

AFRP シート下面接着 RC 版の押し抜きせん断破壊に関する数値解析的研究

Numerical analysis of punching shear behavior of RC slab bonded with AFRP sheet on the tension-side surface

室蘭工業大学
室蘭工業大学
三井住友建設(株)
室蘭工業大学大学院

正会員
フェロー
フェロー
○学生会員

張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三上 浩 (Hiroshi Mikami)
内田 雅俊 (Masatoshi Uchida)

1. はじめに

近年、車両交通の規制緩和に伴う道路橋の設計荷重変更や、経年変化による既設 RC 床板等の劣化問題が指摘されており、種々の補強工法が研究されている。特に、施工性に優れている連続繊維シート補強工法は急速に実用化が進められていると同時に、より合理的な設計手法の開発も求められている。合理的な設計手法の確立には実験的研究は勿論のこと数値解析的研究も必要不可欠である。しかしながら、現在のところ FRP シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断破壊に関する数値解析的研究事例が少ないことより、その数値解析手法も確立されるに至っていないのが現状である。

このような観点から、本研究では、FRP シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断破壊挙動を適切に再現可能な解析手法を確立することを目的に、2 方向アラミド繊維 (AFRP) シートを下面接着した 4 辺支持 RC 版に関する 3 次元弾塑性解析を試み、実験結果と比較することにより解析手法の妥当性を検討した。

2. 試験体の概要

本研究に用いた試験体は、無補強試験体を含め、2 方向シートの補強層数を 1 層から 4 層に変化させた 4 体の全 5 体である。試験体名は N が無補強、S がシート補強、第 2 項目の数字は補強層数を示している。図-1 には、解析対象とした試験体の形状寸法、配筋状況、载荷位置をシート補強概要とともに示している。RC 版の寸法は 2,000 × 2,000 × 180 mm、かぶり厚さは 40 mm である。鉄筋には D16 を用い、版中央部から 150 mm 間隔で下端のみに配置している。シート貼り付け範囲は 2 方向シートを両支点の 50 mm 手前までとした。一方、試験体の支持条件は 4 辺支持で、回転を許容するピン支持に近い構造である。また、実験終了後には主鉄筋方向の版中央部を切断して断面内のひび割れ分布の観察を行っている (図-2)。表-1, 2 には実験時に実施した引張試験結果より得られたコンクリートおよび鉄筋の材料試験により得られた力学的特性値と 2 方向 AFRP シートの公称値を示している。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

図-3 には、本解析に用いた試験体の要素分割状況を示している。解析モデルは、RC 版の対称性を考慮した 1/4 モデルである。コンクリートおよび FRP シートは 8 節点、6 節点あるいは 4 節点固体要素を用いてモデル化している。スパン中央の鉄筋はビーム要素を用いてモデル化し、その他の鉄筋は埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化している。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部においては節点の鉛直方向変位成分を拘束している。なお、解析は変位制御により行っている。また、収束計算には一般に広く用いられている修正 Newton-Raphson 法を採用している。

表-1 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	圧縮強度 f'_c (MPa)	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	34.9	-	25.2	0.2
鉄筋	-	386.4	206	0.3

表-2 2 方向 AFRP シートの力学的特性値

繊維目付量 (g/m^2)	厚さ t (mm)	弾性係数 E_f (GPa)	引張強度 f_f (GPa)	破断歪 ϵ (%)
435/435	0.24/0.24	118	2.06	1.75

