の、連続繊維シートとコンクリートの剥離破壊エネルギー G_c を用いた解析的手法を提案し、実験結果と比較した。

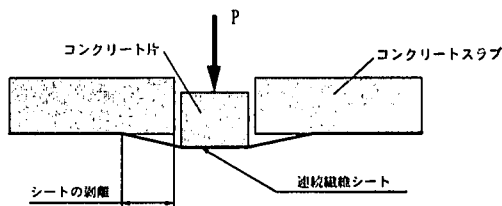
2. 試験方法

(1) 小型押し抜き試験

図-2(a)に示すような中央に孔の開いた無筋コンクリート平板の孔部に、コンクリートの平板の孔部の内径よりわずかに外形の小さいコンクリート製の円筒形圧子を入れ、連続繊維シートを接着含浸樹脂を用いてコンクリート平板下面に貼り付けた。連続繊維シートを接着するコンクリートの表面は、ダイヤモンドサンダーを用いてケレンを行い、プライマーを塗布した後に樹脂パテで平滑化した。コンクリート圧子とコンクリート供試体の間には摩擦が働かないようにポリエチレンフィルムを挟んでいる。このコンクリート圧子にインストロン型万能試験機を用い平板の垂直方向に変位を与えることにより、連続繊維シートの押し抜き試験を実施した。変位は、図-2(a)に示すとおり3点で測定した。平板の寸法は $W50 \times L50 \times t8\text{cm}$ とし、スパン45cmの2辺で試験体を支持した。荷重は変位制御とし、1 mm/minの速度で1 stepの押し込み量を0.5mmとして荷重し、①荷重直後の荷重、②応力の緩



(a) 覆工内面のコンクリート小片剥落のイメージ図

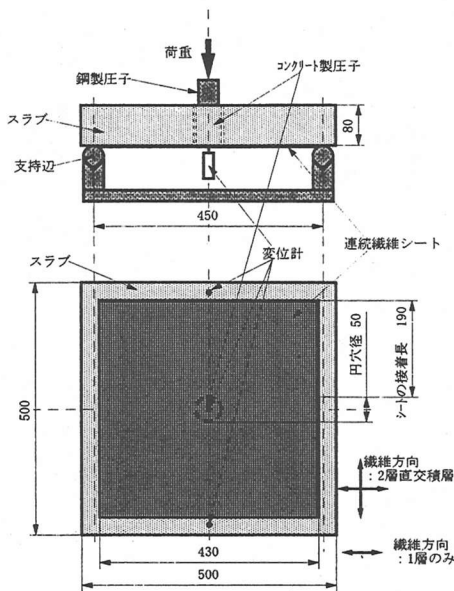


(b) 今回実施した試験のイメージ図

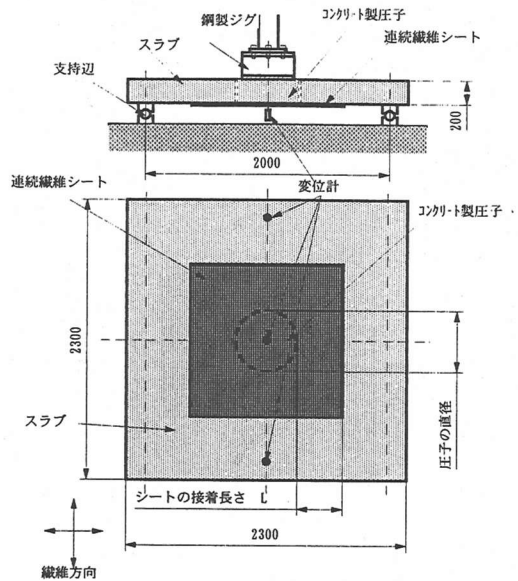
図-1 コンクリート片剥落と今回実施した試験のイメージ図

和を考慮した荷重後2分後の荷重、の測定を行った。荷重のパターンは図-3に示すとおりである。コンクリート圧子を2mm押し込むごとに、連続繊維シートの剥離範囲を特定するためにたたき点検を行い、連続繊維シートの表面に剥離範囲をマーキングした。

実験パラメータを表-1に示す。ここでMMAはメチルメタアクリレート樹脂、PB0繊維はポリパラフェノルベンゾビスオキサドール繊維の略である。養生条件はエポキシ系のプライマー、パテ、接着含浸樹脂を使用したケースでは、23℃の恒温室内で1週間以上とした。MMA系のプライマー、パテ、接着含浸樹脂はエポキシ系の材料と比較して①短時間硬化が可能、②エポキシ系材料では5℃以下の温度では硬化が困難であるが、MMA系材料では-10℃程度までの低温で硬化が可能、などの特徴を有している。MMA系のプライマー、パテ、接着含浸樹脂を用いたケースでは、鉄道トンネルなどの覆工を連続繊維シートを用いて補修・補強した後、早期に交通を解放した場合の剥落防止効果を確認するため、養生時間を3時間とし、その後直ちに荷重試験を実施した。その際の養生温度はエポキシ系材料を用いた場合と同様に23℃とした。表-3に実験に使用した連続繊維シートの材料特性を示す。



(a) 小型試験



(b) 大型試験

図-2 試験方法概要

表-1 小型押し抜き試験の要因

NO.	連続繊維シート種類	積層方向	コンクリート圧縮強度 N/mm^2	樹脂種類	繊維目付 g/m^2	備考
S-1	高強度炭素繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	200	リファレンス
S-2	高強度炭素繊維	0/90° 直交2層	11.8	エポキシ	200	コンクリート強度変化
S-3	高強度炭素繊維	1層のみ(積層方向はスラブの支持方向)	22.1	エポキシ	200	積層方向、枚数変化
S-4	高強度炭素繊維	0/90° 直交2層	22.1	MMA	200	即硬化樹脂 養生3時間
S-5	ガラス繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	300	繊維素材変化
S-6	アラミド繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	260	繊維素材変化
S-7	PBO繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	200	繊維素材変化

表-2 大型押し抜き試験の要因

NO.	孔径 mm	連続繊維シート種類	接着長さ mm	繊維目付 g/m^2	備考
L-1	φ200	高強度炭素繊維	500	200	リファレンス
L-2	φ200	高強度炭素繊維	900	200	接着長さ変化
L-3	φ200	高強度炭素繊維	500	200	プレートで拘束
L-4	φ500	高強度炭素繊維	500	200	孔径変化
L-5	φ1000	高強度炭素繊維	400	200	孔径変化
L-6	φ200	アラミド繊維	500	260	繊維素材変化
L-7	φ200	ガラス繊維	500	300	繊維素材変化

(2) 大型押し抜き試験

小型押し抜き試験と同様に、図-2(b)のように中心に円孔を設けたRC平板 (W230 × L230 × t20cm) の円孔内に、別に製作したコンクリート製の円筒状の圧子を入れた状態で、RC平板および円筒状コンクリート圧子の下面に連続繊維シート(直交方向に2層)を接

