

◆ 特集：建設材料研究の新たな展開 ◆

FRPの歩道橋への適用方策

木嶋 健* 西崎 到**

1. はじめに

土木構造物の腐食劣化は、海塩飛沫の影響を受ける沿岸地域において大きな問題となっている。これは、構造材料である鋼材やコンクリートの腐食劣化が原因で生じており、適切な維持管理対策を実施する必要がある。この様な維持管理対策には、表面被覆による劣化因子の遮断、電気化学的防食による腐食劣化の防止等がある。しかし、維持管理対策に要する費用は多大であり、財政面からも効率的に実施することが求められている。一方、土木構造物の長寿命化という観点からは、供用期間中の維持管理を必要としない耐食性に優れた材料を導入する考え方もある。この様な耐食性に優れた材料の一つとして、橋梁の補修補強材料として利用されているFRP（繊維強化プラスチック）が注目されている。海外ではFRPを構造部材とした道路橋や歩道橋が施工されており、特に歩道橋は米国で約200橋に達する。わが国では、FRP道路橋の施工例は実橋レベルで存在しないものの、FRP歩道橋は2000年3月に沖縄県で初めて施工された。FRP歩道橋はFRP道路橋に比べると実用レベルに近いが、経済性の面で課題があり、未だに試験的な施工に留まっている。本報文では、FRP歩道橋に関する既存の知見や内外の施工事例に基づいて技術的課題や経済的課題を整理し、FRPの歩道橋への適用方策について検討を行うことにする。

2. FRP橋梁の概要¹⁾

FRPは軽量性と耐食性に優れており、土木構造物への広範な適用が期待される材料の一つである。FRP道路橋やFRP歩道橋は代表的な適用事例であるが、共通する利点は、優れた耐食性による維持管理の軽減や軽量化による迅速施工である。特に耐食性は卓越しており、構造部材への適用は、土木構造物の腐食劣化を解決する方策の一つになると期待される。また、FRP歩道橋の施工事例は海外を中心に多く報告されているが、これは、道路橋や床版に比べて荷重条件が緩やかであること、

疲労を事実上無視できること、軽量化により重機搬入が困難な場所でも設置可能であること等が要因とされる。ここでは、FRPの特性を概観した後、FRP橋梁の経済性に関する検討結果や、経済性に比較的優れていると報告されているFRP歩道橋の事例を紹介する。

2.1 FRPの特性

表-1は、FRPと主要な構造材料の物性を比較したものである。FRPの物性は基材構成により異なるため、数値を範囲で示している。

FRPの密度はアルミニウム合金以外の金属材料に比べて非常に低く、普通鋼やステンレス鋼の20～25%に過ぎない。一方、引張強度は普通鋼やステンレス鋼と同程度かやや低く、比強度で見た場合には、普通鋼やステンレス鋼よりも優れた特性を有している。しかし、弾性係数は金属材料に比べて非常に低く、普通鋼やステンレス鋼の10%に過ぎない。そのため、構造材料としては、普通鋼やステンレス鋼より適用用途が限られることも想定される。一方、耐食性については、普通鋼のみならず一般のステンレス鋼に対しても優れており、高耐食性ステンレスやチタン合金に比肩するレベルにある。アルミニウム合金は、弾性係数や密度の微小な相違を除くと、FRPに比較的類似した材料と考えられる。FRPとの大きな相違点は、厳しい腐食環境での耐食性が、FRPよりも一般的に劣るということである。木材は、異方性材料という

表-1 FRPと構造材料との物性比較²⁾

材料名	密度 (g/cm ³)	引張強度 (MPa)	比強度 (MPa/g/cm ³)	弾性係数 (GPa)
FRP (GFRP)	1.6～1.9	150～1000	78.9～625	10～40
普通鋼 (SS400)	7.9	450	57.0	206
ステンレス鋼 (SUS304)	8.0	520	65.0	197
アルミニウム合金 (A5083P)	2.7	345	128	72
チタン合金 (6A1-4V)	4.4	980	223	106
普通コンクリート	2.3	24	10.4	20
木 材	0.5	100	200	10