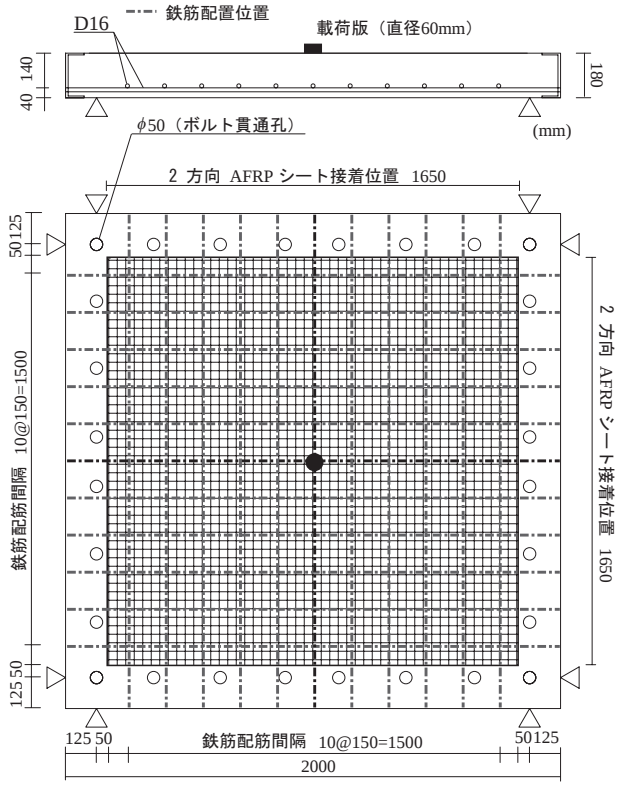


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況、载荷位置

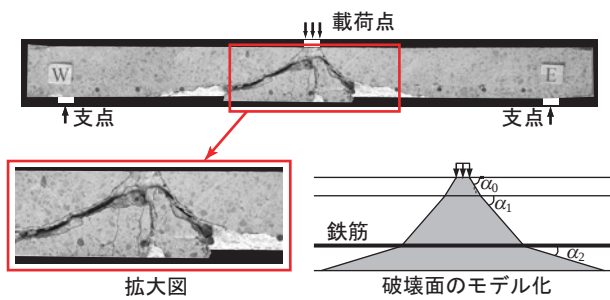


図-2 実験終了後の試験体断面切断状況および押し抜きせん断破壊面のモデル化

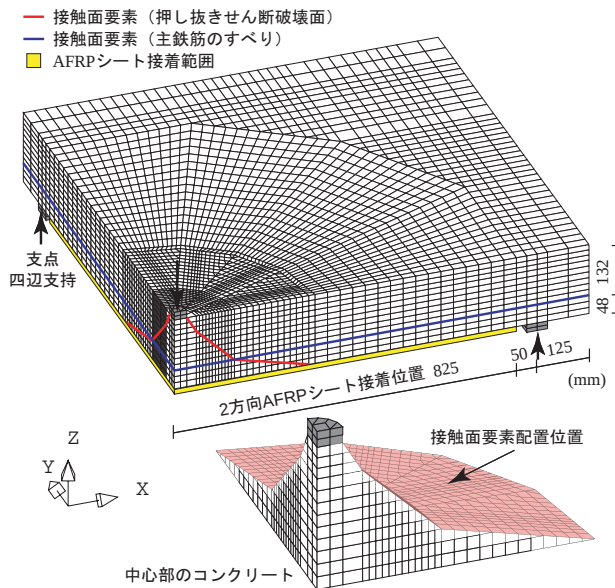


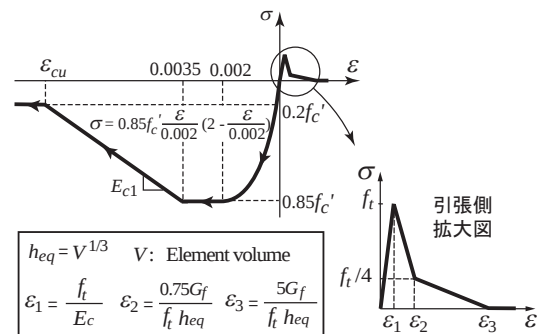
図-3 要素分割状況の一例 (S1 試験体)

3.2 材料構成則

図-4 (a) にはコンクリートの応力-歪関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用い、圧縮歪 $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$ 以後は初期弾性係数の 0.05 倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し、内部摩擦角を 20° としている。一方、引張側に関しては、土木学会コンクリート標準示方書に示されている引張軟化曲線を適用している。鉄筋には、図-4 (b) に示すような塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを適用した。降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとしている。AFRP シートには、図-4 (c) に示すように引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルを用いている。

