

補強本数を変化させた AFRP ロッド下面埋設 RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究

Experimental study on influence of number of AFRP rods on static resistant behavior of RC beams flexural strengthened with NSMR

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroschi Mikami)
 三井住友建設(株) 正会員 藤田 学 (Manabu Fujita)
 室蘭工業大学 ○学生員 笠井 和俊 (Kazutoshi Kasai)

1. はじめに

平成5年度版道路橋示方書により規定された新活荷重の対応策や劣化部補強及び耐震補強対策として、FRPシート接着工法による鉄筋コンクリート(RC)構造物の補修・補強工事が盛んに行われている。しかしながら、この補強工法の場合には、補強材でコンクリート表面を完全に被覆してしまうため、1)コンクリートの劣化損傷によるひび割れ進展状況の目視点検が不可能になること、2)コンクリートからの排水が困難であり構造物内部に滞水して耐疲労性能が低下すること、等の問題点を有している。

このような背景より、本研究では上述のような欠点を改善できるような簡易で合理的な既設RC構造物の補強工法を開発することを目的に、アラミド繊維製ロッド(以後、AFRPロッド)をRC部材のかぶりコンクリート部に埋設する工法を提案し、その曲げ補強効果をRC梁の静載荷実験によって検討した。本研究では、主鉄筋比が異なる2種類のRC梁に対して、直径の異なる3種類のAFRPロッドを用い、引張剛性が同程度となるようにロッド本数を変化させて既設構造物の補強筋量やAFRPロッド補強本数が曲げ耐力向上効果や剥離性状に及ぼす影響を検討した。

表-1 試験体の一覧

| 試験体名 | 主鉄筋比 (%) | 補強材料 | 補強本数 | 引張剛性 E・A(MN) |
|------|----------|------|------|--------------|
| A-5 | 0.80 | RA5 | 4本 | 78.5 |
| A-7 | | RA7 | 2本 | 83.7 |
| A-11 | | RA11 | 1本 | 84.9 |
| B-5 | 1.82 | RA5 | 4本 | 78.5 |
| B-7 | | RA7 | 2本 | 83.7 |
| B-11 | | RA11 | 1本 | 84.9 |

表-2 AFRPロッドの材料特性値

| 補強材料 | ロッド径 (mm) | 公称断面積 A (mm ²) | 弾性係数 E (GPa) | 引張強度 (GPa) | 破断ひずみ ε (%) |
|------|-----------|----------------------------|--------------|------------|-------------|
| RA5 | 5.0 | 19.6 | 62.5 | 1.45 | 2.00 |
| RA7 | 7.3 | 41.8 | | | |
| RA11 | 10.4 | 84.9 | | | |

2. 試験体の概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、主鉄筋比を2種類、ロッド径を3種類に変化させた全6体である。表中、試験体名の第一項目は、下端主鉄筋の種類(A梁;D13, B梁;D19)を示し、第二項目にはAFRPロッドの直径を示している。本実験では、引張剛性E・Aを極力等しくなるように決定しているため、A/B-5で4本、A/B-7で2本、A/B-11で1本のロッドを埋設している。なお、著者が先に提案しているFRPシート補強した場合の破壊形式予測法¹⁾を適用すると、A梁では剥離破壊型、B梁では曲げ圧壊型を示すことが予想される。表-2には、AFRPロッドの材料特性値の一覧を示している。

