

激甚化する地盤災害の技術課題と展望

Technical Subject and View of the Ground-Failure Disaster which Becomes More Terrible

木村隆行 Takayuki KIMURA (㈱エイト日本技術開発)
 笹井友司 Yuji SASAI (中電技術コンサルタント(株))
 井上 真 Makoto INOUE (㈱ウエスコ)
 西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学名誉教授)



現在、日本の災害は激甚化と拡大の傾向が顕著になり、想定外や未経験の災害に遭遇する機会が増えてきている。このような多発する災害環境の中では、従来にない新たな課題が多く浮上してきており、ハード対策とともにソフト対策の充実、持続可能な開発目標を掲げて取り組む研究体制の構築や、情報共有化と複数の目標にまたがった包括的なアプローチが必要な時代に突入している。本論では、地盤技術をテーマに地震災害、斜面災害、洪水災害に係る新たな課題を抽出し、今後の展望についてとりまとめた。

キーワード：深部構造，豪雨災害，斜面崩壊，堤体浸透（IGC：B-04，D-06，E-06）

1. はじめに

日本の災害は激甚化と拡大の傾向が顕著になり、想定外や未経験の災害に遭遇する機会が多くなってきている。防ぎようのないものについては、被害を低減させるための現状把握や減災対策、防ぐことができるものは、対策のための的確で効率的な調査・解析やツール開発などが必要になっている。また、近年、ドローンやAIの活用、データベースの共有なども含めた包括的アプローチによる持続可能な研究開発が求められている。このような中、地盤工学という見えない地下の世界についても、可視化によって共有し、地下構造と物性の把握、継続的観測による監視と予測、持続可能な対策など、防災に資する研究が広く求められている。大地が動く地震災害、山が崩れる斜面災害、水が暴れる洪水災害の3つの分野について、現状の技術課題と展望を分野毎に簡単にまとめた。

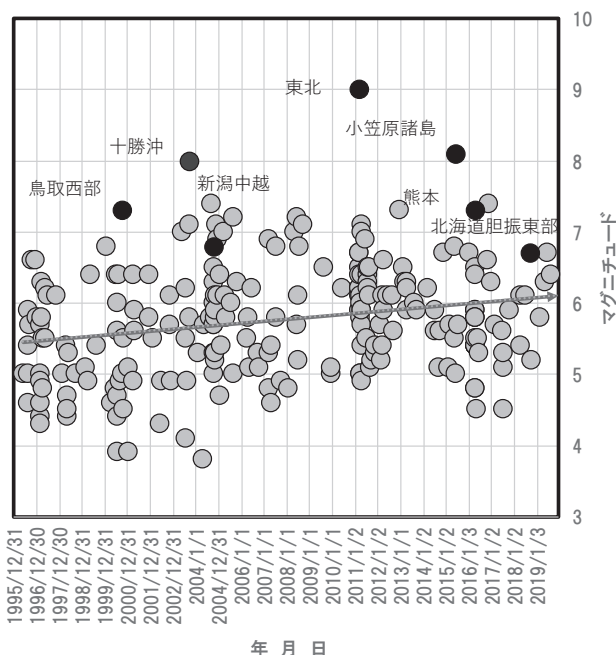


図-1 1996～2019年の震度5相当以上のM分布¹⁾

2. 激甚化する外力

2.1 近年の地震激化

地震観測体制は、阪神・淡路大震災（1995年1月17日）以降、陸域の地震観測は世界に類を見ない全国規模の稠密な観測網が整備されつつあり、海域の観測網や火山の観測体制も強化されてきている。観測網 K-netにおいて、近年1996～2019年に観測された震度5相当以上のマグニチュードMの分布図を図-1に整理した¹⁾。

東北地方太平洋沖地震はM9と突出しているが、全体としても地震規模の巨大化の傾向がみられ、マグニチュードが増大してきているようである。地震活動期に入り大規模な地殻破壊が増えているようにもみえる。

2.2 近年の豪雨激化

2.2.1 年平均雨量

中国地方5県の気象庁5地方気象台における年間雨量の経時変化を図-2に示す²⁾。

5地方気象台の年間平均雨量を比較すると、山陰側の鳥取および松江が多く、山陽側の岡山、広島および下関が少ない傾向にある。山陽側では、東側の岡山から西側の広島、下関へ向けて多くなっている。また、5地方気象台の年間雨量の経時的な変化をみると、いずれも多雨と少雨を繰り返しており、両者の変動幅に顕著な特徴は認められない。つまり、年平均雨量については、顕著な増大傾向はないと考えられる。

2.2.2 1時間雨量 50mm 以上の発生回数

全国的にみると、1時間雨量 50mm 以上の発生回数は、**図-3** に示すとおり 1976～1985 年の 10 年間から 2010～2019 年の至近 10 年間で平均約 1.4 倍に増加している³⁾。そこで、**図-4** に中国地方 5 県の 1970 年代以前に観測が開始された観測所を対象とした 1時間雨量 50mm 以上の発生回数を整理し、比較した²⁾。

まず、中国地方 5 県の合計でみると、1976～1985 年の 10 年間における 1時間雨量 50mm 以上の発生回数は 95 回程度、2010～2019 年では 190 回程度と 2.0 倍に増加している。次に、県別でみると、島根県は横ばい、岡山県 1.5 倍、鳥取県 2.5 倍、広島県 3.0 倍、山口県 3.5 倍に増加している。以上のとおり、島根県を除く 4 県では、全国平均の 1.4 倍を上回っており、1時間雨量 50mm 以上の発生回数に顕著な増大傾向が認められる。

2.2.3 観測史上最大雨量

気象庁は、2015 年 9 月関東・東北豪雨以降、観測史上 1 位を更新した観測所とその雨量を整理・公開している。その至近年の気象事例で 1 位を更新した雨量観測所数は **表-1** に示すとおりである⁴⁾。観測史上 1 位更新観測所数は、3 気象事例のみで 280 観測所以上にのぼり、全国約 1,300 観測所のうちの約 22% を占めている。また、6 時間以内の短期雨量よりも 12 時間以上の長期雨量の方が、更新観測所数が多いことが特徴として挙げられる。

次に、中国地方 5 県の気象庁全 122 雨量観測所を対象とした観測史上最大雨量の発生時期と観測所数の関係を **図-5** に示す⁴⁾。このうち、2018 年 7 月豪雨で観測史上最大値を更新した観測所数を **表-2** に示す⁴⁾。

図-5 に示す観測史上最大雨量の更新観測所数は、1～72 時間雨量のいずれも近年増加傾向にある。更新観測所数の中で 2010～2019 年は、1～6 時間雨量は 50 観測所程度、12,72 時間雨量では約 60 観測所、24～48 時間雨量では約 70 観測所まで増加している。

なお、24～72 時間雨量では、**図-5** の 2010～2019 年における更新観測所数の約 7 割が、**表-2** の 2018 年 7 月豪雨で観測史上最大値を更新した観測所になり、その大半は広島県と岡山県の観測所で発生している。また、**表-1** に示す全国の更新観測所数の約 4 割を占めている。以上のとおり、近年は、前節の 1 時間 50mm 以上の雨量の発生回数に加えて、12～72 時間の長期雨量も増大傾向にある。