3.3 接触面要素の配置

本解析では、RC 版の押し抜きせん断破壊を再現するために、接触面要素を用いて押し抜きせん断破壊面をモデル化することとし、図-3 に示すように、版中央部にコーン状に配置した。配置位置やひび割れの角度は実験終了後のひび割れ状況 (図-2) を参考にし、 α_1 に関しては、無補強試験体の場合には $\alpha_1 = 35^\circ$ 、シート補強試験体の場合には $\alpha_1 = 45^\circ$ とし、全試験体とも $\alpha_0 = 60^\circ$ 、 $\alpha_2 = 15^\circ$ とした。また、スパン中央部に配置されている鉄筋とコンク



(a) コンクリート

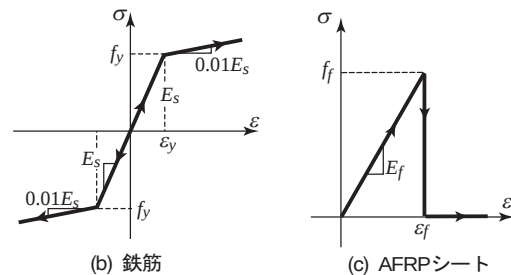
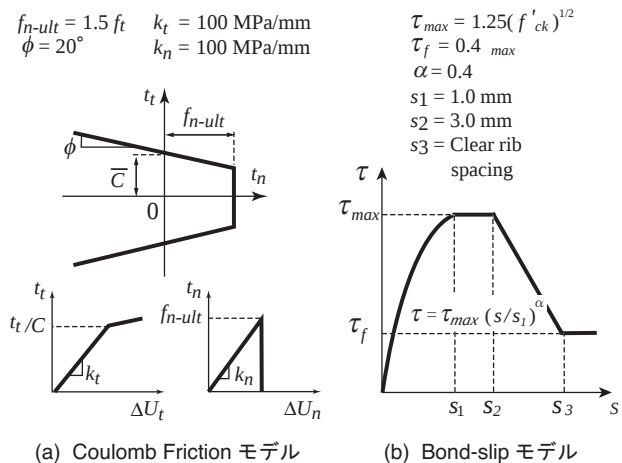


図-4 材料構成則



(a) Coulomb Friction モデル

(b) Bond-slip モデル

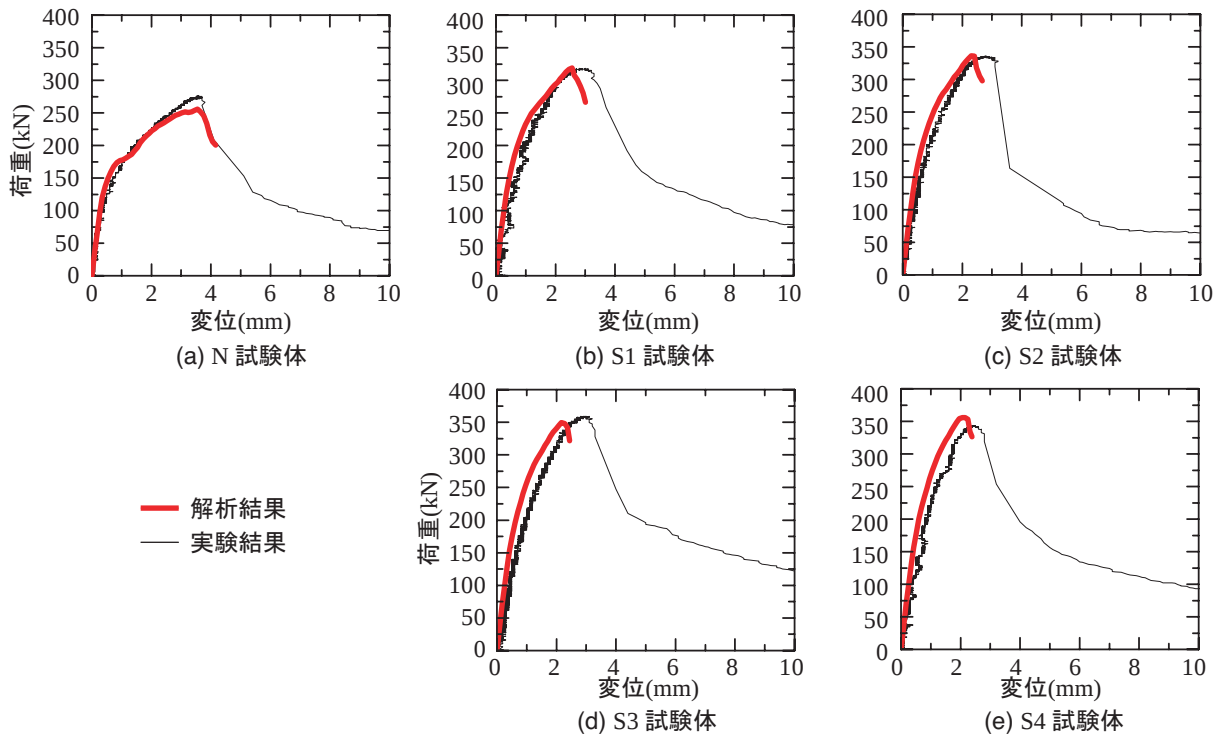
図-5 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