着した。連続繊維シートを接着するコンクリートの表面は、ダイヤモンドサンダーを用いてケレンを行い、プライマーを塗布した後に、エポキシパテで平滑化した。小型押し抜き試験と同様にコンクリート圧子に垂直方向に強制変位を与え、強制的に連続繊維シートを剥離させる押し抜き試験である。なお、押し抜くコンクリート圧子とRC平板との間に摩擦が起きないようにコンクリート圧子とRC平板間に隙間を5mm設けた。載

表-3 連続繊維シートの機械的物性等

繊維シート種類	繊維目付 g/m ²	ヤング率 E GPa	引張強度 MPa	設計厚さ t mm	繊維シートの剛性 E・t ×10 ⁶ N/mm
高強度炭素繊維	200	235	4,150	0.111	26.1
アラミド繊維	280	118	2,450	0.193	22.8
ガラス繊維	300	74	1,650	0.118	8.7
PBO繊維	200	265	4,450	0.128	33.9

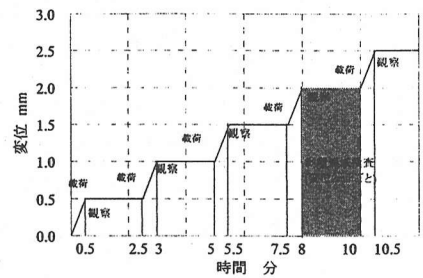


図-3 載荷パターン

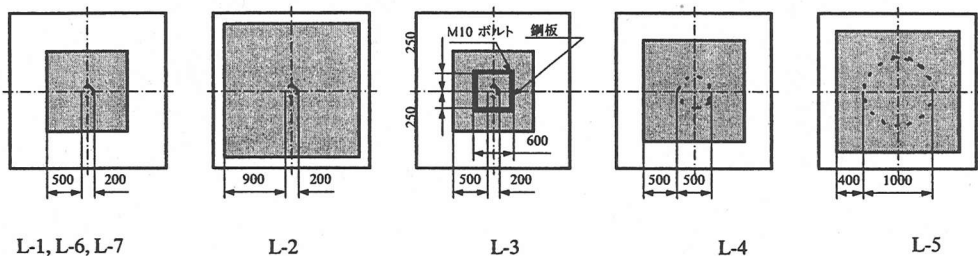


図-4 大型試験体の概要

荷時にコンクリート圧子は載荷装置に固定し、コンクリート圧子を垂直に変位させることで、RC平板と接触しないように載荷した。またコンクリート圧子を載荷装置に吊り下げることにより、コンクリート圧子の自重を相殺した。実験時のRC平板のコンクリートの圧縮強度は28N/mm²であった。変位は、図-2(b)に示すとおり3点で測定した。

試験要因を表-2および図-4に示す。L-3供試体は、中心より30cmの位置にw50×L600×t3.2の鋼製プレート4枚を、円孔を囲んで連続繊維シートの上に配置した。鋼製プレートは1枚あたり3本のM10アンカーを250mmピッチでコンクリートに打ち込み、RC平板に固定した。

エポキシ樹脂の養生期間は1週間以上とした。載荷のパターンは小型押し抜き試験と同一の図-3に示すとおりとした。

小型および大型押し抜き試験の状況を写真-1に示し、写真-2に押し抜き荷重を負荷した際の連続繊維シートの剥離状況を示す。

3. 試験結果

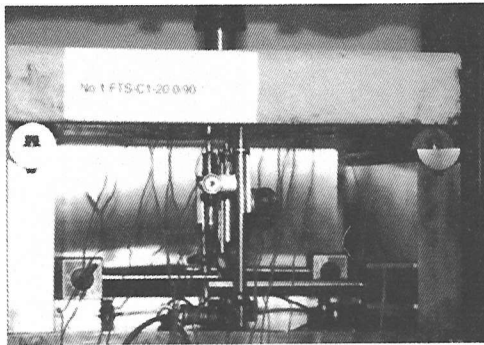
(1) 小型押し抜き試験

コンクリート圧子を押し込んで行くと、円孔近傍の連続繊維シートがコンクリートから剥離していく。連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合には、載荷の初期では剥離は円孔付近から円形状に広がる。さ

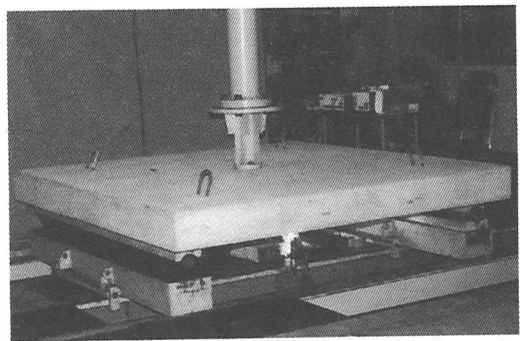
らにコンクリート圧子を押し込んで行くと、剥離領域はさらに広がり、それとともに荷重も上昇していく。剥離長さが長くなると、載荷ステップごとの繊維方向の剥離の進展速度が、繊維と45°の方向の進展速度に比べ速いため、剥離形状は繊維方向をその対角とする正方形の形状に近くなっていく。図-5に試験体の押し抜き試験を行った際の荷重とコンクリート圧子直下の連続繊維シート表面の変位の関係を示す。ここで荷重値には載荷2分後の値を用いている。図-5の荷重-コンクリート圧子の鉛直変位の関係で、高強度炭素繊維シート、アラミド繊維シート、PBO繊維シートを0/90°に2層積層した場合には、最大荷重に到達した直後に荷重が大幅に低下している。これは連続繊維シートとコンクリートの剥離が、連続繊維シートの端部まで進展したためである。ガラス繊維シートの場合には、後で詳細を述べるが、連続繊維シートが一部破断を起こしたため荷重が低下した。高強度炭素繊維シート1層の場合には、コンクリート圧子の変位が増加しても、載荷の初期段階以外では、ほぼ一定荷重で連続繊維シートの剥離が進展し、連続繊維シートの剥離の先端が、連続繊維シートの貼付端部に達した際に荷重が急激に低下した。

