

論文 繰返しの圧縮力およびせん断力を与えたコンクリートの砂利化発生機構の検討

仙頭 紀明*1・ 子田 康弘*2・ 藤山 知加子*3

要旨: コンクリート床版などに生じる砂利化の発生機構の解明を目的に、水圧と圧縮力、ひび割れ面の擦り合わせの影響をそれぞれ検討した。実験は、コンクリートのマトリックスにおける微細ひび割れの発生と水圧の上昇を想定した繰返し圧縮試験と、ひび割れへの水の浸入とすり磨きを想定した繰返し一面せん断試験を行った。その結果、圧縮応力と水圧が作用した状態で、比較的大きなひび割れの存在は砂利化を促すこと、一面せん断によりひび割れ面には砂利化の兆候を示す粉体が確認され、その量は水浸供試体のほうが多いことを示した。さらに、この種の挙動は地盤の液状化現象と類似している点があることを指摘した。

キーワード: 砂利化, 水圧, 繰返し載荷, 一面せん断試験, 液状化

1. はじめに

動的荷重の繰返しを受ける代表的な構造物である道路橋 RC 床版は、繰返し作用と水の存在によって、モルタル分を粉碎、流出させコンクリートの粗骨材だけが残る「砂利化」と言われる現象を呈することが知られている。また、水の侵入は、特に積雪寒冷地域における凍結防止剤散布と相まって、凍害、塩害および ASR を誘発するため、さらに砂利化を促進すると考えられるが、それらの複合効果を定量的に明らかにするのは容易ではない。

砂利化のメカニズム解明の手がかりとして、低水圧下であってもコンクリートへの水の侵入が繰り返されることにより、モルタル領域に粉碎の兆候が認められるという報告¹⁾がある。しかし、コンクリート骨格の急激な圧縮によりコンクリート細孔中の凝縮水の水圧（コンクリートを形成するマトリックスからみれば間隙水圧）が上昇しコンクリート骨格の損傷を促進するという仮説²⁾に立脚すると、**図-1**のような実床版で視認される砂利化への進展までには、水圧に加え、他の力学的要因も検討する必要があると考えられる。

そこで本研究では、砂利化した床版では、床版上面付近に発生した水平ひび割れとひび割れ面への水の浸入が確認されている³⁾ことをふまえて、これらの影響を想定した検討を行った。まず、既往の研究¹⁾を進展させ、ひび割れを発生させた状態で、繰返し圧縮力作用下において載荷重やひび割れ開口の拘束、水圧作用の有無を実験パラメータとした実験を行った。次に、ひび割れに侵入した水がひび割れ面のすり磨きを促進するという報告⁴⁾をもとに、土質試験に用いる一面せん断試験装置を改良して、コンクリートのひび割れ面を対象にした繰返し一面せん断力による砂利化検証実験も行った。この試験で



図-1 道路橋床版における砂利化

は水浸の有無に着目した。さらには、同様の繰返しせん断により変形が蓄積される、ゆるい砂地盤の液状化現象との比較を通して、コンクリートの砂利化発生メカニズムについて考察を行った。

2. 圧縮応力作用下における砂利化発生要因

2.1 実験概要

表-1 に、実験条件を示す。ひび割れ幅は 0.1mm と 0.5mm の 2 条件、ひび割れの載荷中におけるズレや開口の拘束の有無、水圧の作用の有無、疲労作用の影響を調べるため上限荷重を 10kN, 20kN および 30kN の 3 条件とした。また、繰返し載荷回数は 5 万回, 10 万回および 20 万回の 3 条件として、これらを組み合わせた合計 9 条件とした。なお、表中には後述する実験中の水圧の値を示したが、No.3 の水圧が極端に大きく計測されたがこれの原因は特定できれおらずここでは参考値とした。供試体形状は、直径 100mm, 高さ 100mm の円柱とした。供試体数は各条件 1 体である。なお、ひび割れは、実験前

*1 日本大学 工学部 土木工学科 准教授 工博 (正会員)

*2 日本大学 工学部 土木工学科 准教授 工博 (正会員)

