

6. ダム

本章では、地震発生直後に各ダムの管理者によって行われた臨時点検の結果、変状が報告されたダムを対象に国総研と土研が安全性の確認等を目的に共同で実施した現地調査結果について、同調査の結果を受けてダム管理者により実施された対応とともに概要を報告する。また、ダム管理者から提供を受けた震源周辺のダムでの地震動観測記録についてもあわせて報告する。

6.1 概要

河川法の適用を受けるダムでは、ダム基礎部に設置された地震計で 25gal 以上または最寄りの気象庁震度観測点で震度 4 以上の揺れが観測された場合、各ダムの管理者が臨時点検¹⁾を行うこととされている。一連の熊本地震では、228 箇所²⁾のダム等について表-6.1²⁾に示される回数の臨時点検が実施された。臨時点検は、目視による外観等の点検を行う一次点検及び目視による各部の詳細点検及び安全管理用各種観測データの確認等を行う二次点検からなっている。なお、最大加速度が 80gal 未満である地震でかつ気象庁震度階が 4 以下である場合には、一次点検において被災が確認されない状況においては、以下の①～⑥のダムを除き除き堤体の二次点検を省略できる。

- ① ダムの基礎地盤、あるいは堤体底部に地震計を設置していないダム
- ② 管理の期間の区分^{注)}における第 1 期、第 2 期のダム
- ③ 特殊な設計によるダム
- ④ 基礎地盤が岩盤でないダム
- ⑤ 特殊な基礎処置を行ったダム
- ⑥ 堤高が 100m を超えるダム

臨時点検の結果、変状が確認されたダムの一覧を表-6.2 に、各ダムの位置を図-6.1 に示す。表-6.2 に示すように、計 5 ダムにおいて変状が報告され、うち 2 ダム(緑川ダムの脇ダムと地蔵原ダム、ともにフィルダム)で堤体のクラック等の変状が報告された。これらはいずれも管理者による臨時点検の結果ではダム管理に大きな支障はないものとのことであったが、国総研と土研では、九州地方整備局からの要請を受け、堤体に変状が報告されたこれら 2 ダムについて共同で現地調査を実施した。その結果、両ダムの状態は安全性に直ちに問題を生じる重大なものではないと判断された。しかし、堤体のクラックや沈下等の変状が確認されたことから、雨水浸透防止等の応急対策を行った上で重点監視を継続するとともに、堤体内部の変状範囲の確認等を目的とした詳細な追加調査(トレンチ掘削によ

注) ダムの管理の期間の区分(抜粋)³⁾

第 1 期：試験湛水開始から満水以後 2 ヶ月以上を経過するまでの期間とする。揚水発電、洪水調節等で水位の急速低下による影響を考慮する必要があるフィルダムについては、この期間を含むもの。

第 2 期：第 1 期経過後、貯水位等の変化に計測値が正しく追随し、その値が妥当と判断されることにより、ダムの挙動が安定したと確認できるまでの期間。

第 3 期：第 2 期経過以降の期間。

るクラック範囲の確認等)が必要と判断された。これを受けて、その後ダム管理者による詳細な追加調査が行われるとともに、復旧方法が検討されることになった。

表-6.1 臨時点検実施ダム数²⁾をもとに作成

管理者**	一次点検	二次点検	
		実施	変状あり***
国土交通省 (地方整備局)	22	実施	17
		省略	5
		変状あり***	4
水資源機構	4	実施	2
		省略	2
		変状あり	0
道府県	127	実施	50
		省略	77
		変状あり	0
利水	218	実施	199
		省略	19
		変状あり***	1

* 表は一連の熊本地震のうち、平成 28 年 4 月 14 日から 5 月 13 日の間に 228 箇所 of ダムで実施した臨時点検の延べ実施回数を示している。また、3 箇所の堰等の構造物を含んでいる。
 ** 管理移行後のダムについてカウントしている。
 *** 点検完了ダムのうち、5 ダム(国土交通省: 4 ダム、利水: 1 ダム)で小規模な変状を確認しているが、管理上支障となるものではないと報告されている。

表-6.2 変状が報告されたダムの諸元等および臨時点検結果

ダム名	管理者	竣工年	型式*	堤高(m)	震央距離(km)	地震動** (gal)		地震時の貯水位 EL. (m)	臨時点検で報告された主な変状内容
						基礎	天端		
緑川	九州地方整備局	1970	G: 主ダム、 R: 脇ダム	G: 76.5 R: 35.0	20	118.0	383.0	162.75	脇ダム天端舗装においてクラック発生
下笠		1986	A	98.0	40	82.0	308.0	324.37	貯水池斜面において小規模崩落発生
松原		1984	G	83.0	45	68.0	98.0	263.53	光ケーブル破断によるダム下流監視カメラの画像データ不通発生
竜門		2001	複合ダム(G+R)	99.5	25	123.8	376.1	273.54	貯水池斜面において小規模崩落発生
地藏原	九州電力	1922	E	21.8	53	- ***	- ***	786.65	堤体上流面コンクリート遮水壁にクラック発生

* G: 重力式コンクリートダム、A: アーチ式コンクリートダム、R: 中央土質遮水壁型ロックフィルダム、E: アースフィルダム。緑川ダムは重力式コンクリートダムの主ダムと、ロックフィルダムの脇ダム。竜門ダムは重力式コンクリートダムの主ダムと、ロックフィルダムの副ダムの複合ダム。
 ** 水平成分(上下流方向及びダム軸方向)の加速度の最大値。
 *** 地藏原ダムは地震計なし。最寄りの気象庁震度観測点で震度 5 強を記録。



※国土地理院の地理院地図(<https://maps.gsi.go.jp/>)に、本震の震央、ダム の位置、震央からの距離を追記。

図-6.1 地震後の臨時点検で変状が報告されたダム

6.2 地震発生直後の現地調査

6.2.1 現地調査の概要

国総研及び土研では、九州地方整備局の要請を受け、臨時点検でダム堤体にクラック等の変状が報告された地蔵原ダム(九州電力管理)及び緑川ダム(九州地方整備局管理)の主ダム右岸側鞍部に築造された脇ダムについて、本震翌々日の平成28年4月18日から同19日にかけて現地調査を実施した。

6.2.2 現地調査結果

6.2.2.1 地蔵原ダム

(1) 変状の概要

地蔵原ダムは1922年に竣工したアースフィルダムである。同ダムは堤体断面の中央にコンクリート止水壁を有する構造であるが、1993年に止水機能を強化する目的で堤体上流面にコンクリート製表面遮水壁が設けられている。同ダムの諸元を表-6.3、平面図と断面図を図-6.2に示す。

地蔵原ダムには地震計は設置されていないが、熊本地震本震発生時には、ダム最寄りの気象庁震度観測点(熊本県小国町宮原)では震度5強を記録したため、ダム管理者による臨時点検が実施された。その結果、堤体上流面コンクリート遮水壁のクラックや堤体天端の沈下等の変状が報告された。

表-6.3 地蔵原ダム諸元

型式	アースフィルダム(コンクリート止水壁型)
堤高	21.8m
堤頂長	95.3m
堤体積	68,000m ³
竣工	1922年
貯水容量	1,858,000m ³
事業者	九州電力株式会社
備考	1971年：漏水低減のため、ダム上流面にアスファルトパネルを設置 1993年：ダム上流面のアスファルトパネルが劣化したため、コンクリート遮水壁工事を実施

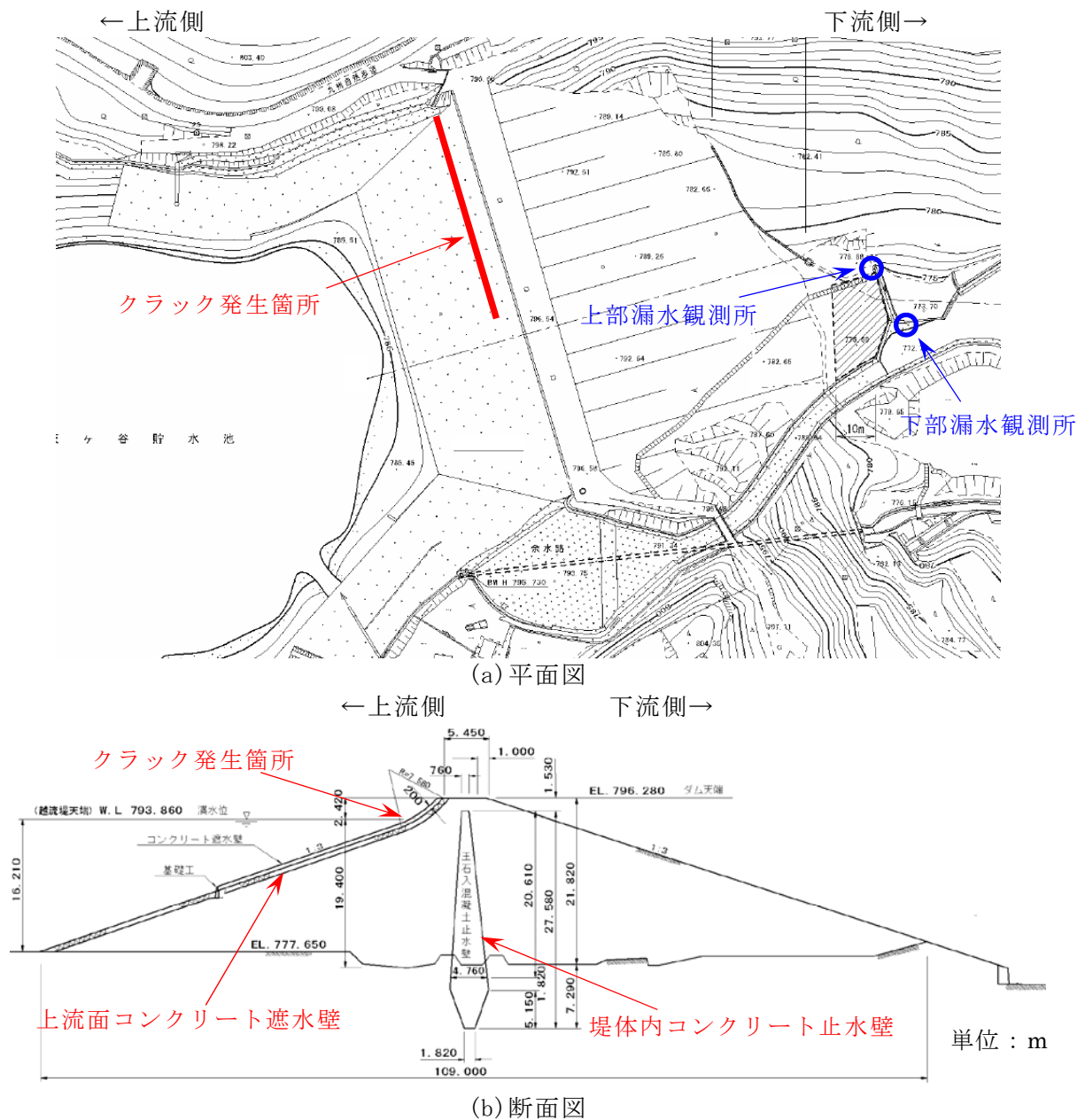


図-6.2 地蔵原ダムの平面図および断面図(九州電力(株)提供資料に一部加筆)

(2) 現地調査結果

地蔵原ダムでは、臨時点検において変状が報告された堤体上流面コンクリート遮水壁やダム堤体天端を中心に調査を行った。

a) 堤体上流面コンクリート遮水壁

堤体上流中央から左岸側のコンクリート遮水壁では、**図-6.2**中に示すように、上位標高部の勾配変化点付近(**写真-6.1**)の水平目地沿いに水平方向のクラックや浮きが認められた。クラックの開きは最大 20mm 程度(**写真-6.2**)であり、深さは調査時の手ばかりで 20cm 程度であった。クラックは土砂を挟むところも多く、地震前から存在していたクラックの一部が今回の地震で開いた可能性が高いと考えられたが、堤体内のコンクリート止水壁とともに当ダムの遮水機能を担うものであることから、その深さ等を詳細に確認するための追加調査が必要と判断された。なお、当ダムの貯水池はクラックが確認された位置よりも地震前から十分低い水位で運用されているが、降雨により貯水位が上昇する可能性も考えられることから、クラックを考慮した当面の運用水位について検討するとともに、追加調査の中で、運用水位以下における表面遮水壁の状況についても確認しておく必要があると判断された。



写真-6.1 コンクリート表面遮水壁部の状況
(地蔵原ダム堤体上流面)
※ブルーシートは雨水浸入防止のための応急対策用

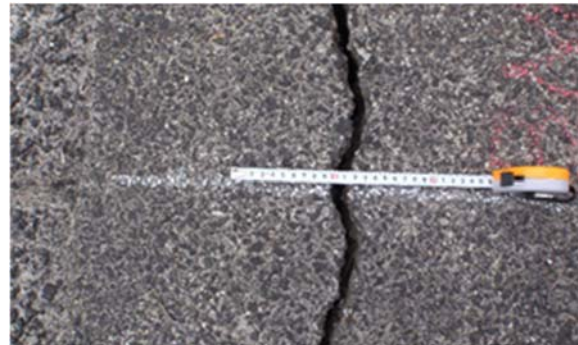


写真-6.2 コンクリート表面遮水壁部
クラック近景
(地蔵原ダム堤体上流面)

b) 堤体天端

天端のほぼダム軸上に埋設されていた測量標点の基礎コンクリート(**写真-6.3**)及び堤体内水位(浸潤線)観測孔パイプの浮き上がり(**写真-6.4**)が認められた。天端表面にクラックは認められなかったが、観測孔パイプの浮き上がりは地震動による堤体の沈下によるものと考えられた。なお、堤体内水位(湿潤線)観測孔のパイプの浮き上がり高さから、沈下量は最大断面付近で約 20cm と推定された。この沈下量は当ダム堤体内のコンクリート止水壁天端より上部の堤高に比べ十分小さいが、堤体天端には芝が張られているため、その下部の堤体内にクラック等の変状がないか、追加調査により確認しておく必要があると判断された。