写真-3(a)～(d)に連続繊維シートの剥離範囲、剥離状況を示す。写真の白線がコンクリート圧子の約2mmごとの変位量に対する剥離範囲である。

表-4に各試験体の最大荷重(載荷2分後の荷重値)を示す。



(a) 小型試験



(b) 大型試験

写真-1 押し抜き試験状況

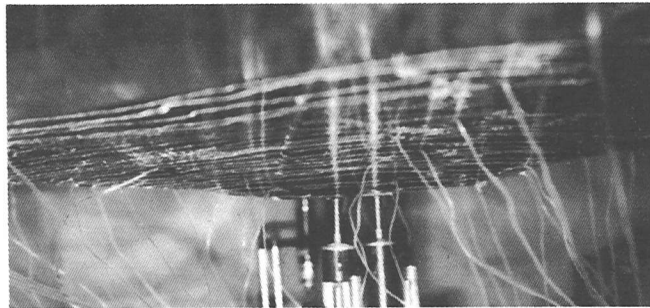
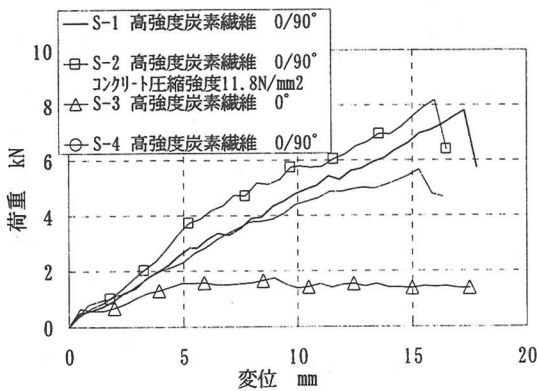


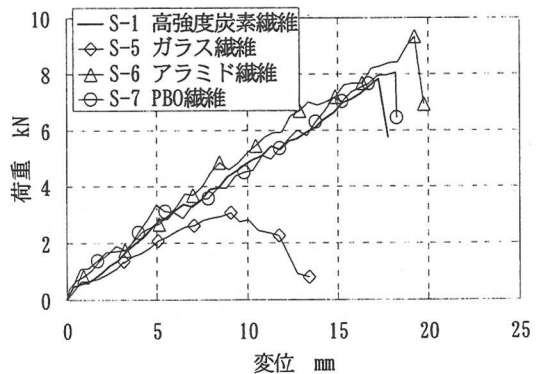
写真-2 シート剥離状況(大型試験)

表-4 小型押し抜き試験結果概要

NO.	連続繊維シート種類	積層方向	コンクリート圧縮強度 N/mm^2	樹脂種類	最大荷重 kN	破壊状況
S-1	高強度炭素繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	7.95	剥離破壊
S-2	高強度炭素繊維	0/90° 直交2層	11.8	エポキシ	8.18	剥離破壊
S-3	高強度炭素繊維	1層のみ(積層方向はスラブの支持方向)	22.1	エポキシ	1.78	剥離破壊
S-4	高強度炭素繊維	0/90° 直交2層	22.1	MMA	5.65	剥離破壊
S-5	ガラス繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	3.08	繊維破断
S-6	アラミド繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	9.33	剥離破壊
S-7	PBO繊維	0/90° 直交2層	22.1	エポキシ	7.96	剥離破壊

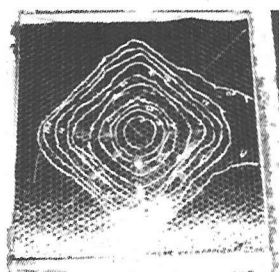


(a) コンクリート強度、樹脂、積層変化



(b) 繊維変化

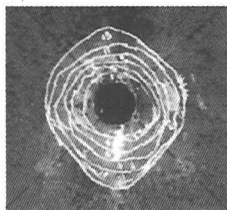
図-5 荷重-圧子の鉛直変位の関係(小型試験)



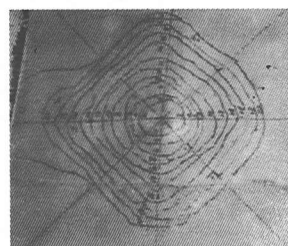
(a) S-1 高強度炭素繊維シート
0/90°



(b) S-3 高強度炭素
繊維シート 0°



(c) S-5 ガラス繊維シート
0/90°



(d) S-6 アラミド繊維
シート 0/90°

写真-3 剥離状況(小型試験)

表-5 大型押し抜き試験結果概要

NO.	穴径 mm	連続繊維 シート種類	接着長さ mm	最大変位 mm	最大荷重 kN	破壊状況
L-1	φ200	高強度炭素繊維	500	43.0	17.0	剥離破壊
L-2	φ200	高強度炭素繊維	900	71.0	23.9	剥離破壊
L-3	φ200	高強度炭素繊維	500	46.0	33.7	アンカー引抜け、剥離破壊
L-4	φ500	高強度炭素繊維	500	42.5	26.1	剥離破壊
L-5	φ1000	高強度炭素繊維	400	32.0	29.1	剥離破壊
L-6	φ200	アラミド繊維	500	48.0	24.6	剥離破壊
L-7	φ200	ガラス繊維	500	48.0	16.4	繊維破断

a) 積層パターンの影響

高強度炭素繊維シートを一方向のみに積層した場合(S-3)には、写真-3(b)に示すように連続繊維シートが孔の両側に繊維方向に裂け、図-5(a)に示すように荷重もあまり上昇しない。高強度炭素繊維シートを2層直交して積層した場合(S-1)には、連続繊維シートの剥離は円孔縁から周状に広がり、最大荷重は1方向のみの場合に比べて非常に高くなった。

b) コンクリートの強度の影響

図-5(a)に示すようにコンクリートの圧縮強度を変えたS-1とS-2を比較すると、コンクリートの圧縮強度の低いS-2の方がコンクリートの圧縮強度の高いS-1よりも最大荷重が若干大きくなる結果となった。しかし、S-1とS-2の最大荷重の差はわずかであり、実験のばらつきの範囲内であると思われる。このことからコンクリートの圧縮強度の影響が連続繊維シートによるコンクリート片の剥落防止効果に対する影響は、本実験の範囲ではほとんど認められなかった。これは以下の理由によると推定される。

- ①連続繊維シートとコンクリートの剥離が、連続繊維シートとコンクリートの界面付近で生じ、ほとんどコンクリートの内部に進展しないため、最大荷重は供試体内部のコンクリートの圧縮強度より、表面の強度に依存すると考えられること。
- ②供試体内部のコンクリートの圧縮強度は異なる

が、本実験では供試体の作製状況から、たまたま表層強度にはほとんど差が無かった可能性があること。

c) 接着含浸樹脂の影響

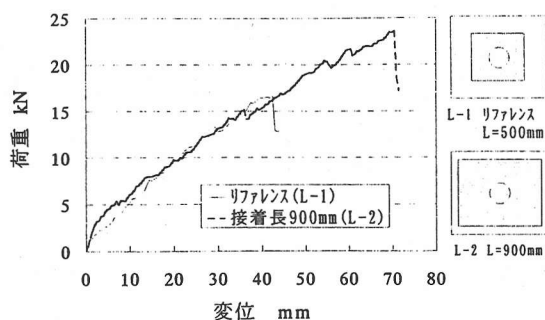
図-5(a)に示すように、MMA樹脂を用い施工した3時間養生の供試体(S-4)は、エポキシ樹脂で施工し1週間養生した基準の供試体と比較した場合に、コンクリート圧子の鉛直変位量10mm程度まではほぼ同等な荷重-コンクリート圧子の鉛直変位の関係を示したが、最終的に最大荷重および最大変位は、若干小さくなった。