*3 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 実験条件 1

供試体 No.	ひび割れ幅(mm)		拘束の有無	水圧の有無	上限荷重(kN)			荷重回数(万回)			水圧(kPa)	
	0.1	0.5			10	20	30	5	10	20	平均	最大
1	○		無	有		○				○	12	31
2		○	無	有		○				○	62	83
3	○		有	有		○				○	(1073)	(2182)
4		○	有	有	○					○	41	83
5		○	有	有		○				○	324	468
6		○	有	有			○			○	180	232
7		○	有	有		○		○			130	152
8		○	有	有		○			○		114	126
9		○	有	無			○			○	-	-

表-2 コンクリートの配合 1

G _{max} (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	AE 減水剤
20	12	64.3	4.5	48.0	178	277	839	1005	2.77

に予め割裂することで供試体直径方向に発生させ、拘束はホースクランプによって供試体を締め付けることで行った。

表-2 に、コンクリートの配合を示す。水セメント比 W/C は、64.3%であり、荷重試験開始時の圧縮強度は 22.7MPa であった。供試体の養生は、材齢 1 日で脱型しその後は室内にて気中養生であり、3 章の供試体も同様の養生である。

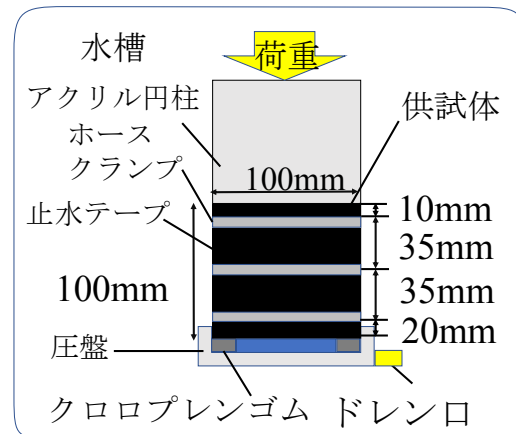
図-2 に、荷重方法を示す。水圧は供試体を水槽内に設置し、供試体底面と圧盤の間に外径 100mm、内径 60mm、厚さ 10mm のクロロプレンゴム製の円環を介し荷重することで円環内の水を加圧し、水圧を発生させた。また、水の侵入を供試体上下方向に制限するため、供試体側面をブチルテープで止水した。設定荷重は、2Hz の正弦波として与えた。測定項目は、繰返し荷重中における水槽内の水の pH、荷重回数、および荷重試験終了後供試体を切断し、供試体内部に発生したひび割れ密度計測を行った。

2.2 実験結果及び考察

図-3 は、荷重試験中の水の変化である。水は徐々に濁るが、これは供試体中のセメント分がアクリル円柱と供試体上面の境界より水槽内へ流出しているためである。よって、間接的ではあるが既報²⁾と同様荷重中の水の pH の変化を測定することで、供試体コンクリートの砂利化の進行の程度を評価することとした。なお、供試体と水槽内水の体積比は、1.7%である。図-4 に、pH と荷重回数の関係を示す。pH は初期値から約 2 程度の増加であり、荷重回数 5 万回以降は概ね一定に推移した。このように繰返し荷重直後から水の pH が増加しており砂利化の兆候と判断された。しかし、砂利化の進行までは pH の変化量で説明することは難しく、以降では試験後の断面の損傷状態と合わせて評価した。

図-5 は、No.6 底面（水圧作用面）から 10mm 位置の

切断面におけるひび割れ状況である。図より、図下側に砂利化した状況が見て取れる。このひび割れ（赤線）をひび割れ密度として数値化し定量評価した。図-6 に、pH とひび割れ密度の関係を示す。図より、両者の関係には、正の相関が認められた。また No.4~6 の比較から、荷重荷重の大小が砂利化の進行の程度に影響している可能性が示唆された。なお、本研究での最大荷重 30kN を与えた No.6 でも、発生応力は圧縮強度の 17%程度である。すなわち、砂利化の進行には比較的低い圧縮応力でも影



