

まさ土で造成した盛土地盤における空洞と陥没の発生機構に関する実験的研究

Experimental Study on Generation Mechanism of Cavity and Depression in the Embankment by Masado Soil

鈴木大夢 Hiromu SUZUKI (前田建設工業(株))
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学防災・減災研究センター)

深い位置に埋設管がある盛土地盤における地盤内空洞の形成と移動のメカニズムについて室内模型実験により検討した。細粒分を含むまさ土地盤の場合、排水管の破損部から管内に土が落ち込んで空洞が形成されても、降雨の浸透や地盤内水位の変動では空洞位置の上方移動は起きなかった。埋設管内に高い水頭が発生した状態で、破損部から地盤上部への給水が繰返し起こる場合に空洞の地表面方向の移動が観察された。このとき破損部から上方向に地盤の密度低下(緩み)とともに空洞が形成され、繰返しの給水により空洞上部が崩壊して緩み領域内に落ち込むことで空洞位置が上部に移動した。

キーワード：まさ土，陥没，高盛土，埋設管，空洞 (IGC：E-14，H-10)

1. はじめに

地盤陥没は地表面において発生する沈下現象であり、その規模も様々であり種々の要因が考えられる。発生の場所や時間によっては大きな災害となるため、陥没発生の要因を検討することが重要となる。既往の陥没事例によると、陥没は地盤内部に空洞が形成されることによって発生している。そして、地盤内に空洞ができる原因としてもっとも多いのは、地盤内の排水管などの地下埋設管の表面が破損し、そこに土砂が流入する場合である¹⁾。排水管に流入した土砂が排水管内を流れて排除されると、その後も排水管への上部の土砂の流入と管を通じた流出が継続するため、地盤内から大量の土砂が排水管を通じて外で流出し空洞が形成される。

このような埋設管の破損が原因である地盤内の空洞発生と陥没では、原因となる埋設管の深度は概ね1~3m程度であり、埋設管の直径と比べると数倍程度の深度での現象が多い^{1)~3)}。一方、盛土により造成された地盤でより大規模な陥没が発生した事例がある。仙台市では造成後約40年経過した地盤において、長さ7.0m、幅5.0m、深さ7.0mの陥没が発生し、その原因が盛土造成時に埋設した排水管の破損(盛土後は深度10~15.5m)であったことが報告されている⁴⁾。この例では、上流にあった農業用ため池の水が排水管に流入し排水管を満たしていたが土砂等で閉塞した状態であったため支障は生じていなかった。何らかの原因で閉塞が解消し一気に排水管内の土砂と水が流出し、盛土地盤が排水管の破損箇所から吸い出されて陥没が発生したと推測されている。

ある住宅造成地で造成後30年以上経過後に地下20~30mにある埋設管の破損に起因して空洞が形成され、さらに上部に移動して表層付近に達し、地盤の陥没が発生した。大きな深度にある埋設管が原因となって空洞が発

生し、表層で陥没が起こるためには、深部で発生した空洞が時間とともに高い位置に移動し、最終的に地盤表面の陥没に至るメカニズムを明らかにする必要がある。また、地盤の陥没に関する研究において、細粒分を含むまさ土地盤を対象とした研究が佐藤ら⁵⁾によって報告されているがまだ少なく土性の違いが空洞形成や陥没の現象に及ぼす影響も明らかになっていないと考えられる。本研究は小型模型地盤による実験を行う方法により、まさ土地盤において深部に形成された空洞が発達し、地盤内をより高い位置に移動する過程を検討した。

2. 盛土地盤における地盤陥没の要因とそれに対応した実験装置

2.1 盛土地盤における地盤陥没の原因と考えられる要因

図-1に住宅造成地の空洞形成の状況を模式的に示すが、図のように地盤内の空洞は、排水管が損傷している箇所の上部あるいは盛土造成時に排水管連結されている縦樋の上部に発生していた。本事例は、原因となる埋

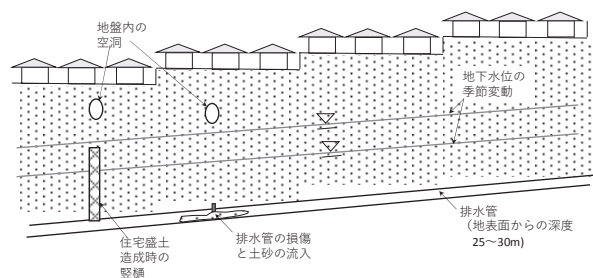


図-1 盛土によって造成された住宅団地における空洞発生例

設管の深度が 20m 以上と大きいこと、空洞と陥没が造成後長時間経過した後に発生していること、地下水の季節変動が 3～5m 程度あることなどが、従来の道路の陥没事例などと異なっている。

図-1 より空洞を発生させる要因を考えると、第一には地盤底部の埋設管の破損による開口部の存在がある。次に、地盤表面からの降雨、地盤内の地下水位の変動、さらには開口部から地盤への給水の 3 つが陥没を発生させる要因と考えられる。

2.2 実験装置と実験の方法

以上の要因と空洞の発生と空洞の上方への伝搬、陥没発生の一過程を観察するため、図-2 に示すアクリル土槽を用いて実験を行った。土槽は埋設管上部に発生する空洞が上方に遷移する状況を観察するため、土槽の幅に対して鉛直方向が高くなるように設計した^{5),6)}。この土槽内に幅 40cm、高さ 40cm、奥行 10cm の模型地盤を作成し、土槽下部中央には管の破損を模した幅 5mm のスリット孔を設置した。スリット孔と中央バルブを通じて排土・排水が可能である。図-3 はアクリル土槽底面の平面図である。図のようにサイドバルブは底面の 2 枚のポーラスストーンに連結しており、サイドバルブからの給水は底面から一様に浸透する。一方中央のスリットからの給水は 5mm の幅の隙間から直接地盤内に浸透させている。給水時の水頭差は図-2 のように地盤面からの高さとする。

