

◆ 報 文 ◆

下水管渠の破損に伴う土砂の流出特性

桑野玲子* 榎谷有吾** 堀井俊孝*** 山内慶太**** 小橋秀俊*****

1. はじめに

下水道整備が拡充し、管路延長が約36万kmに達する一方で、耐用年数を超過する管渠が増え始めている。東京都区部では、法定耐用年数50年を超えた下水管渠が平成12年度末で約2000kmに及び、そのうち平成15年度末には約18%が更新されたが、一方で写真-1に示すように管渠の損傷が原因とみられる道路陥没事故も年間約1900件発生している。

道路陥没は何らかの理由で形成された路面下空洞・ゆるみが進展し、地表面に到達する現象であり、交通に重要な影響を及ぼすため、未然に予測し、回避することが重要である。しかし、空洞が目視できない地下で生じる点や陥没が空洞の発生に時間遅れを伴って生じる点、陥没した道路を早急に復旧しなければならないといった点から、陥没原因の特定は必ずしも容易ではない。

2. 土槽を用いた土砂流出実験

2.1 実験の目的

下水管の破損等に起因する道路陥没は春から秋の多雨の季節の降雨後に起こることが多い。このため道路陥没の原因としては、降雨により地下水位が上昇し、それに伴い下水管渠破損部から雨水とともに管渠周辺の土砂が管渠内に流出し、それが拡大することによって生じる、あるいは、下水



写真-1 下水道管渠腐食による大規模な陥没

管渠内に流れ込んだ大量の排水が破損部等から周辺に溢れ出すことにより、土砂を管渠内に流入しているためと考えられる。そこで、後者の場合について管渠周辺の土質の相違による土砂流出および空洞の発生のし易さを把握するために、土砂の流出現象についてモデル地盤でシミュレーションを試みた。

2.2 実験装置

図-1に実験装置概略図を示す。実験装置は地盤部と水槽部に分割されたアクリル製の小型筒土槽（幅30cm、高さ25cm、奥行き5cm）を使用し、土槽底面に設けた幅5mmのスリット状の開口部から給水及び排水・排土し、モデル地盤内にゆるみや空洞を発生させた。土槽は奥行きの小さい薄い形状とし、地盤の変形が奥行き方向にほぼ一様となるようにした。

また、開口幅は大きいほど土砂流出しやすという傾向があるものの、予備実験の結果、地盤全体の挙動には大きな影響がなかったため5mmとした。モデル地盤上にはベロフラムシリンダーを用いて土被り80cm相当の上載荷重を載荷した。

2.3 実験方法

図-2に実験フローを示す。モデル地盤を1層2.5cmで8層、合計20cmを所定の相対密度 ($D_r = 80\%$) となるよう、1層ごとに土砂を計量して突固めることにより作成し、上載荷重を載荷した後、100ccの水を（水頭差 $\Delta h = 100\text{cm}$ ）開口部から給水した。予定量の水が流入したところで給水バルブを閉じ、1分間停止した後、排水バルブを開けて排水・排土した。これらの一連の動作を1サ

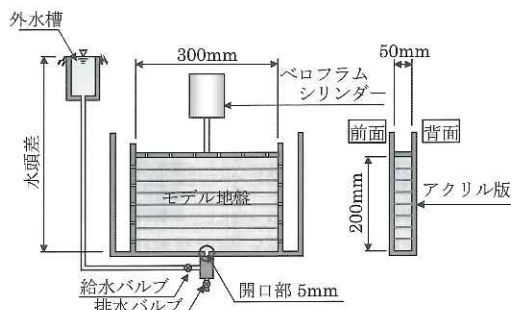


図-1 実験装置概略図

イクルとし、給排水サイクルの繰返しに伴う空洞・ゆるみの進展を土槽前面からのビデオ撮影により記録するとともに、1サイクルごとの排土量を測定した。ただし、モデル地盤内の空洞が大きく成長すると、給水量が100ccでは空洞内が水で満たされず、ゆるみや空洞がそれ以上進展しなくなる。よって、空洞が大きくなった場合は、空洞内が水で満たされる程度の給水量を確保することとした。なお、水の給水時に地盤上面より水が溢れ出す場合は吸水ポンプにより汲み出した。給排水サイクルは地盤上面まで空洞が広がったのを目視により確認した時点で終了とした。また、排水後の休止時間は一定にして実験を行なった。

