

堤防直下粘性土基礎地盤の堤防変状に関する影響調査事例

RELATION BETWEEN THE SHAKING AT THE EARTHQUAKE AND
THE LEAKAGE OF WATER IN THE EMBANKMENT CONSTRUCTED
BY THE COHESIVE SOIL OF FORMER RIVER COURSE

杉本利英¹・増村通宏²・酒井英男³

Toshihide Sugimoto, Michihiro Masumura, Hideo SAKAI

- | | |
|------------------|--|
| ¹ 正会員 | 国土交通省北陸地方整備局（〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1-5-10） |
| ² 正会員 | ㈱アイ・エヌ・エー・事業本部 地質部（〒114-0003 東京都北区豊島8-4-1） |
| ³ 工博 | 富山大学大学院 理工学研究部（〒930-8555 富山県富山市五福3190） |

At the Chuetsu earthquake, the leakage water was found in the embankment along the Uono-river in Niigata Prefecture. The embankment is immediately above the cohesive soil at the former river. After the earthquake, we investigated the ground and embankment condition by borings, trenchings, the density examination and the water permeability test. In the process of the survey, we found the slight leak of water from the crack which seems to be generated with the swelling of the embankment. We consider that the crack and/or the swelling of the embankment were caused by the two factors, i.e. the cohesive soil under the embankment and the earthquake-induced vibration. The rainwater didn't infiltrate the ground because of the cohesive soil under the embankment, and then the pore water pressure increased in the embankment. As the Chuetsu earthquake occurred at this condition, the excess pore water pressure deformed the embankment. We conclude that cohesive soil at the former river under the embankment is the important factor for the safety of the embankment at the earthquake.

Key Words : cohesive soil at the former river, river embankment, water leak, earthquake

1. はじめに

平成16年10月23日、新潟県中越地方の深さ約13kmを震源とするマグニチュード6.8の新潟県中越地震の発生により、震源から約7km離れた小千谷地先では計測震度6.7、最大加速度1,501.9galを観測した。

中越地震による河川での主な被害として、堤防の亀裂や法面崩壊、沈下、護岸、堰、水門等の施設の損傷、河川の埋塞があった。被害箇所は、北は大河津分水路、南は十日町市や南魚沼市までの地域にわたり、185箇所（直轄）に及んだ。震源地に近い小千谷市より上流の魚野川での被害件数は58箇所と多いものの、その程度については堤防亀裂が45箇所であり比較的軽微で、地震発生直後に亀裂部を切り返して盛土で復旧されている。図-1に中越地震の震源及び河川被害箇所位置を示している。今回、中越地震時に堤防天端亀裂が発生し、その後に復旧した魚野川左岸徳田地区の堤防において、地震直後には、被災を認識していなかった堤内地側の法尻部より漏水を発見した。