Applicability of FRP to Pedestrian Bridges

点でFRPと類似するが、引張強度がFRPよりも低く、FRPと同一の荷重を支持する場合にはより大きな断面を必要とする。また、セルロース繊維とリグニンから構成されているため、腐食対策に特別の処理が必要となる。チタン合金は、物性や耐食性の点で、表-1に示す材料の中では最も優れた材料と言える。しかし、精錬技術が高度であることから非常に高価となっており、構造材料としての広範な使用が困難な状況にある。

2.2 FRP道路橋

FRP道路橋の代表的な事例としては、米国オハイオ州のTECH21 Bridge、バージニア州のTom's Creek Bridge等がある。TECH21 Bridgeは台形断面の箱桁FRP橋、Tom's Creek BridgeはダブルウェブのI桁ハイブリッドFRP橋である。いずれも大断面主桁や多主桁構造をとる10m程度の短径間道路橋であり、試験橋の意味合いが強い。

FRP道路橋の経済性については、これまでにいくつかの検討結果が報告されている。Bank³⁾は、米国のFRP橋梁の現状を分析した中で、FRP道路橋の初期費用がFRP歩道橋やFRP床版に比べて高く、十分に利点を活用していないことを指摘している。Nystrom et al.⁴⁾は、実施工された短径間FRP道路橋を対象にLCC（ライフサイクルコスト）の面から検討し、RC橋梁と比較した場合には、将来のFRP道路橋の改良によるコスト低減を考慮しても、経済的な競争力を確保するのは困難との結果を得ている。また、土木研究所橋梁構造チーム⁵⁾は、6径間連続橋梁（鉋桁およびトラス）を対象に、FRPと鋼材に対する試設計を行い、FRPを用いた場合には経済的に優位となる可能性が低いとの結果を得ている。以上のように、これまでに行われたFRP道路橋の経済性に関する検討結果によると、その実用可能性については、現時点では概ね厳しい見解が多い。



写真-1 Tom's Creek Bridge

2.3 FRP歩道橋

2.3.1 鉋桁橋

FRP鉋桁橋の代表的な事例としては、わが国で初めて施工された沖縄県の伊計平良川線ロードパーク橋がある。伊計平良川線は周囲を海に囲まれた厳しい腐食環境にあるため、耐食性に優れたFRPを構造部材とするFRP歩道橋が検討され、当初計画されていたPC橋に代わって施工されるに至った。また、地盤が比較的軟弱であり、上部工の軽量化に伴う下部工費用の縮減により、初期コストはPC橋と大差がなかったとされている。以下に、この橋梁をモデルケースとしたFRP歩道橋とPC歩道橋のLCC比較例を示す⁶⁾。

FRP歩道橋とPC歩道橋の初期費用と維持管理費用を比較検討した結果は表-2の通りである。本検討では、初期費用と維持管理費用のみが対象とされており、廃棄費用は対象とされていない。また、初期費用は上部工と下部工の両方を、維持管理費用は上部工のみを対象とし、いずれも現時点で現実的と考えられる技術を仮定した。なお、改良型のFRP歩道橋は、適切なコスト縮減を図った橋梁であり、①高欄の材料をFRPからアルミ合金へと変更する、②主桁接合の構造を伊計平良川線



写真-2 伊計平良川線ロードパーク橋

表-2 鉋桁歩道橋のLCC試算結果（単位：万円）⁶⁾

		PC橋				FRP橋	
		通常	塗装鉄筋 PC鋼線	塗装鉄筋、 PC鋼線、表面被覆		通常	改良型
				15年毎 補修	30年毎 補修		
初期費用	上部工	4,824	5,062	5,437		7,360	6,235
	下部工	1,013	1,013	1,013		691	691
	合計	5,837	6,075	6,450		8,051	6,926
維持管理費用	30年分	2,450	0	1,800	900	600	350
	50年分	4,250	0	2,700	900	1,000	350
	100年分	6,950	2,450	5,400	2,700	2,000	700
	50年LCC	10,087	6,075	9,150	7,350	9,051	7,276
	100年LCC	12,787	8,525	11,850	9,150	10,051	7,626

ロードパーク橋で用いた特殊な構造から一般的な構造へと変更する、③成形型枠によるFRP製造数量を1橋分から2橋分へと変更する、の3点を仮定している。表-2によると、耐用年数を50年としたFRP歩道橋のLCCは、通常のPC歩道橋のLCCよりも低い。しかし、防食対策としてエポキシ樹脂塗装鉄筋およびエポキシ樹脂塗装PC鋼線を採用したPC歩道橋よりは高くなっている。一方、耐用年数を100年としたLCCについては、改良型のFRP歩道橋が最も低い。以上のように、FRP歩道橋は、厳しい腐食環境にある地域で、長い設計耐用期間が求められる場合に有効であると考えられる。