2.2.4 旬毎の気象庁全観測所雨量の総和⁵⁾

2018 年 7 月豪雨が発生した 7 月上旬の気象庁全観測所雨量の総和は、20 万 7527mm (1 観測所あたり約 215.3mm) で、1982 年以降の旬ごとの最大総雨量とされてきた。しかしながら、熊本県球磨川等の氾濫を引き起こした 2020 年 7 月豪雨では、総和雨量 20 万 8308mm (1 観測所あたり 216.1mm) となり、2 年で前記豪雨記録が更新された。

今後、西日本から東日本の広い範囲にわたって、この 2 豪雨のような豪雨が増加することにより、全国的な地盤災害の激甚化が懸念される。

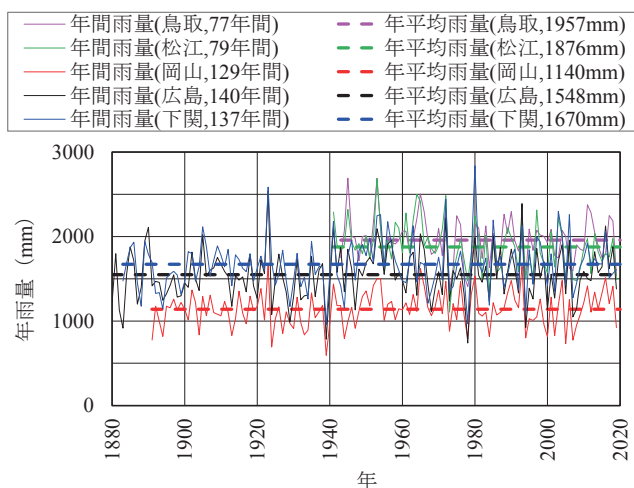
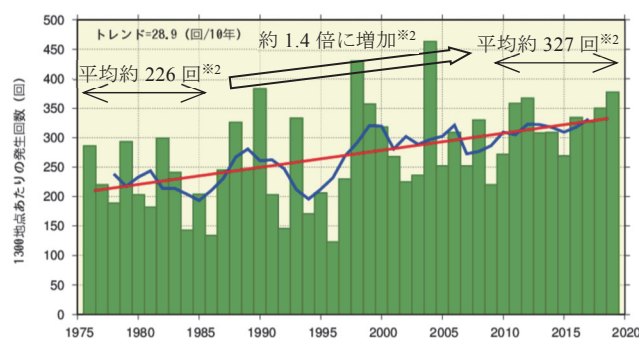


図-2 中国地方 5 地方気象台の年間雨量の経時変化²⁾



※1: 赤線は長期的変化傾向、青線は 5 年移動平均値を示す。
 ※2: 10 年間の平均発生回数、増加倍率 (矢印を含む) は加算

図-3 全国の 1 時間雨量 50mm 以上の発生回数³⁾

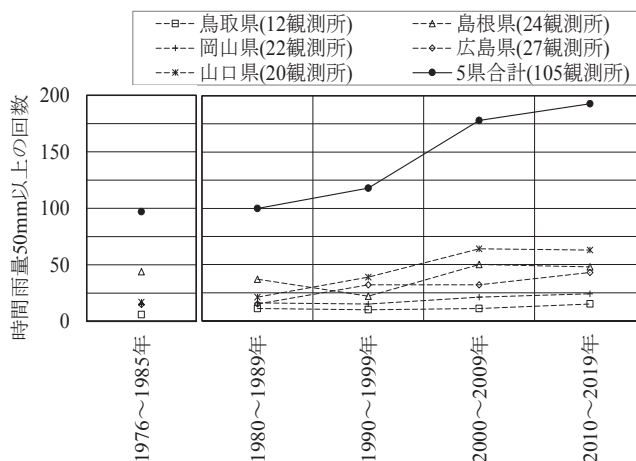


図-4 中国 5 県の 1 時間雨量 50mm 以上の発生回数²⁾

表-1 観測史上 1 位を更新した全国の雨量観測所数⁴⁾

最大雨量の時間	2018年7月豪雨 [岡山県高梁川水系 真備川氾濫他]	2019年10月 東日本台風 [長野県信濃川水系 千曲川氾濫他]	2020年7月豪雨 [熊本県 球磨川氾濫他]
1時間	14	9	15
3時間	16	40	17
6時間	31	89	18
12時間	49	120	20
24時間	77	103	30
48時間	125	72	40
72時間	123	53	40

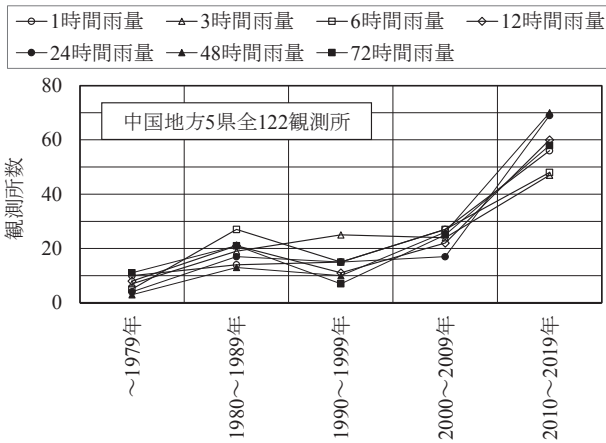


図-5 観測史上最大雨量の発生時期と更新観測所数⁴⁾

表-2 観測史上最大雨量更新観測所数 (2018.7 豪雨)⁴⁾

最大雨量の時間	鳥取県 (全16観測所)	島根県 (全27観測所)	岡山県 (全25観測所)
1時間	0	0	1
3時間	0	0	1
6時間	0	0	6
12時間	0	0	10
24時間	1	0	14
48時間	4	0	20
72時間	4	0	15
合計	9	0	67

最大雨量の時間	広島県 (全33観測所)	山口県 (全21観測所)	合計 (全122観測所)
1時間	1	2	4
3時間	3	1	5
6時間	8	0	14
12時間	17	0	27
24時間	21	1	37
48時間	25	3	52
72時間	23	3	45
合計	98	10	184

3. 激甚化強震動予測の地盤問題

3.1 近年の地震災害

2011年3月の東日本大震災は、地震およびその後の津波によって、死者約20,000人、住宅被害約115万棟に及ぶ我が国観測史上最大の海溝型巨大地震であった⁹⁾。この地震・津波は、福島第一原子力発電所事故をもたらし、それ以降における我が国のエネルギー政策の転機となった。また、2016年4月に発生した熊本地震は、同じ地域で震度7が2回観測されるという想定外の都市直下型地震であり、大規模な斜面崩壊も多数発生して死者は約270人に及んだ⁷⁾。

今後、海溝型の南海トラフ地震や首都直下地震等の切迫する巨大地震に対して、ハード・ソフト両面からの対応を迅速かつ適切に進めていく必要がある。

3.2 地震災害の技術課題

近年の観測網の整備に伴い、防災メールでの警報も浸透してきている。また、これらの高度化・迅速化もかなり進展しており、Hi-net⁸⁾によりリアルタイムで発生後の情報が把握できている。地震現象の逆解析は広く発展し