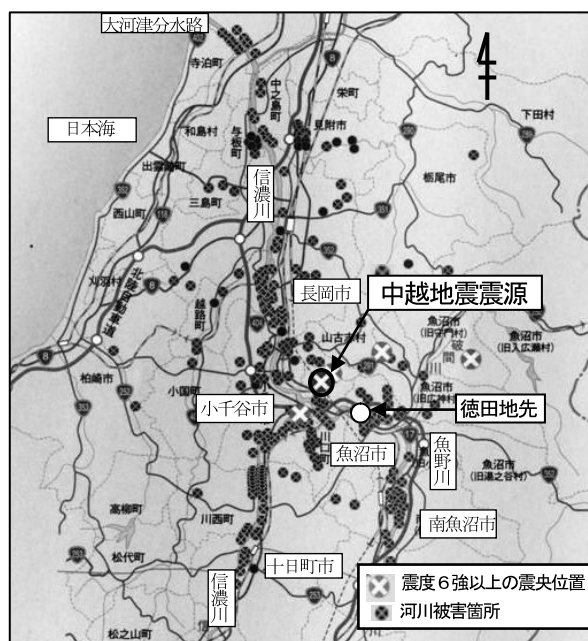


図-1 中越地震の震源及び河川被害箇所位置

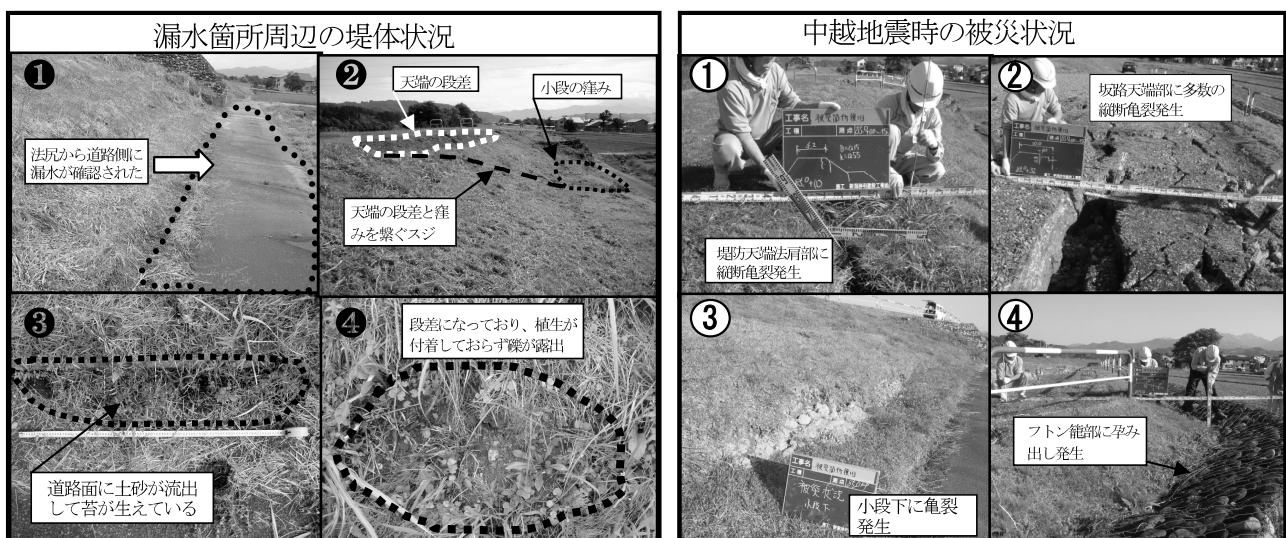
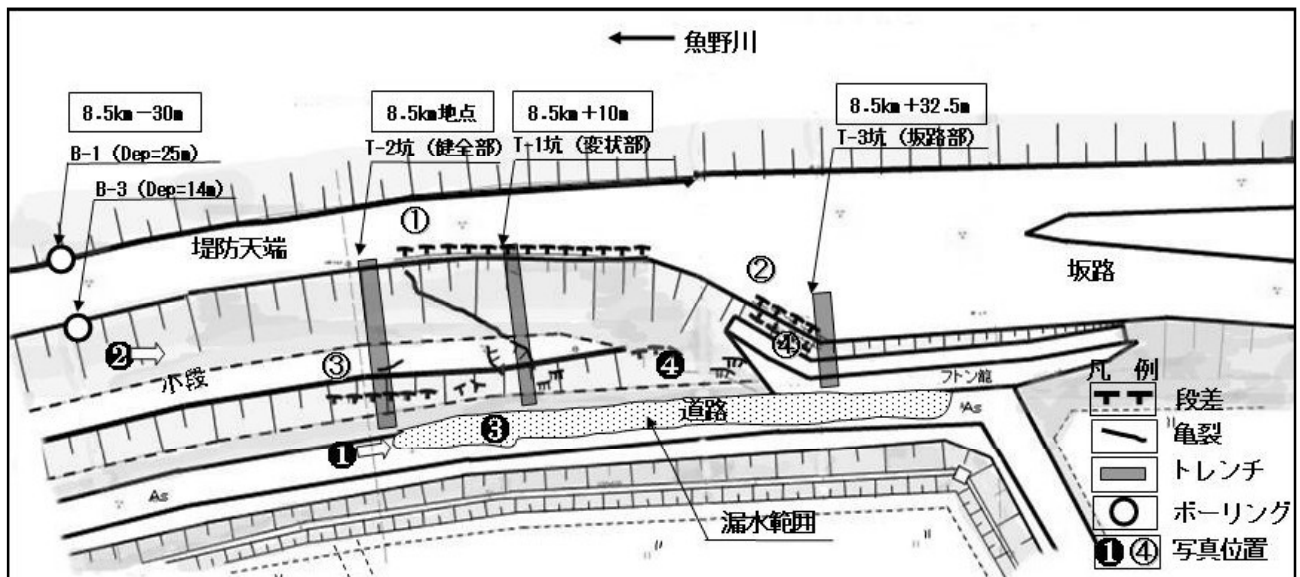