写真-6.3 測量標点基礎コンクリートの浮き上がり(地蔵原ダム天端)



写真-6.4 堤体内水位観測孔パイプの浮き上がり(地蔵原ダム天端)

c) 堤体下流面

堤体下流面(写真-6.5)には、すべりによるものと見られるはらみ出し等の凹凸は認められず、法尻付近の湿潤化や泥濘化等も認められなかった。



写真-6.5 堤体下流面(地蔵原ダム)



写真-6.6 漏水計測状況(地蔵原ダム堤体下流法尻)

(3) 計測データ

a) 堤体変位(測量結果)

堤体測量による変位計測は、管理者により年2回行われている。地震前直近と地震後の計測結果を比較すると、天端の最大断面付近の測点での沈下量は約20cmであり、これは測量標点基礎コンクリートや堤内水位観測孔パイプの浮き上がり高さとはほぼ一致している。ダム軸方向見通し線に沿った沈下量の分布は、最大断面付近が最大で、左右岸に向かうに従い小さくなる。また、上下流方向断面で見ると、沈下量は上流面側より下流面側の方が相対的に大きい。

水平変位量は、天端の最大断面付近の測点で下流方向に約20cmであった。上流面コンクリート遮水壁が設置される上流面に比べ、下流面側の方が構造的に変形の自由度が高いことが一因と考えられる。

b) 漏水

漏水量は、管理者により堤体下流法尻の 2 箇所(図-6.2(a)平面図参照)で毎正時に自動計測が行われている。これらの計測箇所では、主に堤体及び地山からの漏水が計測されており、降雨による堤体下流面からの水は、下流面の表層部に格子状に設置された暗渠により分離して排水されている。

2 箇所の漏水計測箇所のうち、主に左岸地山からの浸透量を捉えている上部の計測箇所では、当ダムの平常時の運用水位では漏水量はほぼゼロであり、地震前後及び調査時点でも同様であった。

一方、この計測箇所の下流側にある下部の計測箇所(写真-6.6)では、地震前に約 3L/分であった漏水量が、4 月 16 日の本震直後に最大 10L/分まで増加した。漏水量はその後やや減少し、約 8L/分でほぼ安定していたが、4 月 17 日 18:00 頃以降、約 18L/分に増加した。その後はほぼ安定し、調査時(4 月 18 日 14:00 頃)の手ばかりによる計測ではほぼ同量(約 18L/分)であった。この箇所で計測される漏水量には、堤体からの浸透水と地山からの浸透水の両方が含まれる可能性があるが、4 月 17 日の増加時及びその前に降雨や余震は観測されておらず、地震後の増加原因が明らかでないため、継続して重点的な監視を行う必要があると判断された。なお、目視では漏水の濁りは認められなかったが、念のため白色板等により土粒子の流出がないかより確認しやすいよう工夫することとした。

c) 堤内水位(浸潤線)

堤内水位(浸潤線)は、管理者により堤体最大断面付近の 5 箇所(堤体内コンクリート止水壁より上流側と止水壁付近(直上流)各 1 孔、止水壁より下流側 3 孔)で計測が行われている。このうち、上流側と止水壁付近の 2 孔では本震直後に堤内水位が若干上昇したが、間もなく地震前の水位に戻り、調査時においては安定していることが確認された。

(4) まとめ

現地調査の結果、地蔵原ダムでは、堤体上流面のコンクリート表面遮水壁にクラックが確認されたが、当ダムの地震前からの運用水位が低く、クラック箇所はそれより上位標高部であった。また、堤体天端の沈下が認められたが沈下量は 20cm と堤体内止水壁の天端より上部の堤高に比べ小さく、堤体下流面では明らかなすべりやはらみ出し等外観上の変状も認められなかった。なお、浸潤線の監視に用いられている堤内水位観測孔においても地震前後で堤内水位の変化はほとんど認められなかった。これらのことから、クラックへの雨水浸透防止のための応急対策を講じる必要があるものの、当ダムの安全性に直ちに影響が生じている状況にはないと判断された。ただし、漏水量は地震前より若干増加した状態にありその原因が明らかでないことから、ダム管理者による監視体制を強化した上で、上流面のコンクリート表面遮水壁のクラック深さや沈下が確認された天端付近の堤体内の変状の有無について、詳細な追加調査を行う必要があると判断された。

6.2.2.2 緑川ダム

(1) 変状の概要

緑川ダムは1970年に竣工したダムで、洪水吐きを有する主ダム(重力式コンクリートダム)のほか、右岸側の鞍部を締め切るために設置された脇ダム(中央土質遮水壁型ロックフィルダム)の2つのダムから構成される。主ダム及び脇ダムの諸元を表-6.4、全体平面図を図-6.3、脇ダムの平面図と断面図を図-6.4にそれぞれ示す。

緑川ダムの地震計は主ダムに設置されており、本震発生時に基礎部(底部監査廊内)で観測された最大加速度は118galであった。なお、ダム最寄りの気象庁震度観測点(熊本県美里町)では震度6弱を記録している。地震発生後の管理者による臨時点検により、主ダムでは特に変状は確認されなかったが、脇ダムの天端道路舗装面において、縦断方向(ダム軸方向)に堤体のほぼ全長にわたってクラックが発生していることが報告された。

表-6.4 緑川ダム諸元

	主ダム	脇ダム
型式	重力式コンクリートダム	中央土質遮水壁型ロックフィルダム
堤高	76.5m	35.0m
堤頂長	295.3m	244.0m
堤体積	367,400m ³	347,000m ³
貯水容量	46,000,000 m ³	
竣工	1970年	
事業者	九州地方整備局	
備考	1996年～2000年：脇ダム表層の劣化したリップラップの撤去・購入材料による置換えによる補修	

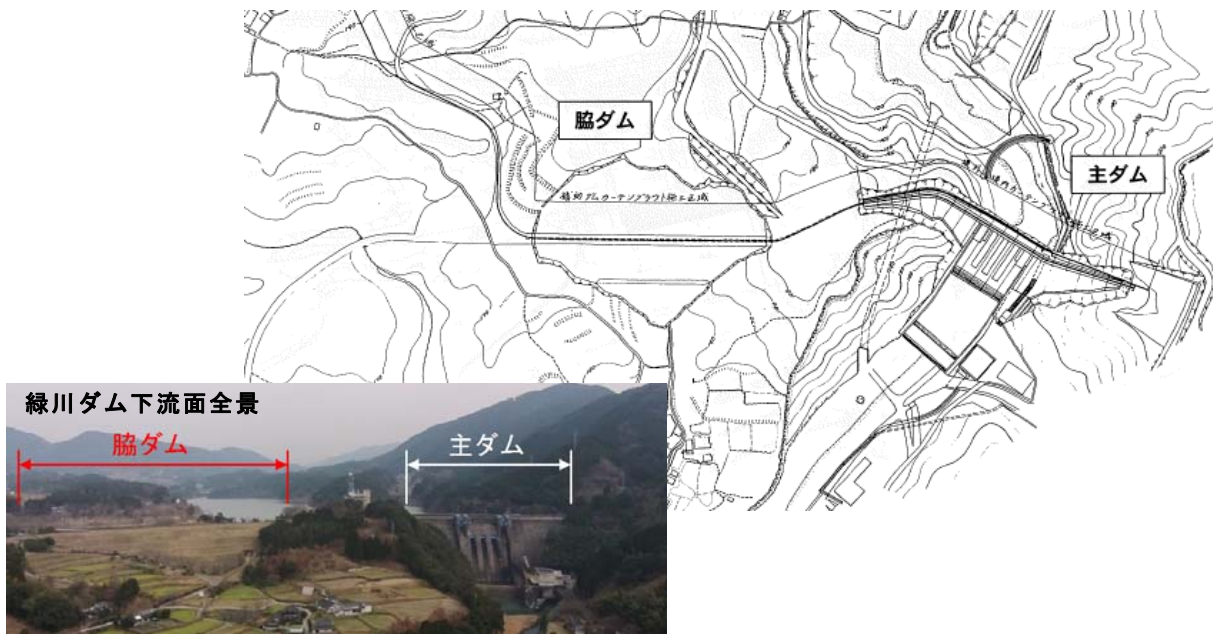
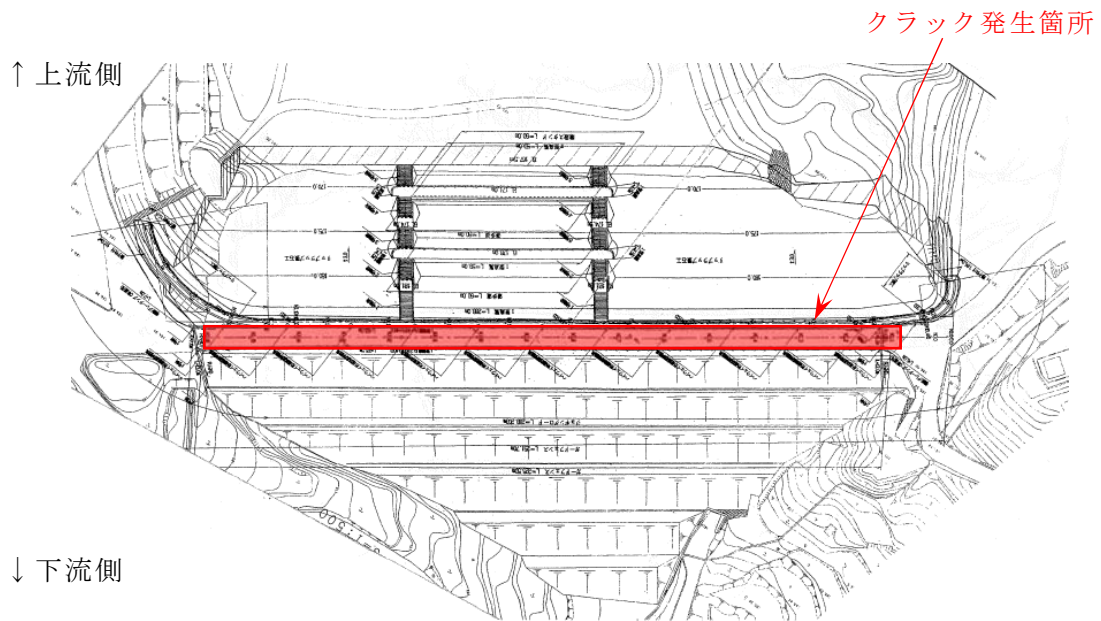
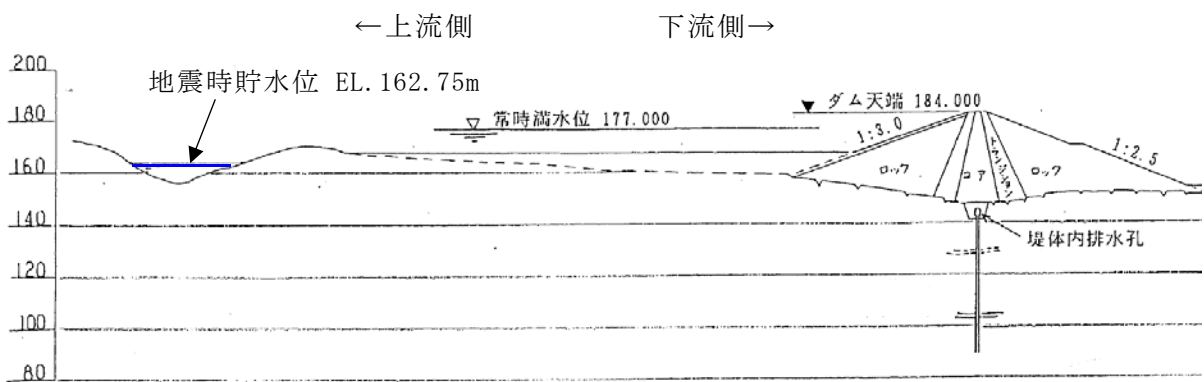


図-6.3 緑川ダム全体平面図(主ダムと脇ダムの位置)(九州地方整備局提供資料)



(a) 平面図



(b) 断面図

図-6.4 緑川ダム(脇ダム)の平面図および断面図(九州地方整備局提供資料に加筆)

(2) 現地調査結果

緑川ダムの主ダムに関しては、臨時点検では特段の変状は報告されておらず、管理者への確認でも、地震直後に1箇所横継目(J11)排水孔から漏水が一時的に増加したものの、濁りはなく、間もなく従前の値に戻ったこと以外、特段の変状は認められなかったとのことであった。このため、現地調査は、臨時点検において変状(天端舗装部のクラック)が報告された脇ダム堤体を中心に行った。なお、主ダムと脇ダム間に位置する広場でも舗装部にクラック等の変状が報告されたことから、その貯水池側斜面とともにあわせて調査を行った。

a) 脇ダム堤体天端

町道として利用されている堤体天端道路のアスファルト舗装において、堤体縦断方向(ダム軸方向)のクラックがほぼ堤体の全長にわたって伸びていた(図-6.4、写真-6.7)。クラックの幅は広いところで20mm程度(写真-6.8)であり、天端道路のセンターライン(概ねダム軸に相当)に沿って伸びていた。その深さは現地調査時の直径6mmの測量用ピンポールを挿入して手ばかりでは最大断面付近で30cm程度と推定された。なお、クラックに堤体のすべりを疑わせるような段差は認められなかった。また、左右岸地山への取付け部を含め、天端(道路舗装)に水みちとなりうる横断方向(上下流方向)のクラックは認められなかった。



写真-6.7 縦断クラックが発生した堤体天端部の状況(緑川ダム脇ダム)

