

◆ 報 文 ◆

遠心载荷模型実験による地すべり抑止杭の設置間隔の検討

石井靖雄* 藤澤和範** 田中 尚***

1. はじめに

地すべり抑止杭工の杭間隔は、地すべり層厚毎に定められた標準杭間隔、もしくは最大でも杭径の8倍以内として設定される¹⁾。これは、杭間で土塊が中抜けを起さず杭に所定のすべり力を作用させるための間隔として、これまでの経験や実験から得られたものである。

杭間での地すべり土塊の中抜け現象に関する実験は大型一面せん断装置を用いた実験²⁾や地盤材料にアルミ棒を用いた室内模型実験³⁾などが実施されてきている。しかしながら、これらの実験は1G場(G:重力加速度)における縮小模型であるため、杭や地すべり土塊の応力状態が実際の地すべり地とは異なることが課題として挙げられる。

そこで、合理的な杭間隔の設定手法を検討するため、杭や地すべり土塊の応力状態をより現実に近い状態に再現できる遠心载荷模型実験を行った。本報告では、杭間隔と地すべり土塊の物性値を変化させて遠心载荷模型実験を行い、それぞれの違いが杭周辺地盤の破壊に及ぼす影響を調べた結果について報告する。

2. 実験概要

実験は、幅1,000mm×深さ700mm×奥行400mmの土槽内に、図-1、写真-1に示す通り、地すべり土塊、すべり面、基盤、杭からなる模型を製作して行った。模型は、杭周辺地盤の破壊が発生し易いように杭谷側には土塊を設けない構造とした。模型を遠心载荷装置によって63G場におき、杭谷側に設置した移動壁をモーターにより谷側に引くことで自重により地すべり土塊が滑動するようにした。実験は、杭間隔と地すべり土塊の物性値を変化させて行った。

2.1 杭模型

杭模型の杭径は実現場での施工実績を考慮して実物換算(1G場)で外径φ500mmとなるよう、63G場でφ7.95mmの鋼棒を用いた。2本の杭模型には図-1に示すように歪ゲージを取付け、杭に発生する歪を計測した。歪ゲージは、すべり面から7.9mm(EM5)、15.9mm(EM4)、31.8mm

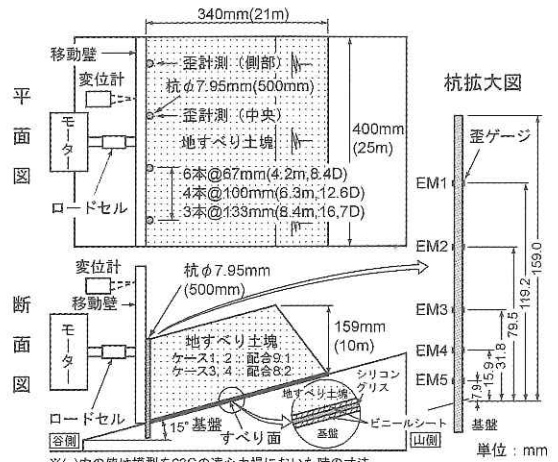


図-1 実験模型の寸法と杭配置

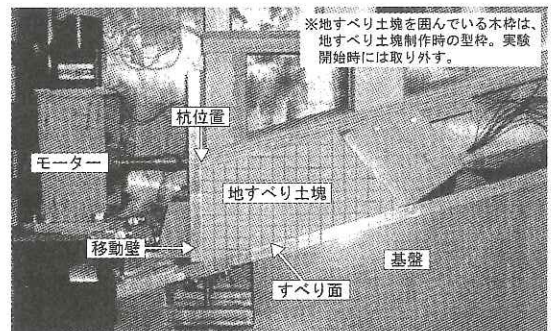


写真-1 実験模型の主要構成

(EM3)、79.5mm (EM2)、119.2mm (EM1) の5深度において、地すべり滑動方向の山側、谷側に設置した。杭模型はアルミ合金製の基盤に予め穴を開けておき、底面から治具を用いて固定した。