図-2 漏水箇所周辺状況及び中越地震時被災状況

既往地形や地質文献の調査、ボーリング、トレンチ、原位置試験による調査を実施した結果、漏水は中越地震時に生じた小規模な堤体変状箇所由来し、堤体直下の旧河道堆積物が堤体変状に大きな影響を及ぼしている可能性が考えられた。本稿では、堤体直下の旧河床堆積物と地震、堤体変状の関連性について検討した結果を報告する。

2. 漏水状況と中越地震時の被災状況

(1) 堤防の概要と漏水状況

漏水を確認した箇所は、信濃川との合流点より8.5km上流新潟県魚沼市徳田地先の魚野川左岸堤防延長約40m区間である。

漏水箇所周辺の堤防は、堤高4m、天端幅3mで法勾配が2割、堤内側に高さ2m、幅2.5mの小段がある。堤内側堤脚部には管理用の舗装道路があり、法尻部には堤脚保護工（道路縁石）が施されているが、堤脚排水路は設置され

ていない。また漏水箇所の約25m上流側には、坂路（幅員3m）が設置されている。

堤防堤脚部からの漏水は、平成19年7月に最初に確認された（写真①）。漏水は、堤内側法尻部の堤脚保護工付近で発生しており、道路舗装面に若干土砂が流出し苔が生えていた（写真③）。

漏水確認の前後での堤防巡視記録には、顕著な漏水の記録はないものの、特定箇所での水の染みだしや道路の乾きが遅いという漏水を示唆する現象が確認された。また、堤外側では漏水は確認されていない。

一方、漏水と降雨、魚野川の水位の記録から、漏水は降雨時に生じていること、漏水確認時に、魚野川の水위가堤内堤脚部標高まで上昇していないことがわかった。

(2) 中越地震時の被災状況

漏水箇所の8.5km地点周辺における地震の被災状況は、堤防天端の堤内側法尻での開口幅15cm、深さ55cm、長さ20m程の縦断亀裂および天端から小段に向かい連続する小規模な亀裂発生であった（写真①）。また、上流側坂

路の天端部では、開口幅30cm、深さ80cm、長さ15m程の亀裂が多数発生し、堤内側の布団カゴ部では孕みだしが見られた（写真②、④）。①、②、④の被災箇所については、切り返し盛土の復旧工事により機能回復が施されている。

この他には、漏水箇所近傍での堤体変状は報告されていない。図-2に、漏水箇所周辺の状況と中越地震時での被災状況を示す。

3. 地形と地質の概要

(1) 魚野川周辺の地形

魚野川周辺の地形は、魚野川と破間川を境に東西で異なる傾向を示し、東側が標高1,500～2,000mの急峻な山岳地域（越後山脈）であるのに対し、西側はなだらかな魚沼丘陵があり、その間は盆地上の低地からなっている。また、西側の丘陵の稜線や盆地の形状は、北北東-南南西方向の顕著な方向性を示している。

魚野川は、新発田-小出構造線の走る低地帯（六日町盆地）を北流し、小出付近で同じく新発田-小出構造線に沿って南北に流れる破間川と合流して流路を西に変え、約40～30万年前から褶曲しながら隆起を続けている魚沼丘陵を浸食し横断して流れる。

徳田地先は、この魚沼丘陵に位置しており、この周辺では、隆起による段丘面が発達している。

(2) 魚野川周辺の地質

魚野川流域周辺の地質は、破間川と魚野川を結ぶ直線的な新発田-小出構造線を境に、東側の越後山脈が古生代-中生代の深成岩類と変成岩類、西側の丘陵地帯が新生代新第三紀中新世-第四紀更新世の堆積岩類と火山岩・火砕岩からなっている。また、魚野川沿いには、新生代第四紀完新世の砂礫や泥といった河川の堆積物が分布している。

(3) 徳田地先周辺の地形

「治水地形分類図」によれば、徳田地先周辺は氾濫平野に区分される。また、氾濫平野上には現在の地形でも識別できる旧河道が認められ、漏水が確認された8.5km地点は旧河道の端部に位置していることから、徳田地先は、かつて魚野川が蛇行を繰り返し、洪水のたびに三日月湖や後背湿地を形成していたものと考えられる。図-3に昭和47年撮影の空中写真を示す。

4. 漏水箇所の土質と堤体変状の状況

現地踏査により、8.5km付近から上流側小段部では窪み（約幅2m、長さ4m）や上下流方向の亀裂（幅10cm、深さ10cm、長さ70cm程度）が認められ、更に、小段部の堤