d) 連続繊維の種類の影響

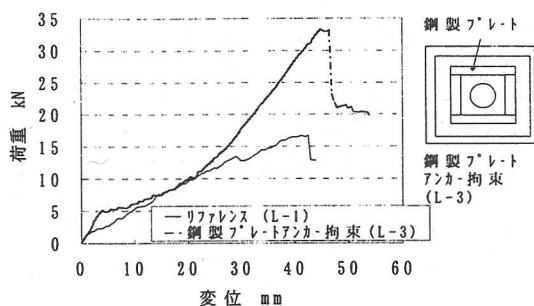
写真-3(c)に示すようにガラス繊維シート供試体(S-5)は最終的にコンクリート圧子の鉛直変位が8mm程度で、コンクリート圧子端部でガラス繊維が破断したため、炭素繊維シートの供試体(S-1)と比べ最大荷重が小さかった。図-5(b)に示すように、ガラス繊維供試体(S-5)の荷重はコンクリート圧子の変位が7mm程度までは上昇し、その後徐々に低下した。有機繊維であるアラミド繊維シート、PBO繊維シートを用いた供試体(S-6、S-7)は最大荷重で炭素繊維シート供試体(S-1)と比較すると、ほぼ同等の最大荷重を示した。

(2) 大型押し抜き試験

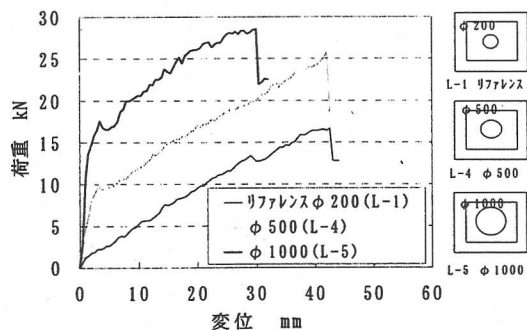
図-6に試験体の押し抜き試験を行った際の荷重-コ



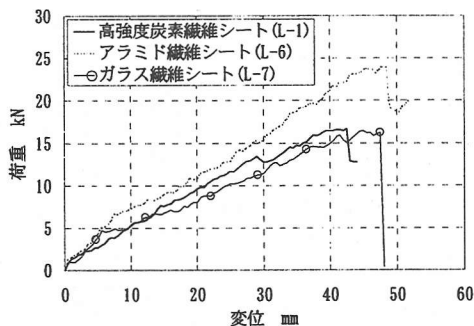
(a) 定着長さ変化



(b) 鋼製プレートの効果

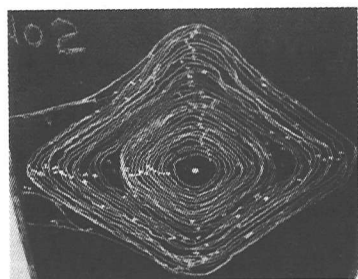


(c) 円穴径変化

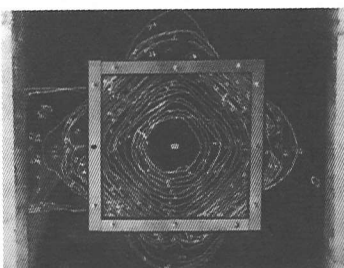


(d) 連続繊維シートの材質の変化

図-6 荷重-圧子の鉛直変位の関係(大型試験)



(a) L-2 L=900



(b) L-3 プレート拘束



(c) L-7 ガラス繊維シート破断

写真-4 剥離状況(大型試験)

ンクリート圧子の鉛直変位の関係を示す。ここで、荷重値には載荷2分後の値を用いている。写真-4(a)～(c)に連続繊維シートの剥離範囲、剥離状況例を示す。写真の白線が小型試験と同様に、コンクリート圧子の約2mmごとの変位量に対する剥離範囲である。また表-5に各試験体の最大荷重(載荷2分後の荷重値)を示す。

ガラス繊維シート供試体(L-7)を除き、どの試験体とも、連続繊維シートが破断することなく、剥離が連続繊維シートの端部まで進展し、剥離が連続繊維シートの端部に到達する直前に、耐力は最大となった。剥離の初期には、小型押し抜き試験と同様に剥離の形状は円形状である。剥離が進展するに従って、剥離の形

状は繊維方向をその対角線とする正方形の形状に近くなった。ガラス繊維シート直交積層供試体は、剥離の進展がシートの端部まで進展する直前に、コンクリート圧子のエッジで繊維シートが破断した。

a) 定着長の影響

図-6(a)示すように円孔径が同一な場合に定着長を長くすると最大荷重は上昇した。しかし、荷重とコンクリート圧子の鉛直変位の関係の傾きは定着長が変化しても、ほとんど変化しないことが確認された。

b) プレートによる拘束効果

図-6(b)に示すように炭素繊維シートをプレートにより拘束した場合、最大荷重はプレートを用いない場合に比較して高く、プレートによる拘束は有効である

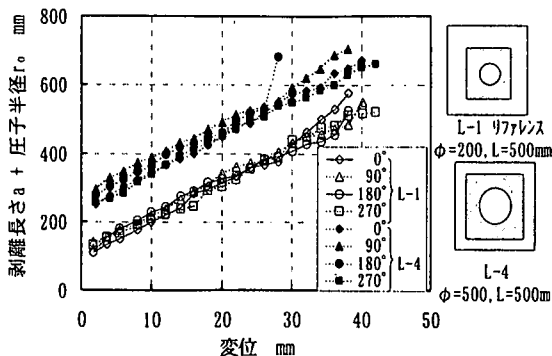


図-7 剥離長さ+圧子半径の和と圧子の鉛直変位の関係 (L-1, L-4)

ことが確認された。しかし、今回実施した実験のように、プレートの剛性が低くかつボルトの間隔が広い場合は、コンクリート圧子の鉛直変位が大きくなると、プレートのボルト間で剥離が進展してしまう。そのため、プレートとしてアングル材などの曲げ剛性の高いものを使用するか、またはアンカーの間隔を密にする対策が必要になることが明らかになった。

c) 円孔径による影響

図-6(c)に示すように、供試体 L-1 は約 1kN、L-4 は約 9kN、L-5 では約 17kN と円孔径が大きい方が載荷直後の剛性変化点での荷重が大きくなった。しかし、載荷直後の時点を除くと、円孔径が変化しても、変位量の増加に対する荷重増加の割合がほとんど等しくなった。図-7に示すように、コンクリート圧子の鉛直変位と剥離長さはほぼ比例関係にあり、剥離長さも荷重は図-8に示すようにほぼ比例関係にある。そのため円孔径が異なっても、荷重とコンクリート圧子の鉛直変位の関係はほぼ比例関係になり、円孔径の異なる供試体の荷重とコンクリート圧子の鉛直変位の関係の傾きはほぼ等しくなる。図-7に示すように、同じコンクリート圧子の鉛直変位量では、円孔径が小さいものに比べ、大きなものの方が、シートの剥離長さに円穴の半径を加えた長さが長くなるため、同じコンクリート圧子の鉛直変位での耐力は円孔径が大きくなるほど高くなった。

d) 連続繊維シートの種類の影響

図-6(d)に示すようにアラミド繊維シートは小型試験の場合と同様に、剥離がシートの端部まで進展した際の荷重は、炭素繊維シートと比べ若干高い結果となった。剥離荷重は連続繊維シートの剛性 (E (連続繊維シートのヤング率) $\times t$ (連続繊維シートの厚み)) の影響⁹⁾や、連続繊維シートとコンクリート界面状態の影響を受けると考えられる。しかし、アラミド繊維シートの方が炭素繊維シートに比べ、剥離が端部まで進展した際の荷重が高かった理由につ