2.3.2 トラス橋

FRPトラス橋は、FRP歩道橋の世界的な先駆けとして施工された橋梁形式でもある。代表例は米国のE. T. Techtonics社により1980年代に開発されたLongspan Prestek Systemと呼ばれるポニートラス橋であり、既に200橋を超える実績があるとされる。本歩道橋はシステム化されており、同社のホームページには標準的な仕様書も掲載されている⁷⁾。その概略は表-3に示す通りである。

Longspan Prestek Systemは、小断面の引抜成形材を比較的長く用いた経済的な橋梁とされている。Bank³⁾は、FRP歩道橋の標準的な価格が、

表-3 Longspan Prestek Systemの標準的仕様の概略

橋 長: 1.5~30m
幅 員: 0.6~3m
荷 重: 歩道橋および軽量車両に対応、293~489kgf/m ² (通常は、橋長15m以下の場合415kgf/m ² 、 橋長15m以上の場合293kgf/m ²)
車両荷重: 必要な場合はAASHTO H-Truckを使用
許容耐荷力: 材料最大強度に以下の安全率を適用して設定される
引張強さ: 2.5
圧縮強さ: 2.5
せん断強さ: 2.5
曲げ強さ: 2.5
端 部: 2.5
接合部: 3.0
たわみ制限: L/240 (L: 支間長)
鉛直方向固有振動周波数: 5.0Hz
水平方向固有振動周波数: 3.0Hz
材 料: Eガラスおよびイソフタル酸系ポリエステル樹脂によるFRP 引抜成形材
材料の保証強度:
引張強さ: 228MPa
圧縮強さ: 228MPa
せん断強さ: 31MPa
曲げ強さ: 228MPa
弾性率: 19.3GPa
床 版: 黄色マツ材、厚さ5cm×幅25cm材または 厚さ7.5cm×幅30cm材

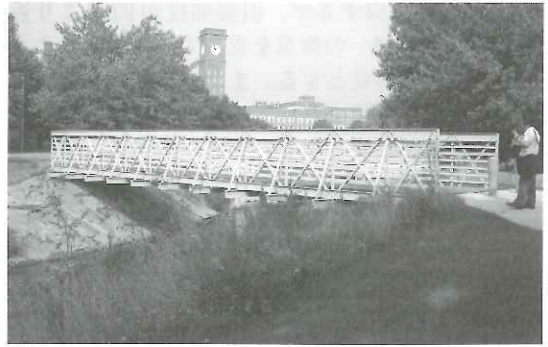


写真-3 Middlebury Run Bridge

橋長15m以下では\$540~650/m²、橋長15~24mでは\$750~860/m²、橋長24m以上では\$915~1,075/m²程度であると報告している。以下では、米国オハイオ州アクロン市にあるMiddlebury Run Bridge、Carey Avenue Bridgeの調査事例を紹介する⁸⁾。

Middlebury Run Bridgeは、橋長17.7m、幅3.0mで、2003年10月に完成した。死荷重は3.18tであるが、鋼材で比較設計した場合には9.1tであったと報告されている。主部材の接合にはステンレス合金製ボルト・ナットが使用されているが、構造上重要でない部分にはFRPの組み立てで多用されるリベットが使用されている。歩道橋ではあるが、4.5tの車両が通行できる。材料費は\$53,400であったと報告されている。本橋梁では主材料にC型チャンネル部材を多用しているが、これは、引抜成形材の単価が等断面部材を多く用いるほど低下するためと想定される。また、ポニートラスであるため高欄が不要になる点もコスト低下の要因と考えられる。その他、主トラスの橋軸直角方向の剛性を高めるため、橋梁外に横桁をはみ出させて、三角形トラスを形成させている。市担当者は、公園内や緑地帯内など、鋼桁を移動させる重機の搬入が困難な場合に適しており、場合によっては、数人の作業員により人力で現場に搬入することも可能であると評価している。

