

豪雨と地震による複合地盤災害

Combined geo-disasters of heavy rainfall and earthquake

小高 猛司 (こだか たけし)

名城大学理工学部 教授

李 圭太 (り けいた)

日本工営(株)コンサルティング事業統括本部 技師長

キーワード：豪雨，地震，複合災害，河川堤防，斜面崩壊，盛土

1. はじめに

我々地盤工学者が対峙する地盤災害にとって，豪雨と地震は双極をなす自然外力であろう。しかし，その両者が，超過外力級の大きさで同時に発生する確率は極めて低いため，同時にそのような外力が作用する場合にも耐えうるような地盤構造物の設計や照査は必ずしも現実的ではない場合が多い。例えば，豪雨と地震の複合災害として筆頭に思い浮かぶ最悪のシナリオは，計画高水位に届くような洪水時に大地震が発生し，河川堤防が沈下して越流が始まり，やがて決壊して大水害が発生するというものである。しかしながら，現状の河川堤防のレベル 2 地震の耐震性照査¹⁾では，地震後の堤防天端高を計画高水位以上に保つことは求められておらず，平常時の最高水位（14 日間で発生する確率 1/10 の洪水位・高潮位）あるいは津波遡上高の高い方より高い位置で堤防天端が残ることを求めている。14 日間の根拠は，阪神大震災を含む近年の大規模地震における堤防変状の応急復旧期間の実績による²⁾。換言すれば，大地震発生から洪水発生までにタイムラグがあっても，それが数日の範囲であれば同時に発生するのと同様に近い物的な被害が発生する可能性が高い。あえて物的な被害と書いたのは，人的な被害はタイムラグの間の避難活動次第で大きく減らすことが可能なはずだからである。

堤防決壊は地震後の豪雨災害のわかりやすいシナリオの筆頭例であるが，その他の典型例としては山地での土砂災害が挙げられる。地震後の報道等で「地盤が緩んでいるため降雨時の土砂災害に注意して下さい」というアナウンスはもはや一般市民も聞き慣れたフレ

ーズであろう。この場合にも地震から豪雨までにタイムラグがあるが，それが一体どの程度の時間なのか見当がつかないのが実情である。タイムラグが大きければ，お互いの関連が不明瞭となり，複合的な災害と判断するのは難しくなる。

本稿では，「地震後の豪雨」と「豪雨後の地震」の 2 つに分けて，それぞれの複合地盤災害について関連する事例や調査研究を紹介し，本文の最後では複合地盤災害への備えについても触れたい。

2. 地震後の豪雨による複合地盤災害

2.1 福井地震後の豪雨による浸水被害

1948 年の福井地震は，地震と豪雨の複合災害の事例として有名である。内閣府中央防災会議「災害教訓の継承に関する専門調査会」の 1948 福井地震報告書³⁾（以下，「福井地震報告書」とする）が非常に詳しく，かつ大変興味深いので是非ご一読いただきたい。次段で要点を紹介する。

福井地震は，1948 年 6 月 28 日に発生した福井市北側の丸岡町（現坂井市丸岡町）付近の地表を震源とする M7.1 の直下型地震であり，3,791 人もの犠牲者を出した。震度 7 を設定する契機となった地震としても有名である。九頭竜川では福井平野部の堤防が全域にわたって被害を受け，堤防天端が最大で 4.5 m 沈下するなど，法面崩落，縦断亀裂が至るところで発生し，日野川，足羽川の堤防も同様に被災した。そのような状況の中，震災から 1 ヶ月も経たない 7 月 23 日から 25 日にかけて九頭竜川中流および足羽川上流域で最大 350 mm の降雨が発生し，25 日に九頭竜川左岸で堤防