表-3 地盤増幅率の改訂点⁹⁾

	現行手法	改訂手法 (浅部・深部統合地盤モデルがある場合)
評価式	工学的基盤と表層地盤での平均S波速度(AVS)の比から、各地点における最大速度の地盤増幅率を推定する経験式(藤本ほか, 2006)	
表層地盤でのAVSの評価	微地形区分から推定(松岡ほか, 2005の方法による)	浅部・深部統合地盤モデルから、表層30mのS波速度の平均値
工学的基盤の上面	深部地盤モデルのVs=600m/s	浅部・深部統合地盤モデルのVs=350m/s層の上面
工学的基盤でのAVSの評価	600m/s	浅部・深部統合地盤モデルから、工学的基盤の上面から直下30mのS波速度の平均値

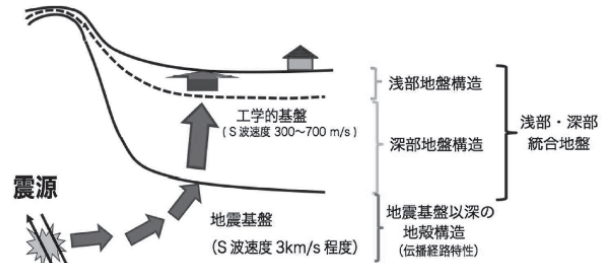


図-6 地下構造モデル¹⁰⁾

ているが、地震により発生する被害の予測、その順解析の高度化はスタートしたばかりの状況にある。政府・地震調査研究推進本部は、2020年3月に地下構造モデルについてのレシビ「震源断層を特定した地の強動予測手法」を改訂し、浅部・深部統合地盤モデルから地震動の地盤増幅率を評価する手法を提示した。表-3に浅部・深部統合地盤モデルによる地盤増幅率の評価手法を示し、図-6にその地下構造モデルを示す^{9),10)}。

このような強震動予測の課題としては、下記のようなデータ共有化・データ取得高度化・地盤モデル高度化・判定技術の高度化の項目が考えられる。

- (a) ボーリング情報のデータベース共有強化
- (b) 地質法などの整備
- (c) 浅層地盤調査の高度化
- (d) 微動アレイ・DAS・各種物理探査の活用
- (e) 地下構造のモデル化におけるデータ統合技術
- (f) AIを活用した補間技術
- (g) 浅部・深部統合モデルの高度化
- (h) 強震動判定・液状化判定の高度化と基準反映

3.3 地盤モデル向上に向けた技術展望

3.3.1 浅部地盤情報

現在、柱状図については「KuniJiban」国土地盤情報検索サイトで、全国約141,500本のデータが公開されているが、これらのデータは道路や河川に沿って線状に分布し、面的に不均質である。そのため、より多くのデータ確保には、自治体などの情報公開推進や建築申請時の法的公開推進なども課題であり、最終的には台湾のような包括的な地質法の整備¹¹⁾が必要であろう。また、付帯資料として土質試験結果が一部公開されているが、それら土質試験の全面的公開やカラーコア写真の公開も、今後の2次利用への展開において重要と考える。

ボーリングデータの補間として、弾性波探査やPS検層などととも、DASも有効な調査手法と考えられる。

DAS は、地下に埋設された光ファイバーを使って地盤振動を観測する技術で、従来の物理探査に比べてコスト面で有利である。適用については、様々な分野で研究が進められ、浅層部の S 波速度構造の把握に使われた事例が報告されている^{12),13)}。これらのデータを包括的に補間して地盤モデルを構築する手法としては、AI を用いた地質断面図支援ツールや、地質統計学手法などもある。他の例では、木村他^{14),15)}が公開している三次元グリッドモデルがあり、その一例の沖積層基底面モデルの鳥瞰図を図-7 に示す。以上のように、適正な補間には課題が多く、今後、更なる補間手法の開発が必要となる。

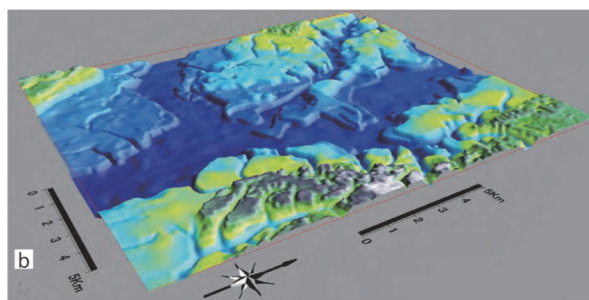


図-7 沖積層基底面モデルの鳥瞰図 (2013)¹⁵⁾

3.3.2 深部地盤情報

深部構造調査では、重力や大深度地震探査、微動アレイ探査等の物理探査データや地震観測データが使われる。

重力データは、地下の物質の密度分布を反映するので、観測された重力値から地形の影響や観測点の標高の影響を除去したブーゲー異常分布は、地震基盤深度の分布と相関性があることが知られており、深部地盤モデルを作成するためのデータになる。国内の重力データは、産業技術総合研究所によって取りまとめ・公開されており、図-8 にその活用例を示す¹⁶⁾。

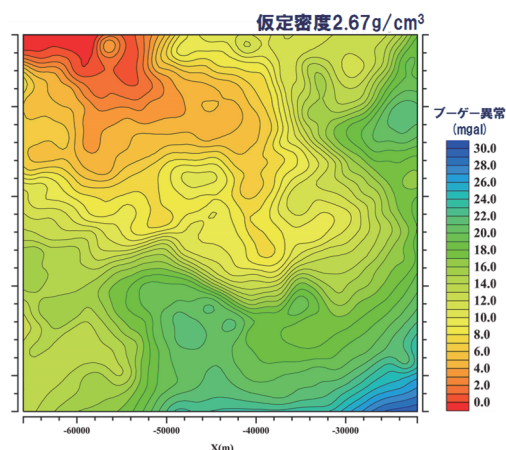


図-8 岡山県のブーゲー異常例¹⁶⁾

他に、K-net による地震情報や微動アレイ探査による任意地点での計測情報を、深部構造の S 波速度構造モデルとして解析することで、重力データを補間することが可能になる。微動アレイ探査はアレイ直下の一次元 S 波速度分布を求める手法であり、深部ボーリングの代用として有効かつ経済的である。複数地点で実施した微動アレイ探査結果を、重力データをガイドとして補間することにより、三次元的な S 波速度の分布を推定することができる。今後の調査と活用が期待される。

以上のような浅部・深部地盤統合モデルを構築し、サイトでの的確な地震動を把握することは予測に重要であり、想定地震動の再現性向上の切り札になると考える。

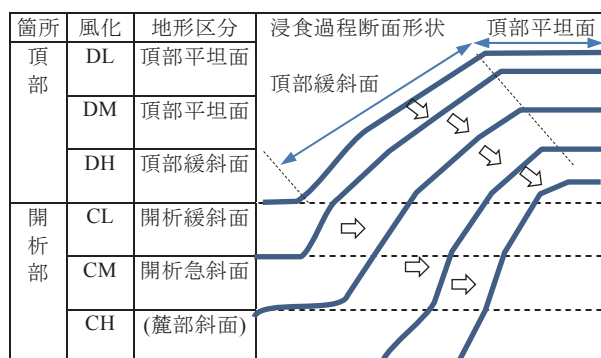


図-9 開析過程による D 級風化帯の減少

4. 激甚化斜面災害予測の地盤問題

4.1 近年の斜面災害

2014 年 8 月豪雨災害では、広島市北部の安佐北区・安佐南区の複数箇所において大規模な土砂災害を発生させた。これによる被害は、土石流などで死者 74 人・家屋の全半壊 255 軒に及んだ¹⁷⁾。その後 2018 年に道路法が改正され、20m 以内の沿道区域内の土地管理者への損失補償を前提とした措置命令権限が規定された¹⁸⁾。