リート間にも接触面要素を配置し、主鉄筋のすべりをモデル化した。それ以外の鉄筋に関しては解析の簡略化のため主鉄筋のすべりについては考慮していない。コンクリートとシート間にはシートの剥離を考慮するために接触面要素を配置している。

3.4 接触面要素の応力-相対変位関係

図-5 には接触面要素に適用した各応力-相対変位関係を示していて、これら3つのモデルを適用することにより、押し抜きせん断破壊面の破壊挙動や主鉄筋のすべり、シートの剥離等の幾何学的不連続現象を再現している。

押し抜きせん断破壊面に配置した接触面要素には Coulomb Friction モデルを採用している。既往の研究²⁾において、法線方向の破壊は、法線方向応力 f_{n-ult} がコンクリートの引張応力 f_t に達した時点で破壊するように設定している。しかしながら、本研究では $f_{n-ult} = 1.5f_t$ と設定することとした。これは、実験時には押し抜きせん断破壊面が凹凸を含んだ複雑な形状となっているのに対し、解析時には平面としてモデル化しており、押し抜きせん断破壊面の面



図－6 荷重－版中央変位関係

積が実験時よりも小さく評価していることを考慮して、便宜的に決定したものである。

また、接線方向の破壊は Mohr-Coulomb の降伏条件を参考に次式より算定しており、内部摩擦角は 20° としている。

$$\bar{C} = f'_c \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi}$$

スパン中央部の主鉄筋要素周囲に配置した接触面要素に適用した Bond-Slip モデルには、CEB-FIP Model Code を参考に示す図-5 (b) に示すモデルを適用している¹⁾。

また、シートの剥離を再現するためにシートとコンクリート間には Coulomb Friction モデルを参考に著者らが過去に提案した剥離モデルを適用している。剥離モデルの詳細は文献3)に譲ることとする。

4. 数値解析結果および考察

4.1 荷重－版下面中央変位関係

図-6 には、荷重－版中央変位関係における各試験体の解析結果と実験結果の比較、表-3 には各結果の最大荷重値 P_{max} と最大荷重時変位 δ_{max} の一覧を示している。各解析結果の終局原因は全て、押し抜きせん断破壊面の離散ひび割れの開口によるものである。

(a) 図に示す N 試験体の実験結果を見ると、荷重 100 kN 程度でひび割れが発生することにより、版の剛性が低下している。その後、徐々に版の剛性が低下し、変位 3.6 mm 程度で押し抜きせん断破壊によって終局に至った。N 試験体の解析結果を見ると、解析結果の最大荷重は実験結果に比べ若干小さくなっているものの、荷重初期から押し抜きせん断破壊により終局に至るまで大略一致している。

(b) 図に示す S1 試験体と (c) 図に示す S2 試験体の解析結果を見ると、解析結果は実験結果に比べて最大荷重時変位が小さくなっている。これは実験時においてはひび割れ