が決壊し、福井市西北部を含む 1,900 ha が、最大水深 2.4 m の浸水被害を受け、浸水家屋 7,000 戸、被災人口 約 28,000 人にも及ぶ未曾有の水害が発生した。なお、福井平野を流れる全河川の下流域全体で 303 箇所の堤防決壊があった。さらに、山間地域においても、砂防施設や山林に多くの土砂災害をもたらした。なお、福井地震報告書³⁾では、九頭竜川の破堤が明治の河川改修による河道付け替えによる旧河道上に築堤された堤防で発生したことなども図や写真を用いて丁寧に解説されているなど、有益な情報が満載である。

福井地震報告書³⁾の秀逸さはそれに留まらない。1948 年福井地震が、2004 年福井豪雨時の足羽川左岸堤防決壊にも影響したとまで指摘している。2004 年の堤防決壊箇所は 56 年前の福井地震時に 1 m 程度の天端沈下が発生した地域にあり、その際の修復部分が 2004 年豪雨時の越流によって顕著に浸食されたことが決壊を早めた可能性があるとの指摘³⁾である。2004 年福井豪雨は筆者らが堤防被災調査を始める契機となった災害であり、地盤工学会が関西支部を主体とした調査団を組織して調査報告書⁴⁾をまとめている。足羽川下流域での堤防決壊については、主に福井県による調査に基づいているが、調査時の基礎資料として、過去の堤防被災履歴と併せて福井地震の被災記録についても検討が行われたとの記載が残っている。2004 年福井豪雨時の地盤調査によって、決壊箇所付近の堤体は砂質土主体であったがその上下流の越水区間の堤体は粘性土主体であったことがわかっており、そのため決壊箇所では越流による裏法浸食を相対的に受けやすかったことに加えて、堤体内浸透も間接的に決壊を早める要因であったことが、数値解析も用いて示されている⁴⁾。ただし、砂質土主体の堤体の存在自体が、福井地震時の被災と関連している可能性もあり、地震と豪雨の複合災害においては、数十年にわたる時間を経て繋がり得ることをこの事例は示唆している。

2.2 国総研河川研究室によるケーススタディ

現在の河川堤防の耐震性照査に用いる照査外水位は、14 日間で応急復旧が完了する想定で算出されていることはすでに述べたが、福井地震の事例では震災後およそ 1 ヶ月後の豪雨によって大水害が発生した。70 年

以上前のしかも戦後間もなくという時代背景であり、現代とは事情が全く違っていることは当然であるが、現代であっても条件次第では地震から豪雨までの間が空いていても大水害が発生する可能性はある。

国土技術政策総合研究所が東日本大震災における地震・津波の複合災害の教訓を機として実施したプロジェクト研究「超過外力と複合的自然災害に対する危機管理に関する研究」において、特に河川研究室が担当した「複合災害に対する危機管理に関する研究⁵⁾」は、地震から豪雨までの時間間隔を考える上で大変参考となる先駆的な研究であるため、ここで紹介したい。

具体的には、延長 60 km の直轄河川を念頭においたモデル河川を対象としたケーススタディであり、地震と洪水の規模と発生間隔を変化させ、堤内地の地震被害が河川構造物の復旧工事に与える影響を過去の実績等から設定した上で、復旧に要する日数やそれに応じた人的被害等との試算が行われている⁵⁾。地震規模に応じて堤内地での家屋等の被害の程度が大きく異なるために、堤防沈下の被害程度自体にはさほど差がないにも拘わらず、堤防の復旧工事に要する日数は最短 20 日、最長 37 日と大きな差が出る試算結果が示されている⁵⁾。さらに、その試算結果をベースとして、地震発生から洪水発生までの日数に応じた人的被害や、堤防の耐震化や二線堤の整備などの事前対策の効果についても試算されており⁵⁾、巨大地震後の洪水による複合災害の影響の甚大さを、机上の計算ながらもリアルに感じ取ることができる。

2.3 熊本地震後の豪雨による土砂災害分析

前節までは、河川堤防に関する事例について述べたが、本節では山地災害に目を向ける。地震後の豪雨は、急傾斜地や土石流が発生する危険性の高い山間部で要注意であることは当然であるが、実際にどれだけの期間を注意すべきかなどは不明瞭であり、それに関する調査結果も少ない。ここでは、2016 年熊本地震後の先駆的な検討⁶⁾について紹介したい。