2018 年 7 月上旬に発生した豪雨災害も、広島県、岡山県、愛媛県などに甚大な被害をもたらし、死者は 263 人に達し、水害による死者も 100 人を超えた。極めて多数の土石流や無数の斜面崩壊が生じ、土砂災害は 2,500 件以上に及んだ¹⁹⁾。この豪雨による斜面災害の特徴を風化残積率の観点から、3 地区の土石流と 1 地区の地すべりについて整理した。

- (1) 中国地方には古い地形面が広く残留しており、標高 1,000m の道後山面、標高 400~600m の吉備高原面、標高 400m 以下の瀬戸内面といわれる。いずれも風化が進行した古い準平原からの隆起侵食過程であり、その開析過程で様々な微地形が形成されている。いわゆるやせ尾根状で頂部(小起伏面)が小さい山体は C 級岩体が主体になり、D 級も多くは鉱物学的 DH 級になる。また、小起伏面が広い領域は、赤色土のような鉱物学的 DL 級岩盤が残り保水能力も高い。
- (2) その過程を図-9 に示すが、地形を D 級風化帯の頂部の侵食・縮小過程と考えれば、頂部の風化残積率で地形形成段階を判定することができ、斜面災害との相関が検討可能となる²⁰⁾。なお、風化残積率と崩壊起点の遷急線比率は、図-10 および式(1)~(6)のように示される。また、地すべりと土石流の移動体としての距離は、図-11 に示すとおり定義した。

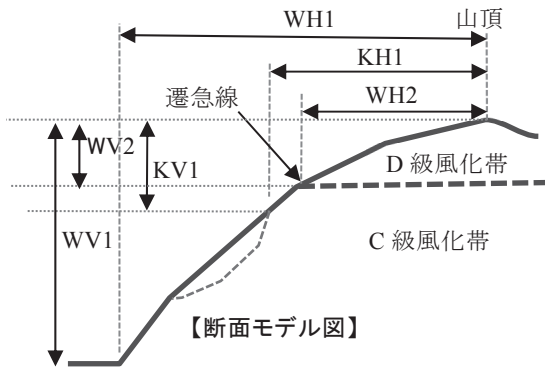


図-10 風化残積率の概念図(一部加筆)²⁰⁾

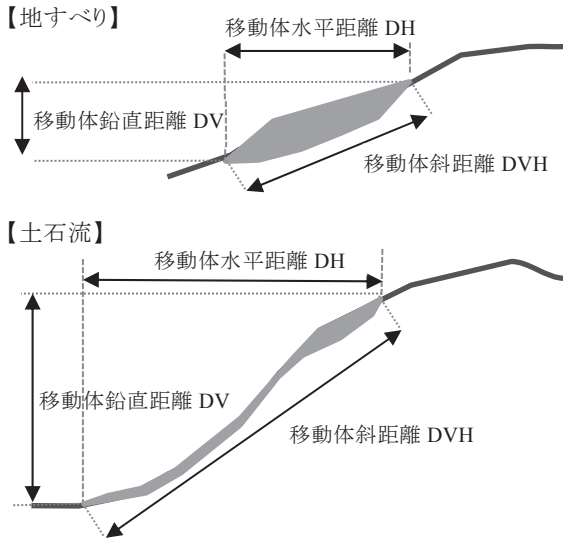


図-11 移動体距離の概念図²⁰⁾

- ・鉛直風化残積率 WV (頂部垂直高/山体垂直高)

$$WV = WV2 / WV1 \quad (1)$$
- ・水平風化残積率 WH (頂部水平距離/山体水平距離)

$$WH = WH2 / WH1 \quad (2)$$
- ・断面風化残積率 WVH

$$WVH = (WV + WH) / 2 \quad (3)$$
- ・崩壊起点遷急線鉛直比率

$$RKV = KV1 / WV2 \quad (4)$$
- ・崩壊起点遷急線水平比率

$$RKH = KH1 / WH2 \quad (5)$$
- ・崩壊起点遷急線断面比率

$$RKVH = (RKV + RKH) / 2 \quad (6)$$

- (3) 図-12に移動体の水平距離と鉛直距離の相関を示す。土石流は、岡山・広島・宇和島ともに同様の相関性を示す。また、地すべりも基本的に同じ延長上に分布しているが、相関性については多少異なる。
- (4) 図-13に示すように、風化層が厚い風化残積率約0.6以上では土石流は発生せず、地すべりが発生している。つまり、風化帯が厚い箇所では、土石流は発生しにくいと考えられ、地すべりも土石流も類似した相関上に分布している。また、岡山や宇和島の土石流より広島土石流の方が、移動体の距離が長い傾向にある。
- (5) 図-14に崩壊起点の遷急線断面比率と断面風化残積

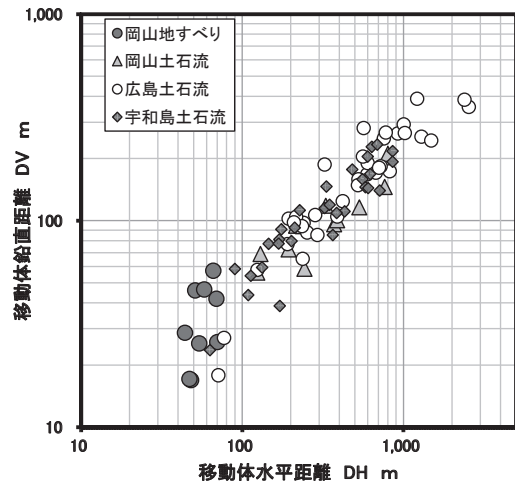


図-12 水平移動および鉛直移動の相関

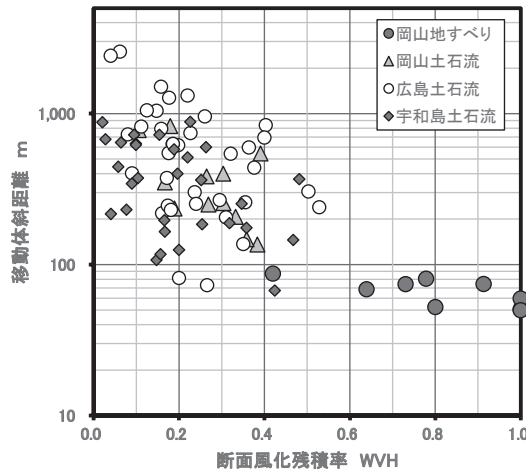


図-13 風化残積率と移動体斜距離の相関

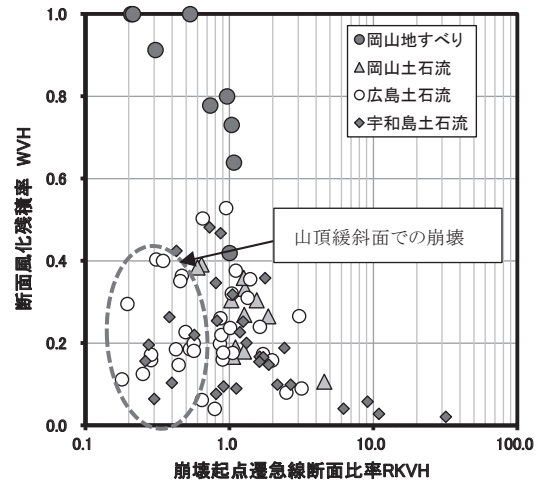


図-14 崩壊起点遷急線断面比率と断面風化残積率の相関

率の相関図を示す。この両者にはある程度相関性が認められ、崩壊起点遷急線比率が1.0周辺の0次谷で土石流が多く発生している。しかし、課題は、崩壊起点遷急線比率が0.6未満の土石流の分布である。このことは、遷急線より山頂側の緩斜面で崩壊が発生していることを意味し、0次谷ではなく、マイナス1次谷ともいべき緩斜面で崩壊が認められる点にある。特に、広島と宇和島の土石流にその傾向が認められる。広島