2.2 地すべり土塊

地すべり土塊の層厚は、実物換算値(1G場)で10mとなるよう、63G場で159mmとした。長さは地すべり土塊の滑動力によって杭模型が降伏しないよう340mmとした。地すべり土塊は、豊浦標準砂とカオリン粘土を乾燥重量比で9:1と8:2で混合した2種類の材料を使用した(以下、配合9:1、配合8:2という)。これは、杭周辺地盤の破壊は杭間隔だけでなく、地すべり土塊の物性値によっても変化することが予想されるため

Study of Pile Interval for Landslide on Centrifuge Modeling Test

ある。

地すべり土塊は、突固めによる土の締固め試験 (A-c) ⁴⁾ によって求められた最大乾燥密度となる最適含水比状態で、締固め仕事量 ⁵⁾ 1.0Ec で締固めて製作した。地すべり土塊の製作に用いた材料の土質試験結果を表-1に示す。配合9:1と配合8:2の物性値を比較すると、後者のほうが湿潤密度が大きい。また、一面せん断試験の結果では、内部摩擦角は同程度であるが、後者のほうが粘着力が大きい。

2.3 すべり面

すべり面はその勾配を15°とした基盤と地すべり土塊の接触面にシリコングリスを塗布したビニールシートを設置して製作した。また、地すべり土塊と土槽が接する側面もシリコングリスを塗布したビニールシートを設置して摩擦を軽減した。

2.4 実験ケース

実験は、杭間隔、地すべり土塊の配合を表-2に示すように変化させた4ケースを行った。杭間隔は、既往設計手法の最大でも杭径の8倍以内ということを考慮して67mm (杭径の8.4倍、以下8.4Dという) を最小間隔とし、100mm (杭径の12.6倍、以下12.6Dという) および133mm (杭径の16.7倍、以下16.7Dという) とした。

2.5 実験手順

実験は、遠心載荷装置により63Gの遠心力を与えながら地すべり土塊を支えている移動壁を谷側に変位速度約1.25mm/minで累積変位約30mmまで移動させた。地すべり土塊は移動壁を谷側に移動させることで自重により滑動する。そして、地すべり土塊の滑動に伴って杭が変形し、杭周辺の地すべり土塊が破壊する。実験中は、これらの状況を5分間隔でカメラ撮影した。また、移動壁に作用する荷重 (ロードセル)、移動壁の移動量 (変位計)、杭の歪 (歪ゲージ)、地盤内の土圧 (土圧計、本報告では結果については省略する) を計測した。実験は、ロードセル、歪計、土圧計の計測値がそれぞれほぼ一定になったことを確認し、移動壁の移動開始から約2,100~2,600秒後に終了した。

3. 実験結果

3.1 実験結果の概要

図-2にケース1 (配合9:1, 8.4D) およびケース2 (配合9:1, 12.6D) の実験中の移動壁に作用

表-1 地すべり土塊材料の土質試験結果

試験項目	材料名	配合9:1*	配合8:2*
湿潤密度	ρ_t (g/cm ³)	1.926	2.100
含水比	W (%)	11.5	11.7
粒 度	礫分 (%)	0	0
	砂分 (%)	89.7	79.7
	シルト分 (%)	2.8	4.4
	粘土分 (%)	7.5	15.9
	細粒分含有率 Fc (%)	10.3	20.3
	最大粒径 (mm)	0.425	0.425
締固め	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.727	1.880
	最適含水比 W_{opt} (%)	11.5	11.7
強度特性	試験条件	圧密定圧	圧密定圧
(一面せん断試験)	粘着力 C_{cd} kN/m ²	10.1	28.1
	内部摩擦角 ϕ_{cd} kN/m ²	45.8	45.5

*地すべり土塊、豊浦標準砂とカオリン粘土の乾燥重量比

表-2 実験ケース

ケース名	杭間隔			地すべり土塊配合*
	杭本数 (本)	杭間隔 (mm)	杭径に対する杭間隔	
ケース1	6	67	8.4D	9:1
ケース2	4	100	12.6D	9:1
ケース3	4	100	12.6D	8:2
ケース4	3	133	16.7D	8:2

*地すべり土塊、豊浦標準砂とカオリン粘土の乾燥重量比

する荷重と杭の歪 (図-1に示す中央の歪計測) の計測結果を示す。それぞれ、杭の歪がほぼ一定となった時刻が最も遅いケース3の1,600秒 (表-3) までを表示した。また、表-3に実験の時刻歴、杭間の地すべり土塊の破壊形状、杭の計測結果についてまとめる。