熊本県南阿蘇村では、2016 年熊本地震の際に阿蘇大橋が大規模山地崩壊に伴い崩落するなどの土砂災害が多発したが、立野地区においては崩壊には至らなかった亀裂が多数残ったために、亀裂のメカニズム検証と

対策のために、熊本県からの依頼により「立野地区亀裂対策検討委員会(委員長:北園芳人)」が設置された。2年以上にわたるモニタリングの結果を用いて、地震による崩壊地について、その後の豪雨での崩壊の有無が調べられている。特に、2016年4月16日の本震発生後に、4月21～22日の連続雨量125.5 mmの降雨と6月18～25日にかけての連続雨量645.5 mmの豪雨による崩壊について詳細に検討されている。その結果、4月の降雨での崩壊箇所は地震による崩壊箇所と重複していること、6月豪雨時の崩壊箇所は地震での谷頭付近の崩壊に起因する土砂流失が主であり、地震で崩壊していない箇所も含まれていること、さらに、それらが2012年7月11～12日の連続雨量816.5 mmの既往最大降雨時には崩壊しなかった箇所であることが報告されている⁹⁾。さらに、崩壊のタイミングや状況による崩壊地の3タイプの危険度分類や、土砂災害を誘発する可能性のある亀裂が、山頂から見て緩傾斜から急傾斜に変わる遷急線の下部の急傾斜で発生している「谷落ち亀裂」であることなど、地震後の斜面防災を考える上で、多くの有用な知見が示されている⁹⁾。

3. 豪雨後の地震による複合地盤災害

3.1 新潟県中越地震の事例

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震(M6.8, 最大震度7)は、10月20日昼から21日未明にかけて四国、関西、関東と駆け抜けた台風23号の直後に発生した。特に兵庫県をはじめとする関西地方では台風通過後も短期間に大量の記録的な大雨が降り続き、直轄河川の円山川の堤防決壊をはじめ、多数のため池決壊、斜面崩壊など甚大な地盤災害が発生した⁷⁾。台風23号における新潟県の降水状況は、日降水量300 mmを超えた地点もある兵庫県に比べれば少ないものの、長岡で日降水量102 mmを記録した。ちなみに、長岡におけるこの日降水量は、10月の日降水量としては歴代1位の記録であり、通年通しても10位(第1位225 mm: 2004年7月豪雨)⁸⁾であり、いかに新潟地方においても台風23号が豪雨をもたらしていたかがわかる。

新潟県中越地震による地盤災害は、斜面崩壊、地すべり、鉄道や道路の盛土構造物の崩壊、宅地盛土の崩壊、各地での液状化など甚大な数に上る。新潟県中越

地震災害調査委員会報告書⁹⁾においては、ほぼすべての調査箇所において、地盤内の地下水位や湿潤状況が被害を拡大した可能性について言及されている。例えば、高町団地の宅地盛土の崩壊地の調査においては、地山と盛土の境界部に多量の湧水が観察されたことやもたれ擁壁背面の裏込め材が少なく排水不良であったことなどの状況証拠の積み上げにより、谷埋め盛土内の地下水位が高まっていた可能性が指摘されている¹⁰⁾。しかしながら、豪雨後の地震災害に共通して、地震前の豪雨がその後の地震時の地盤災害に具体的にどの程度の影響を及ぼしたのか、豪雨がなければ崩壊を免れたのかまでは明確ではないことが一番難しい問題である。とは言え、それを解明しようとする試みは行われている。新潟県中越地震においては、被災鉄道盛土の変状を題材にして、豪雨による影響の検証がなされている。具体的には、ニューマーク法を用いた被災鉄道盛土の地震時変位の数値解析において、排水機能の低下を想定した盛土内の地下水位の上昇を事前の浸透流解析によって加味しなければ、被災時の大きな変位を説明できないことが示されている¹¹⁾。

