

連続繊維シートの付着耐久性

西崎 到* カリム・ベンザルティ** マーク・キアトン*** 加藤祐哉****

1. はじめに

1995年より、建設省土木研究所とフランス中央土木研究所(Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 以下LCPCと記す、いずれも当時)は、道路分野における先端技術・材料関連の分野において研究協力関係があった。3年毎にワークショップが開催され既にその回数は6回を数えている。両研究所に組織改編があったが、研究協力関係は現在もなお、独立行政法人土木研究所とフランス交通企画ネットワーク研究所 (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 以下IFSTTARと記す) に引き継がれている。このワークショップでは、連続繊維シートなどの繊維系コンクリート補強材料の長期的耐久性(特に付着耐久性)がトピックスの一つとなっていた。連続繊維シートは、炭素繊維などによって作られたシート状の補強材でコンクリート表面で樹脂含浸して硬化したFRPとする材料である。日本ではその優れた施工性から耐震補強などを目的に広く普及しており、フランスにおいても採用が増えつつある。ワークショップの中では、日本、フランスのそれぞれが独自に行った検討結果について情報交換が行われていたが、その後、連続繊維シートのコンクリートへの付着耐久性や試験法に関する双方の独自の結果を比較検討し、一つの報告としてとりまとめられた。LCPCは室内試験、土木研究所は屋外暴露試験を中心に検討を行ったが、ここにその概略を紹介する。(なお、本研究はLCPCがIFSTTARに組織改編される前の内容であるので、フランス側の研究をLCPCのものとして記述する。)

2. LCPCによる付着耐久性評価に関する研究

2.1 プルオフ試験法による付着性状評価

LCPCでは付着耐久性試験方法として、高湿度

高温(40℃95%)気中における室内試験を採用した。高湿度条件はコンクリートとFRP界面の付着性能の劣化に影響を与えることは、既に他の研究者により報告されている¹⁾。

板状のコンクリート供試体(30×30×5cm)を、ポルトランドセメント(CEM I)と珪質石灰岩骨材により、水セメント比0.5で製作した。コンクリート圧縮強度は35MPaであった。表面処理には2種類の異なる手法(サンドブラスト、動力工具(ディスクサンダー)仕上)を設定した。表面処理後の供試体に、2種類の市販の繊維系コンクリート補強材料を施した。1つは、炭素繊維シートに樹脂を含浸させながらコンクリート表面に貼り付けるタイプの材料であり(Carbon Fiber Sheet, 以下CFSと記する)、もう一つは工場で成形品となったCFRP板を、コンクリート表面に貼りつけるタイプのものである(図-1aおよび1b参照)。供試体の種類は下記に示す4種類となる。

- サンドブラスト + CFS
- サンドブラスト + CFRP板
- 動力工具処理 + CFS
- 動力工具処理 + CFRP板

製作した供試体は気温40℃、相対湿度95%の恒温恒湿槽にて劣化試験に供した。時間経過とと

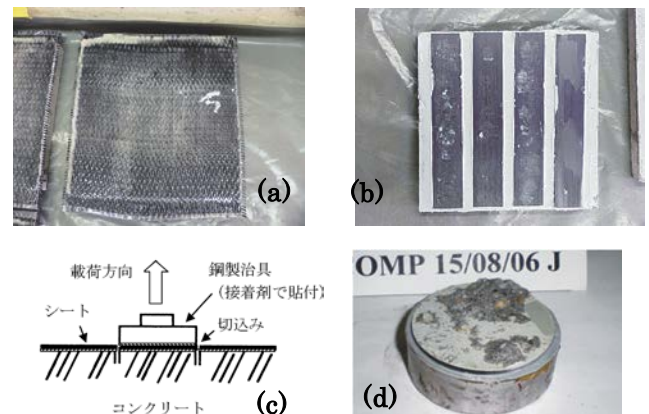


図-1 供試体

((a)CFS貼り付けコンクリート, (b)CFRP板貼り付けコンクリート, (c)プルオフ試験概要, (d)長時間経過後のプルオフ試験後の破壊状況例(コンクリート表面が残っている部分と接着層部分の破壊が混在している))