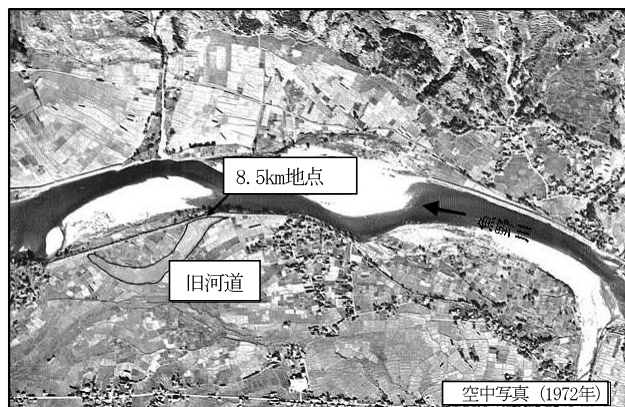


図-3 空中写真（昭和47年撮影）

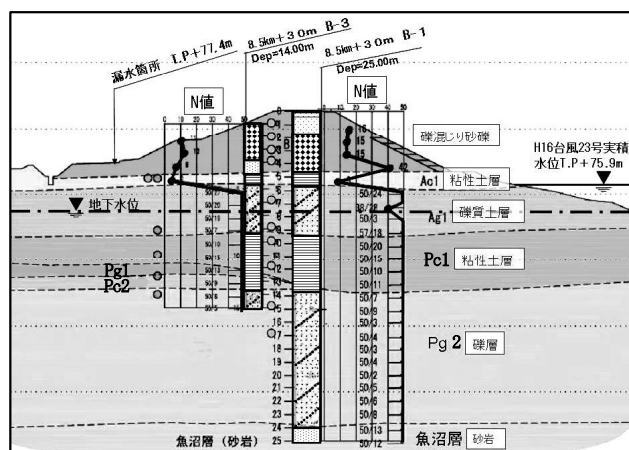


図-4 8.5km-30m地点ボーリング柱状図

内側への孕み出しなどの堤体の変状が認められた（写真②）。

この区間は、漏水範囲とほぼ一致しており、漏水と堤体の変状は密接に関連している可能性が考えられた。そこで、堤体と基礎地盤の状況を把握する為のボーリングとトレンチ調査を実施した。

(1) ボーリング調査の結果

ボーリング調査は、8.5km-30m地点において、堤防天端部（L=25m）及び裏法部（L=14m）で実施した。

漏水箇所の堤体は、N値8～16の黄土色の礫混じり砂礫からなり、基礎地盤は、粘性土と砂質土からなる。

粘性土は、N値0で青灰色を呈し、天端より4～5mの道路盤より約0.4mの深度にあり、天端から6～9mの粘性土直下にはN値38～50の礫混じり土砂が連続し、9～14m付近には再び暗灰色のN値50以上の粘性土層が分布する。孔内水位は、天端から深さ約7.5mにあり堤体直下の粘性土層よりも深部に位置している。

ボーリング調査で確認された深度10m付近の粘性土層には植物片が認められることから古い時代の後背湿地の痕跡であり、また深度4～5mの堤体直下の粘性土は、旧河道の痕跡であると推察された。図-4に8.5km-30m地点のボーリング柱状図と断面図を示す。

(2) トレンチ調査結果

a) トレンチ坑壁観察結果

堤体の変形が確認された漏水箇所8.5km地点周辺の内部状況を直接確認する目的で、漏水部T-1坑、健全部T-2坑、中越地震時復旧工事箇所部T-3坑（坂路部）の計3箇所の堤体裏法部において、幅約1.5m、深さ約1.5m、延長約10mのトレンチ調査を実施した。図-5に調査結果を示す。

①T-1坑（8.5km+10m）漏水部

堤体の天端裏肩付近は良く締まっており、明瞭な亀裂や緩みを示唆する現象は確認されなかったが、小段付近の堤体には顕著な亀裂が複数認められた。同地域は、全体的に緩んでおり、トレンチ掘削後にも水の染み出しがあり、坑底に水が貯まっていた。