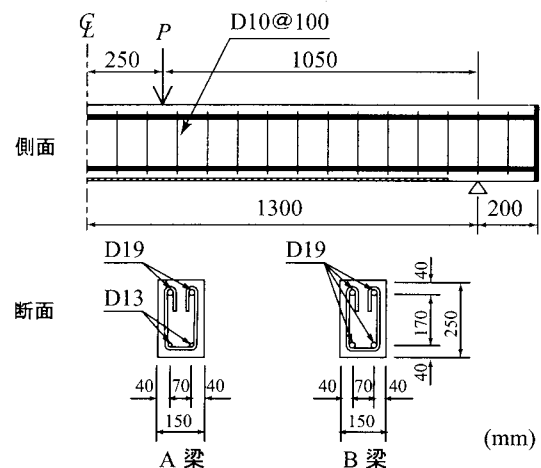


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

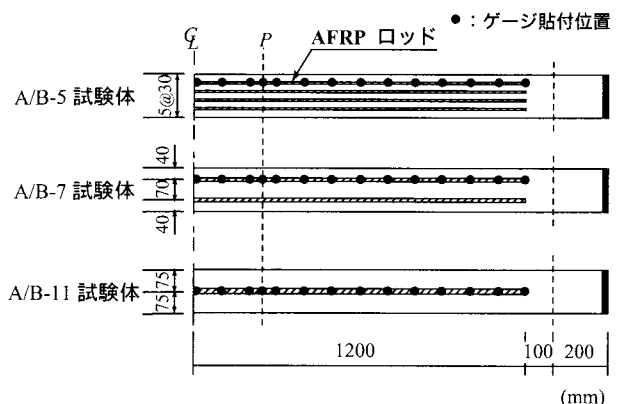


図-2 試験体の補強概要

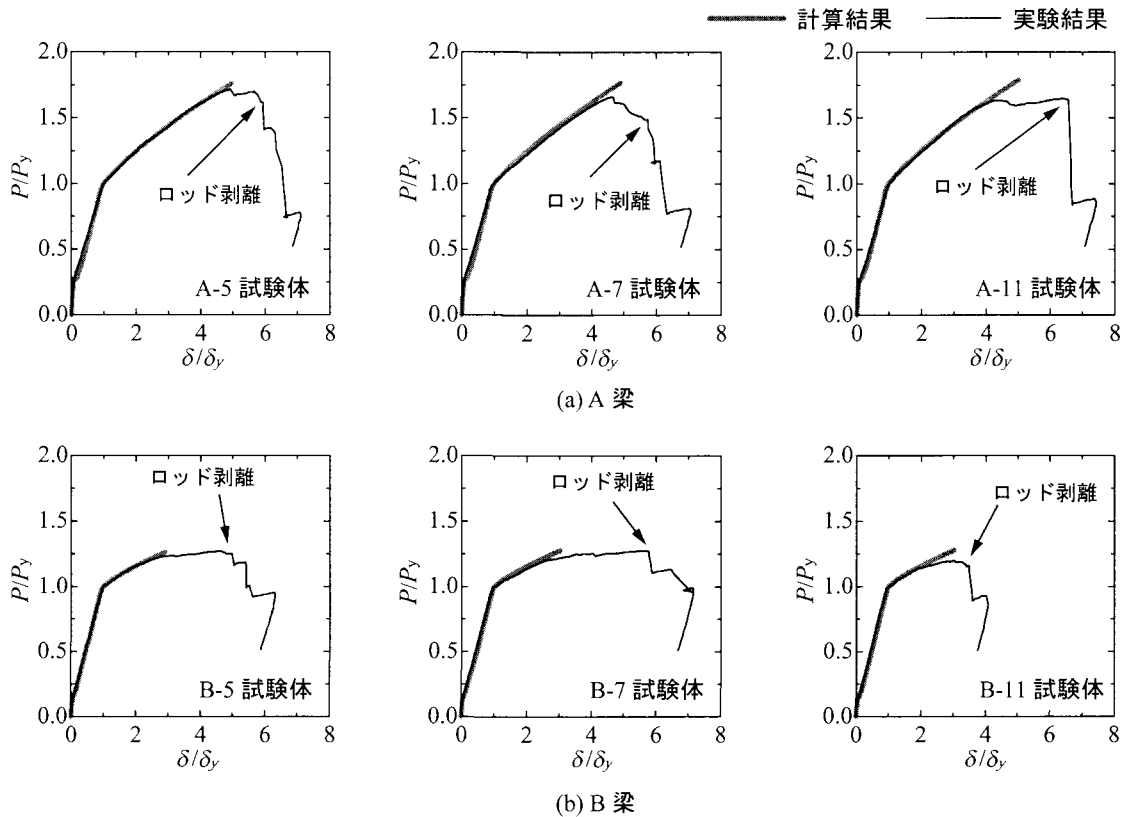


図-3 無次元荷重-変位曲線に関する実験および計算結果の比較図

表-3 実験および計算結果の一覧

| 試験体名 | 降伏荷重 | | 降伏変位 | | 無次元最大荷重 | | | 無次元最大荷重時変位 | | |
|------|----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------|-----------------------------------|-----------------------------------|------|
| | 実験値 P_{ye} (kN) | 計算値 P_{yc} (kN) | 実験値 δ_{ye} (mm) | 計算値 δ_{yc} (mm) | 実験値① P_{ue}/P_{ye} | 計算値② P_{uc}/P_{yc} | ①/② | 実験値③ δ_{ue}/δ_{ye} | 計算値④ δ_{uc}/δ_{yc} | ③/④ |
| A-5 | 42.7 | 39.4 | 9.4 | 8.6 | 1.72 | 1.76 | 0.98 | 4.90 | 4.96 | 0.99 |
| A-7 | 42.2 | 39.8 | 9.7 | 8.7 | 1.66 | 1.77 | 0.94 | 4.62 | 4.89 | 0.94 |
| A-11 | 41.1 | 39.3 | 9.1 | 8.5 | 1.65 | 1.79 | 0.92 | 4.20 | 5.00 | 0.84 |
| B-5 | 86.1 | 80.5 | 13.2 | 10.3 | 1.27 | 1.26 | 1.01 | 4.60 | 2.92 | 1.58 |
| B-7 | 87.0 | 80.1 | 13.3 | 9.9 | 1.27 | 1.28 | 0.99 | 5.74 | 3.04 | 1.89 |
| B-11 | 83.0 | 80.0 | 12.3 | 9.9 | 1.22 | 1.28 | 0.95 | 3.20 | 3.04 | 1.05 |