土石流には、凸または平坦斜面での土石流の流下現象が認められ²¹⁾、発生概念の見直しが必要になっている。この岡山と広島・宇和島の差の一因と想定されるのが時間雨量の差で、岡山より広島・宇和島の方が、最大1~3時間雨量が大きく、短期間に多量の降雨供給があった。遷急線より山側の風化層の薄い緩斜面で崩壊を発生させた誘因は、そればかりではなく、宇和島では熱水変質鉱物（ローモンタイト）の関与も指摘されている²²⁾。また、岡山大学裏山の崩壊では、パーミキュライトの関与も指摘されている²³⁾。

4.2 斜面災害の技術課題

近年の豪雨では、前述のような低角度斜面の崩壊や土石流が発生し、そのメカニズムの解明が課題として浮上している。その一部を下記に挙げるが、その他課題も含め、今後地盤工学的に新しいアプローチが必要と考える。

- (a) 山頂緩斜面での崩壊メカニズム（傾斜 30 度未満）
- (b) 麓部斜面での崩壊メカニズム（傾斜 30 度未満）
- (c) 変質鉱物の関与の定量的評価
- (d) 地下水流動力の評価手法の開発
- (e) 低拘束圧下での移動体の適正な強度評価手法
- (f) 岩盤境界部の崩積土の適正な強度評価手法
- (g) 面的な斜面評価手法の開発(物理探査の精度改善)
- (h) データ活用による広域評価手法の開発
- (i) 非接触調査解析ツールの開発
- (j) N 値に代わる小型化地盤探査ツールの開発
- (k) 斜面作業の軽減化に向けたパワースーツの開発
- (l) 山地環境を維持する安価な斜面強化材料の開発
- (m) 斜面内の安価な地下水位低下工法の開発
- (n) 地下水位低下工法での新たなドレーン材の開発
- (o) 目詰まりが生じにくいドレーンシステムの開発
- (p) 斜面の表面風化防止工やガリー侵食対策工の改善
- (q) グランドアンカーの耐久性診断と改修技術開発
- (r) 表面排水工の健全度診断モニタリングシステム
- (s) 斜面強化工法健全度診断モニタリングシステム

4.3 斜面災害の新たな技術展望

4.3.1 面的な斜面評価手法の開発について

近年、ドローン、LP、SAR、空中電磁探査、ミュオン探査など、面的で広範囲を対象とした調査手法が研究開発されている。ドローンでの LP 測定は、施工現場などで実用化され、着実に研究が進んでいる。今後は、その解析手法の高度化による精度向上が必要と考える。

LP 計測による傾斜量図では、遷急線や遷緩線等の微地形が明確に把握できる。また、LP データの蓄積により、崩壊の前後や複数時期の差分解析が可能となり、地形的素因の把握も可能となった。図-15 は、岡山大学北側の崩壊斜面の傾斜量図である²³⁾。崩壊は、一般的に遷急線前後の 0 次谷で発生するが、この事例では 0 次谷でない麓部斜面上端の 30 度未満の緩斜面で発生している。今後、このような崩壊のメカニズム解明が必要と考える。

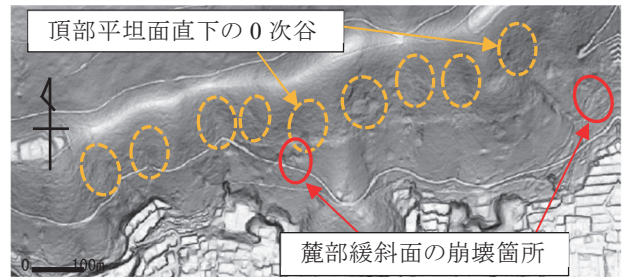


図-15 現地 LP 計測による傾斜量図と 0 次谷想定分布²³⁾

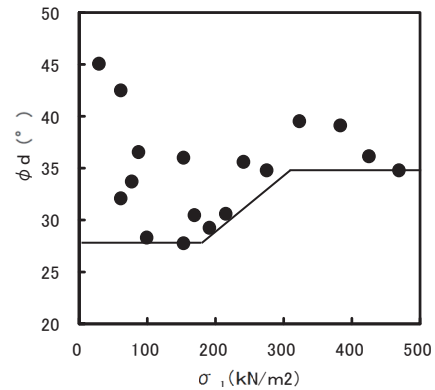


図-16 マサ土の一面せん断の σ_v と ϕ_d ²⁴⁾

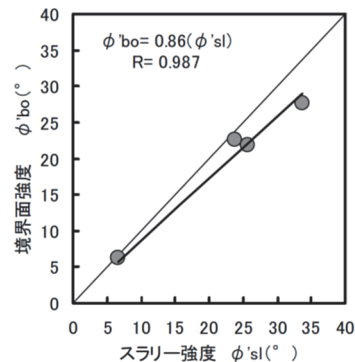


図-17 境界面強度の低下率²⁶⁾

4.3.2 低拘束圧下での移動体の強度評価手法

土石流の発生源の多くは表層崩壊であり、その表層の低圧下での強度は、必ずしも深部と同じ内部摩擦角 ϕ とは限らない。多くの強度試験は、 ϕ が変化しないという仮定で低圧から高圧のモール円場で ϕ を求めてしまうので、必ずしも崩壊が生じる表層の強度を反映できていない。

図-16 にマサ土の低拘束圧下での強度の低下現象を示す²⁴⁾。低拘束圧下でのボシュレフ強度（圧縮・膨張履歴による同一間隙比での強度）の把握は、実務上困難なので、他の低拘束圧力学試験法を今後確立する必要がある。また、酸化物質によるボンド効果や動植物による多孔体の表層土塊は、通常ではない土質構造を有する可能性もあり、低拘束強度とともにパイプ流などを発生しやすい土質構造の把握が重要になる。

4.3.3 岩盤境界部の崩積土の適正な強度評価手法

表層崩壊は、岩盤上の崩積土が崩壊する事例が多く、その境界面では図-17 に示すようなプレカット強度となり、土質試験より低下する²⁵⁾²⁶⁾。その更なる検証が、今後のメカニズム解明に必要である。