②T-2坑（8.5km）健全部

堤体天端付近に微小な亀裂を認めたが、その他小段も含め堤体には亀裂や緩みはなかった。

小段付近では、水の染み出しはなかったものの、道路盤より深度0.3m付近から水の染み出しがあり、坑底に貯まっていた。

③T-3坑（8.5km+32.5m）地震時復旧坂路部

黄土色シルト混じり砂礫の堤体本体と暗灰色砂礫の坂路盛土の他に、赤褐色シルト混じり砂の中越地震被災亀裂補修充填箇所があったが、いずれの土質にも亀裂や緩みは確認されなかった。しかし、坂路盛土や亀裂充填材料は、シルト分が少ないため締まりが悪く、坑壁は崩れやすい傾向が認められた。

b) 原位置試験結果

堤体は、締め固めた土質材料からなり、変状の程度をトレンチ坑壁観察だけで判断するのは難しかった。そこで堤体のゆるみや土質性状を把握する為、各トレンチの堤体天端部、小段部、坂路部の代表的土質性状部を選定し、坑壁や坑底において、現場密度と透水試験、土壌硬度計測定の実位置試験を実施した。

①現場密度試験および現場透水試験の結果

現場密度試験は水置換法、現場透水試験は非定常法で実施した。試験の結果、堤体での透水係数のオーダーは、小段部が 10^{-1} cm/sec、天端部が 10^{-3} cm/sec、坂路盛土が 10^{-2} cm/secと得られた。

密度については、堤体の小段部では 2.3g/cm^3 を超えるものの、天端部では約 1.9g/cm^3 と場所により差が認められた。この結果は、肉眼で観察された性状と概ね一致し、堤体の天端部は小段部に比べて、上載荷重が小さいため締まり程度が低く、地震の影響があると考えられた。