(a) 全体構成図



(b) 水槽内における供試体の設置状況

図-2 荷重試験方法



図-3 载荷中の水の変化

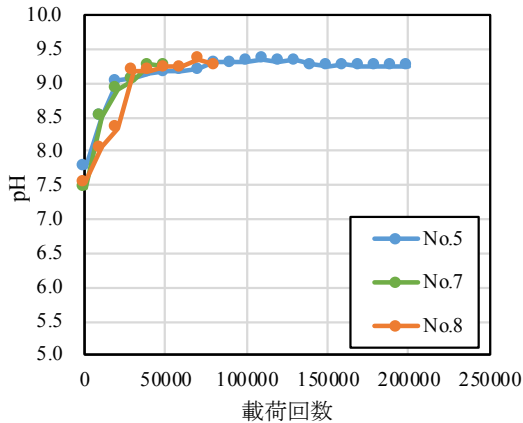


図-4 pH-载荷回数



図-5 内部ひび割れの様子

響を及ぼすとともに、応力度の増加は砂利化を促進させると考えられた。

図-7に、ひび割れ幅と拘束の有無(No.1, No.2, No.3, No.5)によるひび割れ密度を示す。ひび割れ密度は、いずれも拘束無し No.1 と No.2 ではわずかに No.2 が小さいが、拘束有りの No.3 と No.5 では、明らかに No.5 が大きかった。また、ひび割れ幅 0.5mm の No.2 と No.5 を比較すると、拘束の有無によらずひび割れ密度に大差はなかった。これより、ひび割れ幅が小さい場合は、拘束されることで水の侵入が抑制されひび割れ密度が増加しないが、ひび割れ幅が大きいと水が容易にひび割れを通じて内部に侵入するため、拘束の有無に関わらずひび割れ密度が同程度であったと考えられた。これより、拘束の有無以上に、水圧が作用する範囲内でのひび割れの大き

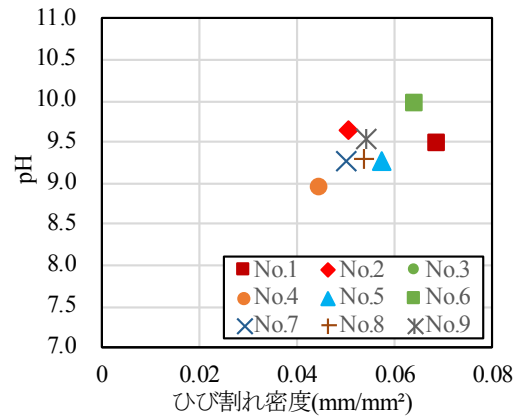


図-6 pH-ひび割れ密度

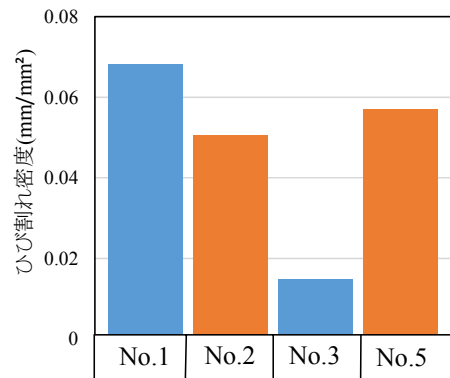


図-7 ひび割れ幅と拘束の有無によるひび割れ密度

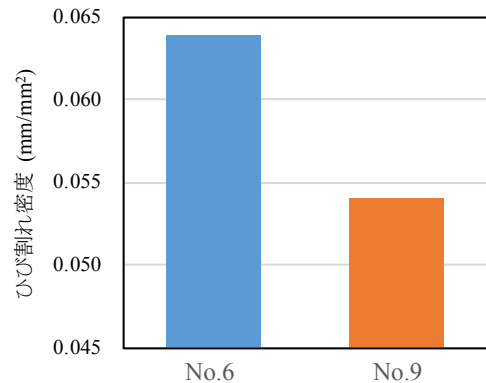


図-8 水圧作用の有無によるひび割れ密度

きさが、砂利化に影響すると考えられた。

図-8に、No.6とNo.9のひび割れ密度の比較を示す。No.6よりNo.9のひび割れ密度は小さい。つまり、水圧が作用することでひび割れ内に水が侵入し、水圧と応力の繰返しが相まってモルタル分が破壊し、加えて微細なセメント粉体を外部に流出させたと考えられた。水圧作用の有無は、ドレン口の開閉により行なったもので、水圧有のNo.6の水圧は試験中の最大値で232kPaであった。

3. 繰返しせん断による砂利化発生要因

3.1 実験概要

図-9に、繰返し一面せん断試験の装置の概要を示す。

表-3 コンクリートの配合 2

G _{max} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	AE減水剤
20	10.0	4.5	65.0	45.0	170	262	841	1051	2.77