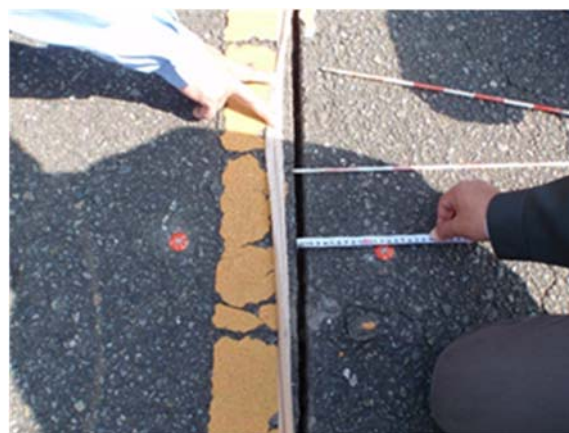


写真-6.8 天端舗装部のクラック近景(緑川ダム脇ダム最大断面付近)

b) 堤体上下流面

堤体上流面はリップラップ、下流面は植生工となっている。上下流面ともに、堤体表面の凹凸やはらみ出し、クラック等の変状は認められなかった。

c) 広場及びその貯水池側斜面

主ダムと脇ダムの間に位置する広場の貯水池に近い側のアスファルト舗装にクラック、インターロッキングブロック部に開きや数cm程度の段差が認められた。広場の周囲の斜面の肩付近では、擬木柵の傾きや地割れが認められた。なお、応急対策として、管理者に

よりクラック部にはシート掛け等による雨水浸入防止対策が行われるとともに、一般の立ち入りが規制されていた。

現地調査の結果、貯水池側の斜面やその下方には目立った変状は認められなかったが、広場の地盤内のクラックの状況や貯水池側斜面の安定への影響について明らかでないことから、地盤内のクラックの範囲について追加調査を行うとともに、斜面部に変動がないか監視を行うのが望ましいと判断された。

(3) 計測データ

a) 脇ダム堤体の変位(測量結果)

堤体測量による変位計測は、管理者により天端では年4回、上下流面では年1回行われている。地震後の測量結果によると、最大断面に相当する堤体天端中央付近において、地震前の最新の計測値に比べ15mm前後の沈下が認められた。この量は過去10年での沈下量の計測値(約5mm)に比べると大きいことから、今回の地震によるものと考えられる。また、同箇所では地震前後で下流方向へ12mm程度の水平変位も認められた。

b) 脇ダムの漏水量

漏水量は、管理者により下流法尻の1箇所で月1回計測されている。地震前後の計測値に大きな変化はないが、月1回の計測であるため、地震による影響の有無は明確には判断できないことから、監視を継続する必要があると判断された。なお、地震時および調査日とも、貯水位は堤体上流(貯水池側)のロック敷標高よりも低い位置にあった。

(4) まとめ

現地調査の結果、緑川ダムの脇ダムでは、堤体天端の舗装部において堤体のほぼ全長に及ぶ縦断方向のクラックが認められた。また変位測量データから堤体が若干沈下したものと考えられた。しかし、クラックの幅は比較的小さく、堤体のすべりを疑わせるような段差も認められなかった。また、地山への取り付け部を含め水みちとなりうる上下流方向のクラックや上下流面のはらみ等その他外観上の変状は認められなかった。これらのことから、ダムの安全性に直ちに影響を生じる状態にはないものと判断された。ただし、クラックが堤体のほぼ全長に及んでいることもあり、クラックの深さや連続性について、詳細な調査が必要と判断された。また、余震が継続していることや、漏水量の計測が月1回であることから、引き続きダムの挙動を注意深く監視する必要があると判断された。

なお、主ダムと脇ダムの間に位置する広場にもクラック等の変状が認められた。このため、地盤内のクラックの範囲等について追加調査するとともに、貯水池側斜面部に変動がないか監視を行うこととなった。

6.3 ダム管理者による詳細調査及び対応

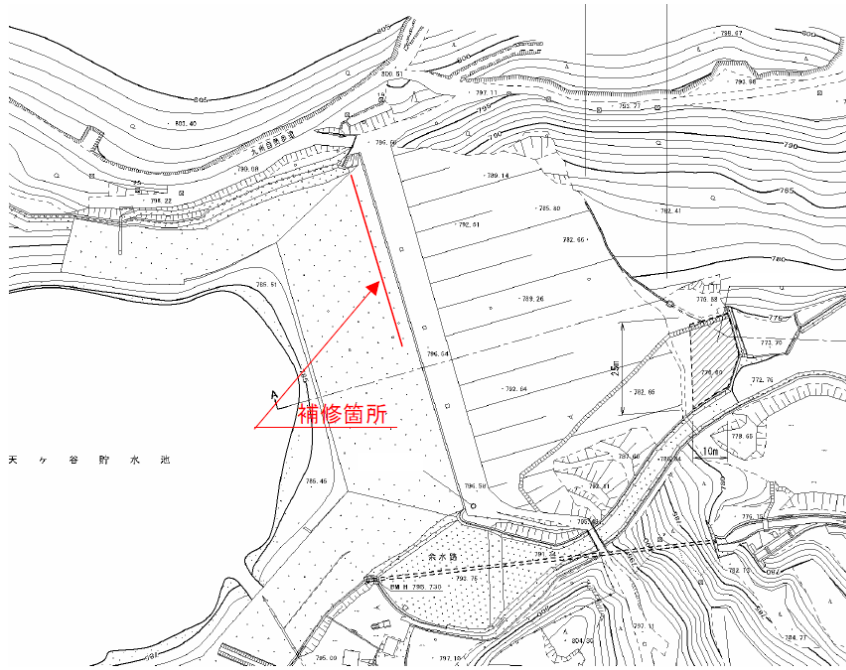
現地調査後に、その結果等を踏まえて、両ダム管理者により実施された追加調査及び対策の概要を以下に示す。なお、両ダムとも本復旧は出水期後の対応とならざるを得ない状況であったことから、雨水浸透防止のための応急対策を取るとともに、出水期前にクラックの調査を行い、貯水池運用上も出水による貯水位上昇が変状箇所には及ばない運用をしつつ、各種調査や対策の検討が行われた。

(1) 地蔵原ダム

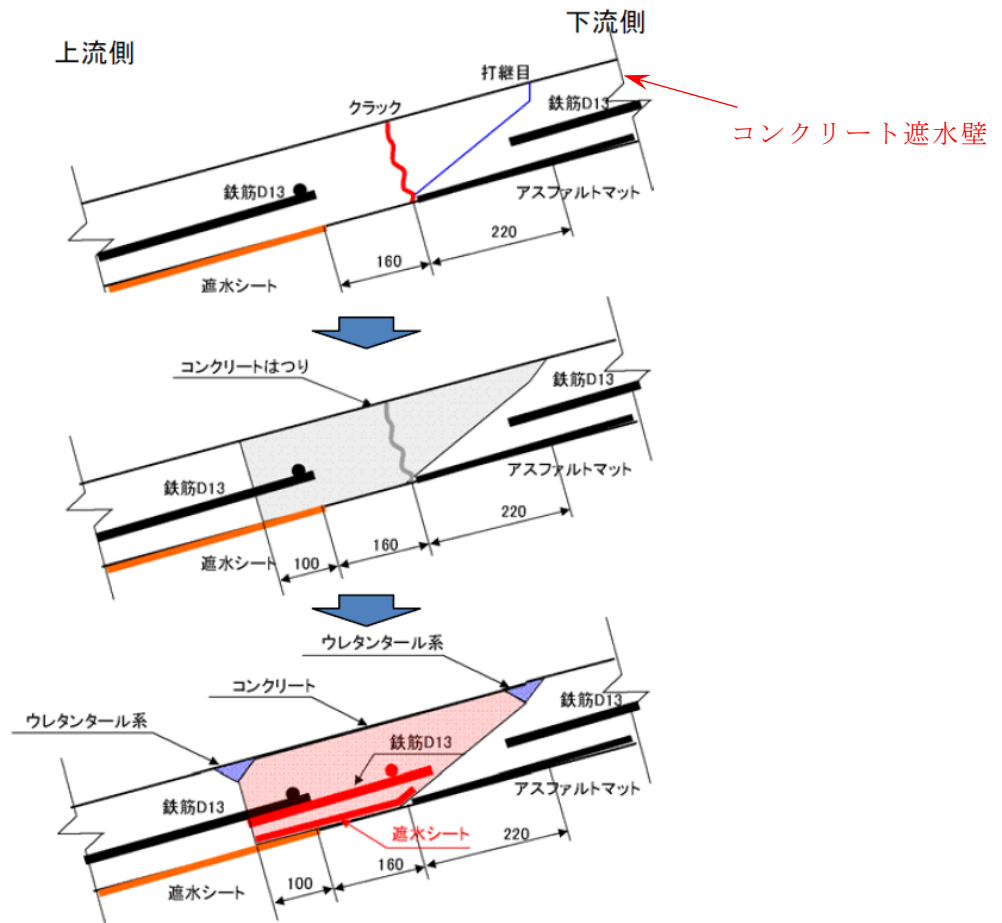
a) 堤体上流面コンクリート遮水壁

クラックの深度や連続性及び遮水壁と土質堤体との間の空洞の有無を確認するため、管理者により電磁波レーダー探査、はつり、コア採取、ボアホールカメラ等による追加調査が実施された。

追加調査の結果、クラック延長は約 44m、最大幅は約 20mm であった。なお、クラックはコンクリート遮水壁(厚さ 15~20cm 程度)を貫通しており、コンクリート遮水壁とその直下に設置された遮水シートの上に 1cm 程度の空隙が確認された箇所もあった。このため、**図-6.5**に示すようにクラック周辺のコンクリートをはつり(**写真-6.9**)、はつり箇所に鉄筋を配置してコンクリートを打設するとともに、打継目表面にウレタンタール系の材料を充填する補修(**写真-6.10**)が行われた。また、コンクリート遮水壁下部の空隙部は、セメント系の材料で充填された。



(a) 補修箇所(平面図)



(b) 補修方法(断面図)

図-6.5 コンクリート表面遮水壁クラックの補修箇所と補修方法(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)



写真-6.9 コンクリート表面遮水壁部クラックのはつり調査(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)



写真-6.10 コンクリート表面遮水壁の復旧状況(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)

b) 堤体天端

沈下が認められた堤体天端付近の変状の有無を調査するため、表面の芝、碎石及び遮水シートを撤去したところ、堤体に縦断方向(ダム軸方向)のクラックが確認された(写真-6.11)。このため、クラックの深度や連続性を確認することを目的に、クラック箇所には消石灰を水で溶いたものを注入(写真-6.12)し、トレンチ掘削等による調査(写真-6.13~14)が実施された。このトレンチ掘削を含む各種調査の実施位置を図-6.6に示す。

調査の結果、クラックは図-6.7に示すように堤体天端からその下にあるコンクリート止水壁の天端方向に向かって発生していることがわかった。ほとんどのクラックは止水壁天端で、一部は止水壁天端下20cmで収束していることが確認された。なお、トレンチ掘削時に行われたコーン貫入試験や堤体上からの標準貫入試験により、調査箇所では堤体に明らかな緩みがないことが確認された。また、トレンチ掘削箇所での目視確認により、堤体盛土と堤体内の止水壁は密着し、境界部に緩みがないことが確認された。このほか、図-6.6に示す堤体の4箇所で行った注水試験が実施され、急激な孔内水位の低下がなかったことや、得られた透水係数が $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/sec}$ オーダーと大きくなかったことから、堤体内に水みちとなるようなクラックが生じている可能性は低いと判断された。

その後、トレンチ掘削箇所以外のクラック範囲を確認するため、堤頂部ほぼ全体にわたって表層を剥ぎ取って行われた調査では、堤頂部のほぼ全長にわたってトレンチ掘削箇所と同様のクラックが確認された。このため、本復旧時にクラックの深さが確認できるよう、クラックに石灰ミルクが注入された(写真-6.15)。その後は天端整形を行い、堤体内部への雨水浸入防止対策として遮水シートが敷設され、碎石と芝張りにより仮復旧としての原形復旧が行われている(写真-6.16~18)。なお、本復旧としては、図-6.8に示すようにクラックが確認された範囲の堤体盛土を除去した上で、再盛立と転圧・締固めが行われる予定である。

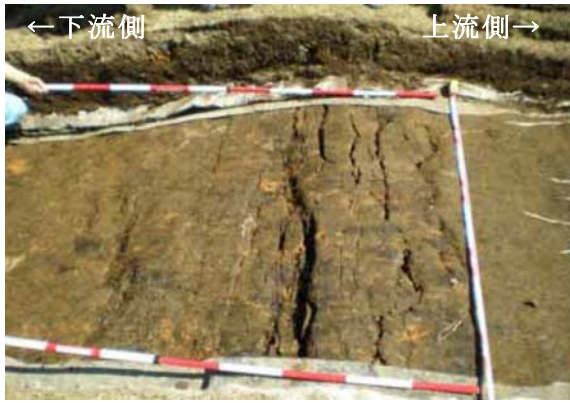


写真-6.11 堤体天端の表層を剥いで確認されたクラック(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)



写真-6.12 クラックへの石灰ミルク注入
(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)



写真-6.13 トレンチ掘削状況(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)

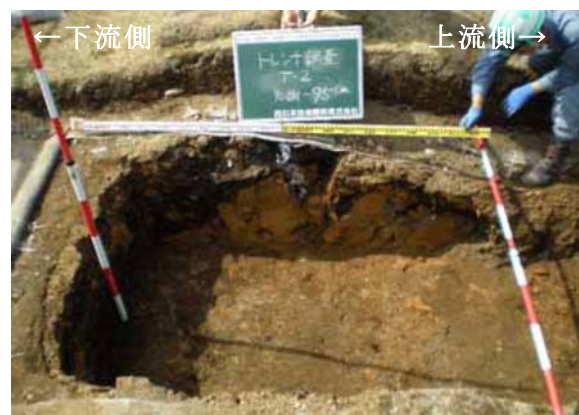


写真-6.14 トレンチ掘削によるクラック確認状況(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)