また、亀裂が認められたT-1-1（小段弛み部）の透水性は、T-2-1（小段健全部）に比べやや高かった。この差は、小段の弛みの影響と推察された。

坂路の盛土材は、シルト分の少ない砂礫材であり、密度は大きく締まっているものの、透水性は大きかった。

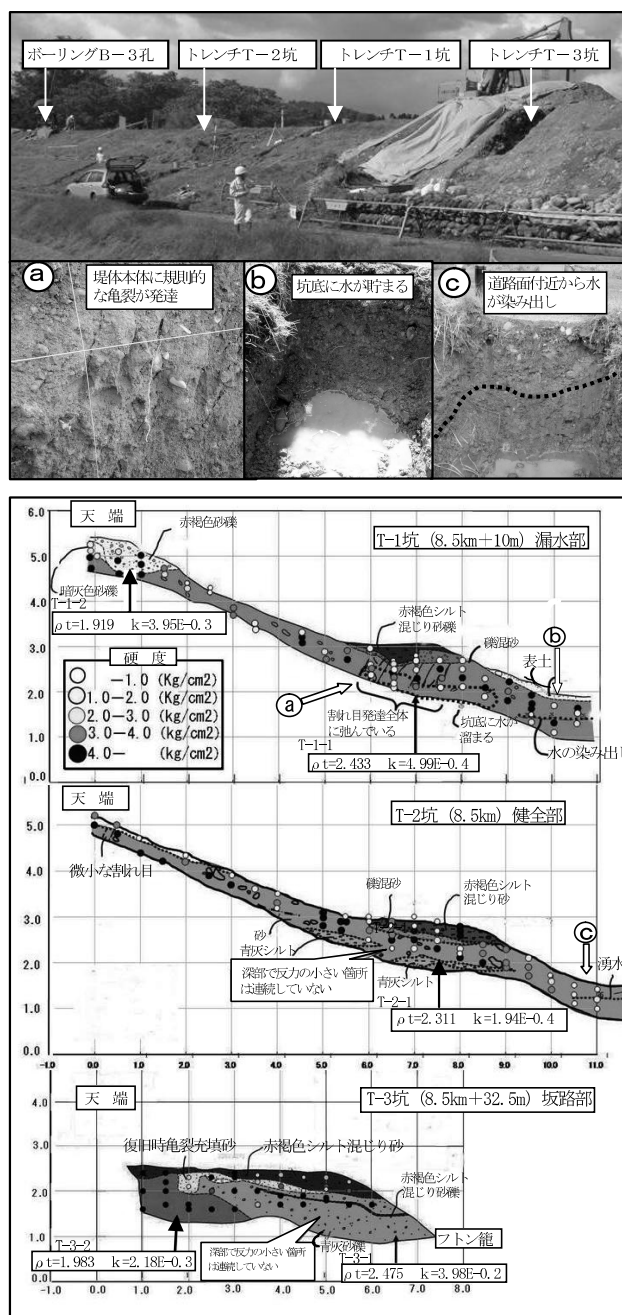


図-5 トレンチ調査結果

②土壌硬度計試験

堤体の土壌の硬軟や締り具合等を判別し、弛みの程度を把握するために、土壌硬度計により圧入深と土壌の反力を横断方向に0.5mピッチで測定を行った。

調査の結果、以下の点が判明した。

堤体天端付近に微小な亀裂が確認されたが、その他小段も含め堤体には、亀裂や緩みはなかった。

堤体本体を構成するシルト混じり砂礫は、亀裂が生じるほど密実であるため、土質自体の硬度は比較的高い傾向にあった。T-1坑では亀裂が生じている小段のトレンチ底部付近で低い値を示す箇所が連続して観察された。また、道路盤の水の染み出し部でも周辺に比べ低い硬度を示した。

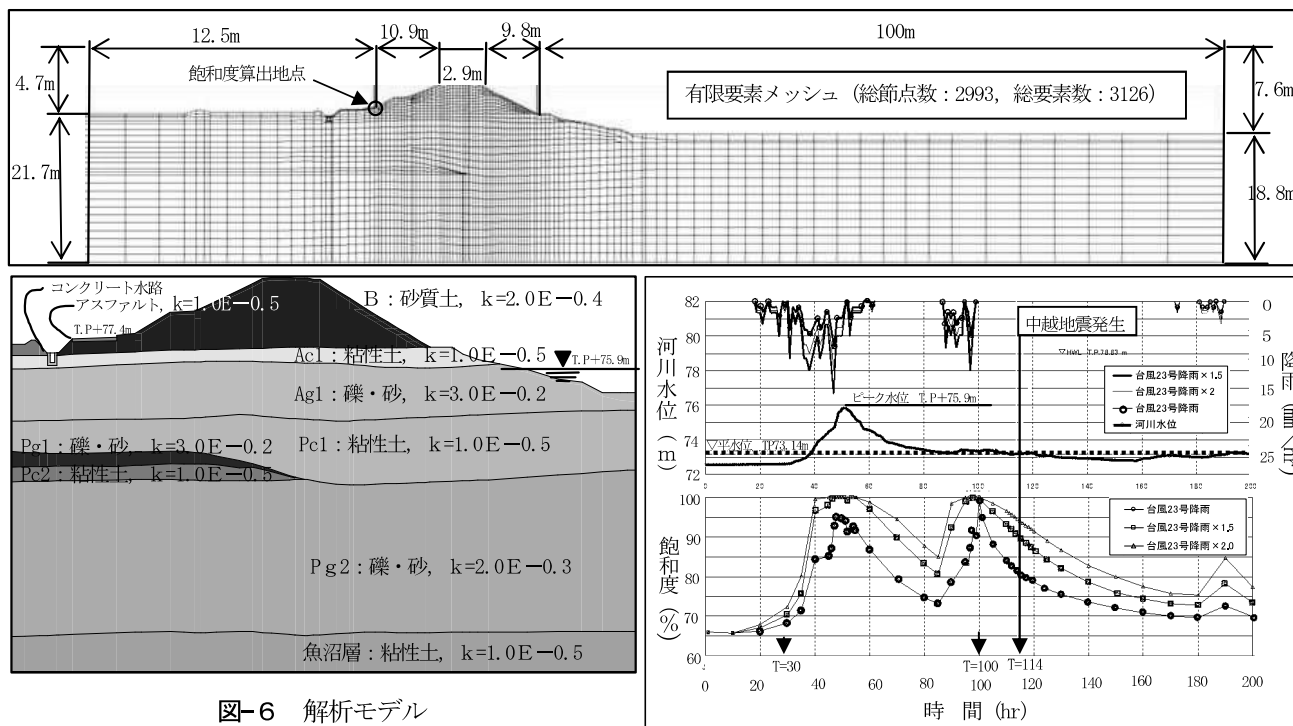


図-6 解析モデル

これに対し、堤体の孕み出しが殆んど認められないT-2 坑では、本体の土質硬度は、全体に高い値を示した。中越地震時に上流側天端で亀裂などが生じたT-3 坑では、堤体本体、坂路設置時の盛土はいずれも高い値を示すが、中越地震復興時に亀裂を充填した砂や、赤褐色シルト混じり砂部の値は低かった。

5. 漏水機構の検討

(1) 漏水の原因

現地調査の結果、下流側、8.5km地点のT-2坑では小段部に亀裂が認められず、堤体の孕み出しが8.5km付近より上流側であることから、8.5km+10m付近のT-1坑で確認した小段部の亀裂部が漏水発生箇所と推察される。この範囲は、漏水を確認できる範囲が8.5km付近よりも上流側であるとの現地状況と一致する。