実験は、上部からの散水（降雨に相当）、底面のサイドバルブからの給水と排水（地下水の上下）、中央スリットからの給水と排土・排水（排水管内に水頭が発生し破損箇所からの地盤内への給水を模擬）、を組み合わせ様々なパターンで繰り返すという方法で行った。以下では、これらの給水方法をそれぞれ散水給水、底面給水（サイドバルブから給水）、スリット給水（スリット孔から給水）と呼ぶこととする。

実験は Case 1～Case 10 の全 10 ケースであり、用いた試料は 5 号珪砂と 6 号珪砂の均等混合砂（以降、珪砂と呼ぶ）と、粒径が 2mm 以下のまさ土である。これらの物理的性質を、表-1 に示した。模型地盤は珪砂のケースでは相対密度 50%、まさ土のケースでは間隙比 0.90 で作成した。実験中に土槽側面をビデオカメラで撮影することで空洞形成から陥没発生までの過程を記録した。

3. 細粒分を含まない珪砂を用いた模型地盤における陥没発生実験の結果

細粒分を含まない珪砂を用いた模型地盤において、地盤底部の中央スリットと給排水条件等を変化させた 4 つの陥没発生実験を行った。それぞれの試験条件と試験結果は以下のとおりであった。

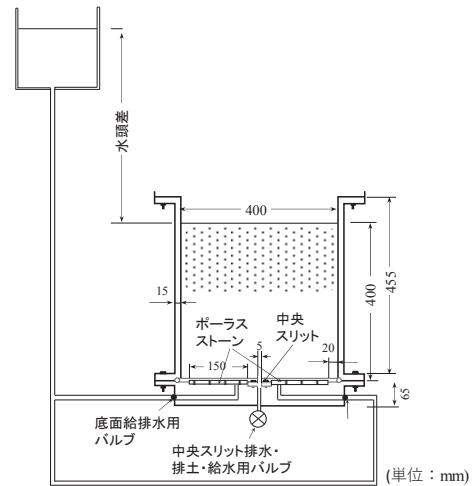


図-2 実験土槽概要図

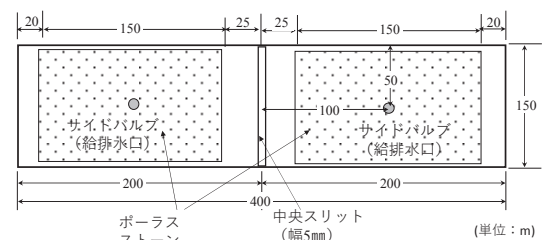


図-3 実験土槽底面の平面図

表-1 試料の物理的性質

試料	珪砂	まさ土
土粒子密度(g/cm ³)	2.654	2.646
最大間隙比 $e_{\max}$	0.943	1.375
最小間隙比 $e_{\min}$	0.608	0.859
平均粒径 D_{50} (mm)	0.37	1.02
細粒分含有率(%)	0	8.79
実験時の間隙比	0.775 ($D_r=50\%$)	0.90
用いた実験ケース	Case 1～4	Case 5～10

表-2 Case 1 の実験方法

	時間 (分:秒)	過 程	スリット
段階 1	00:00	散水給水開始	開放
	31:20	スリット閉鎖(地下水位の上昇を継続させるため)	閉
	45:20	地表面まで地下水位が到達し、散水給水停止	閉
	45:20	スリット開放し(排水・排土)、底面サイドバルブから排水。	開放
48 時間放置			
段階 2	00:00	サイドバルブから底面給水(水頭差 20cm)	閉
	06:25	底面給水停止	閉
	06:25	スリット開放(排水・排土)	開放
段階 3	16:25	サイドバルブから底面給水(水頭差 20cm)	閉
	22:50	底面給水停止	閉
	22:50	スリット開放(排水・排土)	開放

3.1 Case 1（スリット開放＋散水ノズルによる給水と底面給排水）

表-2 に実験方法、図-4 に実験結果を示す。まず段階 1

において散水ノズルから降雨強度 150mm/h で散水給水を 45 分間行い、第 2 段階および第 3 段階では 2 つのサイドバルブより水頭差 20cm で底面給水を行った。地盤底部のスリットを開放し、雨を模擬して散水ノズルにより給水した。その後底面のサイドバルブからの給水とスリットからの排水・排土により地下水を上下させた。

図-4 に実験中の土槽の状況を示すが、散水給水で形成される空洞は小さく(図-4(b))、その後底面給水により地下水位を上昇させると空洞は僅かに上方へ移動したが(図-4(c))、排水過程において空洞天井部が崩壊して空洞は消失した(図-4(d))。その後も給水を行ったが再び空洞が形成されることはなかった。