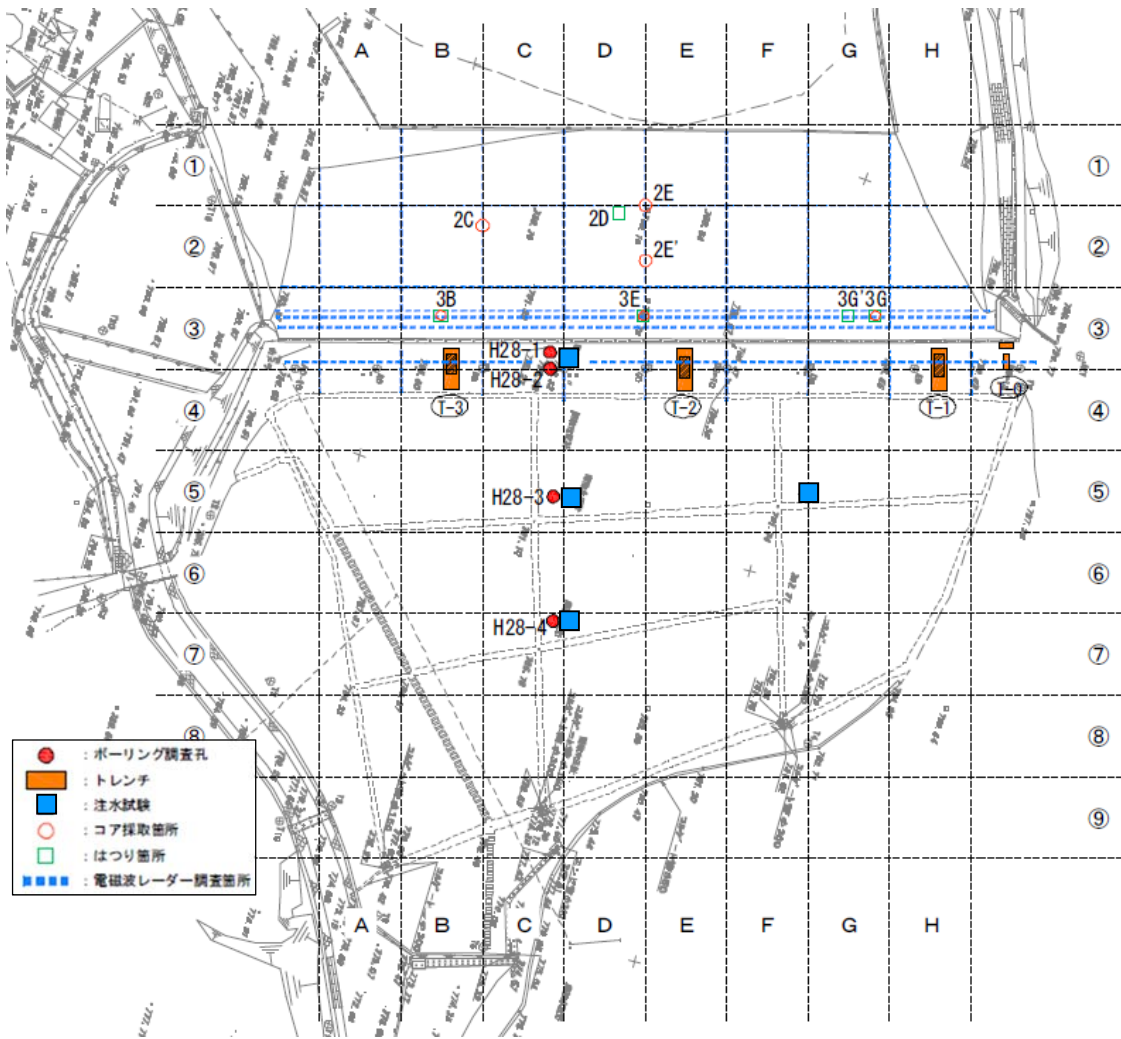


図-6.6 調査実施平面図(九州電力(株)提供資料)

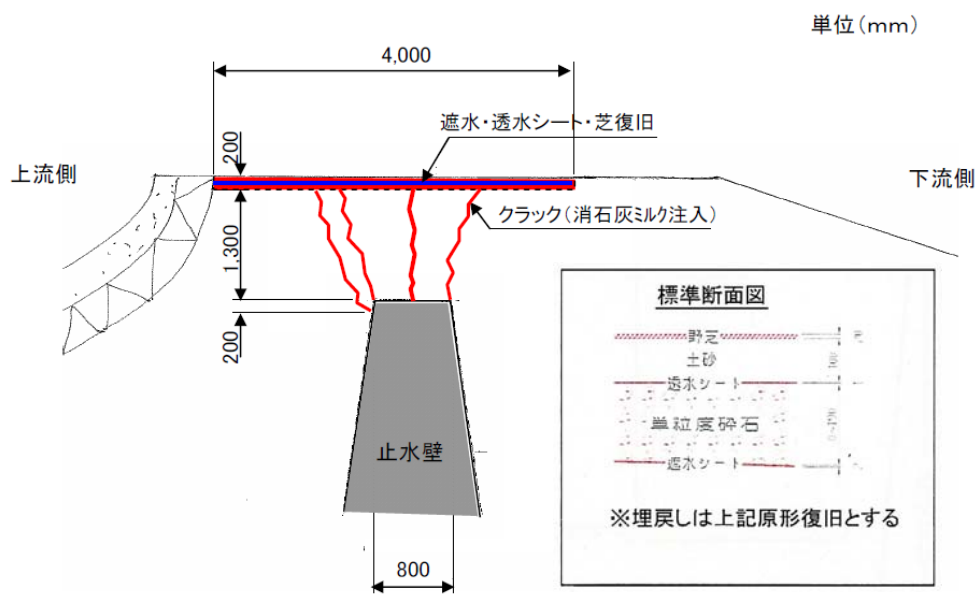


図-6.7 堤体天端部のクラック概念図(地蔵原ダム)(九州電力(株)提供資料)

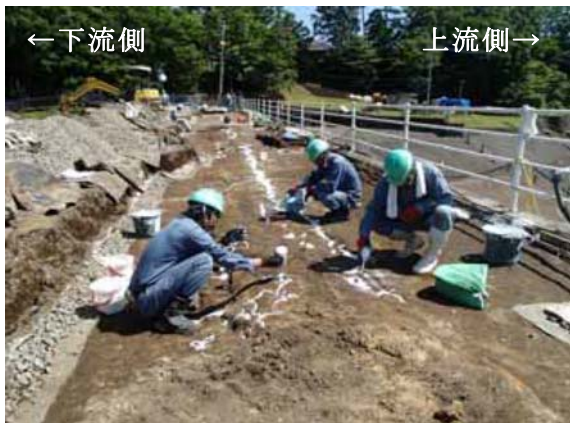


写真-6.15 石灰ミルク注入状況
(地蔵原ダム) (九州電力(株)提供資料)



写真-6.16 遮水シート設置状況
(地蔵原ダム) (九州電力(株)提供資料)



写真-6.17 砕石敷設状況(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)



写真-6.18 天端応急復旧後の状況
(地蔵原ダム) (九州電力(株)提供資料)

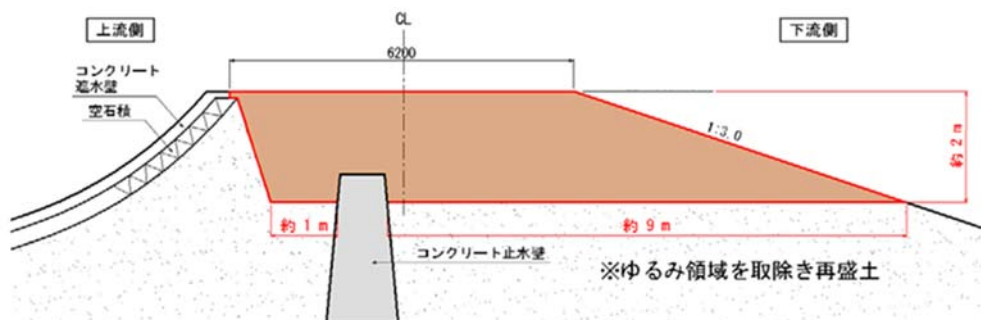


図-6.8 天端復旧計画断面図(地蔵原ダム)
(九州電力(株)提供資料)

c) 漏水量

地震後に増加した状態が続いていた漏水については、漏水量の変化や土粒子の流出の有無を継続的に監視するとともに、浸透経路を特定するために管理記録の分析や漏水の水質分析が行われた。

これらの計測や分析の結果、漏水量の変動は、貯水位のほか、前5日雨量や堤体左岸下流部で計測されている地下水位(地下水位観測孔の配置は図-6.9 参照)とも相関があることが確認された。また、ダム貯水池の表層水と上記の漏水について水質分析を実施した結果、貯水池から堤体を通じた浸透水がそのまま流出しているのではなく、地山からの地下水が混合している可能性が高いとの結果が得られた。なお、漏水量計測箇所へのピット内に白色板を敷いて土粒子の流出がないか確認が行われたが、土粒子の流出は認められていない。これらのことから、計測されている漏水がダムの安全性に大きく影響を及ぼすものである可能性は低いと考えられる。また、地震直後の一時的な漏水量の増加は、降雨による一時的な影響を除けば、堤体からの浸透水もしくは地山地下水の流出が地震の揺れによる何らかの影響で増加したことが原因と考えられるが、両者を明確に分離するのは難しい。このため、地山地下水の影響を把握することで堤体からの浸透量を監視しやすくするため、左岸下流に新たに地下水位計が設置される予定である。

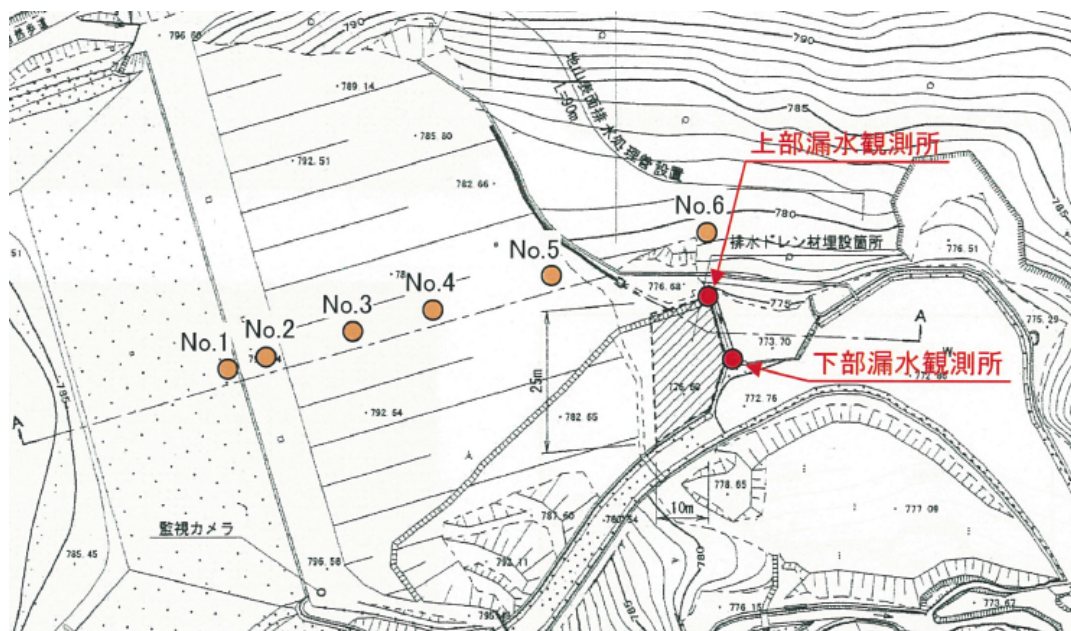


図-6.9 地下水位観測孔配置図(九州電力(株)提供資料)

(2) 緑川ダム

a) 脇ダム堤体天端

脇ダム天端の道路舗装で認められたクラックの深さや連続性を調査するため、管理者により天端部のトレンチ掘削が行われた(写真-6.19~21)。なお、クラック深さが確認できるよう、トレンチ掘削前にクラックに石膏ミルクや石灰ミルクが注入された。また、掘削面でのクラック周辺についても、土壌硬度計や針貫入試験によりゆるみが無いか確認された。そのほか、堤体の透水性を確認するための透水試験や堤体材料の土質試験も行われた。

脇ダム天端の舗装部で確認されたクラック平面図を図-6.10、トレンチ掘削による調査(平成28年5月の調査)で確認されたクラック深さをもとに推定された堤体縦断方向(ダム軸方向)のクラック深さ分布を図-6.11に示す。トレンチ掘削の結果で確認されたクラックの深さは、堤体中央部(最大断面付近)の最も深い箇所では、コア上部の余盛土を貫いて一部コア内まで及んでいることがわかった(図-6.12)。しかしながら、確認されたクラックは堤体内で消滅していることや、堤体上下流面ではらみ出し等の変状が確認されず、局所的な変位も計測されていないこと、また天端舗装部のクラックに段差が生じていないことから、天端クラックを起点とした円弧すべりは発生していないものと判断された。

その後、トレンチ掘削箇所については現地発生材による埋戻しの上、砕石、舗装により仮復旧としての原形復旧が行われている。なお、本復旧にあたっては、クラックの範囲を再度詳しく確認した上で、当該範囲を除去し、再盛立によることで基本断面の復旧を行う予定となっている。



写真-6.19 天端舗装を剥いでのクラック確認状況(緑川ダム脇ダム)
(九州地方整備局提供資料)



写真-6.20 トレンチ掘削状況(緑川ダム脇ダム)(九州地方整備局提供資料)



写真-6.21 トレンチ掘削によるクラック確認状況(緑川ダム脇ダム)
(九州地方整備局提供資料)