図-2a) に示すケース1では、移動壁に作用する荷重はモーターを動作させて移動壁を移動させると2.9kNから急減し、130秒後に-0.2kNとなりほぼ一定値となった。この時に移動壁と地すべり土塊は離れたと推定され、移動壁の移動量は変位計の計測から約2.3mmであった。なお、移動壁の移動速度から求める130秒後の移動量 (=2.7mm) と実測値が異なるが、これは移動壁の移動が定速状態に移行するまでの間の加速が影響しているためである。

杭の歪は、移動壁を移動させると急増し、140秒後にほぼ一定の値となった。歪の最大値は、すべり面に最も近いEM5で記録され、1,107 μ であった。杭上部に設置したEM1とEM2は、移動壁を移動させた直後に負の歪が累積し、40~50秒後に負のピークを迎えた後に正の値が累積する結果

となった。この傾向は他のケース2、3、4でも認められた。この原因として次のことが考えられる。移動壁を移動させた初期段階において、杭上部は地すべり土塊の滑動によって移動壁に押さえつけられているが、杭下部は基盤に固定されているために移動壁からすぐに分離する。その後、移動壁の移動が進むにつれて、移動壁と杭の離れる地点は杭上方へ移動し、最後に地表面付近が離れたと考えられる。実験の初期段階においては杭上部は移動壁に支えられている形となり、杭を山側を押すような力が働いて図-2a)に示すEM1とEM2のような負の歪値（山側への曲げ）が計測されたと考えられる。

図-2b)に示すケース2は、ケース1に比べて杭に発生した歪は大きい、杭の歪の発生パターンおよび移動壁に作用する荷重値は類似している。

全ケースの実験後の杭周辺地盤の破壊状況を図-3に示す。図-3には、地すべり土塊を上方から撮影した天端の状況写真とそのスケッチ、および地すべり土塊の断面を切出して破壊状況を撮影した写真とそのスケッチを示している。

配合9：1のケース1、2では、天端の写真から分かるように地すべり土塊の崩落が発生した。杭間隔8.4Dのケース1では杭間にアーチ状の崩落が発生した。一方、杭間隔12.6Dのケース2では杭間を越える規模の崩落となった。配合8：2のケース3、4では、両ケースとも天端にアーチ状～杭配列に平行な亀裂の発生が認められたものの天端では地すべり土塊の崩落は発生しなかった。しかし、