装置は、せん断箱と、せん断力及び垂直力の荷重装置からなる。この方法は岩盤不連続面の一面せん断試験方法 (JGS 2541-2008) ⁵⁾を参考に既存の装置を改良し、繰返しせん断できるようにしたものである。図-10 に、せん断箱の概要を示す。供試体はひび割れ面がせん断箱の中心の高さかつ水平になるように治具を用いて仮固定した後、供試体とせん断箱の隙間に石膏を充填して固定した。

表-3 に、コンクリートの配合を示す。使用したコンクリートは、W/C=65%であり、供試体は1辺が約60mmの正方形断面で、高さは約40mmである。図-11 に、ひび割れ供試体作製方法を示す。方法①は供試体の側面の相対する2面にディスクグラインダーを用いて幅約1~2mm、深さ約5mmの溝を作製した。その後、溝に沿って鋼製のくさびをいれて荷重を徐々に加えて割裂させた。しかしこの方法では、水平に近いひび割れを発生することが難しかったため方法②を試みた。具体的には、側面全周に方法①と同様の溝を作製し、割裂させた。表-4 に、実験条件を示す。供試体の水浸の有無、ひび割れ面作製方法の違いに着目した5ケース (各供試体1体) の実験を行った。なお、水浸供試体は、水深約20cmの条件で、水道水に1週間以上水浸したものをを用いた。

繰返しせん断試験は、ひび割れ面に対して、垂直力 (0.1kN) を一定で荷重した条件で、正弦波 (0.5Hz) の繰返しせん断力 (振幅: 0.2, 0.4, 0.8kN) を荷重した。なお、ここで設定したせん断力は装置の荷重能力を加味して設定した。ただし実床版との対応については今後詳しく検討する必要がある。せん断力振幅は段階的に増加させ、各段階で約5万回荷重した。測定項目は、図-9 に示すように、せん断力、垂直力、水平変位、垂直変位である。

3.2 実験結果及び考察

図-12 と図-13 に、Case3 (水浸無し) の水平変位および垂直変位と荷重回数の関係を示す。また、図-14 と図-15 に、Case4 (水浸有り) の水平変位および垂直変位と荷重回数の関係を示す。図には各荷重回数における振幅の最大、最小値を示した。Case3 では、水平変位と垂直変位ともに大きな変化は見られないが、Case4 の水平変位の振幅は荷重回数の増加とともに振幅が大きくなっている。垂直変位も荷重回数の増加とともに大きくなり、沈下が進行し、せん断力の増加によりその増分も大きくなり、最終値では約1mm沈下していることがわかる。これにより、ひび割れ面のコンクリートがすりつぶされる

表-4 実験条件 2

ケース	水浸有無	ひび割れ面作製方法	供試体重量(g)	せん断面の面積 (mm ²)
Case1	無し	方法①	—	—
Case2	有り	方法①	—	—
Case3	無し	方法②	552.730	3397
Case4	無し		516.901	3393
Case5	有り		525.228	3301