3.2 駿河湾を震源とする地震の事例

2009年8月11日駿河湾を震源とする地震(M6.6, 牧之原市で震度6弱)が発生し、東名高速道路の牧之原SA付近の上り線の盛土法面が40 mにわたり崩落した¹²⁾。この付近(菊川牧之原観測所)では、駿河湾に接近した台風9号により、前日の8月10日未明に68 mm(時間最大31.5 mm)の固まった降雨があり、地震が発生した8月11日5時7分までにも前日夜から累積15 mmの雨が降っていた⁸⁾。「東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会(委員長:太田秀樹)」は、「崩落の原因は盛土下部に使用された泥岩が長年の水の作用により強度低下するとともに、透水性が低下し、その結果、盛土内の地下水位が上昇し、今回の地震が誘因となり崩落が発生した」と結論づけている¹²⁾。地下水位の上昇のみによっても、地震のみでも崩壊することはおそらく無かったと思われ、豪雨後の地震による複合災害の典型例と考えてよい。

なお、本復旧対策工では集水ボーリング工などの多くの恒久的な排水対策が施された¹²⁾。

4. 複合地盤災害への備え

4.1 見えない地震被害と水害への備え

2004 年福井豪雨での足羽川の堤防決壊の要因の一つが、1948 年福井地震による被災である可能性が指摘されている³⁾ことは先に述べた。それほどの長期ではなく、もっと現実的に水害の要因となりうる時限爆弾的な地震被害の事例をここで紹介する。

2011 年 9 月 21 日東海地方に上陸して東北地方に抜けた台風 15 号は、宮城県の鳴瀬川流域に 20 日から 21 日深夜にかけて 300 mm 以上の豪雨をもたらした⁸⁾。鳴瀬川の青生江揚水機場では堤防裏法の法肩部に直径 2m 以上、深さ 5m ほどの巨大な陥没が発見された¹³⁾。また、吉田川の不来内排水機場においても数カ所の陥没が出水後の点検で確認された¹⁴⁾。いずれの排水機場でも、樋管周辺の堤防に緩み領域が発生するなどの劣化が長期にわたり進行していたと思われるが、およそ半年前の 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震によって、堤体や基礎地盤が液状化したことが樋管周辺堤防の劣化を加速したと考えられる。9 月 21 日の出水では、鳴瀬川および吉田川においては、それぞれ避難判断水位および氾濫危険水位を超過しており、非常に危険な状況であった。実際に大きな水害が発生したわけではないが、紙一重に近い状況であったと言える。この事例で特に注意したいのは、震災後の点検ではいずれの樋管も異常が確認できていなかったことである。ちなみに青生江揚水機場は、震災時に鳴瀬川で大きな変状が発生した下中ノ目地区の上流隣接部であり、地震による影響は少なくなかったと思われる。

震災時には、堤防土堤のみならず、多数の樋門・樋管などの河川構造物が被害を受けた。抜け上がりのように目に見える形で変状が確認できていれば良かったが、構造物周りの緩みのように簡単には発見できない目に見えない被害の把握は容易ではなかったことは想像に難くない。ここで紹介した鳴瀬川や吉田川の樋管は特異ではなく、類似の条件（許可構造物、老朽化の進行、構造条件・支持条件が「柔構造物設計の手引き¹⁵⁾」に不適合等）にある樋門・樋管は日本全国に多数現存する。特に、地盤特性がこれらの樋管に類似している場合には、構造物周辺堤防に同様な劣化が進行