Carey Avenue Bridgeは、Middlebury Run Bridgeの成果を受けて2005年春に完成した橋梁である。現地での施工は、作業員3人で3時間と極めて短い時間で完了している。主部材の接合にはステンレスボルトを使用しているが、接着剤は併用されていない。構造上重要ではない部分には、ビスやリベットを使用している。また、材料費は\$40,000であったとしている。

2.3.3 アーチ橋⁹⁾

FRPアーチ橋では、スペイン・ライダの歩道橋

が、経済性に比較的優れた橋梁として知られている。Lleida Bridgeは、小断面の引抜成形材を比較的長く用いたアーチ形式の跨線橋であり、2001年に完成した。総費用は\$325,000であり、FRP構造部分の費用は組立費込みで\$270,000とのことである。これは比較的安価と思われるが、鋼材で製作した場合に比べて多少高価であったとのことである。また、架設時間は3時間であり、跨線橋で重要とされる迅速施工が達成できたとしている。

2.3.4 斜張橋¹⁰⁾

FRP斜張橋の事例としては、英国スコットランドのAberfeldy Footbridgeが有名であり、経済性にも優れていたと報告されている。1992年に完成したAberfeldy Footbridgeは、橋長113m、支間長63mの斜張橋であり、現在でも世界最大のFRP歩道橋である。この歩道橋は、ACCSシステム(Advanced Composite Construction System)と称する多室角パイプ状パネルを組み合わせて部材を構築する技術が用いられており、経済面からも効率的であると報告されている。ACCSシステムを利用したFRP歩道橋は、英国を中心にいくつか存在している。また、道路橋や床版に適用した事例も知られている。

ACCSシステムはFRP引抜成形材を使用しており、英国のMaunsell Structural Plastics社によって開発されたシステムである。このシステムは、ほぼ正方形の角パイプを多室につなげた断面を持っており、端部にはT字形の凹みを形成している。また、単室の角パイプ部品もあり、トグルコネクターと呼ぶ鍵状の部品を凹みにはめ込んで機械的に接続し、より大きな断面が形成できるようになっている。

工事費用の詳細は不明であるが、計画時の要求が「低コスト」であるため、結果として鋼製歩道橋と同等のコストで建設され、なおかつ熟練工や設備・運搬費を必要としない点で優れていたと報告されている。また、軟弱地盤での施工であり、自重が軽くなった(1mあたりの活荷重=5.6kN/m、死荷重=0.6kN/m)点が評価されている。

3. FRP歩道橋の課題

FRP歩道橋の課題は、技術的課題と経済的課題に分類される。さらに、技術的課題は、材料に関する課題と歩道橋の構築に関する課題に分類される。材料に関する課題としては、長期耐久性、耐火性、廃棄時のリサイクル等があり、現在、各所で検討が行われている。ここでは、技術的課題と

して歩道橋の構築に関する課題を対象とし、経済的課題と併せて検討を行う。

3.1 技術的課題¹¹⁾

FRP歩道橋はこれまでに数多く施工されているが、技術的課題は特に指摘されていない。鈑桁橋については、鋼橋と同様の方法により設計が可能であると報告されている¹²⁾。しかし、経済性も考慮に入れた場合には、様々な技術的課題が生じると考えられる。

主要な課題の一つは、FRPの弾性係数が低いため、材料強度ではなく、たわみ制限を制約条件とする設計方法になる可能性が高いことである。たわみ制限が制約条件となる設計では、剛性を向上させることが必要であり、一般に材料の使用量が多くなる。これは、鋼橋やPC橋に比べて不経済な設計方法になることを意味している。鈑桁橋については、たわみ制限を支間長の1/600から1/400へと緩和しても、経済性の面で不十分な場合がある。2.3.2で示したLongspan Prestek Systemでは、たわみ制限を支間長の1/240としており、その設定方法が大きな課題になると考えられる。なお、たわみ制限を緩和した場合には、剛性の低下に伴って振動の問題が生じる可能性も指摘されており、新たに設定する場合には十分に留意することが必要である。

もう一つは、斜張橋や吊橋のような長大橋の場合に、耐風不安定になる可能性があるということである。これを解決するには、材料のせん断弾性係数やせん断強度を向上させることが必要であるとされている。弾性係数の高いCFRP(炭素繊維強化プラスチック)の使用や厚さ方向に繊維を配した3D織物構造の使用による解決策が提案されているが、経済的にも満足のいく対策を見出すことが今後の課題である。