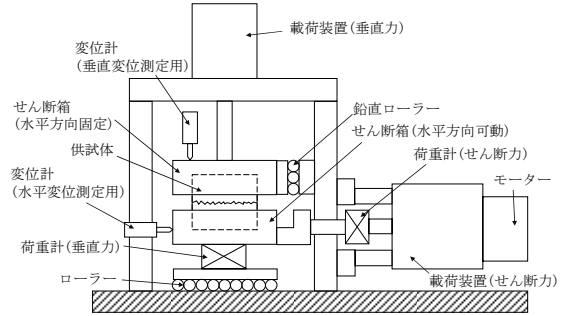


図-9 装置の概要

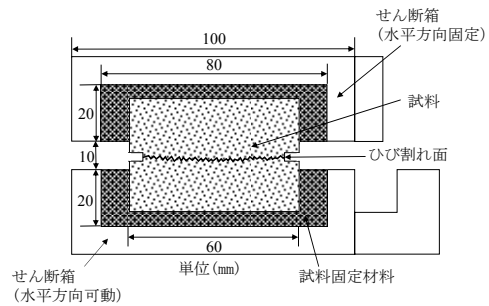


図-10 せん断箱の状況

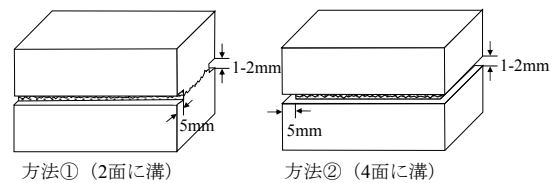


図-11 ひび割れ供試体作製方法

ようにして嵩が小さくなったものと考えられる。

図-16 に、試験前後のひび割れ面の状況 (Case4) を示す。荷重終了後ひび割れ面には、白濁した液体が観察された。観察後にひび割れ面を歯ブラシで軽く擦りながら蒸留水で洗い流して、白濁液体を容器に集めた後、乾燥炉 (110℃) で乾燥させて質量を測定した。なお、この粉体は白色を呈し、微細な粉末であったが、後述するコンクリートの破片も一部含んでいた。なお、上記のブラッシングは、せん断前にも実施しており、その際には粉状のものはほとんど見られなかった。図-17 に、繰返しせん断により生じた粉体質量と水平変位の両振幅との関係を示す。図-18 には、最終の垂直変位との関係を示す。なお、Case1 と Case2 は、図-11 に示す方法①では供試体の側面に溝をいれてない部分の端部が試験中に割れる

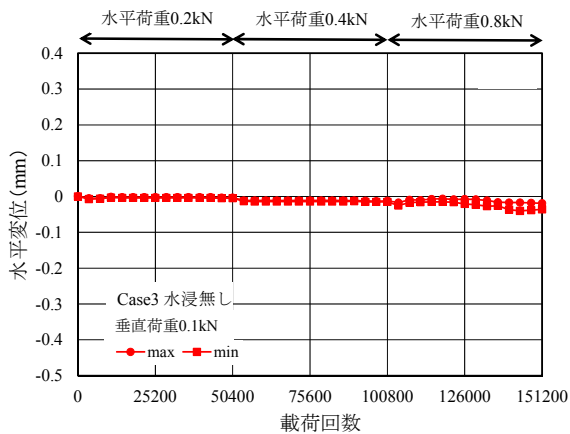


図-12 水平変位と载荷回数 (Case3 水浸無し)

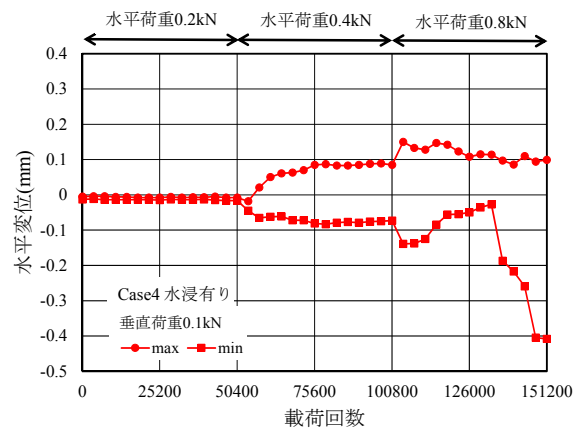


図-14 水平変位と载荷回数 (Case4 水浸有り)

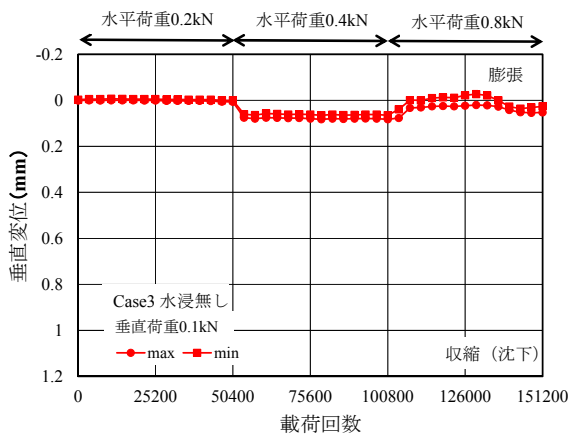


図-13 垂直変位と载荷回数 (Case3 水浸無し)