しているおそれがあり、大きな地震において、液状化・過剰間隙水圧の発生の影響等の構造物周辺堤防の劣化促進の可能性があることに特に注意すべきである。

筆者らは、国土交通省平成 24 年度河川砂防技術研究開発公募・河川技術分野「地震・洪水およびその複合災害に対する統合型河川堤防評価技術の開発（研究代表者：小高猛司）¹⁶⁾」において、樋門・樋管などの河川構造物周りの緩み領域を考慮した堤防の危険度評価について検討した中で、経年的に進行する河川構造物や周辺堤防の劣化を止めることは容易ではないことから、可能な事前対策（継手部の止水板の設置等）や事後対策（応急対策工の準備：必要な資機材の備蓄等）の検討・実施が必要であることを提言するとともに、模型実験ならびに数値解析を通して、樋門・樋管の日常目視点検などに活用するための 4 つの危険度レベルで評価する危険度評価指標の提案を行った¹⁷⁾。目に見えないところで劣化が進行する河川構造物の維持管理は、複合災害に備える上で非常に重要である。

なお、前段で紹介した技術研究開発では、本特集号の野田、吉川の報文¹⁸⁾の解析手法を用いた統合型河川堤防評価技術の開発も行われた¹⁷⁾ことを付記する。

4.2 見えない豪雨の影響と地震への備え

3 章で紹介した豪雨後の地震による複合地盤災害は、地盤内の地下水位や飽和度の上昇という直接は見えない地盤の状態変化に起因する。特に、豪雨後の地震による盛土崩壊の事例については、3.1 で紹介した高町団地の事例においても、3.2 の東名高速道路の盛土の事例においても、経年による盛土の排水機能の低下により、豪雨による水位上昇の可能性が指摘されていた。盛土の経年劣化による機能低下は、複合災害のみならず、あらゆる災害に備えて注意すべき事項であり、長期劣化の概念を導入してライフサイクルコストを考慮して盛土を維持管理することの重要性が指摘されて¹⁹⁾からすでに久しい。すなわち、排水機能の維持を含めて、豪雨時においても盛土内の地下水位が上がらないように保つという日常の維持管理が最も重要であり、豪雨時のみならず、地震時、さらにはそれらが複合する場合においても、その威力が発揮される。河川堤防においては、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に、液状化

による堤体の変状被害が発生した地区において、浸透対策である裏法尻ドレーン工が設置された区間の堤防のみが無被災だったという事例もある²⁰⁾。当時の堤体内の浸潤状況や効果のメカニズムは明らかになっていないが、地盤内浸透水を抑制する対策が地震時にプラスの効果を生む一例と考えてよいだろう。