表－3 最大荷重および最大荷重時変位

試験 体名	実験結果		解析結果	
	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)
N	276.2	3.6	256.01 (1.07)	3.55 (1.01)
S1	318.5	2.8	318.96 (1.00)	2.56 (1.09)
S2	336.2	2.8	336.20 (1.00)	2.30 (1.18)
S3	359.0	3.0	349.35 (1.03)	2.17 (1.28)
S4	343.8	2.4	355.78 (0.96)	2.06 (1.14)

() 内の数値は解析結果と実験結果の比である

が徐々に進行するのに対し、解析時には押し抜きせん断破壊面を平面としているため、ひび割れの開口が急激に進展したためと考えられる。しかしながら、最大荷重は実験結果とほぼ同程度の値を示しており、大略一致している。

(d) 図に示す S3 試験体と (e) 図に示す S4 試験体の解析結果は荷重 100 kN 程度において版の剛性が低下した後、実験結果に比べて大きな剛性を示したまま終局に至っている。これはシートの補強層数が多いために版の変形が抑制され、曲げひび割れが殆ど発生せずに押し抜きせん断破壊に至ったためと考えられる。しかしながら、最大荷重は実験結果とほぼ一致しており、実験結果を大略再現できているものと考えられる。

また、各試験体の解析結果を比較すると、シートを接着した S_n 試験体 (添字 n はシート補強層数) は N 試験体よりも最大荷重が大きく、最大荷重時変位が小さくなっている。実験結果においても同様の結果が得られており、シート補強層数を増加させることにより、最大荷重が増加し、最大荷重時変位が低下することが解析的にも明らかとなった。

4.2 最大主歪分布および破壊状況

図-7～10 には各試験体のコンクリート部における最大主歪分布および破壊状況とともに押し抜きせん断破壊面に

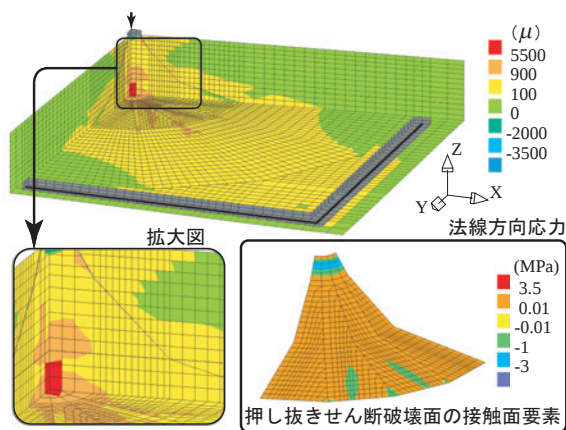


図-7 最大主歪コンター図および破壊状況 (S1 試験体)
剛性低下時: 変位 0.99 mm (変形倍率: 40)

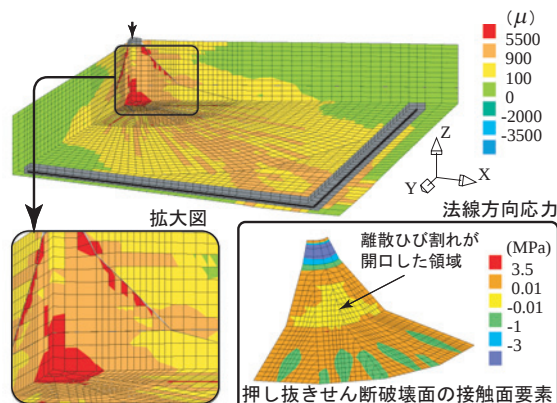


図-8 最大主歪コンター図および破壊状況 (S1 試験体)
最大荷重時: 変位 2.56 mm (変形倍率: 40)

配置した接触面要素の法線方向応力分布も併せて示している。最大主歪のコンターレベルにおいて、100 μ 、5,500 μ の引張歪はそれぞれコンクリートのひび割れ発生歪およびひび割れ開口歪の概略値である。押し抜きせん断破壊面の接触面要素には破壊応力に達した後、法線方向においては応力が開放されるモデルを適用していることより、コンター図において応力ゼロを示す黄色の領域では離散ひび割れが開口しているものと判断される。