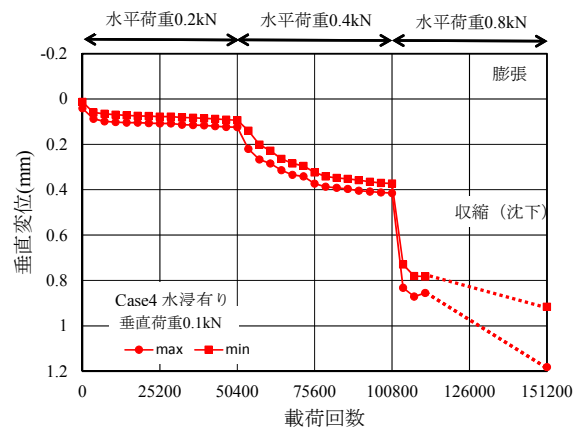


図-15 垂直変位と载荷回数 (Case4 水浸有り)

ことで、粉体中にその破片を含んだために、方法②よりも粉体質量が大きくなった。なお、この端部の破片を取り除いた結果も区別して併せて示した。図より水浸条件が同じであっても、ケースごとに粉体量は異なっている。これはひび割れ面の凹凸の違いによるものと考えられる。しかし、水平変位、垂直変位の増加とともに粉体質量は増加しており、ともに正の相関が見られた。

図-19に、Case4の水平変位と垂直変位の関係を示す。载荷初期から徐々に水平変位の振幅が大きくなるにつれて、沈下も大きくなっていることがわかる。また、水平変位が大きくなると沈下から膨張に転じる傾向もみてとれる。この変形挙動は、緩い砂の繰返しせん断挙動と共通性があるため比較を行った。

砂の繰返しせん断試験は、中空ねじりせん断試験 (JGS 0551-2009) により実施した⁹⁾。垂直力 (応力) を一定で载荷し、繰返しせん断力 (応力) を与えたものである。なお繰返しせん断中は砂からの排水を許す排水条件とした。材料は豊浦砂を用いた。図-20に、応力ひずみ関係とせん断ひずみ-体積ひずみ関係を示す。なお、せん断ひずみは水平変位、体積ひずみは垂直変位と対応している。液状化しやすい緩い砂は、排水条件でせん断すると

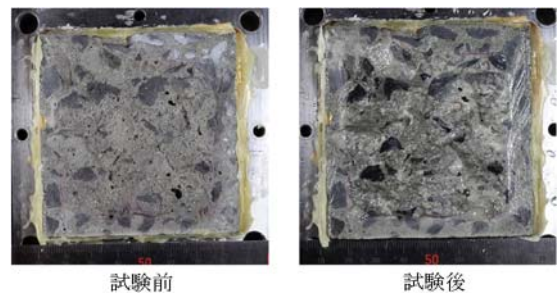


図-16 試験前後のひび割れ面の状況

体積が収縮する負のダイレイタンス挙動を示し、繰返しにより収縮量が累積していく。これは、緩く嵩張った砂の構造 (かみ合わせ) が繰返しせん断により壊されて密になろうとする現象である。この考え方をコンクリートのひび割れ面に当てはめると、ひび割れ面のセメントペースト部は固結しており、嵩張った構造をしているものの、繰返しせん断によりその構造が破壊され、嵩が小さくなり、もとの粉体へと変化したものと考えられた。その際に水浸したことで上記の構造劣化が加速したのと考えられた。このことからコンクリートの砂利化のメカニズム解明と予測に液状化のメカニズムを応用できる可能性が示唆された。なお膨張挙動に関しては、骨材同