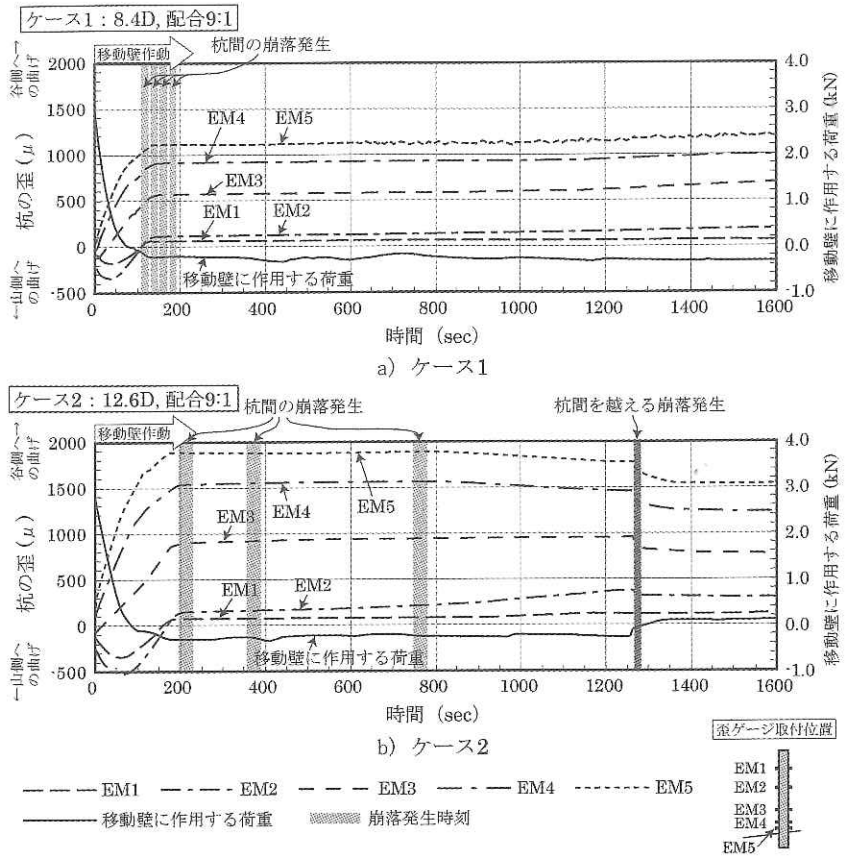


図-2 杭に発生した歪と移動壁に作用する荷重

表-3 遠心荷重模型実験の結果一覧（時刻歴、破壊形状、杭計測）

実験ケース		実験時刻歴			杭間破壊部の形状		杭計測		
ケース名	杭径に 対する 杭間隔	実験 時間 (sec)	杭の歪がほ ぼ一定となっ た時刻(sec)	杭間崩壊 発生時刻 (mm)	杭間破壊部 の最大長さ L _{max} (mm)	L _{max} の杭 間隔に対 する比	杭頭*3 変位量 (cm)	杭の最大曲*3 げモーメント (kN・m)	
ケース1	8.4D	9：1	2,114	140	110～180	22	0.33	9.7	2,717
ケース2	12.6D	9：1	2,260	180	200～800*4	65	0.65	14.9	4,600
ケース3	12.6D	8：2	2,622	1,600	判定不能	40*2	0.40	37.3	9,041
ケース4	16.7D	8：2	2,137	1,200	判定不能	55*2	0.41	48.9	12,024

*1 地すべり土塊、豊浦標準砂とカオリン粘土の乾燥重量比

*2 亀裂発生位置までの最大長さ

*3 63G場における実物換算値

*4 その後、1270秒で杭間を越える崩落が発生

断面で崩落の形状を確認すると、地すべり土塊の天端部分を残し杭の根元付近で地盤の崩落が認められた。

地すべり土塊の杭間の破壊形状についてまとめた表-3に、各ケースの杭間破壊部の最大長さ(L_{max}、杭から山側破壊部までの滑動方向の長さ、亀裂が発生している場合は亀裂までの長さ)とその杭間隔に対する比を調べた結果を示している。杭間破壊部の最大長さ(L_{max})は、ケース1では