3.2 Case 2 (スリット開放+底面給排水)

地盤底部のスリットを開放し 2 つのサイドバルブから給水した(実験方法は表-3、実験結果は図-5)。これによって空洞が形成されたので、その後はスリットを閉じてサイドバルブの開閉により地盤内の地下水位の上昇と下降を繰り返した。実験開始直後からスリットからの排土・排水により大きく横に広い空洞が形成され(図-5(a))、拡大した(図-5(b))。スリットを閉じて、サイドバルブから給水と排水を繰り返すと、空洞の上部が空洞内に落ち込むことで上方へ移動したが、さらには空洞が複数に分割し、それぞれが徐々に薄くなった(図-5(c), (d))。最終的には、模型地盤中央の幅 20cm の範囲で地表面が約 2cm 沈下した。

3.3 Case 3 (底面給排水による水位上昇後中央スリット開放)

表-4 に実験方法、図-6 に実験結果を示す。中央スリットを閉じて底部から同時に給水して地表面高さまで水位を上昇させた後に、中央スリットを開放して排水・排土を行った。排土・排水開始後に土槽中央上部の領域

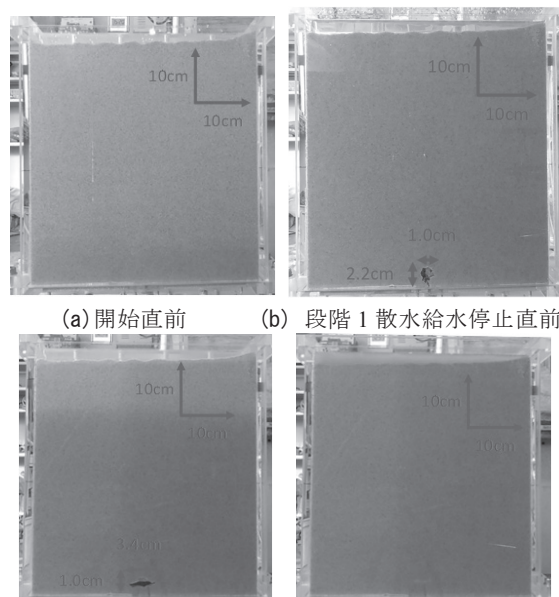


図-4 Case 1 の各過程における土層の状況

表-3 Case 2 の実験方法

	時間	過 程	スリット
段階 1	00:00	サイドバルブから底面給水開始(水頭差 20cm)	開
	10:20	中央スリット閉鎖	閉
	13:40	空洞が土層高さの半分程度になったところで底面給水停止	閉
	13:40	底面サイドバルブから排水。	閉
24 時間放置			
段階 2	00:00	サイドバルブから底面給水開始(水頭差 20cm)	閉
	12:40	底面給水停止	閉
	12:40	底面排水開始	閉
24 時間放置			
段階 3	00:00	サイドバルブから底面給水開始(水頭差 20cm)	閉
	10:45	底面給水停止	閉
	10:45	底面排水開始	閉

表-4 Case 3 の実験方法

	時間	過 程	スリット
段階 1	00:00	サイドバルブから底面給水開始(水頭差 20cm)	閉
	11:00	地下水位が地表面まで達したときに底面給水停止	閉
	12:00	中央スリット開放	開放
	22:00	中央スリット閉鎖	閉

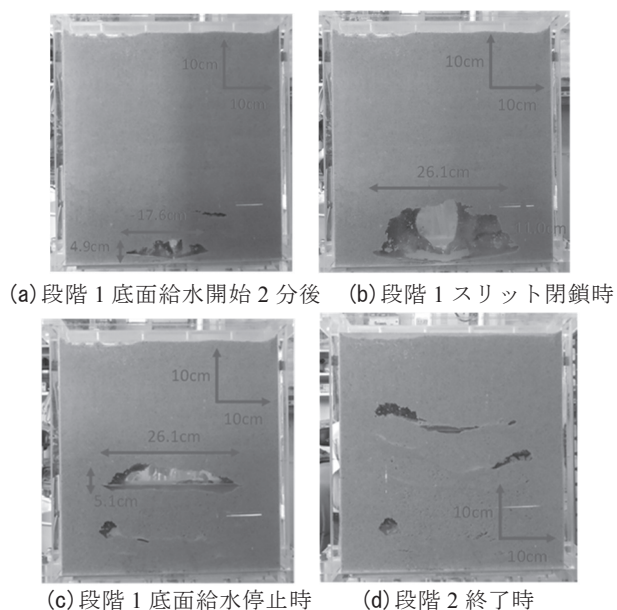


図-5 Case 2 の各過程における土層の状況

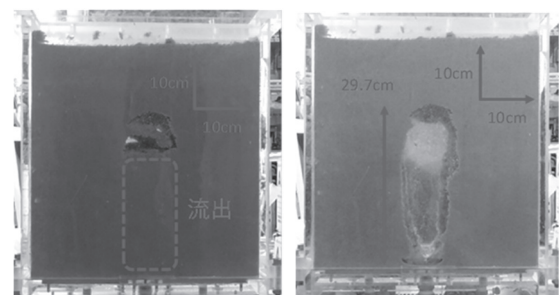


図-6 Case 3 の各過程における土層の状況

において空洞が形成された（図-6(a)）。その後は、空洞下部の土が水と共にスリット孔から流出し、最終的には図-6(b)に示すような縦長の空洞が形成された。

3.4 Case 4（中央スリットからの給水と給水停止後の排土・排水）

Case 4 では、豪雨などによって大量の水が地下埋設管に流入するなどして管内に水頭が発生し、破損箇所から地盤内に給水が起こる場合を想定し、土槽下部中央のスリット孔より給水を行った。表-5 に実験方法を示す。スリットからの給水と給水停止後の排土・排水を行う段階1で空洞が形成されたので、段階2ではスリットの給水とサイドバルブからの排水、段階3ではサイドバルブからの給水と排水を行って、空洞の動きを観察した。