3.2 経済的課題

FRPを含む構造材料の価格は表-4の通りである。一般に、構造材料の価格は重量単位で表されており、材料価格の比較でもこの数字を利用することが多い。しかし、橋梁等の土木構造物を設計する場合には、材料の重量よりも材料の体積が問題となる場合が多い。ここでは、単位体積当りの材料価格を用いて比較検討を行う。

表-4によると、FRPの価格は普通鋼の約4~6倍である。橋梁の価格が材料価格に支配される場合には、FRP歩道橋の価格競争力は極めて低いものとなる。FRP歩道橋の場合には、軽量化に伴う下部工費用や施工費用の縮減、優れた耐食性による維持管理費の低減などが見込まれるが、これら

表-4 構造材料の価格例¹³⁾

名 称	規 格	価 格	
		円/kg	10 ³ 円/m ³
FRP	GFRP	1,500～2,500	2,850～4,750
普通鋼	SS400	100～110	790～869
ステンレス鋼	SUS304	600～800	4,800～6,400
アルミニウム合金	A5052P	700	1,890

を含めた総費用が鋼橋と同等あるいはそれ以下であることが必要となる。一方、一般のステンレス鋼に対するFRPの価格は低く、耐食性も考慮すると、その優位性はより顕著になると考えられる。また、アルミニウム合金に対しては、FRPの価格は1.5～2.5倍とやや高くなっている。しかし、FRPが軽量性や耐食性に優れていることを考慮すると、アルミニウム合金を構造部材とした橋梁がFRP橋梁に対して経済的に優位であるとは必ずしも認められない。以上の検討より、FRP歩道橋の鋼橋やPC橋に対する優位性を示すためには、初期費用だけでなく、施工費用や維持管理費用を含めたLCC評価が重要になると考えられる。

4. FRP歩道橋の実現策

4.1 適用箇所¹⁾

FRP歩道橋の適用箇所は、その軽量性や耐食性が利用できる箇所とする必要がある。軽量性が利用できる箇所としては、例えば軟弱地盤や山間部等の重機搬入が困難な箇所がある。また、耐食性が利用できる箇所として、海塩飛沫の影響を受ける塩害地域があげられる。しかし、FRPと鋼材やコンクリートとの価格差を考慮すると、両方の特性が利用できる箇所であることが望ましい。このような箇所の一つとして、添架側道歩道橋への適用が有力である。古い道路橋には歩道がないため、歩行者が道路橋の通行を余儀なくされる場合は珍しくない。このような状況を解消するため、写真-4のように道路橋の脇に歩道用の橋梁が併設されている事例が多く見られる。現在は主に鋼製歩道橋で実施されているが、軽量のFRP歩道橋を適用すれば、道路橋に添架した側道橋としてより容易に建設できる可能性がある。この場合には、下部工事が小規模で済み、歩道整備の効率化に寄与できる。また、塩害地域においては、耐食性の向上によりLCCの大幅な低減も期待できる。

また、両方の特性が必ずしも利用できる箇所ではないものの、耐食性が利用できる箇所として非常に多く存在するのが、塩害地域における鋼製歩道橋の更新である。塩害地域の道路橋は、塩害対策、補修が進みつつあるが、側道橋として整備さ



写真-4 鋼製の添架側道歩道橋



写真-5 腐食が進行した鋼製歩道橋の事例

れた鋼製歩道橋については、写真-5のように腐食が進行したままのことが多い。これらの鋼構造物は定期的に塗り替えることが原則であるが、小規模な構造物の場合には、維持管理に労力をかけるよりも、耐食性に優れた材料を用いて維持管理の省力化を図ることが効果的と考えられる。FRP歩道橋は、優れた耐食性により、塗り替え等の補修を長期間実施する必要がないため、これらの鋼製歩道橋の更新に有力である。また、軽量性に伴う迅速施工が可能であることから、跨線橋等の場合にも有利になると考えられる。

4.2 橋梁形式

FRPの価格は鋼材やコンクリートよりも高いため、FRP歩道橋の部材量が鋼橋やPC橋よりも少量である橋梁形式とすることも重要である。FRP歩道橋の短所の一つは、低い弾性係数による過大なたわみであるが、これを解消するために断面2次モーメントの大きい橋梁形式とする方法が考えられる。このような橋梁形式としては、トラス橋、アーチ橋、斜張橋等があげられるが、これは、比較的少ない部材で大きな断面2次モーメントを得ることができる形式でもある。一方、FRP部材の