もに付着強度をプルオフ試験法（図-1(c), ASTM D4541に準拠）により測定した。

図-2に付着強度の時間による変化を示す。およそ600日目までのデータを取得した。ばらつきがかなり大きいものの、以下に示す傾向が読み取れる。

- 表面処理条件は、プルオフ試験による付着強度に大きな影響を与える結果となった。大まかにいって、動力工具処理に比べてサンドブラスト処理の方が付着強度が高い傾向が認められた。これは特に100日以下の初期で顕著であった。破壊モードはサンドブラスト処理による場合はコンクリート表面の比較的深い位置で凝集破壊*（素材内部の破壊）しているのに対し、動力工具処理の場合にはコンクリート表面のごく浅い領域で起きていた。
- 経過時間が長期の場合に、付着強度に多少の低下が認められた。この傾向は動力工具処理のCFRP板の場合で特に顕著であった（図-2(b)）。これは、CFRP板の付着強度が連続繊維シートに比べて厳しい環境に敏感であるとの過去の研究報告¹⁾とも一致する。とはいえ、データの変動が大きいことから、より長期にわたる計測による確認が必要である。

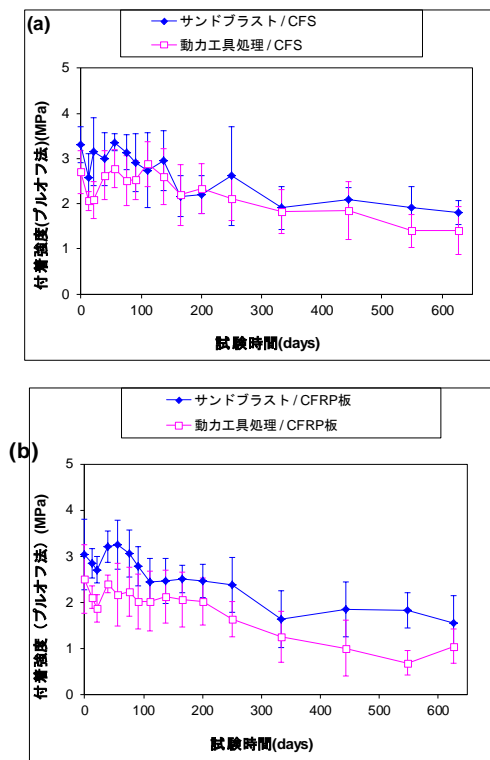


図-2 プルオフ試験による付着強さの変化
(劣化条件：40℃95%大気中)

- また、長期時間経過時は接着層部分での破壊が、特に動力工具処理の場合に増加することが認められた（図-1(d)に事例）。これは湿潤環境により接着層が劣化したことによるものと考えられる。

本試験の結果では、コンクリート部分での破壊が起きることが多かったが、これは補強材とコンクリートとの付着状態の情報が得にくいという点において、プルオフ法による付着特性評価の課題の一つと考えられる。また、この他にもプルオフ試験の課題として、準備段階の補強材カットの深さの影響や、測定機器設置時の微細な軸のずれの影響を受ける点なども指摘されている²⁾。このため、これに代わる付着特性評価方法として、せん断付着試験に着目し、その付着特性についてプルオフ試験の場合と比較することとした。

2.2 せん断試験法による付着性状評価とプルオフ試験との比較

CEM II 32.5 セメントと珪質石灰岩骨材によりコンクリートブロック（21×21×41 cm）を製作した。水/セメント比は0.55、圧縮強度は37 MPaであった。



図-3 せん断付着試験方法の概要



図-4 せん断付着試験の実施状況

このブロックの打設面を動力工具処理し、図-3に示す2か所（1か所はせん断試験用で接着部の長さ250mm、もう1か所はプルオフ試験用）に炭

*土木用語解説：凝集破壊

素繊維をエポキシ樹脂で貼りつけた。2.1節とは異なる種類の市販のCFSを用いた。

補強コンクリートブロックは40℃湿度100%の恒温恒湿槽におき、時間経過後の付着特性を、プルオフ試験(図-1(c))とせん断試験(図-3)により評価した。図-5a, bに、最大せん断荷重とプルオフ試験による付着強度の時間経過による変化をそれぞれ示す。以下のような特徴が認められた。