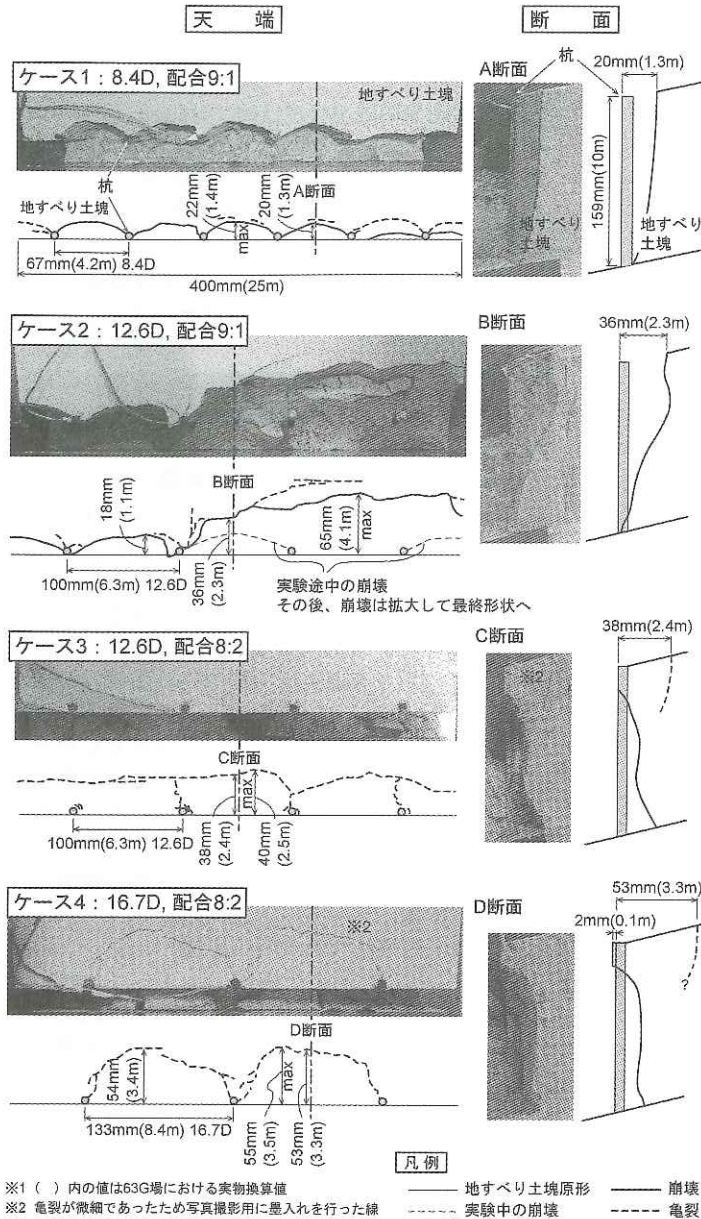


図-3 実験後の地すべり土塊の破壊状況

22mmとなったが、ケース2では65mmと約3倍の違いがあった。ケース3と4の亀裂の発生位置の最大長さ (L_{max}) は、それぞれ40mm、55mmと両者で異なっているが、杭間隔に対する比をとると両者は約0.4とほぼ同じ値となっている。ケース1と2について同様に比較すると、ケース1が0.33であるのに対してケース2では0.65となり、約2倍の違いがある。ケース1、3、4では杭間破壊部の最大長さ (L_{max}) の杭間隔に対する比が0.3~0.4程度であったのに対し、ケース2で0.65と大きく

なったのは、前者が杭間内での崩落または亀裂の発生であるのに対し、後者では杭間を越える規模で崩落が発生して山側まで進行したためである。

以上のように、杭間隔や地すべり土塊の物性値が異なることで、杭周辺地盤の破壊状態や範囲が異なると言える。次節では、このことについて、杭のたわみ量、曲げモーメント、時間の経過に伴う破壊状況の変化を調べた結果とあわせて詳細に述べる。

3.2 杭間隔が杭周辺地盤の破壊に及ぼす影響

表-2に示した同じ地すべり土塊の材料配合で杭間隔を変えたケース1と2およびケース3と4について、実験結果を比較して杭間隔が杭周辺地盤の破壊に及ぼす影響について以下に述べる。

実験により得られた各ケースの杭のたわみ量と曲げモーメントを図-4、5に示す。各グラフは、表-3に示す杭の歪がほぼ一定値となった時刻における計測データを用い、63G場による実物換算値として表示している。長さなどについても以下本文では実物換算値で記述する。なお、ケース3と4の杭歪がほぼ一定となった時刻が1,000秒を越えているが、これは前述した地すべり土塊の破壊状況が異なるために滑動力の杭への作用の仕方も異なったためと考えられる。

3.2.1 配合9:1における杭間隔の影響

図-4a) および表-3に示す通り、杭頭変位 (計測深度GL = 0m) は、8.4Dのケース1では63G場実物換算で9.7cm、12.6Dのケース2では14.9cmとなり、杭間隔の広いケース2のほうが杭頭変位が大きい結果となった。図-4a) に示す杭のたわみ形状からみて、両ケースとも片持ち梁がたわむ時のように杭頭ほどたわみ量が大きくなる抑え杭の挙動を示している。図-4b) に示す杭の曲げモーメントは、両ケースともすべり面に最も近いEM5で最大値となり、ケース1では2,717kN・m、ケース2では4,600kN・mとなり、杭のたわみ量と同様にケース2のほうが大きな曲げモーメントとなった (表-3)。

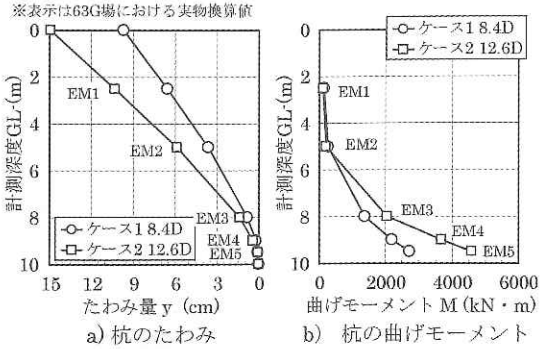


図-4 杭間隔の違いによる杭のたわみ量、曲げモーメントの比較 (配合9:1)