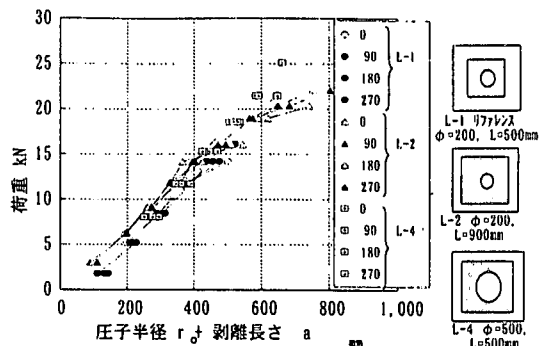


図-8 荷重と圧子半径+剥離長さの関係 (L-1, L-2, L-4)

いては、今回の実験では明白にならなかった。今後更に実験を追加し、詳細につき検討する予定である。

ガラス繊維シート供試体 (L-7) の最大荷重は高強度炭素繊維シート供試体 (L-1) とほぼ同等であったが、写真-4(c)に示すように、剥離が端部まで進展する直前に、コンクリート圧子のエッジ部分で繊維シートが破断した。コンクリート圧子のエッジ近傍にある連続繊維シートに押し抜き荷重が作用した場合、連続繊維シートには①張力による引張応力、②面外方向のせん断力、③連続繊維シートが曲げ変形することによる引張応力、圧縮応力が作用している。ガラス繊維シートの場合、特に上記②、③のような二次応力の影響を受けやすいため、連続繊維シートの引張応力度が許容値以下の値で、ガラス繊維シートの破断が生じたものと考えられる。

小型のガラス繊維シート供試体 (S-5) の場合、コンクリート圧子の円孔径が小さく、二次応力、特に前述の②の影響が大きいためガラス繊維シートの剥離範囲が小さく荷重も小さいうちにガラス繊維シートが破断したものと考えられる。それと比較して、大型のガラス繊維シート供試体 (L-7) の場合には、コンクリート圧子の円孔径が大きく、前述の②の影響が小型供試体と同じ荷重では小型供試体と比べ小さいため、ガラス繊維シートの剥離範囲が小型供試体に比べ大きく広がり、荷重も大きくなった後に、ガラス繊維シートが破断したものと考えられる。

4. 破壊剥離エネルギーを用いた解析

(1) 解析手法

図-9に圧子に負荷した鉛直方向の荷重 P と連続繊維シートの張力の力の釣り合いを示す。この図において繊維方向の剥離角度 α 、剥離長さ a 、圧子の半径 r_p 、シートの貼付け長さ L である。

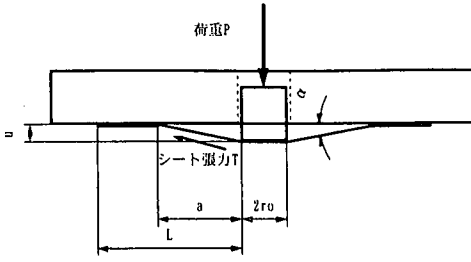


図-9 シートと円柱圧子の力の釣り合い

実験の剥離パターンより、解析では図に示すように一方向のみの積層では楕円形に剥離するもの、2層直交積層の場合は剥離長さが長くなり定常状態になった際には正方形形状に剥離するものとして解析を実施した。

a) 一方向積層の場合

図-10(a)に示すように一方向のみの積層では短径 r_0 一定の楕円形に剥離するものとした。原点と中心とした楕円を以下のように定義する。

$$\frac{x^2}{(a+r_0)^2} + \frac{y^2}{r_0^2} = 1 \quad (1)$$

荷重を負荷する円筒圧子の座標系を(2)式のようにとる。

$$x^2 + y^2 = r_0^2 \quad (2)$$

圧子の鉛直変位が u の時の剥離角度は式(1)、(2)を用いて

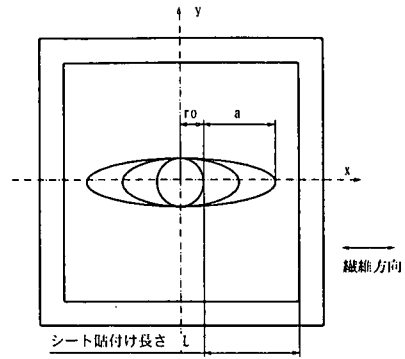
$$\tan \alpha' = \frac{u}{a \sqrt{1 - \frac{y^2}{r_0^2}}} \quad (3)$$

このときシートのひずみ ε は下式のようにになる。

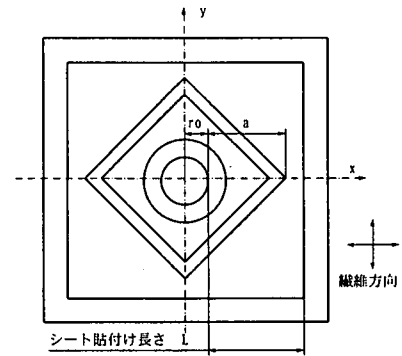
$$\varepsilon = \frac{1}{\cos \alpha'} - 1 \quad (4)$$

シートと円筒圧子の力の釣り合いより

$$\begin{aligned} P &= 2 \cdot \int_{-r_0}^0 E \cdot \varepsilon \cdot \sin \alpha' \cdot t \cdot dy \\ &= 4 \cdot E \cdot t \cdot r_0 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right), \quad \beta = \frac{u}{a} \end{aligned} \quad (5)$$



(a) 一方向積層



(b) 2層直交方向積層

図-10 剥離パターンの模式図

ここで E : 連続繊維シートのヤング率, t : 連続繊維シートの厚さである。

剥離長さ一定の条件で式(5)を変位で積分してひずみエネルギー U を算出すると

$$\begin{aligned} U &= 4 \cdot E \cdot t \cdot \frac{r_0}{a} \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot u^2 - \frac{a^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{u^2}{a^2} \right) \cdot \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{u^2}{a^2}}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi}{4} \cdot a^2 - \frac{1}{2} \cdot a \cdot u \right] \quad (6) \end{aligned}$$