図-7～9にはシートを接着した試験体の一例としてS1試験体における各段階での解析結果を示している。

図-7には初期剛性から若干剛性が低下した時点における解析結果を示している。この時点までには、荷重点直下に分散ひび割れの開口を示す赤色の領域が1本発生している。しかしながら、押し抜きせん断破壊面の離散ひび割れは開口していない。

図-8には最大荷重時の解析結果を示している。この時点では荷重点直下付近の分散ひび割れの領域が拡大し、押し抜きせん断破壊面付近にも分散ひび割れの発生が確認できる。また、押し抜きせん断破壊面に着目すると、中央に接触面要素の破壊を示す黄色の領域が分布しており、離散ひび割れが部分的に開口していることが分かる。

図-9には終局時の解析結果を示している。この時点では図-8に比べ分散ひび割れの進展は殆ど見られない。しかしながら、押し抜きせん断破壊面に着目すると、接触面要素の破壊が押し抜きせん断破壊面全体に分布しており離散ひび割れが大きく開口することによって終局に至って

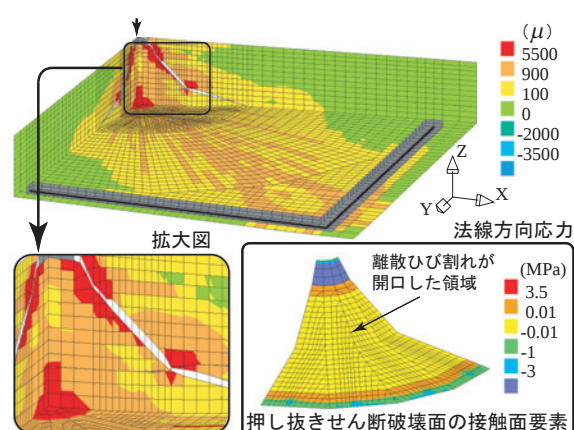


図-9 最大主歪コンター図および破壊状況 (S1 試験体)
終局時: 変位 3.01 mm (変形倍率: 20)

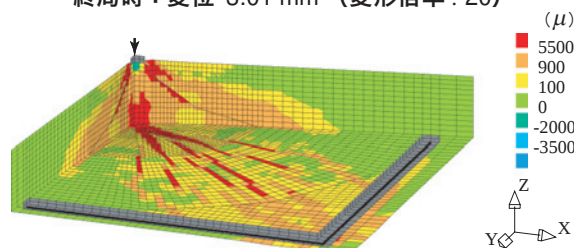


図-10 最大主歪コンター図および破壊状況 (N 試験体)
最大荷重時: 変位 3.55 mm (変形倍率: 20)

いる状況が、拡大図からも確認できる。実験時にはシートを接着しているため曲げひび割れの発生状況は確認できないが、図-6からも明らかなように荷重初期にひび割れの発生によって剛性が低下し、その後押し抜きせん断破壊に至っており、解析結果は実験結果を大略再現しているものと考えられる。

図-10には比較として、N試験体の最大荷重時における解析結果を示している。N試験体の解析結果はS1試験体に比べ、版下面において荷重点直下付近から隅角支点部に向かって分散ひび割れが多く発生している。実験時においても解析結果と同様に版下面に曲げひび割れが発生した後に、押し抜きせん断破壊に至っている状況を確認している。これより、シートを下面接着することにより版の曲げ剛性が向上したことにより変形が抑制され、それに対応して版下面における分散ひび割れの発生も抑制されるものと推察される。

5. まとめ

- (1) 本研究で提案した解析手法を用いることにより、AFRPシート下面接着RC版の最大荷重等はほぼ一致しており、破壊挙動についても大略再現可能である。
- (2) シートの補強層数が増加させることにより、最大荷重が増大し、最大荷重時変位が小さくなる傾向にあることが数値解析的にも明らかになった。

参考文献

- (1) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- (2) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRPシート曲げ補強RC梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No. 725/V-58, pp.255-272, 2003.