最後に「備え」の好例として、中日本高速道路(株)名古屋支社の取組を紹介して終わりたい。3.2で紹介した東名高速道路盛土の崩壊を契機とし、管内の全盛土から崩壊した盛土と類似の性状を有する盛土が牧之原類似盛土と称して抽出された。筆頭著者も参画する「名古屋支社 のり面防災対策検討会(委員長:八嶋 厚)」において、地盤調査と土質試験、さらに地下水上昇を考慮した耐震性照査結果を詳細に検討し、一定の基準を満たさなかった7箇所の盛土については適切な対策工を施すとともに、モニタリングの強化も行った²¹⁾。また、2019年の大雨による新名神高速道路の切土法面の崩壊を機に、やはり類似法面の抽出・分類・分析を行い、必要に応じて地下水上昇を抑える水抜き対策を施すことを進めている²²⁾。直接目に見えない地盤内の状態を正確に把握することは容易ではないが、盛土・切土を問わず地盤内の浸潤状況の制御を含めて日常の維持管理をしっかりと続けることが、複合地盤災害に備えるためにも極めて重要である。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局治水課:河川構造物の耐震性能照査指針・解説Ⅰ. 共通編一, 2012, 入手先<https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/wf_environment/structure/index3.html> (参照 2022.1.1)
- 2) (財)国土技術研究センター:河川構造物の耐震性能照査において考慮する河川における平常時の最高水位の算定の手引き(案), 10p., 2007, 入手先<<https://www.jice.or.jp/tech/material/detail/7>> (参照 2022.1.1)
- 3) 内閣府中央防災会議「災害教訓の継承に関する専門調査会」第4期報告書:1948 福井地震報告書, 第8章福井地震と豪雨災害, pp.206-216, 2011, 入手先<<http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyokunnokeshou/index.html>> (参照 2022.1.1)
- 4) (社)地盤工学会平成16年7月福井豪雨による地盤災害の緊急調査団:平成16年7月福井豪雨による地盤災害調査報告書, 第2章足羽川堤防の破壊, pp.15-37, 2005.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所:超過外力と複合的自然災害に対する危機管理に関する研究, 第3章複合災害に対する危機管理に関する研究, 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告, No.64, pp.272-295, 2020, 入手先<<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoku/kpr/pm0064.htm>> (参照 2022.1.1)
- 6) 立野地区亀裂対策検討委員会:立野地区亀裂対策検討委員会報告書, 5. 熊本地震以降の降雨と土砂災害(亀裂の変状)の関連性, pp.44-52, 2019, 入手先<<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/93/1875.html>> (参照 2022.1.1)
- 7) (社)地盤工学会平成16年台風23号関西圏地盤災害緊急調査団:平成16年台風23号による関西圏地盤災害調査報告書, 183p., 2005.
- 8) 気象庁, 入手先<<https://www.jma.go.jp/>> (参照 2021.1.1)
- 9) (社)地盤工学会新潟県中越地震災害調査委員会:2004年新潟県中越地震災害調査委員会報告書, 528p., 2007.
- 10) (社)地盤工学会新潟県中越地震災害調査委員会:2004年新潟県中越地震災害調査委員会報告書, 7.4 高町団地, pp.248-255, 2007.
- 11) (社)地盤工学会新潟県中越地震災害調査委員会:2004年新潟県中越地震災害調査委員会報告書, 6.3.4 被災鉄道盛土の検証解析, pp.220-224, 2007.
- 12) 石田誠幸・岩吹啓史:駿河湾沖地震による東名高速道路の盛土の被害と復旧について(EPSを用いた応急復旧工事), ジオシンセティック技術情報誌, Vol.26, No.1, pp.9-14, 2010, 入手先<<http://www.jcigs.org/>> (参照 2022.1.1)
- 13) 国土交通省東北地方整備局:台風15号概要及び樋管周辺の変状, 第4回北上川等堤防復旧技術検討会, 2011, 入手先<<http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/taiheiyouokijishin/n/kenntoukai/shiryoku4.htm>> (参照 2022.1.1)
- 14) 大沼敏治・千葉孝寿:堤防開削調査から見た堤防陥没被災原因の考察について, 平成25年度東北地方整備局管内業務発表会, 2013, 入手先<<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/happyoukai/H25/1-21.pdf>> (参照 2022.1.1)
- 15) (財)国土技術研究センター:柔構造樋門設計の手引き, 1998.
- 16) 国土交通省:河川砂防技術研究開発公募河川・水防災技術分野技術研究開発テーマ一覧(5年度経過分), 入手先<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/kasenmizubousai/theme_past.html> (参照 2021.1.1)
- 17) 名城大学:地震・洪水およびその複合災害に対する統合型河川堤防評価技術の開発(平成24年度河川砂防技術研究開発公募河川技術分野)平成26年度研究報告書, 122p., 2015.
- 18) 野田利弘・吉川高広:空気～水～土連成有限変形解析による河川堤防の地震と外水位の複合外力下における力学挙動の評価, 地盤工学会誌, Vol.70, No.3, 2022.
- 19) 山本 剛・中井卓巳・丸木義文・小高猛司・岸田 潔・大西有三:長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.21-33, 2009.
- 20) (公社)地盤工学会:河川堤防の調査・検討から維持管理まで, 第6章地震に対する対策工とモニタリング, 6.1.5 耐震対策工以外の効果, pp.121-122, 2020.
- 21) 名古屋高速道路(株)名古屋支社・中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株):平成25年度名古屋支社のり面防災対策検討会報告書, 2014.
- 22) 名古屋高速道路(株)名古屋支社・中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株):令和2年度名古屋支社のり面防災対策検討会報告書, 2021.

(原稿受理 2022.1.11)