エネルギー開放率 G は式(6)を鉛直変位 u が一定の条件で微分して算出する。

$$G = -\frac{1}{\pi \cdot r_0} \frac{\partial U}{\partial a} = E \cdot t \cdot \left[\beta^2 + \frac{2}{\pi} \cdot (1 - \beta^2) \cdot \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} + \frac{2}{\pi} \cdot \beta - 1 \right] \quad (7)$$

剥離破壊エネルギー G_c がエネルギー開放率 G に等しいとすると、上式で剥離破壊エネルギーは β 、 E 、 t のみで決定されることがわかる。

b) 2層直交積層の場合

剥離が進化した場合の剥離パターンは、ほぼ繊維方向に対角を有する正方形に近くなる。図-11のように簡易的に正方形の剥離と仮定する。xおよびy方向に連続繊維シートが配向されているとしてx軸より θ の角度を有している連続繊維シートのx軸方向応力を σ_{fx} とする。繊維シートに発生する応力の原点に向かう方向の分力を σ とし、連続繊維シートの厚さを t とする。また、x軸上の連続繊維シートが面外方向にコンクリート面となす角度を α とし、x軸から θ 回転した位置のシートがコンクリート面となす角度を α' とすると、x軸方向の応力の合力は下式のような。

$$P_x = 4 \cdot \int_0^{r_0+a} \sigma \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha' (y) \cdot dy \quad (8)$$

$y = (r_0 + a) \cdot \frac{\tan \theta}{\tan \theta + 1}$ であるので、両辺を θ で微分すると次式が得られる。

$$dy = \frac{r_0 + a}{2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + 1} \cdot d\theta \quad (9)$$

$$\sin \alpha' = \sqrt{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right), 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

と書くことができるので

$$P_x = 4 \sqrt{2} \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right)$$

$$\cdot \frac{r_0 + a}{2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + 1} \cdot d\theta$$

$$= 2 \cdot \sigma \cdot t \cdot (r_0 + a) \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

y軸方向の応力の合力を加えて

$$P = 4 \cdot \sigma \cdot t \cdot (r_0 + a) \cdot \sin \alpha$$

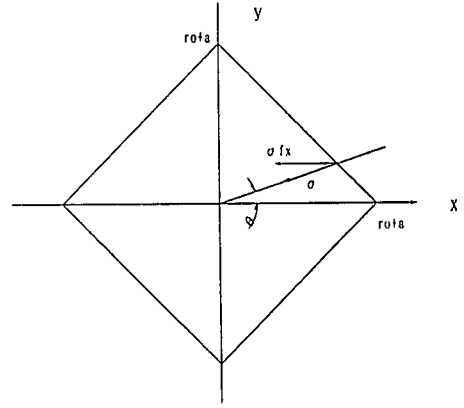


図-11 2層直交積層の場合の座標

$$= 4 \cdot E \cdot t \cdot (r_0 + a) \cdot \beta \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right) \beta = \frac{u}{a} = \tan \alpha \quad (11)$$

ここで E は連続繊維シートのヤング率である。剥離長さ一定の条件でひずみエネルギー U を式(11)を変位で積分して算出すると次式のような。

$$U = 4 \cdot E \cdot t \cdot a \cdot (r_0 + a) \cdot \left(\frac{1}{2} \beta^2 - \sqrt{1 + \beta^2} + 1 \right) \quad (12)$$

エネルギー開放率 G は式(12)を鉛直変位 u が一定の条件で微分して算出する。

$$G = -\frac{\partial U}{4 \cdot (r_0 + a) \partial a}$$

$$= E \cdot t \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \beta^2 + \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} - 1 \right)$$

$$- E \cdot t \cdot \frac{a}{a + r_0} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \beta^2 - \sqrt{1 + \beta^2} + 1 \right) \quad (13)$$

ここで剥離長さ a が円柱圧子 r_0 の半径よりも十分大

きいときに $\frac{a}{a + r_0} \approx 1$ であり次式が得られる。

$$G = E \cdot t \cdot \left(\sqrt{1 + \beta^2} + \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} - 2 \right) \quad (14)$$

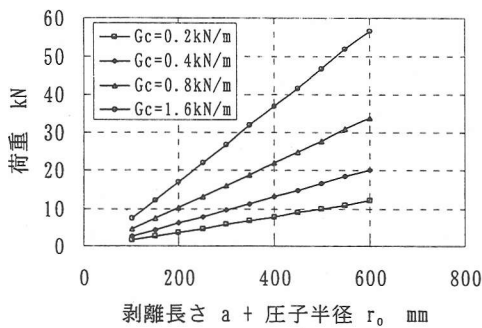


図-12 剥離破壊エネルギーを変化させたときの荷重と剥離長さ+圧子半径の関係(解析値)
($r_0=100\text{mm}$)

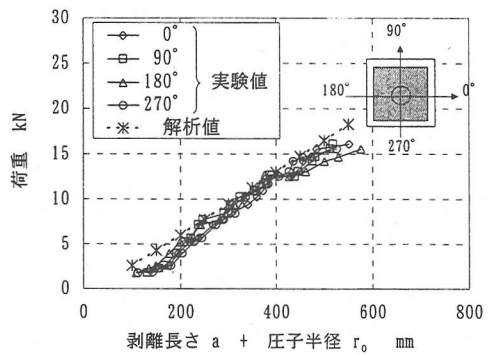
エネルギー開放率 G を剥離破壊エネルギー G_c と等しいとした場合、 β の値は式(11)より剥離長さ a と円柱圧子 r_0 の半径から求めることができる。また、剥離長さ a が円柱圧子の半径 r_0 よりも十分大きいときには β の値は式(14)に示すように、剥離長さ a に依存せず剥離破壊エネルギーにより決まる。すなわち剥離角度 α は一定となる。円柱圧子に負荷している荷重 P は式(11)より剥離長さ a 、円柱圧子の半径 r_0 、剥離破壊エネルギー G_c より算出することができる。

(2) 解析値と実験値の比較

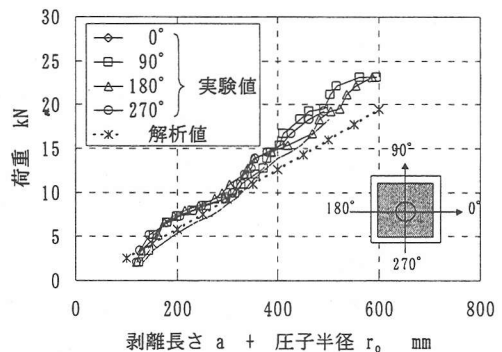
解析手法は連続繊維シートを1層積層のケース、2層直交積層のケースの2種類について求めた。しかし、小型押し抜き試験において剥落防止効果が2層直交積層のケースの方が1層のケースより有効で実用的であることが判明したため、2層直交積層で大型押し抜き試験を実施してきた。そこで、解析値と実験値の比較は連続繊維シートの積層構成を2層直交積層のケースで実施することとした。