図-7 は各過程における土槽の状況であるが、段階1の中央スリットからの給水とその後の排土・排水により高さ 8.9cm、幅 6.0cm の空洞が形成された（図-7(a)）。段階2でスリット孔より給水を行うと、空洞の上部の土が緩んで空洞に陥没することで空洞が上方に移動し、形状は横長に変化した（図-7(b)）。スリット給水を停止しスリットを閉じたままサイドバルブのみを開放し底面排水を行うとさらに空洞は上方に移動し（図-7(c)）、段階3の底面給水においても上方への移動が見られた（図-7(d)）。

3.5 珪砂を用いた実験のまとめ

珪砂を用いた模型実験は Case 1 から Case 4 の全 4 ケース行い、全てのケースで空洞の形成を確認することができた。各ケースの結果は、以下のようにまとめられる。

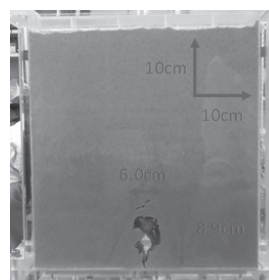
- (1) 中央スリットを開けて雨水を想定した散水給水を行った Case 1 では、形成される空洞が非常に小さく、地下水位を上昇させた場合に空洞は僅かに上方へ移動したが、排水過程において空洞は消失しその後も給水を行ったが再び空洞が形成されることはなかった。
- (2) 地下水上昇を想定した底面給水を行った Case 2 と Case3 では、Case1 と比べ、スリット上部に空洞が形成された。空洞形成後にサイドバルブやスリットからの給水と排水を繰り返すことで、空洞の上部が緩んで落下することによる空洞の上部への移動が観察され、Case3 では地表面が 2cm 陥没した。
- (3) スリットからの給水と底面給水を行った Case4 でもスリット上部に空洞が形成され、給水と排土・排水を繰り返すことで空洞は地表面近くまで移動した。

4. 細粒分を含むまき土を用いた模型地盤における陥没発生実験の結果

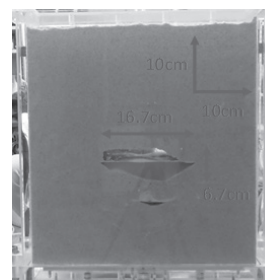
細粒分を 8.79%含むまき土を用いた模型地盤を用いて 6 つの陥没発生実験を行った。結果は以下のものであった。珪砂を用いた Case 1-4 との対応関係では Case5 は散

表-5 Case 4 の給排水方法と過程

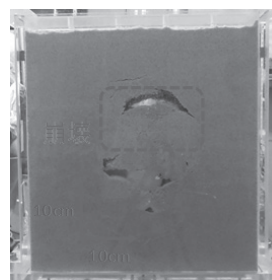
	時間	過 程	スリット
段階 1	00:00	スリット給水(水頭差 20cm)	開
	30:00	スリット給水停止	閉
	31:15	スリット開放	開
	39:00	スリット閉鎖	閉
段階 2	39:00	スリット給水(水頭差 20cm)	開
	45:15	スリット給水停止	閉
	45:35	サイドバルブから底面排水開始	閉
48 時間放置（以降、底面の給排水）			
段階 3	00:00	スリット閉鎖し底面給水開始(水頭差 20cm)	閉
	17:00	底面給水停止	閉
	19:00	底面排水開始	閉



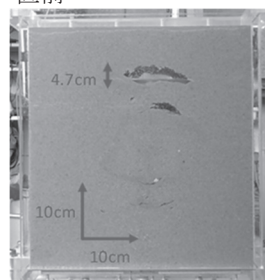
(a) 段階 1 終了時



(b) 段階 2 スリット給水停止直前



(c) 段階 2 底面排水開始 4 分

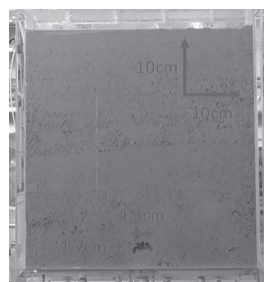


(d) 段階 3 底面給水停止直前

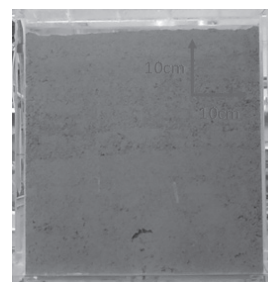
図-7 Case 4 の各過程における土槽の状況

表-6 Case 5 の給排水方法と過程

	時間	過 程	スリット
段階 1	0:00:00	散水給水開始	開放
	0:30:00	散水給水停止	閉
段階 2	0:37:00	散水給水開始	開放
	0:47:00	散水給水停止	閉
段階 3	0:59:00	散水給水開始	開放
	1:07:00	散水給水停止	閉



(a) 段階 1 終了時



(b) 段階 3 終了時

図-8 Case 5 の各過程における土槽の状況

水給水を行った Case1 に、Case 6-7 は底面給水後にスリットからの排水・排土を行った Case 3 に、Case 8-10 はスリットから水頭を与えて給水した後排水・排土を行った Case4 に対応している。ただし、まさ土の地盤では珪砂に比べて空洞の発生や拡大が明瞭に見られなかったため、底面からの給水・排水あるいはスリットからの給水と排水・排土を繰返し行って空洞形成との関係を調べた。