(2) 堤体変状の発生機構

a) 素因

堤体変状箇所(8.5km+10m付近)と下流側の漏水が確認されない箇所では、土質構成と性状、堤体形状に大きな差は認められない。したがって、変状は、8.5km+10mに固有の以下の素因があると考察した。

①旧河道地形：8.5km地点周辺は、空中写真及びボーリング調査から旧河道の痕跡が確認できたことから、基礎地盤は周辺よりやや低く、軟弱で水の集まりやすい場所であると考えられる。

②堤体及び基礎地盤：堤体は、礫混じり砂礫($D_{50}=7.9\text{mm}$, $D_{10}=0.12\text{mm}$)からなり透水性が高い($k=2.0\text{E}-04$)。

一方、基礎地盤に着目すると、堤体直下には、厚さ約1mの粘性土層($k=1.0\text{E}-0.5$)が連続している。この堤

体直下の粘性土層が難透水層の役割をして、堤体内を浸透した雨水が堤体内に残留し易い構造となっている。ボーリング孔内での地下水位は、基礎地盤粘土層の下位にあることを確認している。

③堤体の形状：変状が生じた8.5km+10m付近の直上流側には坂路があり、坂路から変状箇所に向かって傾斜する構造で光ケーブル管路が敷設され砂で埋戻されている。坂路は、堤体と異なる粗粒な砂礫からなり透水性も高い(現場透水試験： $k=2.18\text{E}-0.3\sim 3.98\text{E}-0.2$) (図-2)。したがって、変状箇所には直接の降雨の他に上流側坂路から光管路伝いに雨水が浸透しやすい構造にある。

b) 誘因

8.5km+10m付近の堤体変状と中越地震との関係は明確ではないが、中越地震時に周辺の堤防で亀裂などの変状が多く発生していることから、中越地震により変状が生じた可能性が高い。

④中越地震震度：中越地震時に魚野川堤防に作用した地震動は、徳田地先近傍の小千谷地震動観測地点において最大加速度1,501gal・卓越周期0.7秒の強い地震動が観測され、震度5弱以上の余震が本震から2時間以内に10回も発生している。

⑤中越地震時の降雨と河川水位状況：中越地震前の気象状況をみると、地震直前に台風23号の影響で118mm/4日(10/19~22、堀之内雨量観測所)の降雨があり、降雨により堤体は飽和に近い状態であったと推定できる。魚野川徳田地先の河川ピーク推定水位は、T.P+75.9mで堤内地盤高T.P+77.4mまで水位は達していない。

以上から、堤体の亀裂と孕み出しの要因については、堤体直下の基礎地盤が良く締まった粘性土層であり雨水が地盤内に浸透しない構造・性状であったこと、そこへ中越地震前の豪雨で堤体内の間隙水圧が高まり、地震時

の震動が加わって生じたものと推察された。

堤体変状のうち、天端と天端周辺の亀裂は中越地震のような強い地震動のみでも起こりうるが、堤体の孕み出しは基礎地盤または堤体の強度低下が関連していると推察される。堤体や基礎地盤の強度低下は、間隙水圧の上昇が考えられ、中越地震直前の豪雨や変状箇所の雨水を集め地下水位が上昇しやすい構造を勘案すると、地震時に堤体内の過剰間隙水圧上昇に伴う有効応力低下による軟化現象が発生した可能性が高いと考えられる。

6. 堤体飽和度状況の再現

中越地震時の堤体内の飽和度を検証するため、H16年10月台風23号降雨時の当該地点における推定実績水位（堀之内水位観測実績流量換算）と降雨（堀之内雨量観測所実績時間雨量）を外力条件として浸透流解析を実施した。シミュレーションは、台風23号実績降雨の他に、旧河道による水の集まり易い地形であること、上流側坂路や光管路設置構造などの影響で降雨が集まりやすいことも考慮し、実績降雨の1.5倍と2倍の降雨が変状箇所に集中したと仮定したケースについても検討を行った。

(1) 検討条件

- ・解析手法：非定常条件2次元飽和—不飽和浸透流解析
- ・解析モデル：図-6に示す。
- ・外力条件：

- ①台風23号実績降雨+8k500 推定実績水位
- ②台風23号実績降雨×1.5倍+8k500 推定実績水位
- ③台風23号実績降雨×2倍+8k500 推定実績水位