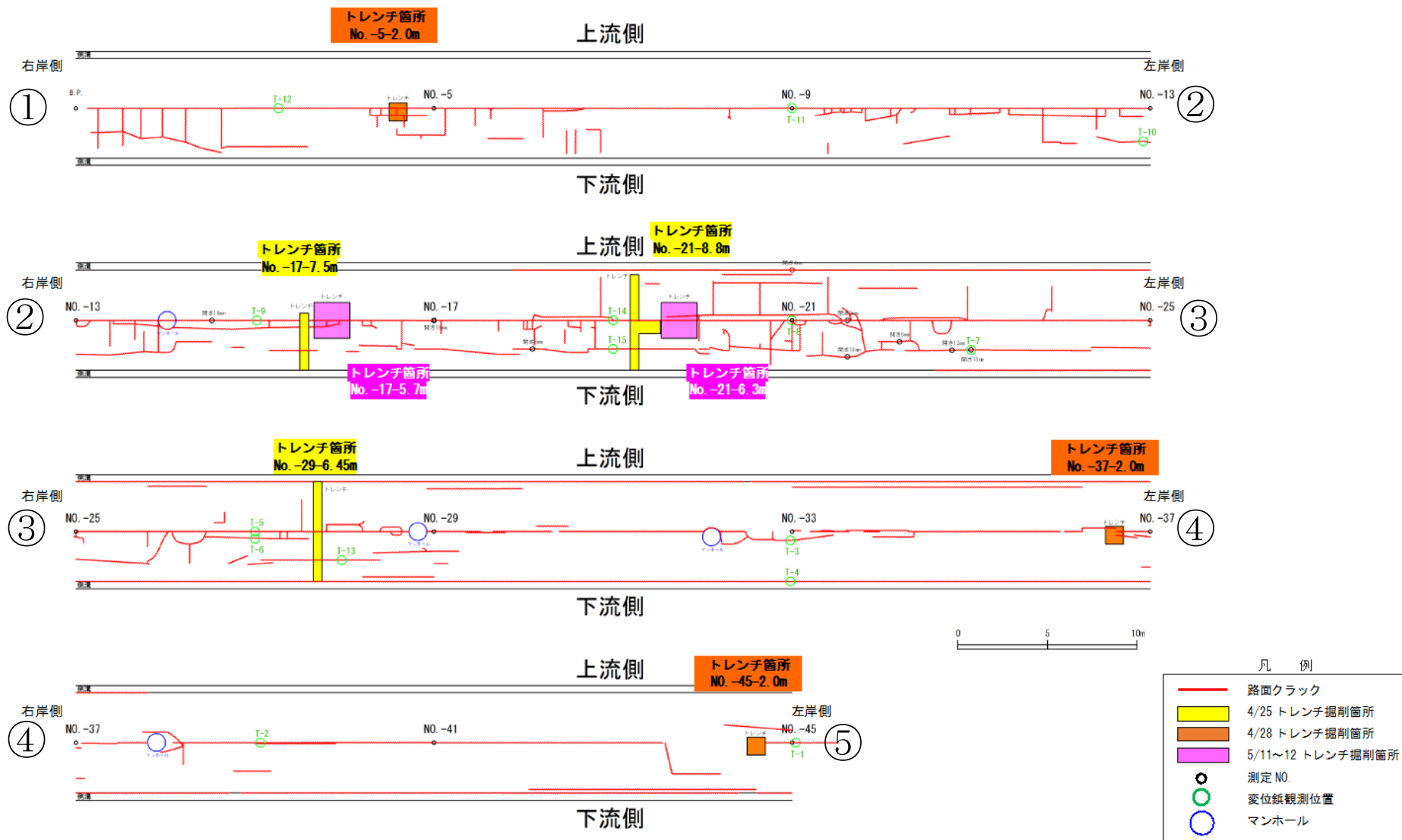


図-6.10 天端のクラック平面図(緑川ダム脇ダム) (九州地方整備局提供資料) (平成 28 年 5 月調査)

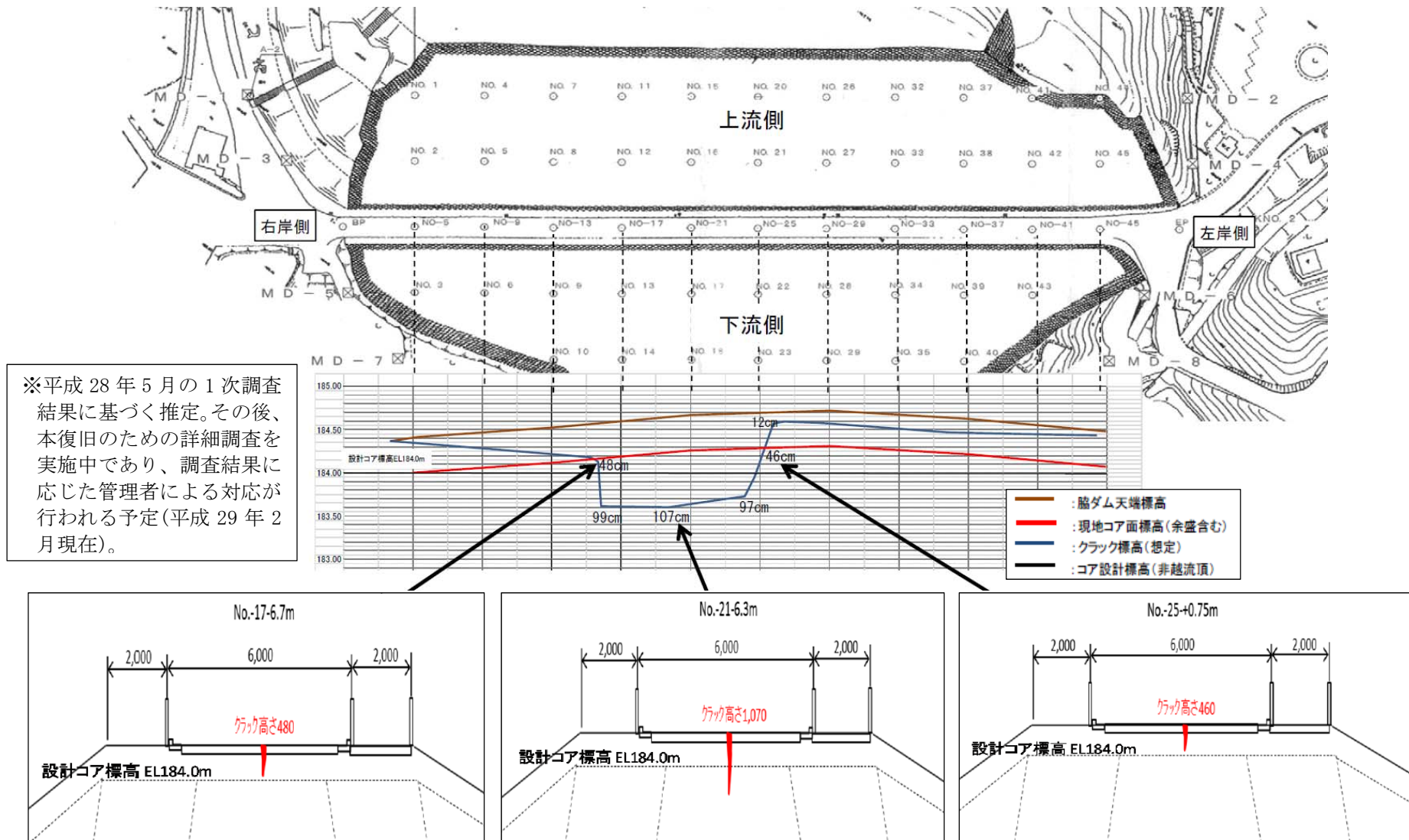


図-6.11 クラック深さ分布図(緑川ダム脇ダム)(九州地方整備局提供資料)(平成 28 年 5 月調査)

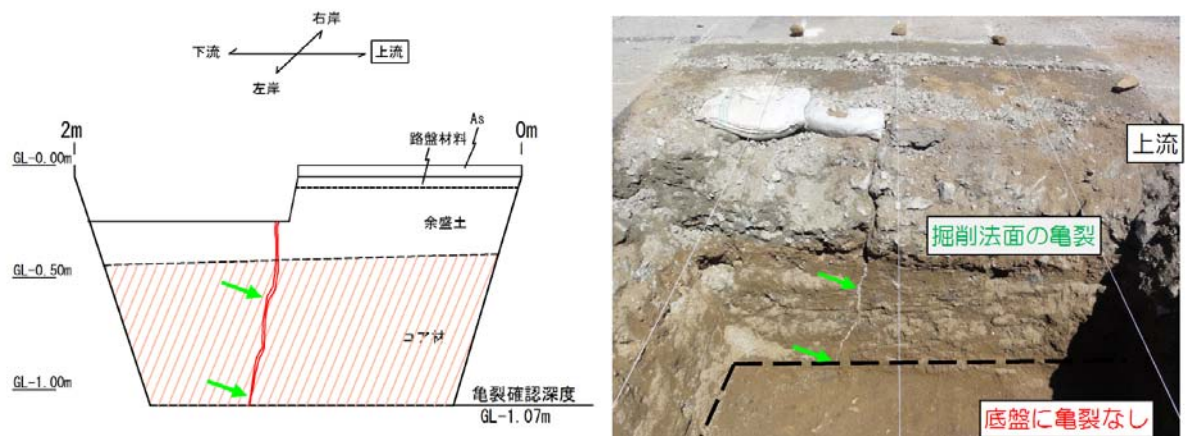


図-6.12 天端トレンチ掘削調査結果(緑川ダム脇ダム)
(九州地方整備局提供資料)(平成 28 年 5 月調査)

b) 広場及びその貯水池側斜面

地中や斜面の変動を監視するため、管理者により孔内傾斜計観測や変位計測用の杭等が設置された。しかし、その後の梅雨時期を跨いだ計測によっても明瞭な変動や変状の進展は確認されなかった。このため、現状では貯水池斜面は安定していると判断されたが、余震が継続していることや、出水による貯水位上昇の際にはその影響を確認する必要があることから、当面は監視が継続される予定である。

6.4 ダムで観測された地震動

6.4.1 地震動記録の概要

国総研では、一連の熊本地震において国土交通省所管のダム(地方整備局、水資源機構及び県が管理する多目的ダム等)において観測された地震動記録を収集した。その結果、本震において、ダム堤体内の底部監査廊内等(以下、「基礎部」)に設置された地震計で50gal以上の最大加速度を観測したダムは計11ダムであった。その一覧を表-6.5、各ダムの位置を図-6.13にそれぞれ示す。

表-6.5 ダム基礎における最大加速度

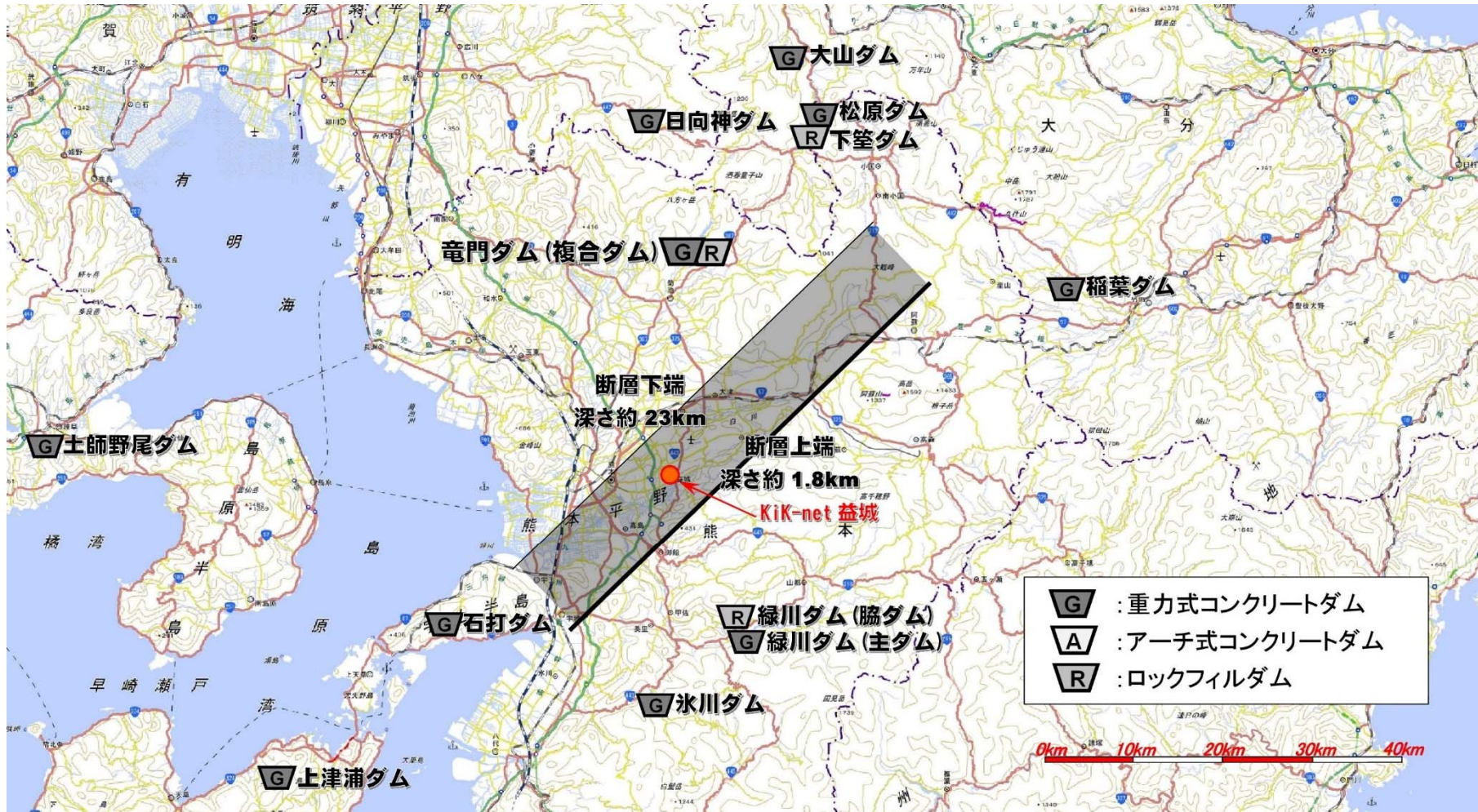
(本震時に基礎部で50gal以上の最大加速度が観測された国土交通省所管ダム)

ダム名	型式	堤高(m)	管理者	基礎の最大加速度(gal)	地震時の貯水位EL.(m)
竜門ダム	重力式コンクリート*	99.5	九州地方整備局	124	273.54
緑川ダム	重力式コンクリート*	76.5	九州地方整備局	118	162.75
石打ダム	重力式コンクリート	38.5	熊本県	112	77.64
氷川ダム	重力式コンクリート	58.5	熊本県	86	164.30
下笠ダム	アーチ式コンクリート	98.0	九州地方整備局	82	324.37
松原ダム	重力式コンクリート	83.0	九州地方整備局	68	263.53
稲葉ダム	重力式コンクリート	56.0	大分県	61	438.53
上津浦ダム	重力式コンクリート	54.0	熊本県	60	142.02
日向神ダム	重力式コンクリート	79.5	福岡県	59	303.31
大山ダム	重力式コンクリート	94.0	水資源機構	58	245.04
土師野尾ダム	重力式コンクリート	31.5	長崎県	54	55.62