4.1 Case 5（スリット開放+散水ノズルによる給水）

表-6 に実験方法、図-8 に実験結果を示す。まず実験スリットを開放した状態での散水ノズルによる地表面からの給水を 3 回に分けて行った。各回において給水は地下水位面が地表面に達した段階で終了させた。給水終了後はしばらく時間を空け排水によって地下水位を下げ、次段階へ移行した。段階 1 終了時に小さな空洞の形成は確認されたが(図-8(a))、散水と排水・排土を繰り返すことによる空洞の拡大や移動はほとんど見られなかった(図-8(b))。

4.2 Case 6 と Case7（スリットを閉じて底面給水。その後排水・排水を繰返し）

Case 6 ではスリットを閉じてサイドバルブから底面給水を行い(水頭差 20cm)、その後スリットを開けて排水・排水する過程を 3 回繰返した。表-7 に実験方法、図-9 に実験結果を示す。Case 7 は Case 6 と同じ条件であるが、底面からの給水とその後の排水・排水を 12 回繰返した。

段階 1 では図-9(a)に示すように給水時、排水・排水時ともに空洞の形成は見られなかった。図-9(b) は段階 3 の状況であるが、スリットの真上に非常に小さな空洞が見られたものの空洞の拡大や移動は確認されなかった。Case 7 は Case 6 と同条件で給排水を 12 回繰返したが、一時的に小さな空洞が形成されてもその拡大や移動は全く見られなかった。

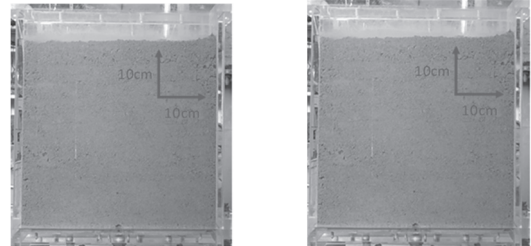
4.3 Case 8, 9, 10（スリット給水とその後のスリットからの排水・排水）

Case 8 では地盤面からの水頭差 2m で中央スリットから給水し、地盤内水位が地表面に達したときに給水を停止して、その後スリットから排水・排水を行い、この過程を 3 回繰返した。表-8 に実験方法を示す。Case 9 は Case 8 と同じ実験条件であるが、水頭差を 1m とし、給水と排水・排水を 8 回繰返した(表-8 の手順で段階 8 まで)。Case 10 は Case 9 と同じ条件で 8 回繰返したを行った後に貫入抵抗値の測定を行った。

Case 9 における段階 1 から 4 までの実験の状況を図-10(a)～(d)に、段階 5 から 8 までを図-11(a)～(d)に示す。図-10(a)に示すよう段階 2 のスリットからの排水・排水過程において上部に非常に小さな空洞が形成された。その後は図-10(b)～図-10(d)からわかるように段階

表-7 Case 6 の給排水方法と過程

	時間	過 程	スリット
段階 1	00:00	底面給水(水頭差 20cm)	閉
	11:20	底面給水停止	閉
	12:00	スリット開放	開放
	23:20	スリット閉鎖	閉
段階 2	23:20	底面給水(水頭差 20cm)	閉
	29:20	底面給水停止	閉
	29:20	スリット開放	開放
	39:20	スリット閉鎖	閉
段階 3	39:20	底面給水(水頭差 20cm)	閉
	45:20	底面給水停止	閉
	45:20	スリット開放	開放

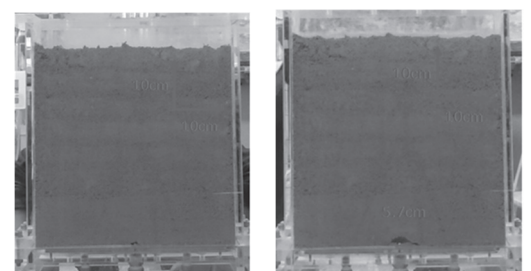


(a) 段階 1 スリット閉鎖直後 (b) 段階 3 終了時

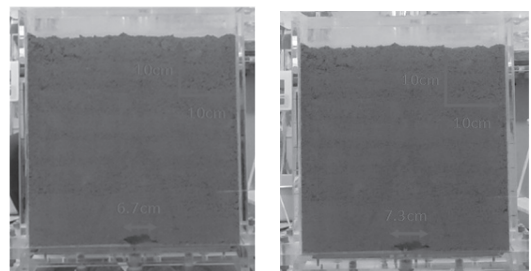
図-9 Case 6 の各過程における土層の状況

表-8 Case 8 の給排水方法と過程

	時間	過 程	スリット
段階 1	00:00	スリット給水(水頭差 2m)	給水
	18:00	スリット給水停止	給水停止
	19:00	スリット開放	開放
	29:00	スリット閉鎖	閉
段階 2	30:00	スリット給水(水頭差 2m)	給水
	33:00	スリット給水停止	給水停止
	34:00	スリット開放	開放
	44:00	スリット閉鎖	閉
段階 3	45:00	スリット給水(水頭差 2m)	給水
	46:00	スリット給水停止	給水停止
	47:00	スリット開放	開放