5. 激甚化洪水災害予測の地盤問題

5.1 近年の洪水災害

2011～2020年の10年間、ほぼ毎年のように豪雨による河川の氾濫が生じており、それらの床上浸水棟数は図-18のように激甚化してきている²⁷⁾。

5.2 洪水災害の技術課題

河川堤防の破堤要因としては、浸透破壊・越流・侵食・地震があり、地盤工学上の課題として下記が挙げられる。

- (a) 中間土・砂礫材料の適正な評価
- (b) 低拘束圧部の強度評価
- (c) 堤体内空気圧・浸透圧の適正評価と試験法の開発
- (d) 堤防弱点箇所調査手法の確立
- (e) 堤防基礎の液状化および浸透破壊の強化工法開発
- (f) 堤体の法面侵食の安価な新しい強化技術の開発
- (g) 堤体の景観と植生を維持した堤体強化技術の開発
- (h) 越流しても決壊しない礫と砂の混合築堤材の開発
- (i) 堤防の堤外地のドレーンシステムの開発
- (j) 目詰まりしにくいドレーンシステムの開発
- (k) ドレーン材を自然洗浄するシステムの開発

5.3 洪水災害の新たな技術展望

5.3.1 中間土・砂礫堤体材料の適正な評価

堤体材料の多くは、様々な中間土や礫混じり砂などが多く、大半は砂質土に分類される。その場合、 ϕ 材として評価されるが、礫の混入率により極端に内部摩擦角 ϕ が低下することは意外に知られていない。図-19に示す粘土と礫の混入土において非圧密非排水強度定数 ϕ_u は礫率50%で低下する例²⁸⁾や、砂礫材料で礫率40～50%の低拘束圧において、圧密非排水で間隙水圧を考慮した強度定数 ϕ' が低下する図-20のような現象がある²⁹⁾。今後、このような礫率や拘束圧の適正な評価方法を確立していく必要がある。

5.3.2 堤体内空気圧・浸透圧の適正評価と試験法の開発

豪雨の堤体内への浸透過程において、時系列的に①堤体内空気圧の発生、②浸透圧の発生の2段階の変化が想定され、その力学試験方法の開発が必要と考える。

5.3.3 堤防弱点箇所調査手法の確立

堤防の弱点箇所（浸透破壊により決壊に至る可能性の高い箇所）の確実な抽出と、対策は極めて重要である。しかし、堤体内に局部的に潜在する高透水層、水ミチ等の弱点箇所を抽出する調査手法は、確立されていない。図-21の空気圧連通試験と高密度電気探査を組み合わせた方法³⁰⁾は、有効な調査手法としての確立が望まれる。

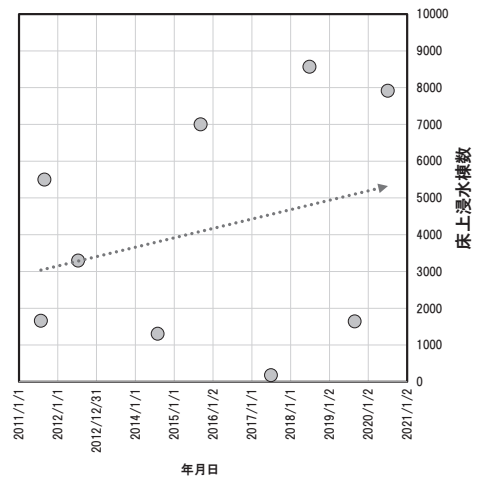


図-18 近年の洪水災害の床上浸水棟数²⁷⁾

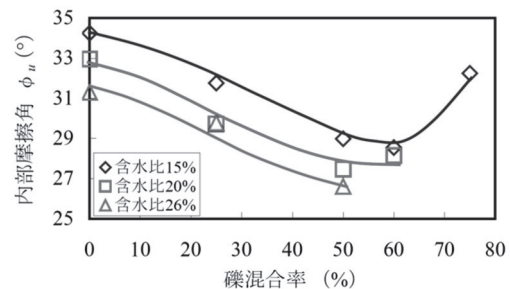


図-19 礫率と ϕ_u の相関²⁸⁾

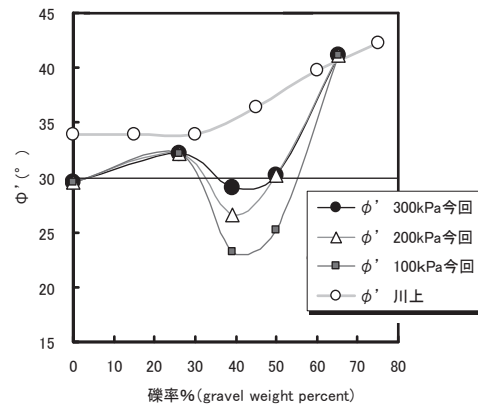


図-20 礫率と ϕ' の相関²⁹⁾

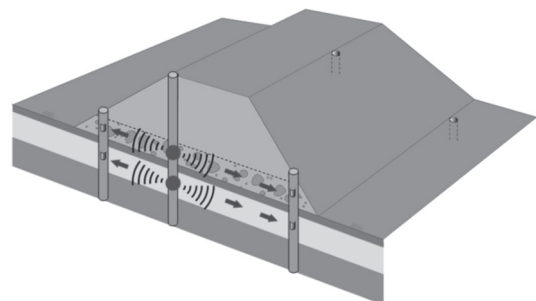


図-21 空気連通試験のイメージ³⁰⁾

6. シミュレーション技術の技術展望

6.1 シミュレーションデータの今後の情報取得

3～5では、主として地震災害、斜面災害、洪水災害の

予測シミュレーションの基礎となる地盤内調査、構造把握、物性設定に係る課題と技術展望を論じた。

国土交通省は、自らのデータと民間等の多様なデータを連携し、業務効率化やスマートシティ施策等の高度化、

産学官連携によるイノベーション創出のための「国土交通データプラットフォーム整備計画」を、2019年5月に公表した³¹⁾。この計画の目指す姿を以下に記す。

- (1) 三次元データ視覚化機能として、国土地理院の三次元地形データをベースに、三次元地図上に点群データ等の構造物三次元データや地盤情報を表示する。
- (2) データハブ機能として、国土交通分野の多種多様な産学官のデータをAPIで連携し、同一インターフェースで横断的に検索、ダウンロード可能にする。
- (3) 情報発信機能として、国土交通データプラットフォームのデータを活用してシミュレーション等を行った事例を、登録・閲覧可能にする。

本章ではこのうちの3つ目に着目し、3分野の予測シミュレーションに関する技術展望について概説する。

6.2 地震災害

3で述べたとおり、地震動の予想精度向上には、深部の地盤情報の把握が重要な課題であるが、地盤構造を予測するシミュレーション技術の高度化も必要と考える。

三次元S波速度構造を作成する手法として、ジョイント・インバージョンを用いた方法³²⁾があり、今後も観測データとの整合性確認を行っていく必要がある。

6.3 斜面災害

土砂災害警戒区域（急傾斜地）に未指定の傾斜30°未満の緩斜面で発生する崩壊現象には、降雨とその特異な土質構造、パイプ流などの存在に加えて、地下水による浸透圧や流動力を考慮する必要があると考える。このため、4で述べたLPによる微地形、強度特性や図-22³³⁾に示す豪雨時の地下水浸透圧を考慮したシミュレーションの適用等による崩壊メカニズムの解明が必要と考える。

6.4 洪水災害

河川堤防の浸透破壊に対する安全性評価³⁴⁾には、不飽和土中の空気は地下水に比べ速く移動すると仮定し、水のみを扱う一相流のシミュレーションが用いられている。しかしながら、今後の豪雨の激化により、図-23³⁵⁾のように堤体内に封じ込まれた間隙空気が、堤体の安定性に影響を及ぼす懸念がある。このため、5で述べた堤防弱点箇所を把握のもと、水と空気を考慮したシミュレーション³⁶⁾等による浸透破壊のメカニズム解明が望まれる。