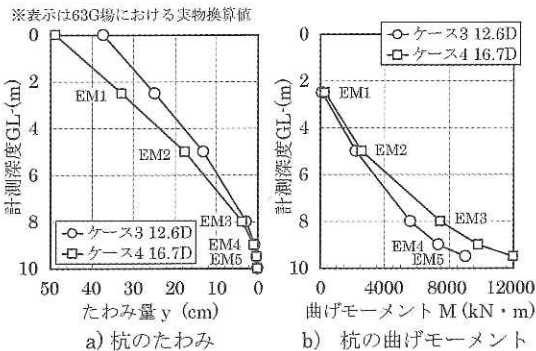


図-5 杭間隔の違いによる杭のたわみ量、曲げモーメントの比較 (配合8:2)

杭周辺地盤の破壊状況は図-3に示す通り、ケース1では最大で杭より1.4m山側の位置を頭部としたアーチ状の崩落が発生し、アーチ形状はいずれの杭間においても類似した形状を示した。杭周辺地盤で発生した崩落は、杭の歪が一定となる140秒後前後の110~180秒後の間で発生し、その後は時間が経過しても大きな変化は確認されなかった(図-2a))。一方、ケース2では、杭の歪が一定となった180秒後以降の200~800秒後の間でケース1で見られたような杭間にアーチ状の崩落が発生したが、時間の経過に伴って崩落が山側に発達し、1270秒後に杭間を越える規模の大きな崩落となった(図-2b))。最終的には、崩落は最大で杭から4.1m山側の位置まで及んだ。

3.2.2 配合8:2における杭間隔の影響

図-5a) および表-3に示す通り、杭頭変位(計測深度GL=0m)は、ケース3では37.3cm、ケース4では48.9cmとなった。図-4b)に示す杭の曲げモーメントは、両ケースともすべり面に最も近いEM5で最大値となり、ケース3では9,041kN・m、ケース4では12,024kN・mとなり、配合9:1と同様に杭間の広いケース4のほうが杭頭変位が

大きい結果となった(表-3)。杭のたわみ形状からみて、配合9:1の場合と同様、両ケースとも抑え杭の挙動を示している。

杭周辺地盤の破壊状況は図-3に示す通り、ケース3では最大で杭より2.5m山側の位置に杭配列に平行な連続した亀裂と杭から山側に延びる亀裂が発生し、天端においては崩落は発生しなかった。しかし、断面で見ると杭の根元付近が崩落した。一方のケース4についても、天端では崩落せずに杭の根元付近で崩落する現象はケース3と同じであったが、ケース4ではケース3では見られなかった杭間にアーチ状の亀裂が発生した。なお、両ケースの亀裂および杭の根本付近の崩落発生時刻を正確に判定することはできなかった。

3.2.3 杭間隔の影響についての考察

これまでに杭間隔が広いほど杭のたわみ量や曲げモーメントが大きくなる結果を示した。これは単純に、杭1本あたりの地すべり土塊のすべり力を受け持つ力が大きくなったためである。

杭周辺地盤の破壊状況は、杭間隔によって変化することが示された。そのため、杭工の設計にあたっては、地すべり土塊のすべり力に見合った剛性の杭を選定しつつ、杭間隔を12.6Dとしたケース2で見られたような杭間を越える破壊現象が生じないように杭間隔を設定する必要があり、現行設計法の考え方と整合している。

3.3 地すべり土塊の物性が杭周辺地盤の破壊に及ぼす影響

3.3.1 地すべり土塊の物性の影響

表-2に示した同じ杭間隔で地すべり土塊の材料配合を変えたケース2と3について実験結果を比較して、地すべり土塊の物性が杭周辺地盤の破壊に及ぼす影響について以下に述べる。