*竜門ダムは重力式コンクリートダムの主ダムとロックフィルダムの副ダムの複合ダム、緑川ダムについては、重力式コンクリートダムの主ダム、ロックフィルダムの脇ダムがあるが、地震動観測は、ともに主ダムである重力式コンクリートダムで行っている。

これらの11ダムについて、計測された最大加速度とダム距離減衰式⁴⁾(ダム基礎岩盤における地震動推定式)による推定値との比較を行った結果を水平動について図-6.14、鉛直動について図-6.15にそれぞれ示す。ダム距離減衰式による加速度の推定に用いた震源断層から各ダムまでの距離(最短距離^{a)}及び等価震源距離^{b)}の算出には、国立研究開発法人防災科学技術研究所が行った地震インバージョン解析結果による断層モデル⁵⁾(図-6.13中に示す)を使用した。観測された地震動の観測値とダム距離減衰式による推定値との整合性は比較的良好。

- a) 最短距離：断層モデルの断層面のうち、ダム地点から最も近い点とダム地点を結ぶ直線の長さ。
 b) 等価震源距離：断層モデルの断層面から発散される地震のエネルギーと等価となる仮想的な点震源とダム地点間の距離。



※国土地理院の地理院地図(<https://maps.gsi.go.jp/>)に、震源断層モデル⁵⁾、ダムの位置を追記。
 図-6.13 震源断層モデル⁵⁾と最大加速度 50gal 以上を記録したダムの位置

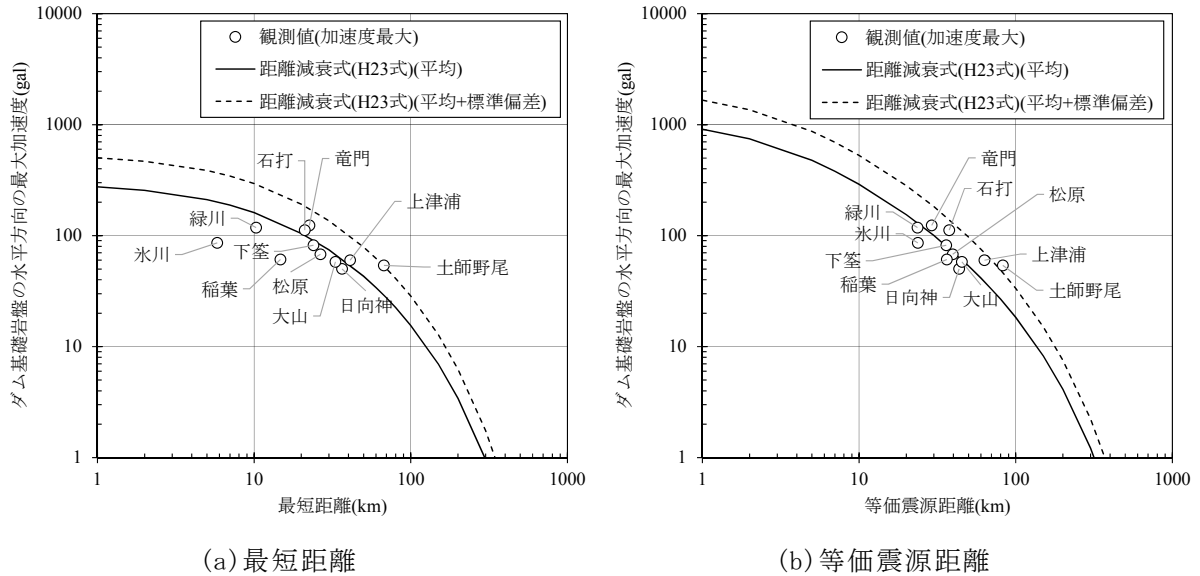


図-6.14 ダム基礎部で観測された最大加速度とダム距離減衰式による推定値の比較 (水平動)

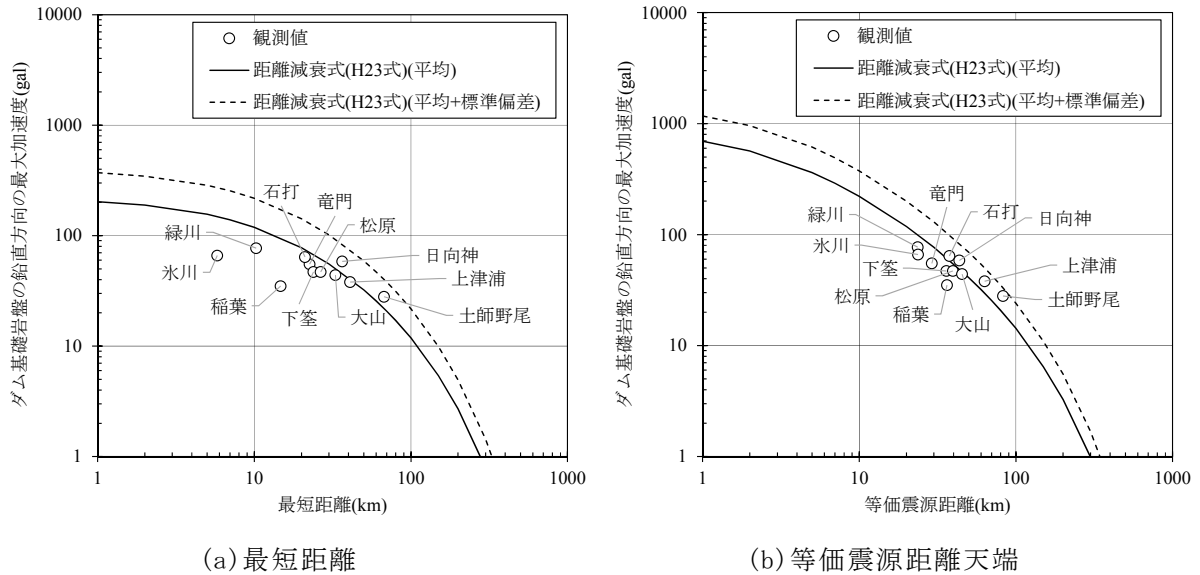
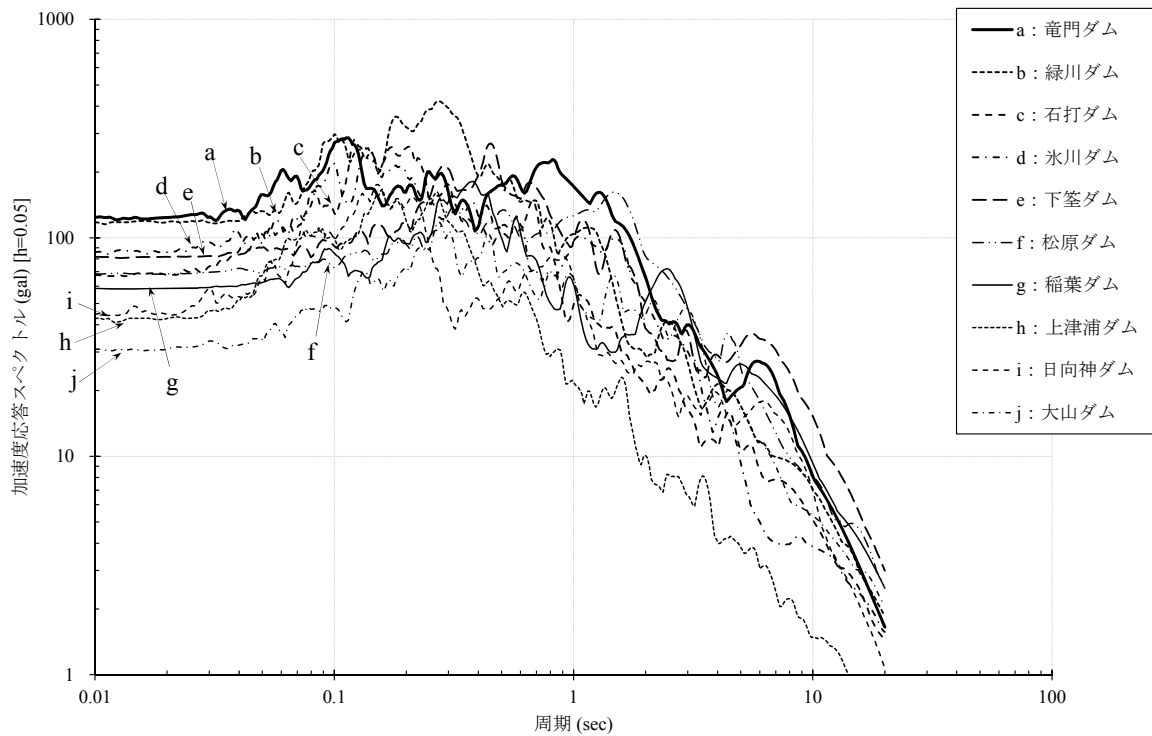


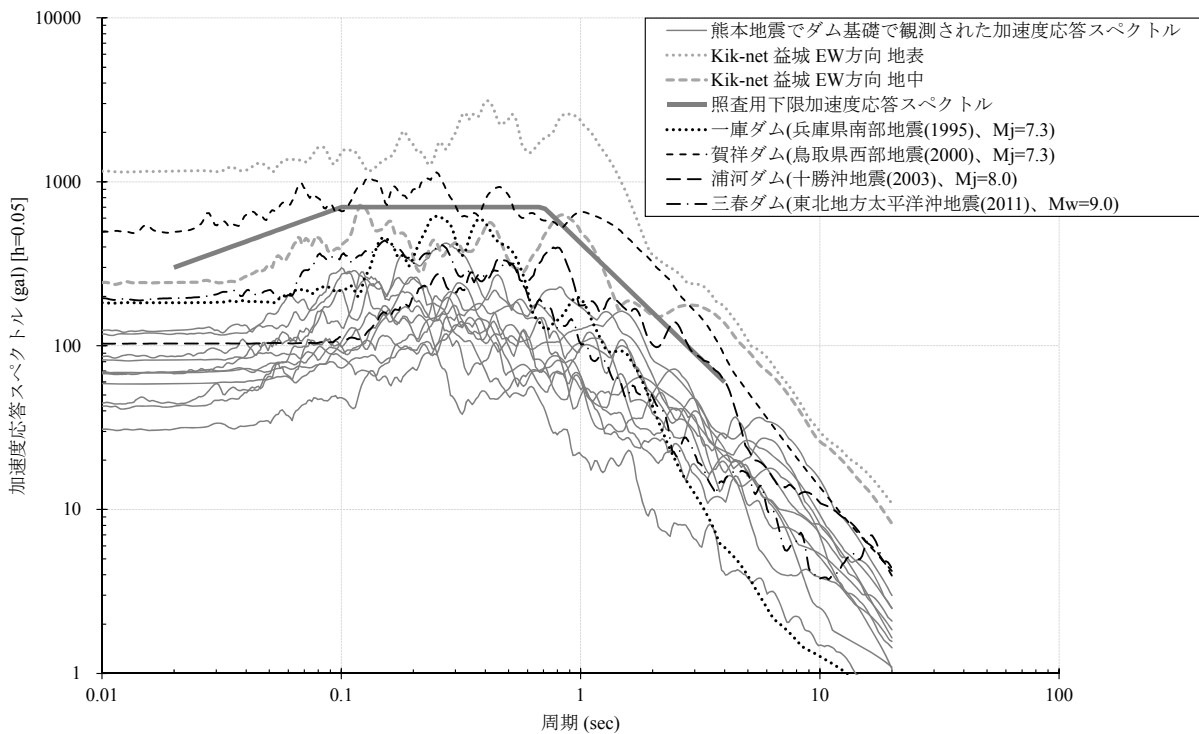
図-6.15 ダム基礎部で観測された最大加速度とダム距離減衰式による推定値の比較 (鉛直動)

表-6.5 に示したダムのうち、加速度時刻歴波形が得られた 10 ダムについて求めたダム基礎部での水平動(上下流方向成分)の加速度応答スペクトルを図-6.16(a)に示す。図-6.16(b)には、上記 10 ダムでの加速度応答スペクトルとともにダム以外の震源断層近傍の地盤での観測点(Kik-Net 益城⁶⁾)で観測された地震動の加速度応答スペクトル、大規模地震に対するダムの耐震性能照査⁷⁾で用いられる照査用下限加速度応答スペクトル(地震の震源となる活断層が地表面に現れていない場合を想定して、最低限考慮すべき地震動を加速度応答スペクトルとして設定したもの)及び既往の大規模地震において上記 10 ダムと同型式のコンクリートダムの基礎部で観測された代表的な強震動の加速度応答スペクトルの例も併せて示している。図-6.16 より、熊本地震(本震)において周辺のダム基礎部で観測された加速度応答スペクトルは短周期側でやや大きく、内陸地殻内地震の特徴を示してい

る。また、震源断層近傍の地盤での観測点（Kik-Net 益城）で観測された地震動に比べると全般に小さく、既往の内陸地殻内地震においてコンクリートダム基礎部で観測された代表的な強震動記録（図-6.16(b)の一庫ダムや賀祥ダムでの観測記録）や照査用下限加速度応答スペクトルに比べても、それほど大きな地震動ではなかったことがわかる。



(a) 各ダムでの基礎部における観測記録



(b) KiK-net 観測記録及び既往の地震のダム基礎部で観測された地震動等との比較

図-6.16 地震動の加速度応答スペクトル(上下流方向成分、減衰定数5%)