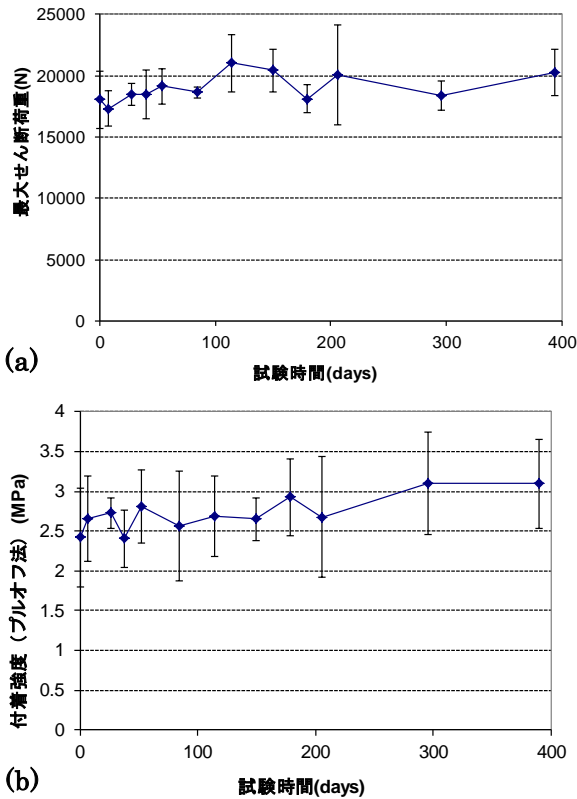


図-5 CFSのコンクリートへの付着特性
(a)せん断荷重(繰り返し数:3), (b)プルオフ試験の結果(繰り返し数:6)

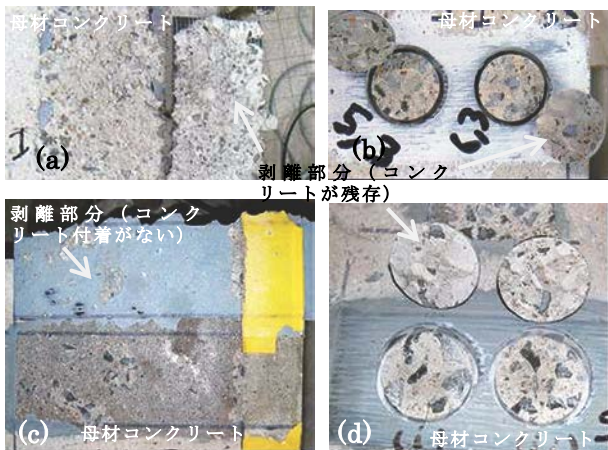


図-6 破壊モードの典型的な例
(a)せん断試験,(b)プルオフ試験(ともに初期),(c)せん断試験,(d)プルオフ試験(ともに13カ月経過後)

- プルオフ試験よりもせん断試験の方がデータのばらつきが少なかった。
- 3か月までは、最大せん断強度およびプルオフ試験による付着強度に、特に明確な変化は認められなかった。
- しかし、せん断試験の破壊モードでは、初期にはコンクリート部分における凝集破壊であった(コンクリート表層部が剥離したFRPシートに残っている(図-6a))のが、時間経過後は界面または接着層での破壊(図-6c)への変化が認められた。
- プルオフ試験ではこれらの変化は認められず、コンクリートにおける凝集破壊のままであった(図-6b,d)。これらの結果から、せん断試験の方がプルオフ試験よりも、補強材のコンクリートとの付着特性の変化を詳細に評価できる可能性があると考えられる。

3. 土木研究所による付着耐久性評価に関する研究

3.1 プルオフ試験による付着性状評価

土木研究所では、連続繊維シートの付着耐久性を調べるための試験として、長期にわたる屋外暴露試験を主に実施した。評価方法としては、既にコンクリート表面被覆材の標準的な付着性状試験であったプルオフ法を第一に選択した。1992年に市場から入手した歩道舗装用のコンクリート平板(30×30×6 cm)に対し、当時日本国内で使用されていた4種類の製造会社の異なるCFSを用いた。各CFSは製造会社の示す標準的な手順・材料に従って、コンクリート平板の全面に施工した。コンクリート表面の前処理は動力工具処理(ディスクサンダー)とした。プライマー(コンクリート表面に始めに塗布する浸透性の高い被覆材)は全てのCFSで使用されたが、パテ(不陸調整材)はCFSによっては使用しないものもあった。マトリックス樹脂(含浸用樹脂)は全てエポキシ系であった。CFSの積層構成は2層とし、互いに直交するように配置した。CFS施工後には白色の上塗り塗装を行った。供試体の一覧は下記のとおりである。各供試体は10個製作され、初期値用を除く9個を暴露に供した。