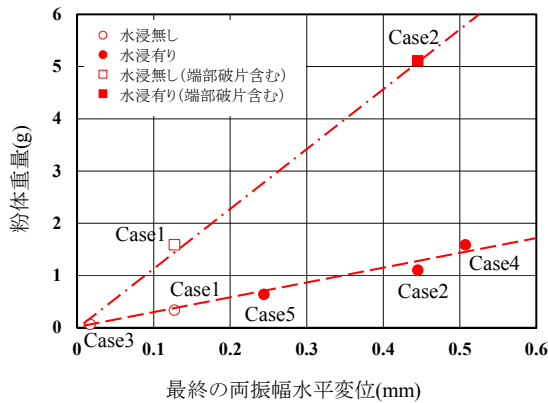


図-17 粉体質量と最終水平変位の関係

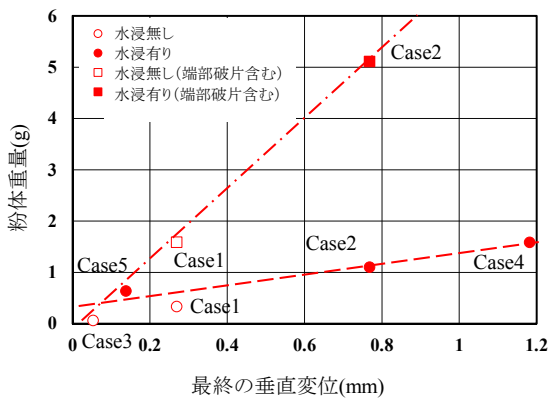


図-18 粉体質量と最終垂直変位の関係

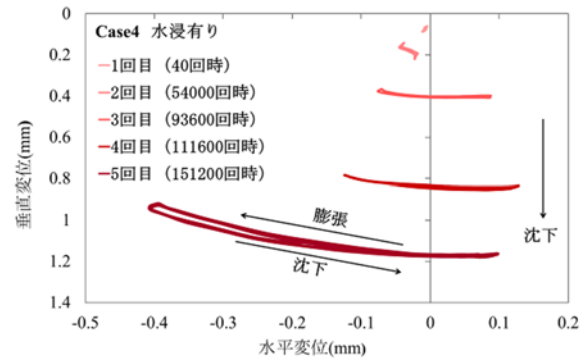


図-19 垂直変位と水平変位の関係

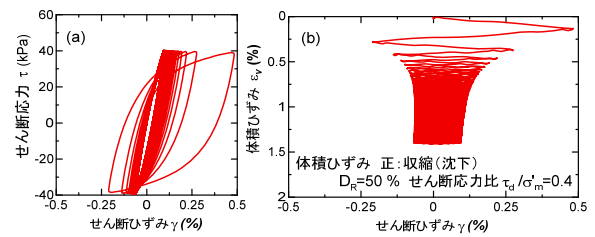


図-20 緩い砂の繰返しせん断結果

今後は、実験回数を増やし再現性を確認するとともに外力を加えず注入方式による水圧载荷で水圧単独の作用を評価する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H04402 により実施された。日本大学工学部土木工学科 横田貴史君、篠原陸哉君には実験に協力いただいた。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 藤山知加子, 小川健, 子田康弘, 仙頭紀明: 水圧を繰り返し与えたコンクリートにおける砂利化検証実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.601-606, 2017.7
- 2) 前川宏一: 間隙水の動態から見るコンクリート構造力学と地盤工学, 地盤工学会誌, 第 61 巻, 11/12 号, pp.30-33, 2013.
- 3) 子田康弘, 斉藤卓也, 岩城一郎: 輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp.145-150, 2009.
- 4) E. Gebreyouhannes, T. Kishi and K. Maekawa: Shear fatigue response of cracked concrete interface, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, pp.365-376, 2008.
- 5) 地盤工学会: 岩盤不連続面の一面せん断試験方法, 地盤材料試験の方法と解説, pp. 912-944, 2009.
- 6) 地盤工学会: 土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法: 地盤工学基準 (JGS0551-2009), 地盤材料試験の方法と解説, pp. 709-715, 2009.

士の乗り上げによるものと推察され、粒状体のせん断変形に伴う正のダイレイタンスーと似た挙動を示している。

4. まとめ

本研究では、繰返し圧縮力作用下と繰返し一面せん断力作用下における砂利化の発生機構を検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 繰返し圧縮力より、ひび割れがある中で水圧が発生する方がひび割れ密度が大きくなる傾向であった。
- 2) ひび割れ密度は、圧縮力の繰り返し回数の多少より、载荷重の影響が大きかった。ひび割れを通じて水圧が供試体全体に作用しモルタル部を粉砕すると同時に間隙水圧上昇が損傷を促進したと考えられた。
- 3) 比較的大きなひび割れが発生したコンクリートに対して、圧縮応力と水圧が作用した状態で、砂利化が進行すると考えられた。
- 4) 繰返し一面せん断により、ひび割れ面に粉体が発生する砂利化の兆候を確認した。この粉体質量は、水浸無しに比べて水浸有りの方が大きくなった。
- 5) 粉体質量は水平変位両振幅および垂直変位（沈下量）が大きくなると増加し、正の相関が見られた。
- 6) 繰返しせん断中は、沈下と膨張を繰返ししながら、沈下が進行していくことがわかった。この傾向は、緩い砂の繰返しせん断に伴う体積収縮挙動、すなわち液状化と類似することを示した。