6.4.2 震源近傍のダムの地震動

比較的大きな加速度が計測された例として、表-6.5 中の竜門ダムと緑川ダムについて、基礎部で観測された地震動を以下に示す。

(1) 竜門ダムにおける加速度記録

竜門ダムは重力式コンクリートダムとロックフィルダムの複合ダムで、重力式コンクリートダム部の堤高は 99.5m である。竜門ダムでは、熊本地震(本震)において国土交通省所管ダムの中で最も大きな加速度が計測された。竜門ダムの諸元を表-6.6、地震計設置位置を図-6.17 にそれぞれ示す。竜門ダムでは、重力式コンクリートダムの天端(T1)と基礎部(L1)、フィルダム部の天端 2 箇所(T2、T3)に地震計が設置されている。

表-6.6 竜門ダム諸元

型式	重力式コンクリートダム	中央土質遮水壁型ロックフィルダム
堤高	99.5 m	31.4 m
堤頂長	620 m	240 m
堤体積	1,074,000 m ³	230,000 m ³
竣工	2001 年	

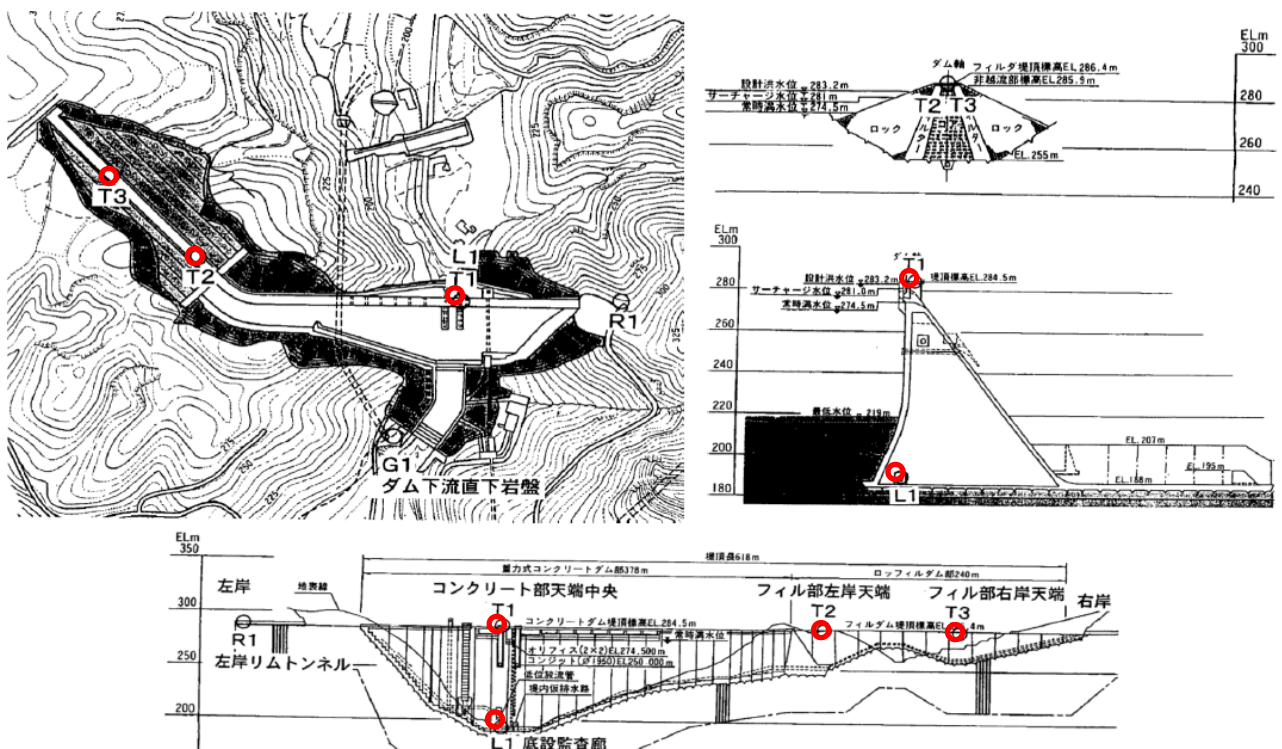


図-6.17 地震計設置位置(竜門ダム)

竜門ダムの重力式コンクリートダム部(基礎部、天端)で観測された本震時の加速度時刻歴波形を図-6.18に示す。最大加速度は、基礎部(L1)では上下流方向 123.9gal、ダム軸方向 81.1gal、鉛直方向 55.2gal、天端(T1)では上下流方向 376.1gal、ダム軸方向 249.7gal、鉛直方向 156.2galであった。

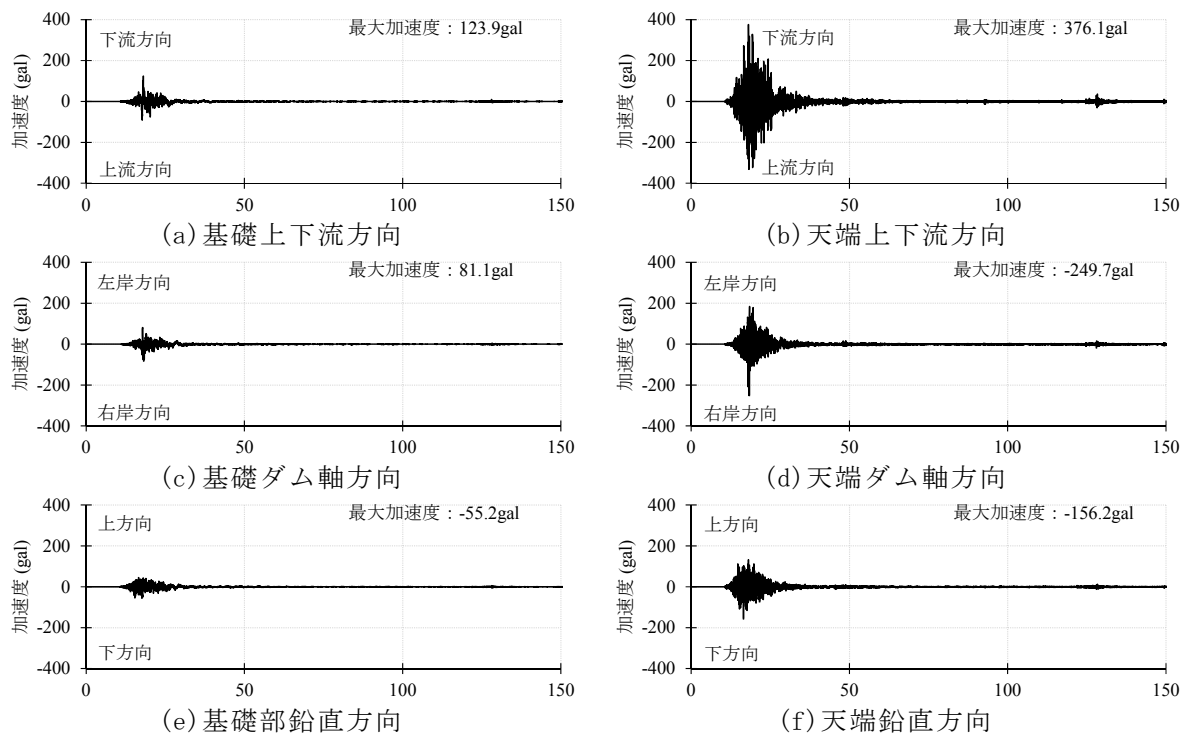


図-6.18 本震時の加速度時刻歴(竜門ダム(重力式コンクリートダム部))

竜門ダムのコンクリートダム部の基礎部で観測された地震動とダム距離減衰式により推定した同ダム地点での地震動の加速度応答スペクトルの比較を、水平方向成分について図-6.19、鉛直方向成分について図-6.20にそれぞれ示す。両図より、竜門ダム地点でダム距離減衰式により推定した地震動の加速度応答スペクトルは、水平動、鉛直動とも最短距離式によるものより等価震源距離式によるものがやや大きいことがわかる。

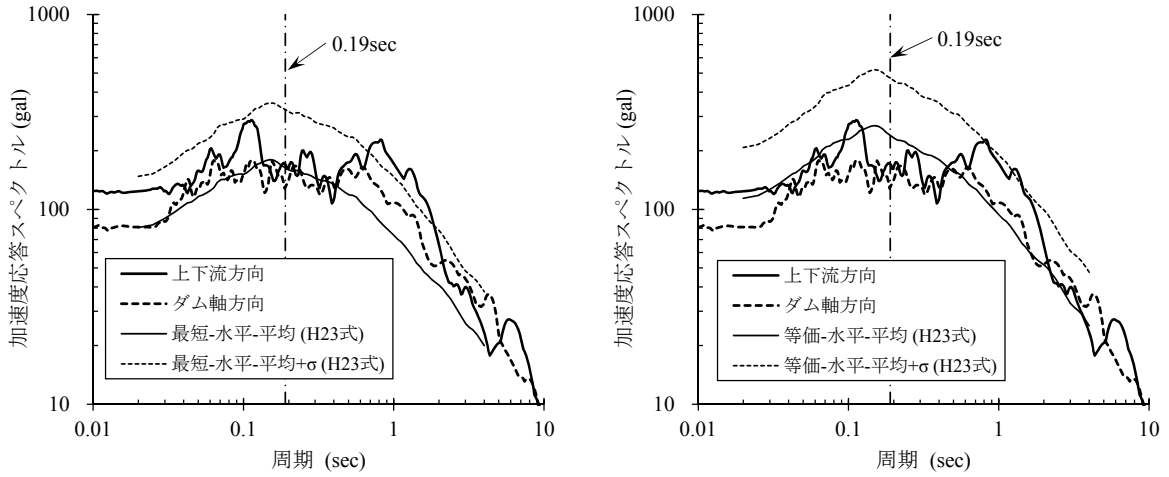
観測された地震動の加速度応答スペクトルをダム距離減衰式の最短距離式での推定結果と比較すると、水平動の場合、一部の周期帯では最短距離式の平均値+標準偏差程度となっているが、ダムの応答に影響が大きいと考えられる堤体の固有周期(式(6-1))に示す過去の重力式コンクリートダムにおける地震動観測記録からの経験式⁸⁾によれば、約0.19sec付近では平均値~平均値+標準偏差程度である。等価震源距離式との比較では、最短距離式に比べ全体に加速度応答スペクトルが大きめに推定される関係で、上記の固有周期付近での観測値はダム距離減衰式の平均値より小さくなっている。鉛直動については、観測値のスペクトルは概ね最短距離式の平均値程度であり、等価震源距離では平均値よりも小さめとなっている。

$$T = 0.191/100 \times H \pm 0.029 \quad (6-1)$$

ここに、 T : 1次固有周期(秒)、 H : ダム堤高(m)。

大規模地震に対する耐震性能照査において各地点で想定される最大級の地震動(レベル

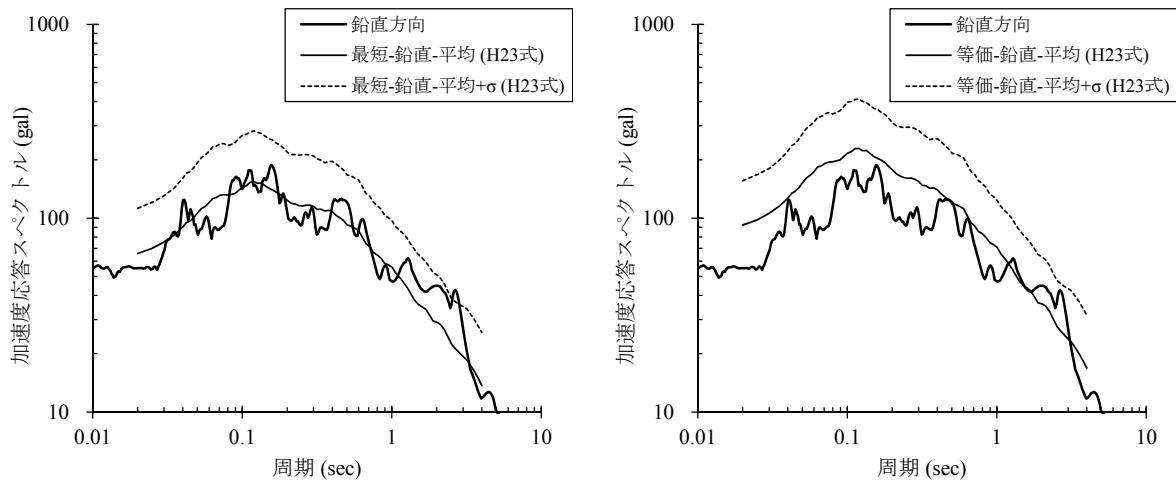
2 地震動)の推定をする際には、ダム距離減衰式の平均値+標準偏差レベルの加速度応答スペクトルを有する地震動が考慮されるが、今回の地震において、竜門ダムで観測された地震動は、基本的にこれを上回るものではなかった。



(a) 最短距離式との比較

(b) 等価震源距離式との比較

図-6.19 基礎部で観測された地震動の加速度応答スペクトル
(竜門ダム(重力式コンクリートダム部)、水平動、減衰定数 5%)



(a) 最短距離式との比較

(b) 等価震源距離との比較

図-6.20 基礎部で観測された地震動の加速度応答スペクトル
(竜門ダム(重力式コンクリートダム部)、鉛直動、減衰定数 5%)

(2) 緑川ダムにおける加速度記録

緑川ダムは、国土交通省が管理するダムのうち、震源断層(図-6.13 に示す断層モデル)から最も近いダムであった。地震計は重力式コンクリートダムである主ダムにのみ設置されている。主ダムの諸元を表-6.7、地震計の設置位置を図-6.21 にそれぞれ示す。地震計は主ダムの天端(T1)と基礎部(L1)に設置されている。