2.4 実験条件

本実験では6種類の異なる地盤材料を使用し、空洞形成における地盤材料の影響を調べた。地盤材料は細粒分含有率に着目し、標準土として豊浦砂、実際の施工で用いられる山砂、さらに細粒分のみシルトの他、細粒分含有率を調整した豊浦砂+シルト（3パターン）を使用した。各材料の物理特性及び粒度分布を図-3、表-1に示す。なお、山砂の最大粒径は2mmとし、シルトについては、石材を加工する際に発生する石材粉を75 μ

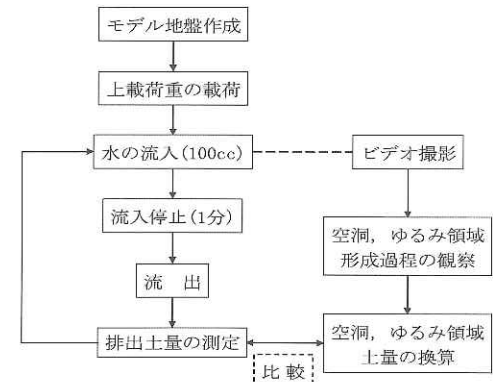


図-2 実験フロー

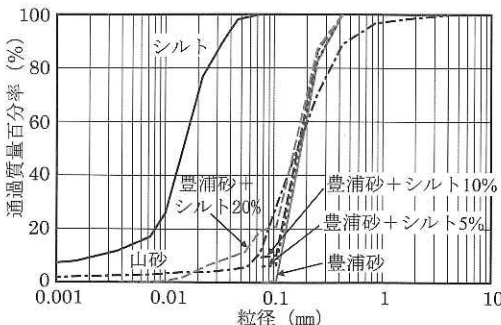


図-3 地盤材料の粒度分布

表-1 実験条件

ケース	地盤材料	最大密度 (g/cm ³)	最小密度 (g/cm ³)	モデル地盤 (相対密度 (Dr) 80%)		
				乾燥密度 (g/cm ³)	初期含水比 (%)	透水係数 (cm/s)
A	豊浦砂	1.65	1.32	1.57	14.0	9.6 × 10 ⁻³
B	山砂	1.56	1.18	1.46	17.5	5.0 × 10 ⁻⁴
C	シルト*	1.44	0.93	1.55	21.4	-
D	豊浦砂+シルト5%	1.72	1.37	1.64	13.8	1.3 × 10 ⁻³
E	豊浦砂+シルト10%	1.79	1.41	1.70	13.1	9.2 × 10 ⁻⁴
F	豊浦砂+シルト20%	1.90	1.49	1.80	13.0	1.5 × 10 ⁻⁴

*シルト地盤は相対密度114%に調整したときの値

mふるいでふるい分けしたものを使用した。

2.5 実験結果

2.5.1 空洞・ゆるみの形成、及び進展過程

流入時（開口部からモデル地盤へ水を給水している時）、停止時（給水を停止し、開口部を閉じて1分間静置している時）、流出時（開口部を開放し排水・排土させる時）のそれぞれの段階を観察したところ、概ね次のような経過をたどって、開口部周辺に空洞・ゆるみが生じていることが分かった。