図-6に実験により得られた各ケースの杭のたわみ量と曲げモーメントを示す。なお、図-6は、前述した図-4および図-5を再整理したものである。

図-6a) および表-3に示すように、杭頭変位

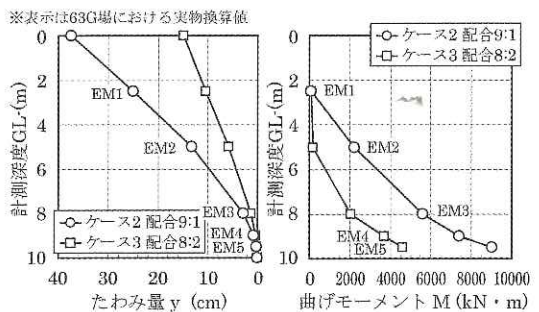


図-6 地すべり土塊の物性の違いによる杭のたわみ量、曲げモーメントの比較 (12.6D)

(計測深度GL = 0m)は、配合9 : 1のケース2では14.9cm、配合8 : 2のケース3では37.3cmであった。図-6b) および表-3に示す杭の曲げモーメントは、ケース2では4,600kN・m、ケース3では9,041kN・mであった。このことから、配合8 : 2のケース3のほうが杭頭変位や杭の曲げモーメントが大きい結果となった。これは、表-1に示した通り、配合8 : 2の湿潤密度は2.100g/cm³で、配合9 : 1の1.926g/cm³に比べて約9%大きく、杭に作用する荷重が大きくなったためと考えられる。しかし、杭頭変位や曲げモーメントの増加は湿潤密度の増加割合以上に大きくなっているため、それ以外の影響もあると考えられるが特定できていない。

杭周辺地盤の破壊状況は図-3に示した通り、ケース2では杭間にアーチ状の崩落が発生し、時間の経過に伴って崩落が山側に進行して杭間を越える崩落となった。一方、ケース3では、ケース2とは異なり、杭の根元付近で崩落が生じたが天端では亀裂の発生にとどまり、杭間を越えるような規模の崩落は発生しなかった。

3.3.2 地すべり土塊の物性の影響についての考察

遠心載荷模型実験で地すべり土塊の物性値の違いによる杭周辺地盤の破壊状況の違いが確認され、杭間隔のみならず地すべり土塊の物性値に応じて杭周辺地盤の破壊状況が変化することが示された。表-1に示した地すべり土塊の一面せん断試験結果によれば、配合9 : 1と8 : 2では粘着力(ccd)に3倍程度の違いが認められる。このことから、杭周辺地盤の破壊状況の違いについて、地すべり土塊の粘着力の影響が大きかったと推察される。

よって、杭工の設計にあたっては、現行設計法では地すべり土塊の物性値の影響は考慮されていないが、今後は粘着力等の物性値を考慮した杭間隔の設定手法とする必要があると考える。

4. まとめ

杭間隔と地すべり土塊の物性値を変化させた遠心載荷模型実験の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 杭間隔および地すべり土塊の物性値によって杭周辺地盤の破壊状況が変化することが示された。
- (2) したがって、杭工の設計にあたっては、配合9 : 1、杭間隔12.6Dとしたケースで見られたような杭間を越える規模の破壊現象が生じないように、地すべり土塊の物性値を考慮した杭間隔を設定する必要があることが示唆された。

今回の実験結果は杭谷側土塊がない抑え杭の条件である。今後はFEM解析により実験結果を再現し、杭間隔や地すべり土塊の物性値等を変化させたFEM感度解析を行って杭間隔が杭周辺地盤の破壊に及ぼす影響について検討すると共に、杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件についても検討していく。また、杭間隔を決定するための地すべり土塊の物性値の設定方法について検討を行う。

参考文献

- 1) (社)地すべり対策技術協会：地すべり鋼管杭設計要領, 2003
- 2) 建設省土木研究所砂防部地すべり研究室：地すべり抑止のための剛体杭の解析、土木研究所資料、第2698号, 1989
- 3) 足立紀尚・木村 亮・多田 智：室内模型実験による地すべり抑止杭の抑止機構に関する考察、土木学会論文集、第400号/Ⅲ-10, pp.243-252, 1988
- 4) 突固めによる土の締固め試験方法JIS A 1210
- 5) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版）、pp.252-265、平成12年3月

石井靖雄*



国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム主任研究員）
Yasuo ISHII

藤澤和範**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム上席研究員
Kazunori FUJISAWA

田中 尚***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
Hisashi TANAKA