7. まとめ

7.1 モニタリング・ループの継続

本研究では、近年激甚化する地盤災害を、地震による地盤災害と豪雨による斜面災害あるいは、洪水時の河川堤防の決壊について論述した。また、ここでは主にその災害の予測についての課題を取り上げた。地盤災害は地球全体の問題である。その災害に技術的に対峙するには、

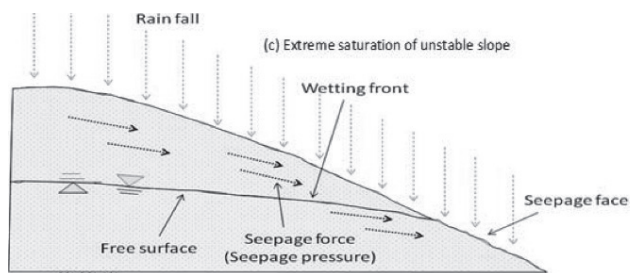


図-22 豪雨時の地下水浸透圧の発生イメージ³³⁾

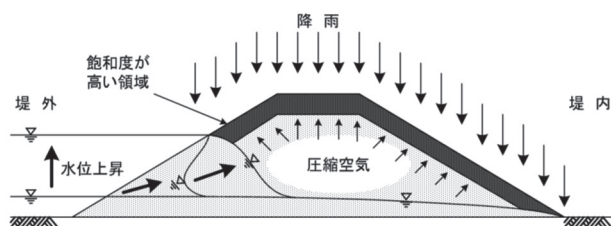


図-23 豪雨時の浸透圧と空気圧の発生イメージ³⁵⁾

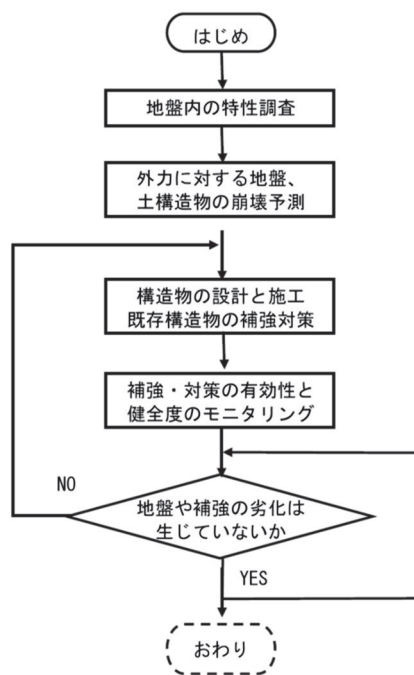


図-24 地盤災害の予測・対策とそのモニタリングフロー

見えない地盤内の調査、その構造の把握、物性の理解、外力に対しての耐久性を予測する必要がある。

このようにして安定性を評価した箇所に対しては、当然、崩壊しないようにする対策工を立案・実施し、100～200年にわたる長期間のモニタリングを通じて、対策工の健全度と災害に対する安全性を検討していくべきである。すなわち、対策工の劣化に応じて、適切な修復を行っていくべき道筋を示す必要がある。

このような考え方をまとめると、図-24のフローのとおりとなる。ただし、このフローには「おわり」がなく、国民の安全を考えるとその対策工の修復等を未来永劫繰り返していかなければならない。

7.2 地震災害

地震時の地盤の液状化に関しては、深部地質情報のデータが必要であることを示した。また、既設地下構造物の分布も考慮した三次元での液状化の予測・評価に対しては、スーパーコンピュータ「富岳」等を用いた研究が望まれ、これも大きな課題である。さらに、液状化のハザードマップは示されているが、その対策をどのようにするかについては、まだまだ一般的になっていないことも課題として挙げられる。

羽田空港等の耐震滑走路は、セメント注入による対策がなされている。この効果の継続は50年と考えられているが、1000年近い砂地盤の結合性を維持できるジオポリマー材³⁷⁾を注入して補強する工法が提案できる。

7.3 斜面災害

近年、異常気象による豪雨災害が生じていることは明らかである。それによって、防災に対して「過去のデータ」から設計外力を定め、斜面の安定性を評価し、その対策を検討する手法は過去の政策になってきた。

気象学の分野では、気象がこれからどれだけ危険な状況になるかについて日々研究がなされており、豪雨による土砂災害の安定対策も「想定し得る最大規模の降雨」を外力とすべきである。また、その豪雨量がますます増大するといわれる中では、それを考慮した斜面安定性検討時の所要安全率を定める必要がある。

表面排水の側溝に関しても、現行の時間雨量50mmで計画しているのは、いつまでも道路が川になってしまう。斜面で集められた表面水が、流末で跳水となって表面排水施設を侵食している現象が、建設間もない新しい高速道路の斜面でも観察されている。これらを鑑みると、豪雨に対する排水施設を根本から再検討すべきであると考ええる。また、表面排水施設のみならず盛土などの水平排水施設についても、その老朽化による目詰まりに対して、その状況を確認するモニタリングシステムを構築する必要がある。さらに、地盤内の水平排水施設の目詰まりを洗浄するシステムの検討・研究は現状なされていないため、これらについても今後研究を重ねる必要がある。

2014年8月の広島市安佐南区八木での土砂災害の後、5年をかけて日本中の住居近くの斜面の診断が実施された。しかし、2018年7月豪雨では、この評価で安全と判定された傾斜30°未満の土砂災害警戒区域に未指定の斜面で崩壊が生じた。これは、従来手法では豪雨に対する評価ができない現象が生じていることを示している。

7.4 洪水災害

堤防に関しても、外力である豪雨が検討に考慮している規模以上になることで、河川水が堤防を越流することが普通になり、一級河川の堤防の決壊が頻発している。現在の堤防を越流しても決壊しない堤防へと補強することが、当面の最も大きな課題であり、堤防の締固めを根本から改善する案が考えられる。

現状の堤防では、将来の豪雨によって越流することは当然起こると予測されているため、再び日本中に洪水対策のダムを設置する必要がある。また、越流しても決壊しないよう堤防を補強しても、平地の内水や洪水を放流するには、河川断面を大きくする必要が生じる。堤防高を上げることも考えられるが、高くなった堤防が決壊すると、その被害は一層大きくなるのがジレンマである。

このような現実の大きな課題に対して、洪水を円滑に流下させる河川下への放水路トンネルの構築が、最良の対策として挙げられる。その工事の止水対策にも、7.2に記載したジオポリマー材が極めて有効と考える。

国土の狭い日本であるが、国土の地下データがほとんど把握されていない現状に対して、50年先の安全な国土にする計画を立て、豪雨でも避難する必要のない国土形成を検討していきたいものである。

7.5 新たな研究体制への取り組み

官産学が直面する共通課題が多い中、各省の大臣が認可する技術研究組合という研究体制がある。現在日本には61の組合があり、そのほとんどが経済産業省主体で、国土交通省の大臣認可は8組合である。

その中の一つに、岡山に事務局を置き、西垣誠理事長を中心として2019年11月に設立された「統合物性モデル技術研究組合」がある。この組合では、斜面災害・土砂災害・洪水災害の3分野における地盤工学上の問題と激甚化する災害の課題解決に取り組んでいる。