①流入時：地盤に水が浸透し、空洞内が水で満たされるとともに、空洞周辺にゆるみが生じていることが分かった。

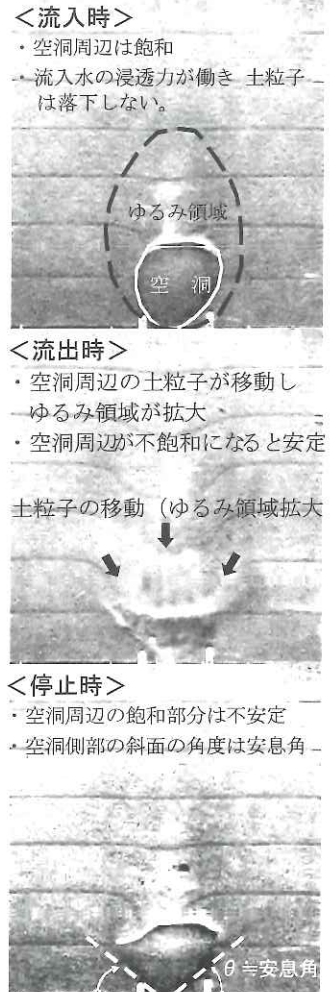


写真-2 ゆるみ進展状況

透力により落下を逃れるため、空洞の成長は顕著でない。

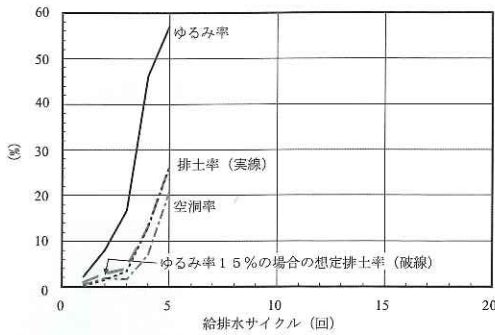
②停止時：空洞天端部の土粒子が水中を落下し、空洞が拡大するのに伴い、ゆるみが空洞上方に波及する。空洞側部の斜面上の部分は、斜面角度が安息角程度に落ち着くまで土粒子が斜面を滑り落ちる。空洞・ゆるみの進展は停止時において最も著しい。

③流出時：停止時に空洞下部へ落下した土粒子が水と共に開口部から排出される。空洞周辺の水位低下に伴い土粒子の移動が生じ、ゆるみ領域が拡

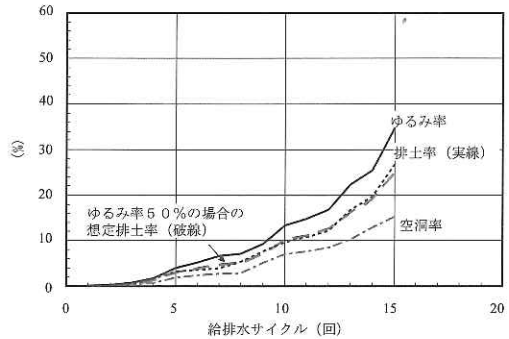
表-2 空洞・ゆるみ定量評価のための指標

指標	定義
排土率	土砂の流出しやすさを示す指標で、対象領域* 地盤全体の乾燥重量に対する排出土の乾燥重量 の割合
空洞率	空洞のできやすさを示す指標で、目視から推定 した空洞領域の割合
ゆるみ率	ゆるみの発生しやすさを示す指標で、対象領域 に対する目視によってゆるみが生じていると推 定される領域の割合