表-6.7 緑川ダム(主ダム)諸元

型式	重力式コンクリートダム
堤高	76.5 m
堤頂長	295.3 m
堤体積	367,400 m ³
竣工	1970 年

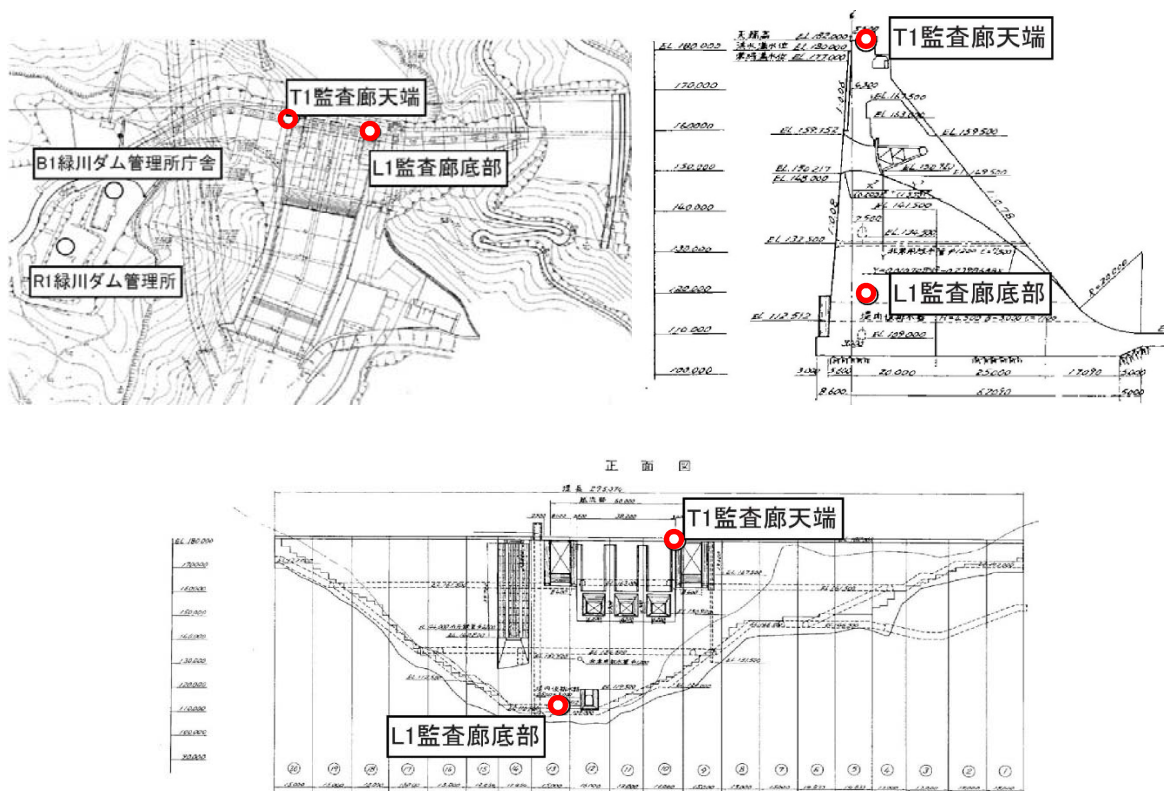


図-6.21 地震計設置位置(緑川ダム(主ダム))

緑川ダム(主ダム基礎部、天端)で観測された本震時の加速度時刻歴波形を図-6.22 に示す。最大加速度は、基礎部(L1)で上下流方向 117.9gal、ダム軸方向 77.9gal、鉛直方向 76.7gal、天端(T1)で上下流方向 344.3gal、ダム軸方向 382.6gal、鉛直方向 134.8gal であった。

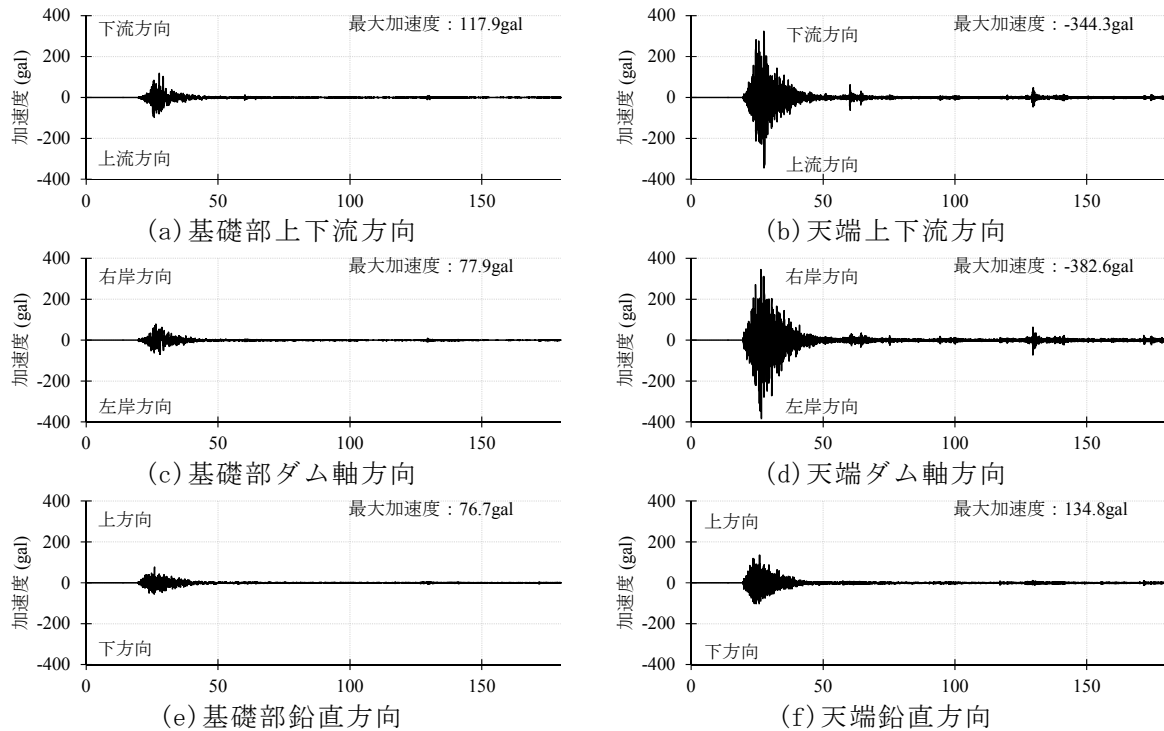


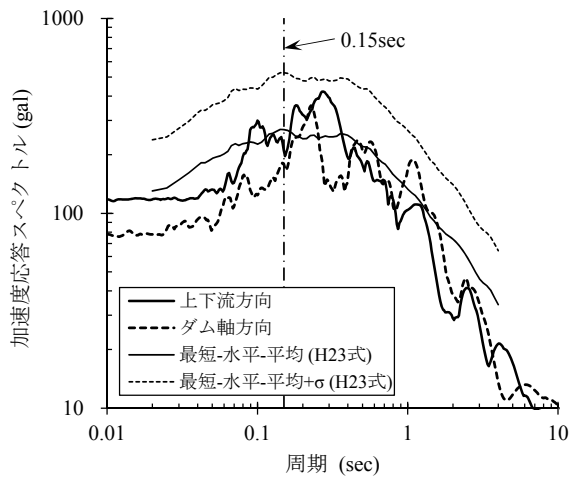
図-6.22 本震時の加速度時刻歴(緑川ダム(主ダム))

緑川ダムのコンクリートダム部基礎で観測された地震動とダム距離減衰式により推定した同ダム地点での地震動の加速度応答スペクトルの比較を水平方向成分について図-6.23、鉛直方向成分について図-6.24 にそれぞれ示す。

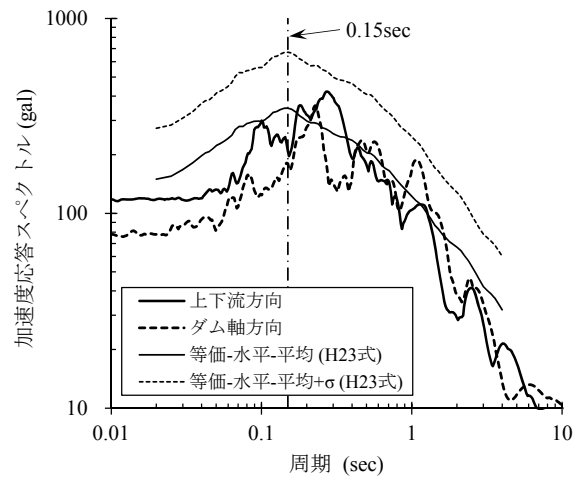
観測された地震動の加速度応答スペクトルをダム距離減衰式の最短距離式での推定結果と比較すると、水平動については、一部の周期帯では平均値以上となっているが、全ての周期帯で平均値+標準偏差以下となっている。なお、ダムの応答に大きく影響すると考えられる堤体の固有周期(経験式(6-1)⁸⁾によれば約 0.15sec)付近では、平均値程度である。等価震源距離式との比較でも傾向は概ね同様であるが、上記の固有周期付近では観測値はダム距離減衰式の平均値よりも小さくなっている。

鉛直動については、最短距離式、等価震源距離式いずれとの比較においても、観測された地震動のスペクトルは一部の周期帯でダム距離減衰式の平均値以上となっているほかは、ほとんどの周期帯で平均値以下となっている。

大規模地震に対する耐震性能照査において各地点で想定される最大級の地震動(レベル2地震動)の推定する際には、ダム距離減衰式の平均値+標準偏差レベルの加速度応答スペクトルを有する地震動が考慮されるが、今回の地震において、緑川ダムで観測された地震動は、基本的にこれを上回るものではなかった。

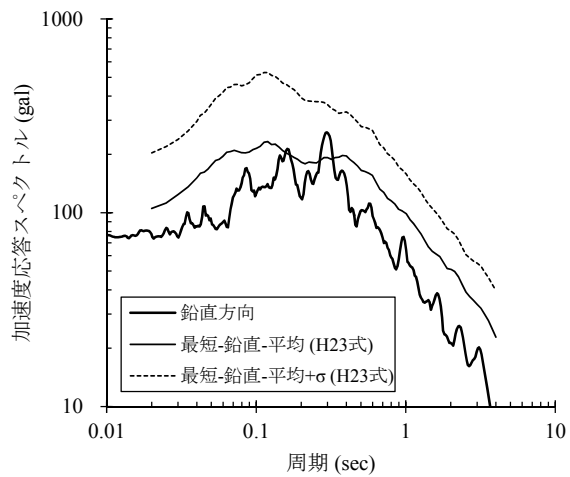


(a) 最短距離式との比較

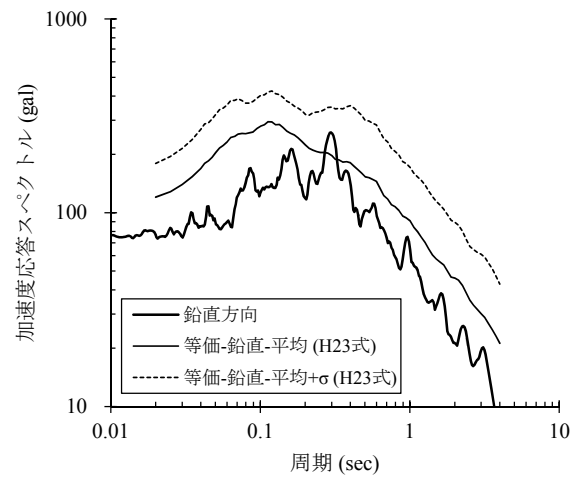


(b) 等価震源距離式との比較

図-6.23 基礎部で観測された地震動の加速度応答スペクトル
(緑川ダム(主ダム)、水平動、減衰定数 5%)



(a) 最短距離式との比較



(b) 等価震源距離式との比較

図-6.24 基礎部で観測された地震動の加速度応答スペクトル
(緑川ダム(主ダム)、鉛直動、減衰定数 5%)

6.5 まとめ

熊本地震において、臨時点検で堤体にクラック等の変状が報告された河川区域内の2つのフィルダムについて現地調査を実施した。その結果、報告されたクラック等の変状は、直ちに安全性に影響が生じるものではないと判断されたが、詳細な追加調査が必要と判断された。このため、監視を強化しつつ、管理者により変状範囲を確認するための各種調査が実施されるとともに、今後、その結果を踏まえて、変状箇所の補修(本復旧)が予定されている。

国土交通省所管の震源周辺のダムで観測された地震動については、内陸型地震の特徴を示す比較的短周期成分が大きい特徴が認められたが、震源断層近傍の地盤で観測された地震動や既往の代表的なダム基礎での強震記録と比べると大きなものではなかった。また、今回の地震において、比較的大きな加速度が計測された竜門ダムと緑川ダムで観測された地震動は、基本的にダム距離減衰式の平均値+標準偏差レベルの加速度応答スペクトルを有する地震動を上回るものではなかった。

ただし、いずれもコンクリートダムでの記録であり、今回現地調査を行った2つのフィルダムでは直接地震動観測が行われていない。そのため、地震動観測記録をもとに堤体に生じたクラック等の変状原因を解析的に推定することは難しいが、堤体のはらみだしや段差が認められなかったこと及びトレンチ調査の結果等から堤体のすべり破壊は生じていないものと考えられることから、天端付近で大きく増幅した地震動によって生じた上下流方向の引張応力によって縦断方向(ダム軸方向)のクラックが生じた可能性が高いと考えられる。

今回の調査で明らかになった変状の特徴や被災直後の対応、現地調査結果を踏まえて行われている各種の調査や検討中の復旧方法等については、今後の災害対応においても貴重な情報となるものと考えられ、今後関係機関からも詳細な報告が待たれるところである。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局河川環境課：地震発生後のダム臨時点検結果の報告について、2005.
- 2) 国土交通省：熊本県熊本地方を震源とする地震について(第50報)、
http://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_160502.html
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 維持管理編(ダム編)、2014.
- 4) 佐々木隆, 伊藤壮志：東北地方太平洋沖地震を踏まえたダム基礎岩盤における地震動距離減衰式、日本地震工学会論文集(特集号「2011年東北地方太平洋沖地震の地震動と地盤」)、Vol. 16, No. 4, pp. 80-92. 2016.
- 5) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：近地強震記録を用いた平成28年(2016年)熊本地震(4月16日1時25分、M7.3)の震源インバージョン解析(2016/5/12改訂版)
http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Kumamoto_20160416/inversion_v2/
- 6) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET、KiK-net)、
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 7) 国土交通省河川局治水課：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)、2005.
- 8) ダム地震記録データベース更新分科会：ダム地震動記録データベース更新分科会報告書、大ダム No. 231, pp. 6-54, 2015.