洪水災害に関し、豪雨が河川堤防内の地下水にどのように関与するかを定量的に判断するための研究の一例として、堤体内の地下水位変動と不飽和土中の体積含水率の変化の同時計測がある。最近ではTDRやADR等の誘電率を用いる計測や、飽和度0~100%までを計測できるFDR法の安価な小型センサーが開発されている。2019年にはこのセンサーを岡山県の一級河川高梁川の堤防に設置し、豪雨時も含め堤体内の飽和度変化を計測している。

地震災害・斜面災害・洪水災害における共通課題の解決には、企業間の垣根を超えた新しい研究体制も新たなポテンシャルになるのではないかと考えている。このため、今後も関係者一同、激甚化する外力に対して国土交通データプラットフォーム整備への貢献や包括的アプローチも見据えた新たな研究に取り組みたいと考えている。

参考文献

- 1) K-net:国立研究開発法人防災科学技術研究所, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/cgi-bin/kyoshin/bigeqs/index.cgi> (入手日:2020.8.12)
- 2) 気象庁 web: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stat/etnrn/index.php> (入手日:2020.8.28)
- 3) 気象庁:気候変動監視レポート2019, p.39, 2020.
- 4) 気象庁 web: https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html (入手日:2020.8.25)
- 5) 気象庁観測部:「令和2年7月豪雨」の観測記録につ

- いて(報道発表), 2020.
- 6) 内閣府(防災担当): 東日本大震災の概要, 2011.
 - 7) 警視庁: 平成28年熊本地震に伴う被害状況と警察措置(8月15日), 2016.
 - 8) Hi-net: 国立研究開発法人防災科学技術研究所, <https://www.hinet.bosai.go.jp/hypomap/?ft=1&LANG=ja> (入手日: 2020.8.12)
 - 9) 地震調査研究推進本部事務局: 地盤増幅率に関する震源断層を特定した地震の強振動予測手法(「レシピ」)の改訂のポイント, p.4, 2020.
 - 10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 地下構造モデル作成の考え方, p.1, 2017.
 - 11) 太田陽子: 台湾の「地質法」について, 活断層研究38号, pp.51-54, 2013.
 - 12) 山内泰知, 笠原順三, 羽佐田葉子, 川島裕貴, 杉本芳博, 山口隆志: DAS(Distributed Acoustic Sensor)の表面波分散曲線への適用可能性, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, 2018.
 - 13) 山内泰知, 笠原順三, 羽佐田葉子, 川島裕貴, 杉本芳博, 山口隆志: 人工震源と微動を震源として用いたDASによる表面波解析, 物理探査学会第138回学術講演会論文集, pp.29-32, 2018.5.
 - 14) 木村克己, 花島裕樹, 石原与四郎, 西山昭一: 埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの三次元解析—東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例, 地質学雑誌, Vol.119, pp.537-553, 2013.
 - 15) 木村克己, 花島裕樹, 西山昭一, 石原与四郎: ボーリングデータ解析による浅部地下地質構造の三次元モデリング—東京低地北部から中川低地南部の例, 関東平野中央部の地下地質情報とその応用, 特殊地質図, No.40, pp.56-113, 2014.
 - 16) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(2013): 日本重力データベースDVD版.
 - 17) 広島県土木局砂防課(H27.1): https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/sonota/sabo/pdf/216_H26_820dosyasaigai.pdf (入手日: 2020.8.25)
 - 18) 国土交通省: 道路法等の改正について, 社会資本整備審議会道路分科会第65回基本政策部会, 配布資料, 資料2, p.2, 2018.
 - 19) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部: 平成30年7月豪雨による土砂災害の発生状況(2018年9月25日時点), 2018.
 - 20) 木村隆行, 沼知之, 二木重博, 工藤健雄, 與那城稔, 井上真: 岡山県での西日本豪雨における風化率と斜面崩壊形態の相関, 日本応用地質学会, 平成30年度7月豪雨災害(西日本豪雨災害)調査団報告書, pp.81-86, 2019.
 - 21) 加藤弘徳, 曾我部淳, 小笠原洋, 宮本新平, 岸本剛: 地質・地形の違いから見た土石流の個性と被災状況, 日本応用地質学会, 平成30年度7月豪雨災害(西日本豪雨災害)調査団報告書, pp.47-62, 2019.
 - 22) 松澤真, 古木宏和: 南予地方で発生した土砂災害と地質特徴との関係—ローモンタイトの崩壊への影響, 日本応用地質学会, 平成30年度7月豪雨災害(西日本豪雨災害)調査団報告書, pp.137-146, 2019.
 - 23) 井上真, 西垣誠, 鈴木茂之, 木村隆行, 笹井友司: 2018年7月豪雨により崩壊した傾斜30度未満の崩壊斜面の機構解明, 建設と地盤, 地盤工学会中国支部, Vol.38, No.1, pp.39-50, 2020.
 - 24) 武居有恒, 三浦清: マサ土崩壊とその対策, 島根県, 1978.
 - 25) 山本哲朗, 鈴木素之, 寺山崇, 原田博: 斜面崩壊の素因となる不連続面のせん断強度の評価手法, 地盤工学会, 土と基礎, Vol.49(7), pp.7-9, 2001.
 - 26) 木村隆行, 佐藤丈晴: 境界面強度における強度低下率, 平成22年度地盤工学会中国支部セミナー報告会, ポスターNo.22, 2010.
 - 27) 【Japan Data】過去の豪雨災害: <https://www.nippon.com/ja/features/h00240/> (入手日: 2020.8.22)
 - 28) 田中利典, 棚橋由彦, 蔣宇静, 杉本知史, 辻大志: 風化地山を想定した礫-粘性土混合試料の強度特性の実験的評価, 土木学会西部支部研究発表会, pp.78-79, 2010.
 - 29) 山名孝志, 木村隆行, 徳方完: 礫質土のせん断強度と斜面安定評価, 日本応用地質学会平成16年度研究発表会, pp.173-176, 2004.
 - 30) 舘川逸朗, 藤吉秀彰, 新村卓也, 西村伸一, 西垣誠: 河川堤防における弱点箇所を抽出する組合せ調査法についての一考察, 第53回地盤工学研究発表会講演集, pp.981-982, 2018.
 - 31) 国土交通省: 国土交通データプラットフォーム(仮称)整備計画, 2019.
 - 32) 杉本芳博, 山内泰知, 高岡宏之: 物理探査データのジョイント・インバージョン—三次元速度構造モデル構築手法—, 物理探査, Vol.71, pp.86-102, 2018.
 - 33) 西垣誠: 安全・安心を支える地盤技術, 中国地質調査業協会第23回技術講演会, 特別講演, 2015.
 - 34) 国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版), pp.46-68, 2012.
 - 35) 瀬尾昭治: 気液二相流における不飽和土の浸透特性に関する基礎的研究, 岡山大学大学院環境学研究科博士論文, p.2, 2014.
 - 36) 新村卓也, 藤吉秀彰, 舘川逸朗, 齋藤雅彦, 珠玖隆行, 小松満, 西村伸一, 西垣誠: 河川堤防の弱点箇所を抽出する空気圧による連通試験手法の開発, 地盤と建設, 地盤工学会中国支部, Vol.36, No.1, pp.71-78, 2018.
 - 37) Davidovits, J.: GEOPOLYMERS, Journal of Thermal Analysis, Vol.37, pp.1633-1656, 1991.

(2020年9月29日 受付)