(a) 段階 2 スリット閉鎖直後 (b) 段階 3 スリット閉鎖直後

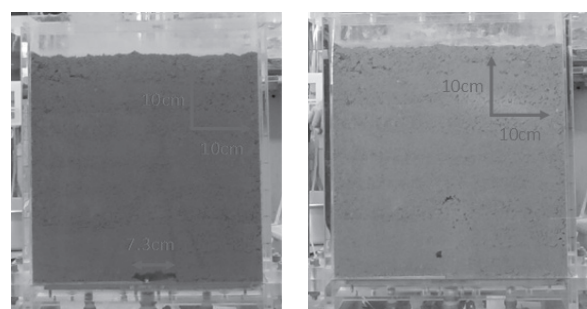


(c) 段階 4 スリット閉鎖直後 (d) 段階 5 スリット開放 7 分後

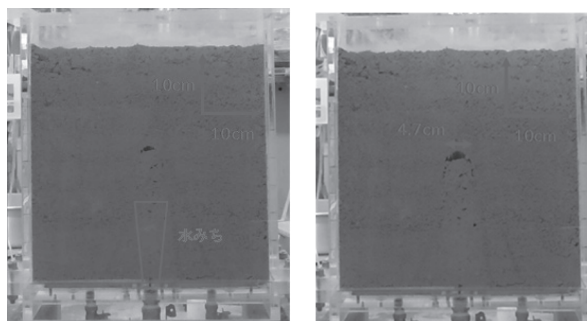
図-10 Case 9 の実験時の状況（段階 5 まで）

を重ねるごとに空洞は主に横方向に大きく拡大した。空洞の拡大は排土・排水過程において生じており、給水過程では空洞の拡大はほとんど見られなかった。第6段階では排水過程において図-11(a)に示すように空洞が変形した。第7段階では排土・排水過程において一時的に空洞が消滅し、排土・排水終了時に図-11(b)に示すように模型地盤の鉛直方向中央線上に小さな空洞が複数見られる状態となった。第8段階の給水時には図-11(c)中も赤線で囲まれたエリアにおいて周辺と比較して明らかに水が急速に地盤内を浸透する領域を確認した。この領域内では土粒子が吹き上げる現象も見られたので、パイピング現象により地盤のかみ合わせが緩み、部分的に水が浸透しやすい状態になったと考えられる。この領域をここでは「水みち領域」と呼ぶことにする。この領域は第7段階の排水終了時に複数の小空洞が見られた範囲(図-11(b))と一致している。第8段階の排土・排水過程では図-11(d)のように給水時に水みちが見られた領域の上部に空洞が形成された。

水みち領域の上部での空洞形成は Case 8 でも観察された。図-12(a)は Case 8 の段階3 スリット給水時に観察した水みち領域であるが、その後のスリット開放時にこの領域の上部に空洞が形成された(図-12(b))。図-13(a)と図-13(b)は Case 10 で観察された水みち領域と段階6での空洞発生状況である。Case 10 では段階2のときに径4.9cmの空洞が観察されたがその後は図-13(b)のように側面から空洞が観察できなかった。そこで Case 10 の試験終了後に土層強度検査棒⁹⁾を用いて土槽内の貫入試験を行った。土層強度検査棒はコーン付きのロッドを人力で静的に押込み貫入抵抗値を測定するものである。土槽の左端から4cm, 8cm, 12cm, 16cm, 20cm, 24cm, 28cm, 32cm, 36cmの9か所で深さ5cmずつ貫入抵抗を測定した。図-14に各貫入位置での貫入抵抗値と深度の関係を示すが、水みち領域(図中の土槽左端から20cm)では地表面から10cmの深度で貫入抵抗値がほぼ0となっており、この付近が空洞となっていた可能性が高い。このようにスリット給水を行った Case 8,9,10 では、いずれもスリットの直上の水みち領域の上部に空洞が形成された。水みち領域では小空洞が観察されるなど、地盤が緩んで

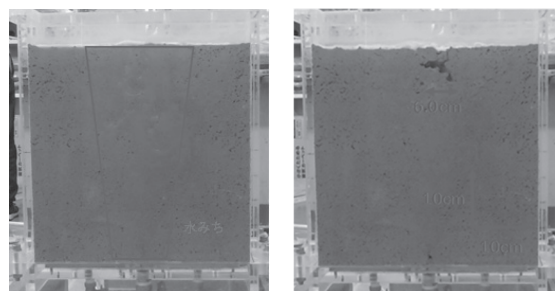


(a) 段階6 スリット閉鎖直後 (b) 段階7 スリット閉鎖直後



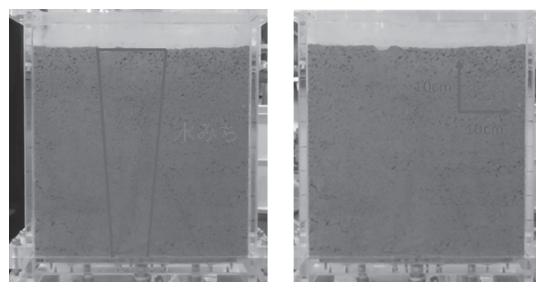
(c) 段階8 スリット給水 (d) 段階8 スリット開放7分後終了直後

図-11 Case 9の実験時の状況(段階6から段階8)



(a) 段階3 スリット給水時に (b) 段階3 スリット開放時観察した水みち領域

図-12 Case 8の実験時の状況(段階6から段階8)