図-1には、本実験に用いたRC梁の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、いずれも断面寸法(梁幅×梁高)15×25cm、純スパン長2.6mである。試験体は、A梁の場合は下端および上端鉄筋にそれぞれD13、D19を2本ずつ、B梁の場合は下端および上端鉄筋にD19を2本ずつ配置した複鉄筋矩形RC梁である。

図-2には、試験体底面のロッド埋設状況を示している。各試験体の底面にはロッド径を多少上回る幅および深さの溝を切削し、エポキシ樹脂系パテを充填した後にロッドを埋設している。ロッドの梁幅方向の配置位置はロッド本数が4本の場合は梁幅を等間隔に分割する位置、2本の場合は主鉄筋と同様の位置、1本の場合は梁幅の中央位置としている。また、梁軸方向の補強範囲は梁中央部から両支点の10cm手前までとしている。なお、曲げ補強ロッド上には、検長1mmのひずみゲージをスパン中央部から両支点側に10cm間隔および載荷点直下に貼り付けている。

実験時のコンクリートは材齢が106日、平均圧縮強

度は $f'_c = 31.6$ MPaであった。また、主鉄筋の降伏強度はD13、D19で376.9MPa、383.4MPaであった。なお、本実験における測定項目は、載荷荷重、スパン中央変位(以後、単に変位)およびAFRPロッドのひずみである。

3. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重-変位曲線

図-3には、各試験体の無次元荷重-変位曲線に関する実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は既往の研究¹⁾と同様に、AFRPロッドとコンクリートの完全付着を仮定し、上縁コンクリートひずみが3,500 μ に至る時点を終局として断面分割法により算出したものである。なお、図中の実験および計算結果は、各試験体の主鉄筋降伏後におけるAFRPロッドの曲げ補強効果を同一の尺度で比較検討するため、各々の降伏荷重 P_{ye} 、 P_{yc} 、および降伏変位 δ_{ye} 、 δ_{yc} で除し、無次元化して整理している。表-3には、参考のため各試験体の降伏荷重、降伏変位、無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位