価格は、ハンドレイアップ成形や引抜成形等の成形方法により異なる。FRP部材を大量に使用する場合には、引抜成形が価格面で最も優位となる。ただし、引抜成形には相当の費用を要する成形金型の作成が必要であるため、可能な限り同一の部材を使用することも重要になる。

以上を考慮すると、現在考えられている橋梁形式の中では、トラス橋が一つの有力な候補になる。ただし、支間長や接合部とも関連する事項であるため、今後の詳細な検討が期待される。

4.3 設計指針の作成

FRP歩道橋を効率的に施工するためには、設計方法を指針やガイドラインの形で整備することが重要である。海外では、いくつかのFRPメーカーが材料の仕様を示しているが、FRP歩道橋の設計指針は未だに整備されていない状況にある。わが国では、現在、土木学会において、FRP歩道橋の設計指針あるいはガイドライン作成に向けた活動が行われている。

5. まとめ

本論文で得られた結果をまとめると、下記の通りである。

- 1) FRP歩道橋の実現には、経済性の面で課題が存在する。経済性を考慮した効率的な設計を実施する場合には、それに伴って技術的な課題も生じる。最も重要な課題の一つは、低い弾性係数に伴う過大なたわみへの対策である。また、従来材料に対する優位性を示すため、LCC評価が重要になると考えられる。
- 2) FRP歩道橋の適用箇所は、その軽量性や耐食性が利用できる箇所とする必要がある。軽量性が利用できる箇所としては、例えば軟弱地盤や山間部等の重機搬入が困難な箇所がある。また、耐食性が利用できる箇所として、海塩飛沫の影響を受ける塩害地域があげられる。
- 3) FRP歩道橋の橋梁形式は、部材量を少量とする形式であることが重要である。例えば、比較的少ない部材で大きな断面2次モーメントを得る形式や、同一部材を大量に使用する形式などが望ましい。また、FRP歩道橋を効率的に施工するためには、設計方法を指針やガイドラインの形で整備することも重要である。

参考文献

- 1) (独)土木研究所他：FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書（Ⅱ）－FRP歩道橋の適用性に関する検討－、土木研究所共同研究報告書第360

号、平成19年6月

- 2) 国立天文台編：理科年表（CD-ROM, 2005）、丸善
- 3) Bank, L. C.: Application of FRP Composites to Bridges in the USA, Proceedings of the International Colloquium on Application of FRP to Bridges, pp9-16, 2006
- 4) Nystrom, H. E. et al.: Financial Viability of Fiber-Reinforced Polymer Bridge, Journal of Management in Engineering, Vol.19, No.1, pp2-8, 2003
- 5) (独)土木研究所：新材料の土木構造物への適用に関する研究－アルミニウム合金と繊維強化プラスチックの道路橋への適用に関する調査・分析－、土木研究所資料第3888号、平成16年3月
- 6) 土木学会複合構造委員会：先進複合材料の社会基盤施設への適用, pp170-177、平成19年2月、土木学会複合構造レポート01
- 7) E. T. Techtonics, Inc.: <http://www.ettechtonics.com/>
- 8) 山田聖志：米国におけるFRP橋梁、土木学会誌, Vol.90, No.12, pp48-51, 2005.
- 9) Sobrino, J. A. et al.: Towards Advanced Composite Material Footbridges, Structural Engineering International, Vol.2, pp84-86, 2002
- 10) Harvey, W. J.: A Reinforced Plastic Footbridge, Aberfeldy, UK, Structural Engineering International, Vol.4, pp229-232, 1993
- 11) 土木学会構造工学委員会FRP橋梁研究小委員会：FRP橋梁－技術とその展望－, pp177-208, pp249-264、平成16年8月、土木学会構造工学シリーズ11
- 12) (独)土木研究所他：FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書（Ⅰ）－ビルトアップ法によるFRP歩道橋設計に関する検討－、土木研究所共同研究報告書第324号、平成17年12月
- 13) 建設物価（2007.4）、建設物価調査会

木嶋 健*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ新材料チ
ーム主任研究員
Takeshi KISHIMA

西崎 到**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ新材料チ
ーム首席研究員
Itaru NISHIZAKI