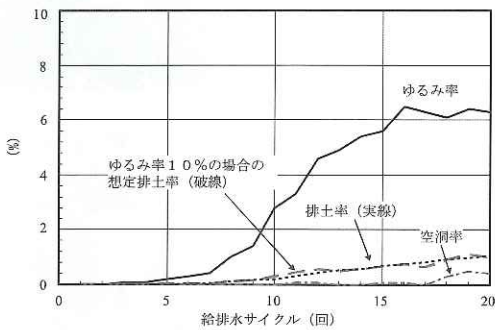
*対象領域は開口部を中心として幅25cm、高さ20cm



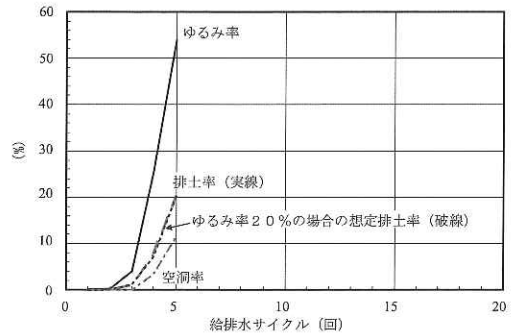
A) 豊浦砂



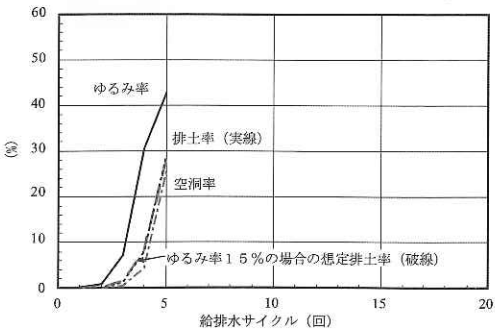
B) 山砂



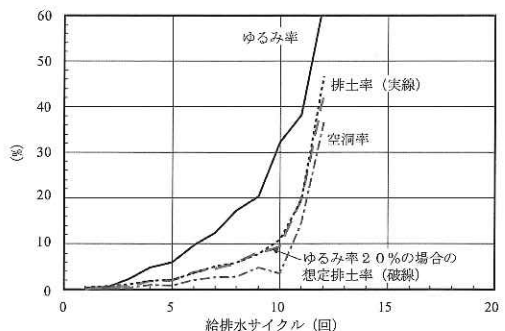
C) シルト



D) 豊浦砂+シルト5%



E) 豊浦砂+シルト10%



F) 豊浦砂+シルト20%

図-4 ゆるみ領域の推定

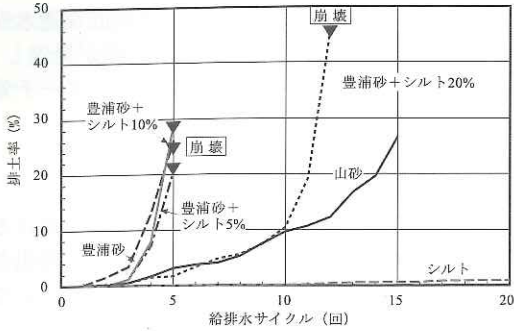


図-5 排土率

大する。透水性の高い材料の場合は、速やかに排水され、一旦空洞周辺が不飽和状態になるとそれ以上のゆるみの進展は抑制される。

1サイクルごとに上記①～③を繰り返すことにより空洞・ゆるみが鉛直・水平方向に進展し、最終的に空洞天端部上方の土塊を支えきれなくなり崩壊に至る。写真-2に空洞・ゆるみの進展状況の様子を示す。また、表-2に空洞・ゆるみ定量評価のための指標を示す。

(1) 土砂流出特性

図-4にゆるみ領域の推移を、図-5に各材料のサイクル毎の排土率を示す。細粒分を多く含む材料では土砂の流出及びそれに伴うゆるみの進展が遅延し、高い耐土砂流出性を有していることが分かる。豊浦砂及び豊浦砂シルト混合土では、途中からゆるみの進展が急速に進み崩壊に至った。山砂地盤は、細粒分含有率は豊浦砂+シルト10%と大差ないが、豊浦砂+シルト20%地盤以上の耐土砂流出性を示した。また、空洞率は全般的に排土率の変化と同様の傾向が見られた。

以上の結果より、地盤材料によって、ゆるみや空洞の進展速度、およびゆるみ領域の形状やゆるみ程度が異なり、細粒分が少なく粒度の悪い砂では、土砂流出およびゆるみは急速に進展し全体崩壊に至ることが示唆された。

(2) ゆるみ程度の推定

排出土は空洞・ゆるみ領域から排出していることから、ゆるみ領域の密度低下を逆算することができる。各地盤のゆるみ程度を計算すると、豊浦砂、シルト、及びシルト混じり豊浦砂では約10～20%、山砂で約40～60%となった。

図-4に各地盤材料について一定のゆるみ程度を想定した場合の排土率を表す、想定排土率も示した。図-6に示すように、推定ゆるみ領域の大きさはサイクルを通して空洞に対してほぼ一定割

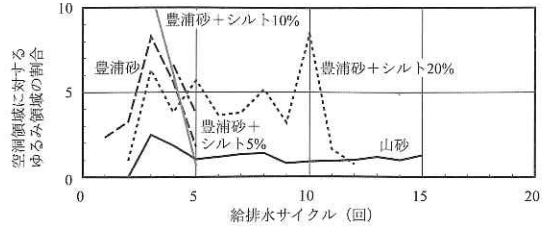


図-6 空洞領域に対するゆるみ領域の割合

表-3 実験条件

ケース	地盤材料	地盤条件
A	豊浦砂*	豊浦砂：Dr = 80%、w = 14.0%
B	山砂*	山砂：Dr = 80%、w = 17.5%
G	豊浦砂 混じりレキ	レキ：Dr = 70%、w = 0.0% ※レキ地盤の間隙に豊浦砂を投入
H	レキ混じり 豊浦砂	豊浦砂：Dr = 80%、w = 10.0% ※豊浦砂とレキ材の乾燥重量比 = 2:1
I	レキ混じり 山砂	山砂：Dr = 80%、w = 17.5% ※山砂とレキ材の乾燥重量比 = 2:1