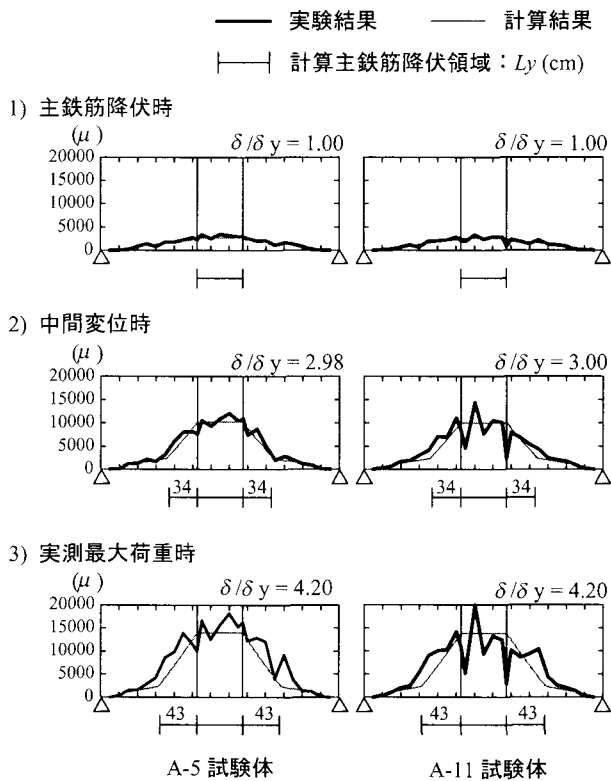


図-4 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布性状 (A 梁)

の実験および計算結果に関する一覧を示している。

(a) 図より、A 梁の実験結果はいずれの試験体も計算終局時の荷重および変位到達前にロッドが剥離して終局に至ることより剥離破壊型の性状を示していることが分かる。一方、(b) 図より、B 梁の実験結果は B-11 試験体を除いて計算終局時まで計算結果とほぼ同様の耐荷性状を示し、計算終局変位到達後、計算耐力と同程度の荷重レベルでロッドが剥離して終局に至っていることより、曲げ圧壊型の性状を示していることが分かる。

表-3 より、無次元最大荷重時変位に着目すると、A 梁ではロッド径の増大とともに減少傾向が見られ、B 梁でもロッド径の最も大きい B-11 試験体で最も小さな値を示している。これらの結果は、ロッド径が大きい場合にはロッドの曲げ剛性が大きく、曲率の増大に伴う変形に追従できないために部分剥離が早期に発生しやすいことを示すものと考えられる。以上のことから、本実験の範囲内では、引張剛性が同程度でロッドの補強本数を変化させる場合においても、著者らによる FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法が適用可能であるものと判断される。ただし、補強材料の曲げ剛性が特に大きい場合には、早期に剥離が進展しやすいことに留意が必要である。

3.2 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布性状

図-4 には、A-5/11 試験体の AFRP ロッドのひずみ分布性状を、1) 主鉄筋降伏時、2) 主鉄筋降伏時と計算終局時の中間変位時、3) A-11 試験体の実測最大荷重時における実験結果と計算結果を比較して示している。図の下には、参考のため各時点における計算結果の主鉄筋降伏領域 L_y (cm) を併せて示している。