(a) 段階6 スリット給水停止直前 (b) 段階6 スリット開放30分後

図-13 Case 10の実験時の状況

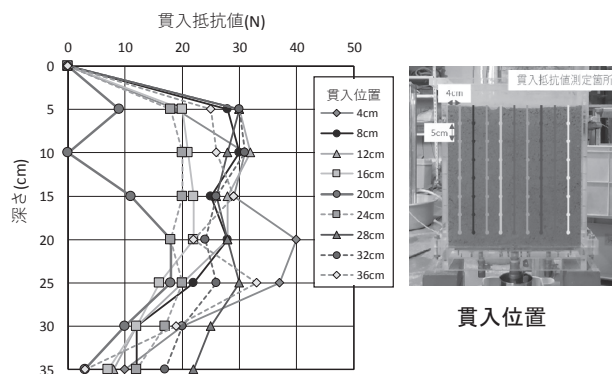


図-14 実験終了後に土層検査棒で測定した貫入抵抗と深度の関係 (Case 10)

おり、これらの領域が自重で圧縮することで、上部に空洞が形成されたと考えられる。

4.4 まさ土を用いた実験のまとめ

まさ土を用いた実験結果をまとめると、以下のようになる。

(I) 降雨による地盤表面から水を浸透させることを模擬

した散水給水実験（Case 5）では空洞の形成は確認されたものの空洞の拡大や移動はほとんど見られなかった。

- (2) 地盤内の地下水位の上下を模擬した底面給水を行った Case 6 と Case 7 でも、地盤内に小さな空洞の発生が確認されたものの、その後地盤内の水位を上下させても、空洞が発達しその位置が地表面方向に移動する現象は見られなかった。
- (3) 埋設管内に水頭が発生し、破損箇所から地盤内に給水される条件（スリット給水）では、スリットの直上に明らかに水が急速に地盤内を浸透する領域（水みち領域）を確認した。この領域の上に空洞が発生するが、これは緩んでいる水みち領域の地盤が自重で圧縮するためと考えられる。

5. まさ土による盛土地盤における空洞・陥没発生メカニズムに関する考察

今回の実験では細粒分を含まない珪砂の地盤と細粒分を含むまさ土地盤で、埋設管の亀裂に相当するスリットから土を排出された場合の空洞発生状況に大きな差がみられた。まさ土地盤では地下水位の上下では空隙の発達や上方への移動は起きなかった。東田らは細粒分が 5, 10, 15, 20% である地盤において模型地盤を用いた空洞形成実験を行い、細粒分を多く含む地盤では非常に小さい空洞の形成は確認されるものの、空洞やゆるみ領域の形成・拡大は生じ難いと報告している^{7,8)}。今回の結果はこれらとほぼ一致しており、まさ土地盤では、降雨の浸透や地下水位の上下の繰り返しだけでは地盤内埋設管の上部に亀裂が発生しても空洞の形成と発達には至りにくいのではないかと考えられるが、今回は限られた条件での実験であるので今後さらに検討が必要である。

一方、埋設管に水頭が発生し破損部から上部の地盤に給水する場合を想定し、中央のスリットから給水し、給水終了後にスリットから排土・排水させることを繰り返した Case 8～Case 10 では、スリット上部に空洞が形成された。その後の再給水によって空洞は一時的に消滅するが、給水と排土・排水を繰り返すと空洞が再び現れた。さらに、後半の給水過程では中央スリットの鉛直線上に水みち領域を確認した。水みち領域は給水時にこの領域を中心に給水が行われる領域であり、水の流れによって土粒子が動いている様子が明瞭に観察できた。したがって水みち領域では地盤は、自重による有効応力と上向きの浸透応力の和がゼロに近くなるパイピング現象に類似した状態となっており、土粒子のかみ合わせが外れて地盤が緩むため、落下してスリットを通じて排土されやすい領域となっている。

以上の結果から、今回のまさ土地盤における空洞発生のプロセスを考察すると図-15 のようになる。

プロセス 1：地盤に埋設された排水管に豪雨等により大

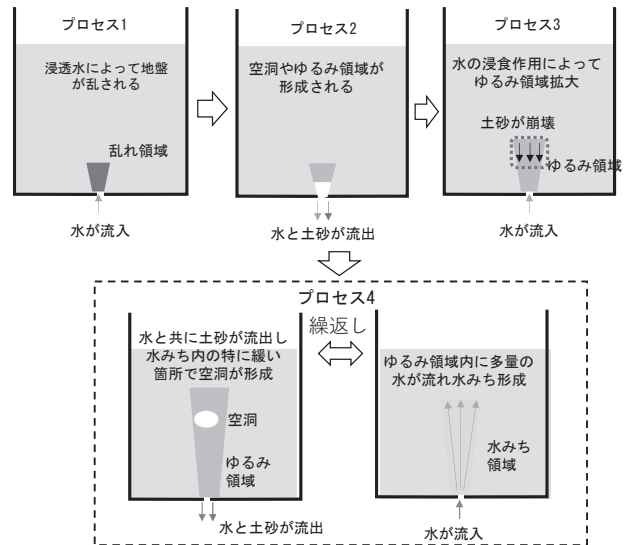


図-15 まさ土地盤における空洞形成プロセス

量の水が供給されて管内水圧が上昇すると、管の破損箇所から高い浸透圧で地盤内に流出した水によって破損箇所の上部の地盤が乱される。

プロセス 2：埋設管内の圧力が低下すると、破損部からその周辺の乱れが生じた不安定な領域の土砂が管内に流入し、破損箇所の上部に空洞およびその周囲の密度のゆるみ領域が形成される。

プロセス 3：再び豪雨等で管内の水圧が高まると、透水係数が大きい緩み領域に水が急速に流入する（水みち領域となる）。透水力によるパイピング現象でゆるみ領域の地盤が崩壊して空洞が埋まり一段と緩い地盤が形成されるとともに、上部に新たな空洞が形成される。