*前章での実験

合を保っており、空洞の拡大に伴って、ゆるみ程度やゆるみ率は変化しなかった。

なお、ゆるみ領域とゆるみ程度の関係は地盤材料によって異なると考えられ、細粒分が少ない材料では、軽微なゆるみが広がりやすいため、ゆるみ程度は小さいがゆるみ領域は広くなりやすく、細粒分が多い材料では、ゆるみ程度は大きいがゆるみ領域は狭くなる傾向がみられた。

3. レキ混じり地盤の土砂流出特性

3.1 実験概要および実験条件

土砂流出におけるレキ材の影響を検討するために、土槽を用いた給排水繰返しによる土砂流出実験を行なった。

実験装置は概ね前章と同様であるが、レキ混じり砂地盤では実験開始と共にレキ材に沿って水みちが発生するため、本実験では側壁の穴を塞ぎ、モデル地盤から水槽部に水が流出しないように改良した。なお、実験条件を表-3に示す。なお使用する土砂は前章と同じ物を用いた。CaseGはレキが主たる骨格を形成する地盤を想定し、CaseH、Iは母材にレキが点在している地盤を想定した。

3.2 実験結果

3.2.1 空洞・ゆるみ形成および進展過程

地盤内にレキが混入することにより、空洞やゆるみの形成および進展過程において、豊浦砂や山砂の均一地盤とは異なる現象が観察された。写真-3

に実験の様子を示す。CaseGで観察された土砂流出領域の進展過程が示すように、レキを主体とする地盤では、流入水がレキに沿って容易に浸透し、レキ材の間隙にある砂を浸食することにより、土砂流出領域は枝状に拡大する。ただし、レキ材が地盤の主たる骨格を成しているため、土砂流出が進んでも全般的な破壊には至らない。また、土砂流出領域周辺に顕著なゆるみ領域は見られない。

CaseHで観察された空洞の進展過程に見られるとおり、砂を主体とする地盤では、レキの挙動は砂の流出・移動に依存するため、レキ材の周辺の砂が浸食されると、支えを失ったレキ材が空洞方向に移動・落下し、空洞が拡大した。空洞は、レキの配置によりイレギュラーな形となり、空洞周辺にはわずかなゆるみ領域が見られた。

山砂を主とする地盤内の空洞とゆるみの形成状況であるCaseB、Iについても写真-3に示す。山砂の均一地盤であるCaseBでは、空洞の大きさと比較して空洞上方のゆるみ領域は比較的小さい。しかし、レキ材を混入したCaseIでは、空洞上部にゆるみ領域が大きく広がっていることが分かる。

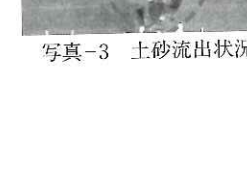
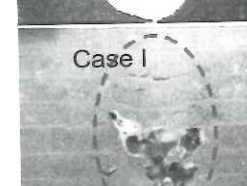
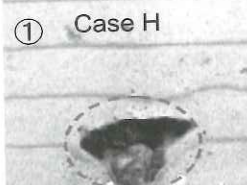
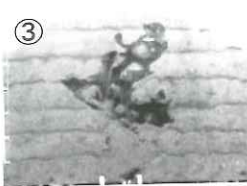
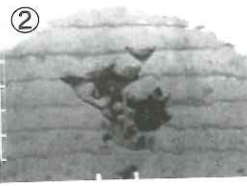
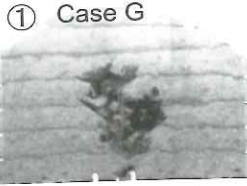


写真-3 土砂流出状況

地盤にレキを混入することで、平均的な透水性が良くなると同時に不均質な透水経路が発達し、地盤内の応力伝搬が一様ではなくなり、アーチ効果の発揮が阻害される可能性がある。

3.2.2 地盤のゆるみ特性

(1) 土砂流出特性

図-7にCaseA、B、G~Iの各ケースにおける排土率を示す。なお、レキ材は開口部から排出されないため、レキ混じり地盤ではレキ材を除いて算出している。

山砂のみで地盤を作成したCaseBは15サイクルで地盤崩壊に至らなかったのに対し、レキが混入したCaseIは13サイクルで崩壊した。ここで、排土率はCaseBとIが同様に推移していることから、レキが混入することにより、ゆるみ領域が空洞上部に拡がりやすくなり崩壊しやすくなる可能性がある。