図-12に連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合の、荷重と剥離長さ+圧子半径の関係の解析値を示す。剥離破壊エネルギー G_c は式(13)で $G=G_c$ とし、 G_c を0.2から1.6kN/mまで変化させた場合の β の値を求め、式(11)に代入して荷重を求めている。破壊剥離エネルギーを大きくすると荷重と剥離長さ+圧子半径の関係のグラフの傾きが大きくなる。図-13(a)に炭素繊維シートを2層直交方向に積層したケース(L-1)の荷重と剥離長さ+圧子半径の関係を示し、図-13(b)にアラミド繊維シートを2層直交方向に積層したケース(L-6)を示す。実験値から剥離破壊エネルギー G_c の値を求めると、約0.4kN/mの値にした場合に炭素繊維シートの場合およびアラミド繊維シートの場合とも実験値と解析値のグラフの傾きがほぼ一致する。

式(13)より $G_c=0.4\text{kN/m}$ となる β の値を任意の剥離



(a) 炭素繊維シート、圧子半径100mm (L-1)



(b) アラミド繊維シート、圧子半径100mm (L-6)

図-13 荷重と剥離長さ+圧子半径の関係
実験値と解析値の比較($G_c=0.4\text{kN/m}$)

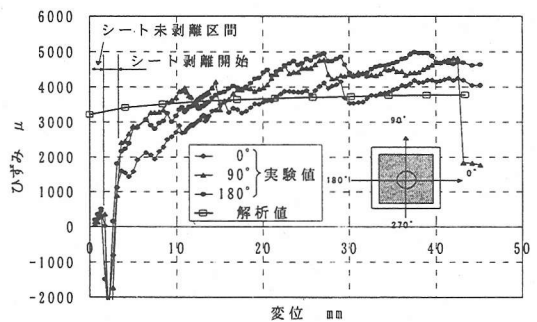


図-14 連続繊維シートのひずみと圧子の鉛直変位の関係
実験値(L-1)と解析値の比較($G_c=0.4\text{kN/m}$)

長さ a に対して算出し、その β の値を式(11)に代入し、円柱圧子にかかる荷重から連続繊維シートのひずみを求め、これを図-14に示す。この図には実験で求められた繊維方向のシートひずみを併記した。ひずみの実測値は円孔縁から50mm離れた位置に貼付けた、繊維方向のひずみゲージから求めたものである。なお、270°方向のひずみゲージはリード線の不良のため

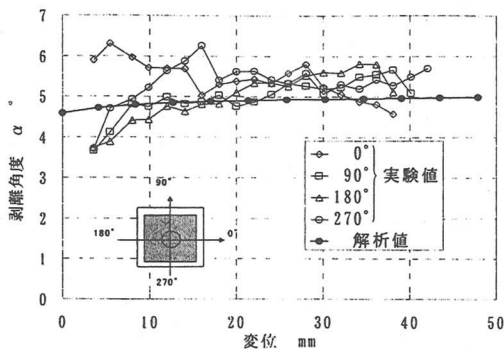


図-15 剥離角度と圧子の鉛直変位の関係
実験値(L-1)と解析値の比較($G_c=0.4\text{kN/m}$)

表-6 大型試験体の実験値と解析値の比較($G_c=0.4\text{kN/m}$)

試験体 No.	解析値		実験値		実験値/解析値	
	最大荷重 kN	最大変位 mm	最大荷重 kN	最大変位 mm	最大荷重	最大変位
L-1	20.0	43.5	17.0	43	0.85	0.99
L-2	34.2	78.8	23.9	71	0.70	0.90
L-4	23.7	42.6	26.1	43	1.10	1.01
L-5	26.5	33.3	29.1	32	1.10	0.96
L-6	21.9	44.8	24.6	48	1.12	1.07
L-7	15.2	57.4	16.4	48	1.08	0.84

め正確な値が得られていないと考えられたため、データから削除した。荷重の初期には、①ゲージ位置の連続繊維シートが剥離していないため、ひずみがほとんど測定されていない区間、②連続繊維シートの剥離がゲージ位置まで進行したため、シート表面に曲げによる圧縮力が作用している区間、のデータを含んでおり、①、②の区間ではシートの正確なひずみの値は測定されていない。しかし、連続繊維シートが完全に剥離した後の区間では、シートひずみの実測値と解析値は良い一致を示している。

また同様な方法で算出した連続繊維シートの繊維方向の剥離角度 α と変位の関係を図-15に示し、実験値と比較した。解析値と実験値は連続繊維シートのひずみの場合と同様に良い一致を示した。

表-6に $G_c=0.4\text{kN/m}$ とした場合の大型試験体の解析値と実験値の比較を示す。解析値では剥離が貼付け範囲端部まで進展した場合に、最大荷重および最大変位に達するものとして計算を実施した。L-7のガラス繊維シートでは、円柱圧子のエッジ近傍で繊維シートの破断が生じているが、剥離が繊維の貼付け範囲のほとんど端部まで進行していたため、参考として値を示した。最大荷重、最大変位とも解析値と実験値は良い一致を示した。

そこで、剥落するコンクリートの範囲を仮定し、そのコンクリートが剥落しないように剥落が予想されるコンクリート部の周囲に連続繊維シートを積層することを想定する。例えば覆工厚さ60cm、直径2.0m

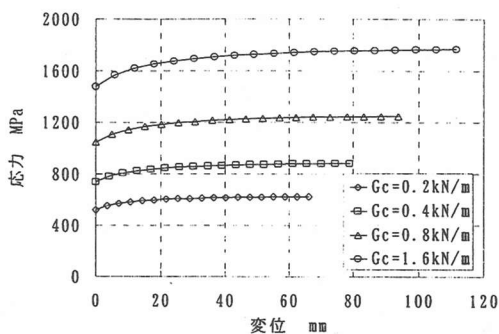


図-16 剥離破壊エネルギーを変化させた場合の連続繊維シート の応力と圧子の鉛直変位の関係の解析値
(高強度炭素繊維シート、 $r_0=100\text{mm}$)

の範囲のコンクリートが剥落すると仮定した場合に、必要な連続繊維シートの定着長さを算出する。剥落を仮定した部分の質量は $2.0\text{m} \times \pi/4 \times 0.6\text{m} \times 2.4\text{ton/m}^3 \times 1000 = 4,523\text{kg}$ 。荷重に換算して44.4kNとなる。連続繊維シートとして表-3に物性を示す炭素繊維シートを2層直交方向に積層するものとする。 $G_c=0.4\text{kN/m}$ として式(11)および(9)を用いて剥落を仮定したコンクリートの荷重を炭素繊維シートで支える定着長さを算出すると、本実験および解析の範囲では剥落を想定した範囲から約25cmの定着長をとり、炭素繊維シートを接着積層すれば良いこととなる。