(2) 検討結果

堤体直下に難透水の粘土層があり、2回目の降雨終了時には、堤体内と基礎地盤内の粘土層下部に二層構造の地下水が発生し堤体小段部の飽和度もほぼ100%と高い状況となった。また、降雨終了から14時間後の中越地震発生時においても堤体小段部の飽和度は82～95%と高い状況であることが明らかとなった（表-1、図-7）。

以上から、中越地震時に変状箇所の飽和度は、一定の条件を満たせば100%に近い値になると判明した。従って変状箇所が8.5km+10m付近に集中した原因は、堤体と基礎地盤の構造および性状により多量の雨水の浸透で堤体内の飽和度が上昇した可能性が高いと結論する。

7. おわりに

旧河道の堆積物は、透水性の高い砂質土や礫質土で構成される場合も、埋積粘性土からなる場合でも、浸透に対して相対的危険性が高いため、堤防の詳細点検において特に注意すべき地質要素として挙げられる。

徳田地先で生じた堤体変状の主因は、素因として堤体直下の基礎地盤に難透水層が連続し、堤脚排水施設が未設置で、台風の降雨により堤体内に浸透した雨水が排水し難い構造になっていたことが考えられる。そして誘因として、台風による多量の降雨とその降雨で堤体の間隙

表-1 堤体飽和度シミュレーション結果

	台風23号降雨前	降雨終了直後	地震発生直後
	(T=0hr)	(T=100hr)	(T=114hr)
台風23号実績降雨	66%	99%	82%
台風23号実績降雨×1.5倍	66%	100%	90%
台風23号実績降雨×2.0倍	66%	100%	95%

※ 堤体小段部地点で算出

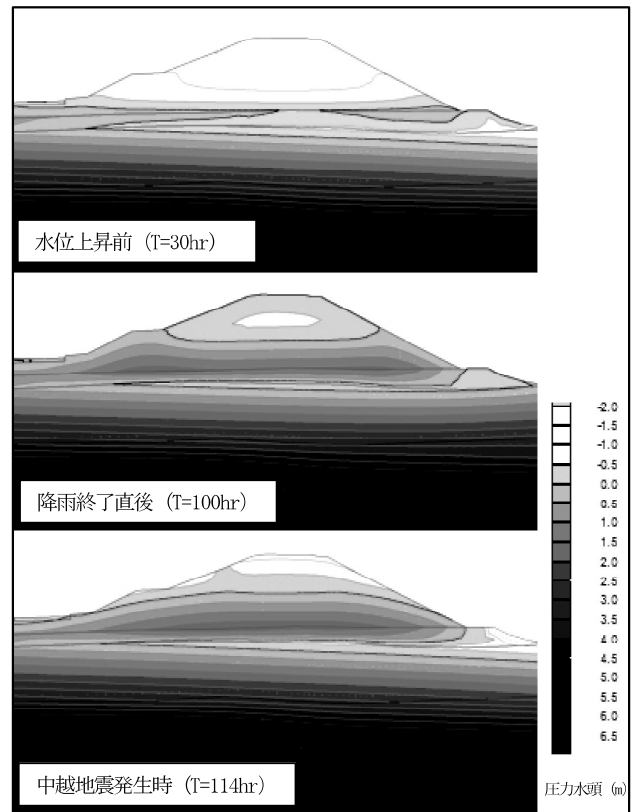


図-7 浸透流解析結果（外力条件③）

水圧が高まっていたところに中越地震が発生したことが挙げられ、この地震により堤体の変状したと考えられる。

本報により、旧河道堆積物地域での地震による被害について、堤防の安全性への具体的な影響が明らかになった。

徳田地先の堤体変状は、台風の降雨と中越地震が重なって発生した稀な事例であるが、素因である旧河道堆積物の粘性土層が堤防基礎となっている箇所は全国に多数存在する。その状況は、堤体内の間隙水圧上昇に対し、治水上の堤体安定面で問題となるので、間隙水圧の上昇を防ぐための早急な対応が必要である。

また、災害の復旧に際しては、規模の大きな変状はすぐに発見されるので早急に対策が実施されるものの、小規模な変状は見落とされる可能性がある。応急対策が実施された後で、小規模な変状等が見落とされていないかの検証も必要である。

参考文献

- 1) 信濃川河川事務所：信濃川堤防詳細調査業務委託（小出地区外4地先）平成20年3月

（2010. 4. 8受付）