図より、1) 主鉄筋降伏時では、いずれの実験結果も計算結果のひずみ分布とほぼ対応しており、ロッドが完全

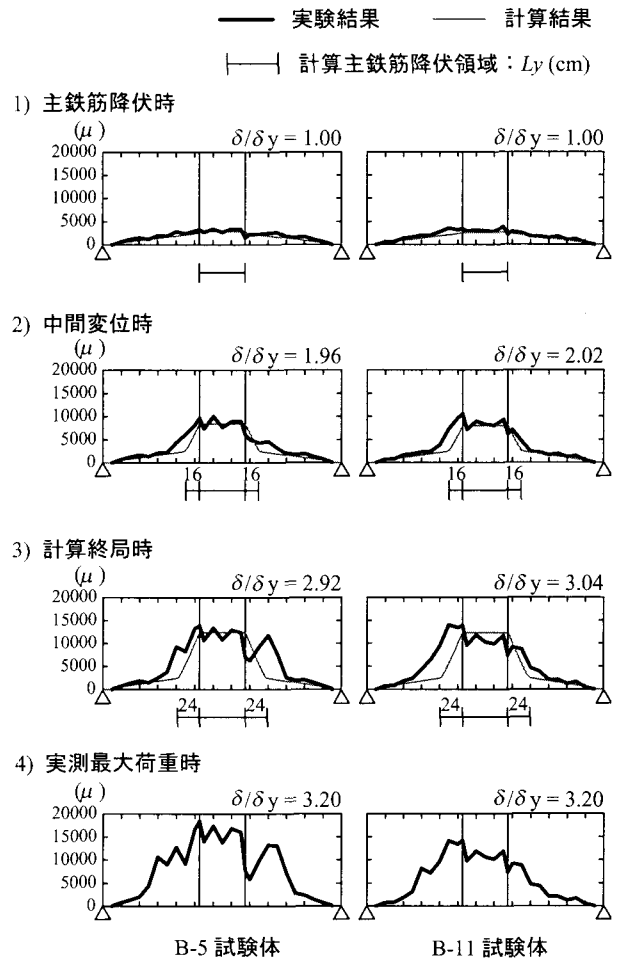


図-5 AFRP ロッドの軸方向ひずみ分布性状 (B 梁)

付着に近い状態にあることが分かる。2) 中間変位時では、等曲げ区間において、曲げひび割れの発生により局所的に大きなひずみが発生しているものの、計算結果とほぼ対応していることが分かる。しかしながら、等せん断力区間では、計算主鉄筋降伏領域内において、実験結果が計算結果よりも大きく示される傾向にある。これは主鉄筋降伏領域内のかぶり部においてコンクリートブロックが形成され、その押し出しによるピーリング作用により部分剥離が発生したためと考えられる。また、3) 実測最大荷重時には、大きなひずみ分布範囲が主鉄筋降伏領域の拡大とともに支点側へ進展していることが分かる。また、A-11 試験体の最大荷重時変位では、A-5 試験体は最大荷重に至っていないことから、ロッド径が大きい場合ほど早期に剥離が進展していることが分かる。これは、 $E \cdot A$ はほぼ同等であるものの、ロッド径が大きい場合ほどロッドの接着面積が小さいことや曲げ剛性が大きいことによるものと考えられる。

図-5 には、B-5/11 試験体の AFRP ロッドのひずみ分布性状を、1) 主鉄筋降伏時、2) 主鉄筋降伏時と計算終局時の中間変位時、3) 計算終局時、4) B-11 試験体の実測最大荷重時における実験結果と計算結果を比較して示している。また、図-4 と同様に各時点における計算結果の主鉄筋降伏領域 L_y (cm) を併せて示している。

図より、1) 主鉄筋降伏時では、いずれの実験結果も計算結果のひずみ分布とほぼ対応しており、ロッドがコンクリートと完全付着に近い状態にあることが分かる。2)

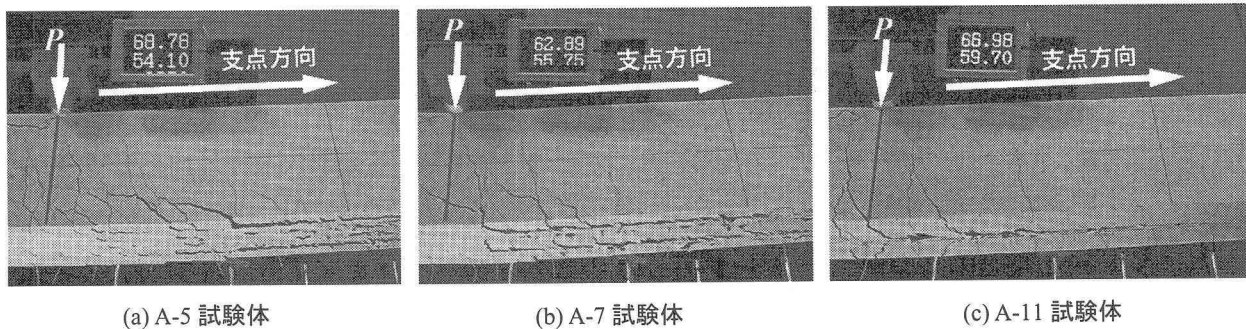


写真-1 ロッド剥離時におけるひび割れ進展状況 (A 梁)