- 供試体 A: CFS-A (高強度系) パテ有
- 供試体 B: CFS-B (高強度系) パテ有
- 供試体 C: CFS-C (高弾性系) パテ有
- 供試体 D: CFS-D (高強度系) パテ無

暴露試験は1992年につくば市内の土木研究所構内で、架台を使って南向き5°で暴露された(図-7)。



図-7 土木研究所における暴露試験の状況

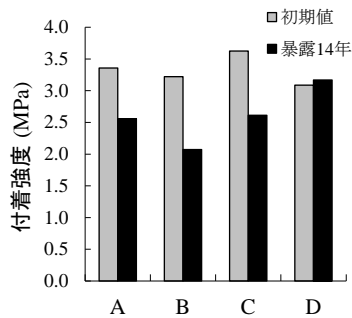


図-8 14年暴露した供試体のプルオフ試験の結果

2006年に1組の供試体を回収し、付着特性を評価した。プルオフ試験を行った結果を図-8に示す。傾向は以下のようにまとめられる。

- プルオフ試験による付着強度の初期値はおよそ3.0MPaであった。14年暴露した供試体では、2.1MPaから3.2MPaとなった。供試体A、B、Cでは初期値に対して64%から76%の付着強度低下が認められるが、供試体Dでは殆ど変化が認められなかった。
- 暴露後に付着強度低下が認められる供試体でも、その絶対値は最低でも2.1MPaあり、実用上は十分な付着特性を維持していると考えられる。
- プルオフ試験の破壊モードは、初期においても、14年暴露後においても、いずれもコンクリート表面における凝集破壊であった。この結果から、暴露試験後に認められたプルオフ試験による付着強度の多少の低下は、必ずしもCFSとコンクリート間の付着特性の低下

を表しているものではないものと考えられる。

3.2 引きはがし法による付着性状評価とプルオフ試験との比較

本暴露試験の開始当初はCFSとコンクリートの付着性状の耐久性をプルオフ法により評価するように計画されていた。しかし、近年では引きはがし試験による評価の試みが報告^{3), 4)}されていることから、土木研究所においても、14年暴露した供試体を用いて、CFSとコンクリート間の付着力評価法としての適用性を検討することとした。図-9に示すように、各供試体の端部の一部をダイヤモンドカッターにより切り取ってCFSをつかむ部分を作るとともに、供試体表面に切込みを入れ、幅30mm、長さ170mmのスリット状の評価対象部分を5つ作成した。

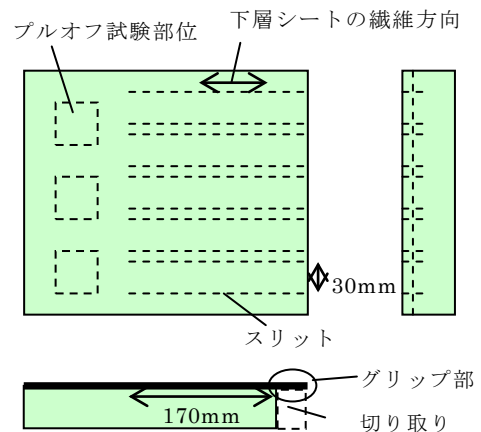


図-9 引きはがし試験実施のための供試体加工

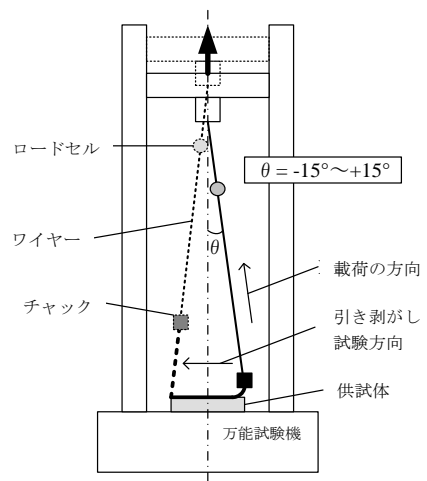


図-10 引きはがし試験の実施方法

次に供試体を、図-10に示すように、万能試験機にセットし、クロスヘッドと供試体のグリップ部分を、途中でロードセルを挿入したワイヤー（長さ 600mm）でつないだ。試験速度は 100mm/minとした。得られる引きはがし荷重対時間線図の典型的例を図-11に示す。試験開始から 50秒後から試験終了の 10秒前までの区間の最大荷重と最少荷重の平均値を引きはがし荷重とし、これを試験部位の幅で除した値（単位幅あたりの平均引きはがし荷重）を求めた。