実際のコンクリート構造物と本実験では、下地処理の手法などにより剥離破壊エネルギー G_c の値が今回の試験の場合と異なることが予想される。また、負荷される荷重に対して定着長さに十分な余裕がなく短い場合には、荷重が負荷されると連続繊維シートが急速な剥離進展を起こし、一度に連続繊維シートの端部まで剥離が進展する現象が生じ、今回解析において想定した安定剥離進展の場合と異なる剥離進展形式が生じる場合がある。さらにトンネルの覆工のように平面でなく曲率を有している場合では、剥離が進行した場合に本実験と異なる挙動を示すことがありと予想される。そのため式(11)および(13)または式(14)を実際の構造物に適用する場合には、①現場で簡易な手法(例えば②)などを用いて剥離破壊エネルギー G_c の値を測定すること、②想定される連続繊維シートの剥離領域から更に外側に十分な長さの最低定着長さを規定すること、③十分な安全率をとること、などの検討が必要であると考えられる。

図-16に剥離破壊エネルギー G_c を変化させた場合の、解析によって求められた高強度炭素繊維シート の応力と変位の関係を示す。剥離破壊エネルギー G_c が高くなると、シートに発生する応力度も高くなる。しかし、剥離破壊エネルギー G_c が一定であれば、変位量が

表-7 繊維が破断する剥離破壊
エネルギーの最小値

シートの種類	G_c kN/m
高強度炭素繊維シート	8.19
アラミド繊維シート	3.29
ガラス繊維シート	4.00

増加し、シートの剥離が進展しても、連続繊維シートに発生する応力度はほとんど上昇せず一定の値となる。すなわち今回モデル化したように剥離パターンが一定であるという条件の範囲では、連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合には、剥離破壊エネルギーの値が非常に高くシートの応力度がシートの破断応力度に達する場合を除き、剥離が大きく進展しても繊維の破断は生じないこととなる。すなわち連続繊維シートの接着長さを十分長くすると最大荷重を十分大きくすることが可能となる。

表-7に連続繊維シートの剥離が進展した場合に連続繊維シートの破断が生じる、剥離破壊エネルギーの最小値を示す。この計算に使用した連続繊維シートの引張強度は表-3の値を使用した。繊維の破断が生る剥離破壊エネルギーの最小値は、実験より求められた約0.4kN/mの値より非常に大きく、連続繊維シートの中ではシートの破断強度の高い高強度炭素繊維シートが一番高くなる結果となった。ガラス繊維シートでは、繊維の破断が生じる剥離破壊エネルギーの最小値は、実験から求められた剥離破壊エネルギーの値よりも十分高い。しかし、ガラス繊維シートを用いた小型試験および大型試験ではコンクリート圧子のエッジの部分で繊維シートの破断が生じている。これは、コンクリート圧子のエッジ部とシートの接触部分、あるいはシートがコンクリート部から剥離しかけている部分では、シートに曲げ応力および面外方向のせん断応力が作用するため、繊維の破断応力度が一軸引張より求められた表-3の値よりも、小さくなるためであると考えられる。

5. 結論

コンクリート構造物からコンクリート片が剥落することを防止することを目的として、コンクリート表面に連続繊維シートを貼付けた場合の、連続繊維シートの剥落防止の効果を確認するために、繊維の積層構成、連続繊維シートの繊維、コンクリート強度、剥落するコンクリートを模した円柱の直径、連続繊維シートの貼付け長さなどをパラメータとして一連の実験的検討を実施し、さらに連続繊維シートとコンクリートの剥離破壊エネルギー G_c を用いた解析的手法を提案

し、実験結果と比較した結果以下の結論を得た。

- 1) 連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合、一方方向積層の場合に比べ押し抜き耐力が大幅に上昇することが実験的に確認された。また2層直交方向に積層した場合には、押し抜き耐力はコンクリート圧子の変位量あるいは繊維シートの剥離長さ、ほぼ比例することが実験的に確認された。
- 2) 連続繊維シートを2層直交方向に積層した場合の、連続繊維シートとコンクリートの剥離破壊エネルギー G_c を用いた解析的手法により、 G_c の値を実験的に定めれば、最大荷重、最大変位、連続繊維シートの剥離角度、連続繊維シートに生じる応力度を精度良く求めることできた。また、剥落すると想定されるコンクリートの重量を保持するために必要な連続繊維シートの定着長さを、解析から算出することが可能であることを示した。
- 3) 今回モデル化したように剥離パターンが一定であるという条件の範囲では、解析により剥離破壊エネルギーの値が小さい場合には、連続繊維シートに生じる応力度は剥離が進展した場合に一定値となることがわかった。すなわち連続繊維シートの接着長さを十分長くすると、最大荷重は非常に大きくなることを示した。

謝辞：本研究の実施にあたり、有意義なご意見をいただきましたFRC研究会の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) Karbhari, V.M. and Engineer, M.: Investigation of Bond between Concrete and Composite: Use of Peel Test, pp.208-227, *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol.15-Feb.,1996.
- 2) Kimpara, I., Kageyama, K., Suzuki, T., Ohsawa, I. and Yamaguchi, K.: Characterization of Peeling Structure of FRP Sheet Bonded on Mortar and Concrete, *Proceedings of The Eighth JAPAN-U.S. Conference on Composite Materials*, pp.1011-1019,1998.
- 3) 朝倉俊弘, 呉智深, 植村政彦, 吉澤弘之: 炭素繊維シートの剥落防止効果に関する研究, コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像—性能照査型補強設計指針(指案), pp.II-61-67, 1998.
- 4) 高橋徹, 朝倉俊弘, 呉智深, 吉澤弘之: 連続繊維シートによる剥離・剥落防止効果に関する実験的検討, 土木学会第53回年次学術講演会, V-472, pp.944-945, 1998.
- 5) Täljsten, C.B.: Strengthening of concrete prisms using the plate-debonding technique, *Inter. J. of Fracture*, Vol.82, pp.253-266,1996.

(1999.10.29受付)

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES ON PEELING BEHAVIOR AND SPALLING RESISTANCE EFFECT OF EXTERNALLY BONDED CONTINUOUS FIBER SHEETS

Zhishen WU, Toshihiro ASAKURA, Hiroyuki YOSHIKAWA, Hong YUAN,
Akira KOBAYASHI and Toru TAKAHASHI

In this paper, the peeling behavior and the spalling resistance effect of externally bonded continuous fiber sheets (CFS) were firstly investigated experimentally through a series of punching shear tests. CFS applied concrete slabs with a hole in center were used for the test specimens. Specimens were varied in scale of slabs, layers and their fiber directions of CFS, diameters of spalling columnar concrete. It was found from the experiments that the maximum load of punching shear with bonded orthogonal two layers of CFS was extremely higher than the case of one layer of CFS.

Secondly, a fracture energy method was proposed for modeling the membrane peeling behavior and for evaluating spalling resistance effect of externally bonded CFS. It is realized that only one material parameter, interfacial fracture energy G_c along CFS-concrete interface, was necessary to represent the interfacial behavior. Finally, the close agreement between the predicted results from the proposed analytical method and the experimental results was demonstrated by means of some numerical examples.