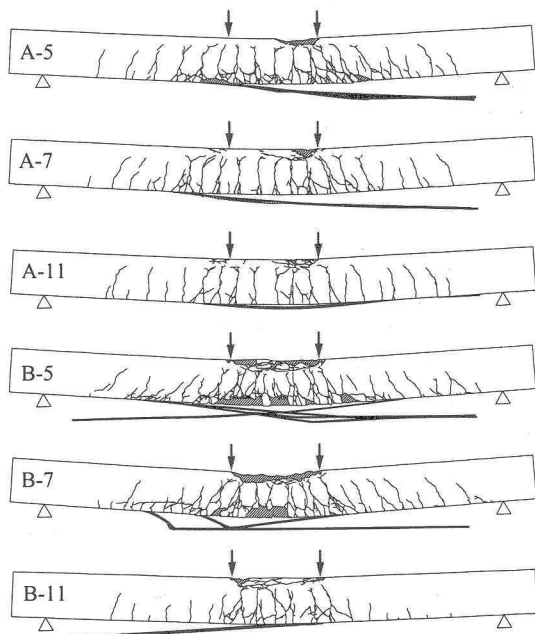


図-6 実験終了後のひび割れ分布性状

中間変位時では、いずれの試験体も等曲げ区間の実験結果は計算結果とほぼ対応しているのに対し、等せん断力区間では、計算主鉄筋降伏領域内における実験結果が計算結果よりも大きく示されていることが分かる。これは A 梁と同様にピーリング作用によるものと考えられる。3) 計算終局時では、かぶりコンクリートのブロック化に起因するピーリング作用が顕在化し、大きなひずみ分布範囲は計算主鉄筋降伏領域の拡大とともに支点側へ進展していることが分かる。その後、4) 実測最大荷重時には、変位の増加とともに部分剥離がより支点側に進展している。また、ロッドのひずみレベルはロッド径の大きい場合ほど小さく示されている。これは、A 梁と同様にロッド径が大きい場合ほど早期に剥離が進展し、B-11 試験体ではこの時点で終局となり、B-5 試験体では未だ終局に至っていないためと考えられる。

3.3 破壊性状

図-6には、実験終了後における各試験体のひび割れ分布性状を示している。図より、いずれの試験体においても荷重点近傍の下縁かぶり部において、曲げおよび斜めひび割れの交叉によって、コンクリートブロックが形成されていることが分かる。これは、いずれの試験体においても、ピーリング作用によりロッドが剥離に至った

ことを示している。また、ひび割れ分布性状を見ると、破壊形式にかかわらずロッドの補強本数が多い場合ほど細かいひび割れが発生し損傷が著しいことが分かる。これは、ロッド本数が多いほど接着面積が大きく、ロッドが補強材として有効に機能するためと考えられる。

写真-1には、上縁コンクリート圧壊前にロッドが剥離した A 梁に関する剥離直前のひび割れ進展状況を示している。写真より、ロッド本数が少ない場合ほど、荷重点に近い位置でコンクリートブロックが形成され、ピーリング作用による部分剥離が生じていることが分かる。また、梁底面のひび割れ性状を見るとロッド周辺のコンクリートが引き剥がされていることが分かる。

4. まとめ

本研究では、AFRP ロッド曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすロッド本数の影響を検討するため、引張剛性 $E \cdot A$ が同程度で補強本数を変化させた RC 梁を用いて静荷重実験を実施した。また、著者らが既に提案した FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法¹⁾の適用性に関する検討も行った。本実験より得られた知見は以下の通りである。

- 1) いずれの試験体もかぶり部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によりロッドが剥離し終局に至ることが確認された。
- 2) ロッド径が大きい場合ほど、ロッドの曲げ剛性が大きく曲率の増大に追従できないことおよびピーリング作用に対する抵抗面積が小さくなることより、ロッドの剥離が早期に生じる傾向にある。
- 3) 本実験の範囲内では、ロッドの補強本数が異なる場合においても著者らによる FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法¹⁾が適用可能である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683 / V-52, pp. 47-64, 2001