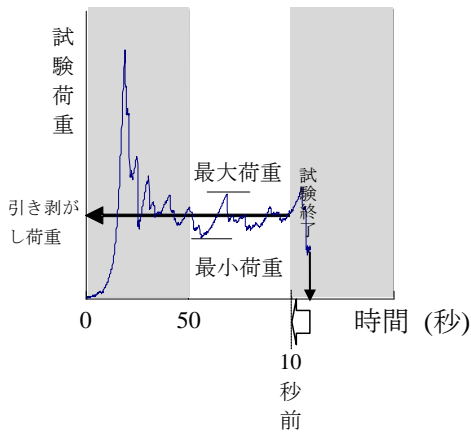


図-11 単位幅あたりの平均引きはがし荷重の算出

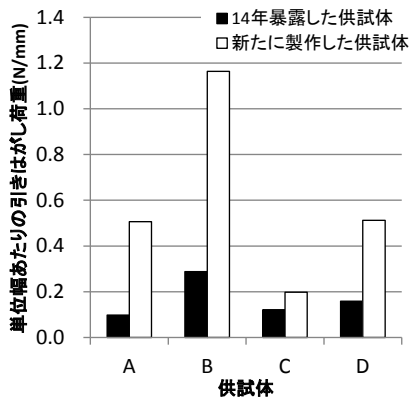


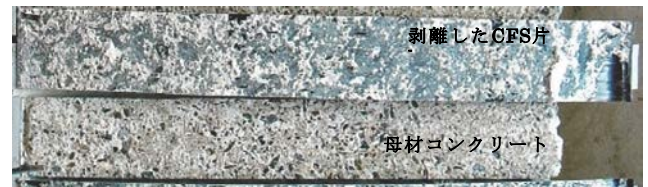
図-12 14年暴露した供試体の引きはがし試験結果

図-12（左側の棒グラフ）は14年暴露した供試体の単位幅あたりの平均引きはがし荷重の結果である。それぞれ、5回のデータの平均値を示している。以下の特徴がまとめられる。

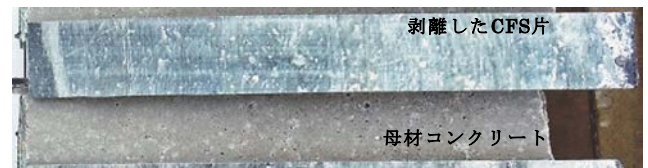
- 供試体A、C、Dが0.10から0.16N/mmであるのに対し、供試体Bは特に大きな値（0.29 N/mm）を示した。
- 供試体Dでは表面のコンクリートが部分的に引きはがし部分のCFS上に残っており（図13a）、供試体Bでも引きはがし部分の70%の

面積で同様の破壊モードであったのに対し、供試体AおよびCでは引きはがし部のCFS上にコンクリートの残存は認められなかった（図-13b）

- このような破壊モードの供試体間の相違などの特徴は、プルオフ法では認められず、すべてのケースでコンクリートの凝集破壊が起きていた。この試験の結果からは、プルオフ法による付着試験は品質管理などの目的では問題ないものの、CFSとコンクリートとの付着特性を詳細に評価するには別法（引きはがし試験）の方が適していると考えられ点で、LCPCの試験結果（せん断）と同様の結果となった。



(a) CFS上に残るコンクリート（供試体D）



(b) CFS上にコンクリートが残っていない（供試体A）

図-13 引きはがし試験後の供試体の状況

残念ながら、供試体作成時に引きはがし試験は計画されていなかったため、14年間暴露後の引きはがし試験結果を、初期と比較することはできない。そこで、1992年当時に作られた材料と手法にできるだけ近いものによる供試体を、新たに製作して、引きはがし試験を実施することとした。ただし、1992年当時と同種類の材料（プライマー、パテ、炭素繊維シート、エポキシ樹脂）が入手できたのは、供試体Dのみであり、他の供試体は入手可能な類似の材料を使用した。また、コンクリートは全て新たに製作したものである。