プロセス 4：水みち領域が形成されても、排水管内に圧力が発生しない場合は地盤中に水みち領域と空洞がある状態で落ち着いている。しかし、再び大雨等により排水管内の水圧が高まると水みち領域を通じて水が浸透し、プロセス 3 の現象が再び起こって空洞の位置がさらに上部に移動する。以上を繰り返すことにより、空洞が地表面近くに到達すると陥没が発生する。

次に以上の考え方を図-1 に示す高盛土の住宅地における問題に適用して説明したのが図-16 である。造成地が高低差のある地形に造成された場合、標高が高い箇所と繋がっている排水管に大雨によって排水能力を越えて雨水や地下水が浸透すると、一時的に管内に高い水圧が発生すると考えられる。本研究の実験において実施した中央スリットからの給水はこのような状況に相当する。このときに埋設排水管の破損部から上方向に水みち領域（緩み領域）が形成されると、その後大雨等のイベントによって埋設管内に水圧が発生するごとに水みちを通じた給水と排水・排土が間欠的に発生し、空洞の位置が徐々に上部に移動して、最終的に地表面の陥没に至るというメカニズムが考えられる。

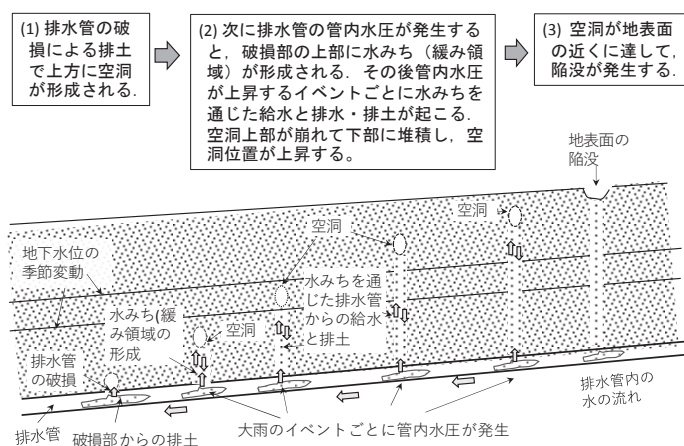


図-16 盛土で造成した地盤において考えられる空洞の発生メカニズム

6. まとめ

本研究では細粒分を含むまき土地盤における地盤内空洞の形成メカニズムを解明することを目的とし模型実験による検討を行った。その結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 細粒分を含まない珪砂の地盤では、地盤底部に埋設管破損部を模擬したスリットを開けて雨水を想定した散水給水を行うと形成される空洞は小さく、その後の地下水位の変化により消失した。
- (2) 地盤内の地下水を上下させてスリットを開くとスリット上部に空洞が形成され、空洞の上部が緩んで落下することによる空洞の上部への移動が観察された。スリットからの給水と底面給水を行った場合はその後のスリットからの排水・排土によりスリット上部に空洞が形成され、給水と排土・排水の繰り返しにより空洞は地表面近くまで移動した。
- (3) 細粒分を含むまき土地盤の場合は、散水給水でスリットを開けても空洞は形成されず、地盤内水位の変動だけでは空洞の拡大や空洞位置の地表面への移動は起こらなかった。
- (4) 水頭差を与えたスリットからの給水とその後の排土・排水を繰り返した場合、まき土地盤においても大きな空洞が形成され地表面方向に移動した。このときにスリットの上部の地盤に水みち領域が形成され、水の浸透により水みち領域の上部で陥没が発生して空洞が形成された。さらに、スリットからの給水があるごとに空洞上部が崩壊して水みち領域内に落ち込むため、空洞の位置が上部に移動した。
- (5) 以上の結果より、まき土地盤の深部で埋設管の破損により空洞が発生し地表面方向に移動する原因として、大雨等のイベントにより埋設管内に水圧が発生し破損部から上方に形成された水みち領域を通じて地盤内に水が浸透する現象が間欠的に発生し、空洞を発生・移動させたことが考えられる。

参考文献

- 1) 桑野玲子:地盤の陥没-陥没のメカニズム-, 地盤工学会誌, pp.43-44, 2014.
- 2) 東田淳, 村木義則, 金子佳央: 損傷した老朽下水道管周囲の空洞実態調査について, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1753-1754, 2003.
- 3) 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊: 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 2, pp.349-361, 2010.
- 4) 草修, 菅野敏夫, 吉田与一: 平成21年仙台市泉区高森地区道路等陥没事故報告, 土と基礎, Vol.58, No.8, pp.44-46, 2010.
- 5) 佐藤真理, 堂領翔吾, 宇野嘉伯, 伊藤亮太: 埋戻し土を用いた模型実験による地中空洞挙動の考察, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1647-1648, 2018.
- 6) Sato, M., Kuwano, R.: Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion, Soils and Foundations, Vol. 55, No. 4, pp.829-840, 2015.
- 7) 東田淳, 松林誠, 大杉朗隆, 岡島洋一: 損傷した老朽下水道管周囲の空洞形成シミュレーション実験, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1755-1756, 2003.
- 8) 東田淳, 郭義偉, 二ノ形一哉, 岡島洋一: 中型土槽による損傷下水道管周囲の空洞発生シミュレーション実験, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1735-1736, 2004.
- 9) 独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ地質チーム: 土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案), 土木研究所資料第4176号, <http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D6641.pdf>, (参照 2019.9.27)

(2019年6月18日 受付)