(2) ゆるみ程度の推定

図-8にCaseH、Iのゆるみ領域の推移を示す。前章同様、ゆるみ領域のゆるみ程度はほぼ一定値で推移していることがわかる。豊浦砂および山砂のみで地盤を作成したケース(図-4参照)において、ゆるみ領域のゆるみ程度はCaseAが10~20%程度、CaseBは40~60%程度であった。一方豊浦砂にレキ材を混入したCaseHでのゆるみ程度はCaseAとほぼ同等で、レキ材混入の影響が見られなかったのに対し、山砂にレキ材を混入したCaseIではゆるみ程度が10~20%程度となり、レキ材混入の影響が大きい。高い耐土砂流出性を有する地盤材料でも、レキ材を混入することにより、軽微なゆるみが広範囲に進展し、地盤崩壊に至りやすくなる可能性があることが分かる。

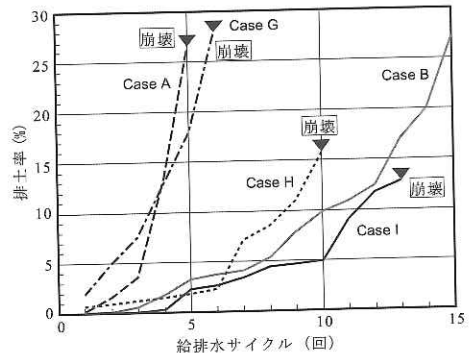


図-7 排土率

4. まとめ

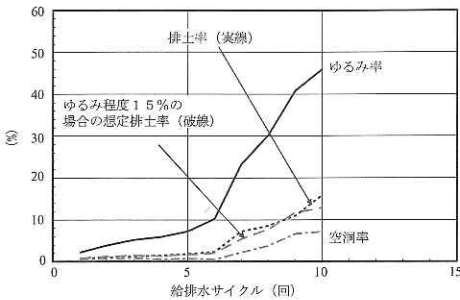
本研究により以下の知見が得られた。

- ①開口部からの給排水の繰返しに伴い、開口部から土砂が流出し、空洞・ゆるみが進展する。特に開口部周辺地盤が飽和している時に土砂流出が起こりやすい。
- ②空洞の大きさに関わらず、周辺のゆるみ程度はほぼ一定で推移する。
- ③レキ混じり地盤では透水性や強度特性は改善するが、不均質な土砂流出経路が発達し、地盤の崩壊が早まる傾向がみられた。

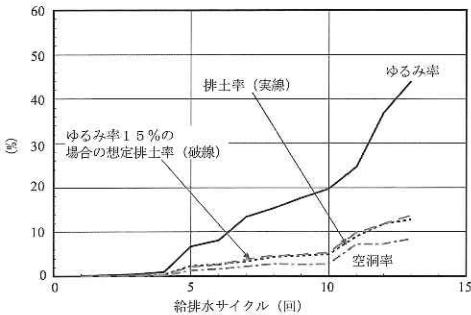
今後更に条件を変えデータを蓄積することにより、周辺地盤、下水道管渠の破損状況から、ゆるみ、空洞の発生範囲を予測できるようにしていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 小橋、桑野他：「管渠埋設地盤内の空洞・ゆるみ形成メカニズムに関する研究」、土木研究所資料, 2006. 3



H) レキ混じり豊浦砂



I) レキ混じり山砂

図-8 ゆるみ領域の推移

桑野玲子*



東京大学生産技術研究所
助教授 (前 独立行政法人
土木研究所材料地盤研
究グループ土質チーム主
任研究員), 工博
Dr. Reiko KUWANO

榎谷有吾**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ土質チ
ーム研究員
Yugo MASUYA

堀井俊孝***



若築建設(株)設計部 (前 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土
質チーム交流研究員)
Toshiyuki HORII

山内慶太****



若築建設(株)技術部 (前 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土
質チーム交流研究員)
Keita YAMAUCHI

小橋秀俊*****



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
ープ土質チーム首席研究員, 工博
Dr. Hidetoshi KOHASHI