新たに製作した供試体の引きはがし試験の結果（平均値）を、図-12の棒グラフ（右側）に示す。新たに製作した供試体の引きはがし荷重は、いずれも14年暴露後の供試体と比べてかなり大きな値となった。新たに製作した供試体は14年暴露供試体と完全に同等に再製作されたものでは

ないため、この結果は必ずしも14年の暴露期間の間の劣化を示すものではない。

供試体Aはパテ層内部の凝集破壊で破壊し、供試体BとCはCFSとコンクリートとの界面で、供試体Dはコンクリート表面層の凝集破壊であった。ただし供試体Bでは、引きはがし部分の20%では2つの連続繊維シート層の間およびコンクリート表面層内でも破壊したことを示している。これらの特徴は、それぞれ供試体の14年暴露供試体の破壊モードとほぼ同様なものであった。また、同時に行った新たに製作した供試体のプルオフ試験の結果が全てコンクリート部分の凝集破壊であった点においても、再製作供試体は14年暴露供試体と同様の結果を示した。

4. まとめ

連続繊維シートとコンクリートとの付着耐久性について、土木研究所とフランス中央土木研究所との研究協力協定に基づき、双方の研究情報を比較検討を行った。

はじめに、付着試験への影響因子は2つのケースが検討され、双方に一致する点として、プルオフ試験による付着性状評価では、多くのケースでコンクリート表面部分の凝集破壊がおきることから、連続繊維シートとコンクリートとの付着性状評価法としては限界があることが示された。

次に連続繊維シートの付着耐久性について、それぞれの機関から得られた結果は以下のとおりである。：

- 湿潤大気(気温40°C, 相対湿度95%)中で12か月静置した供試体の、せん断付着試験の結果、破壊モードはコンクリート表面の凝集破

壊から**界面破壊***に変わった。しかし最大せん断付着強度に変化はなかった。

- 14年暴露した供試体の引きはがし荷重は、新たに製作された類似供試体に比べて小さな値を示した。ただし、この結果は必ずしも14年の暴露期間の間の劣化を示すものではない。引きはがし試験の破壊モードは初期値および14年暴露後の供試体ともに類似しており、プルオフ試験とは異なる破壊モードを示すケースがあった。
- プルオフ試験は品質管理などの用途には適していると考えられるが、詳細な付着特性評価にはあまり適しているとは言い難い。一方、せん断付着試験や引きはがし試験はコンクリート内部での破壊をよりおこしにくく、付着特性の詳細な評価には適していると考えられる。

参考文献

- 1) Grace, N.F & Singh, S.B., Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design, ACI Structural Journal 102(1): 40-51, 2005.
- 2) Bonaldo, E.; Barros, J.A.O. & Lourenço P.B., Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing, International Journal of Adhesion and Adhesives 25: 463-474, 2005.
- 3) 藤澤健一、富山禎仁、大島敏幸 稗田省三：「引き剥がし試験による防食ライニング材のふくれ評価手法の検討」、日本コンクリート工学協会年次大会論文集、27(1)、pp.943~948、2005.
- 4) Au, C. & Büyüköztürk, O., Peel and Shear Fracture Characterization of Debonding in FRP Plated Concrete Affected by Moisture, ASCE Journal of Composites for Construction 10(1) : 35-47, 2006.

西崎 到*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料資
源研究グループ新材料
チーム 上席研究員、博
(工)
Dr. Itaru NISHIZAKI

カリム・ベンザルティ**



フランス交通企画ネット
ワーク研究所(パリ)、材
料物理化学研究室 研究
員、Ph. D.
Dr. Karim BENZARTI

マーク・キアトン***



フランス交通企画ネット
ワーク研究所(パリ) 構
造挙動・耐久性研究室
研究員、Ph. D.
Dr. Marc QUIERTANT

加藤祐哉****



国土交通省関東地方整備
局横浜国道事務所交通対
策課(元 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
新材料チーム研究員)
Yuya KATO

*土木用語解説：界面破壊