

3.8 コンクリートダムの補修・補強に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）

研究担当者：山口嘉一、岩下友也、小堀俊秀

【要旨】

大規模地震時に対するコンクリートダムの耐震性能照査を実施した場合、地震動特性、堤高、堤体形状等によっては堤体へのクラック発生の可能性が示唆されている。コンクリートダム堤体に発生したクラックについては、漏水防止を目的とした補修事例は多数あるが、強度を回復または向上することを目的とした事例は少なく、未だ対策方法は確立されていない。また、現在のダムの設計法を規定している河川管理施設等構造令施行前のダムに関しては、耐震性能向上のための効率的な補強方法が望まれている。このため、コンクリートダム堤体の強度などの耐震性能を回復・向上を目的とした補修・補強方法の開発が必要である。

本研究では、コンクリートダム堤体および一般のコンクリート構造物の補修・補強工法について実績の整理・分析を行い、その中から断面増厚工とアンカー工を用いた補修・補強対策工を対象にして、主に解析的方法により検討し、コンクリートダム堤体の補修・補強の効果や適切な対策方法について提案した。

キーワード：コンクリートダム、補修、補強、断面増厚工、アンカー工、非線形解析

1. はじめに

(1) ダムの耐震性能照査指針（案）について

『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）』（平成 17 年 3 月、国土交通省河川局）（以下、「ダム L2 指針案」と呼ぶ）¹⁾ では、レベル 2 地震動に対して確保すべきダムの耐震性能として、「①貯水機能が維持されること」、「②生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること」の 2 点が定められている。

このうち、耐震性能①とは、「制御できない貯水の流出が生じないこと」とされており、耐震性能照査では、ダム堤体に損傷が生じたとしても、それが限定的なものにとどまることを確認することとされている。具体的には、コンクリートダムについては、「(a)上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じないこと」、「(b)ダム堤体の圧縮破壊やせん断破壊を生じるような応力が発生しない、もしくは発生しても局所的なものにとどまること」の 2 点を確認することとされている。

また、耐震性能②については、レベル 2 地震動により損傷が生じたダムの修復可能性について、「適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で継続使用するための修復が可能であること」を確認することとされている。ダムは流域の治水・利水上極めて重要な機能を有する構造物であることを考えると、耐震性能②の修復可能性に関しては、単にダムの損傷状態の評

価にとどまらず、その補修工事において想定される工法や経費、修復に要する期間やその間の社会的・経済的影響やその措置等について検討することが必要となる。このため、修復可能性については、ダム L2 指針案の試行における重要な検討課題の 1 つとなっている。

本研究においては、修復可能性に関する検討の一環として、主に技術的な側面から損傷状態の評価を踏まえた補修対策効果について検討し、大規模地震時に受けた損傷に対して適切な補修対策の選定を行うための基本的な考え方を提案するものである。また、地震による損傷を想定して地震前にその耐震性能を向上するために実施する補強についても補修と同様に検討した。

(2) 本研究の経緯

●平成 17 年度

平成 17 年度は、コンクリートダム補修・補強技術上の課題を把握するために、コンクリートダムに発生している変状の調査を行い、補修・補強事例の整理分析を実施した。事例としては、耐震性能の回復・向上のための補修・補強ではないが、ダムの状況（高水圧、寒冷等の諸条件）と対象としている劣化、被害の種類を踏まえた、補修・補強技術上の課題を把握した。

●平成 18 年度

これを踏まえ、平成 18 年度は、コンクリートダム堤体に対する補修・補強実績の整理・分析を行い、断面増厚工（コンクリート腹付け工）、アンカー工による

地震後補修を対象にして、解析的、実験的な対策効果の検討を実施した。解析的検討については、大規模地震後の補修工法として、断面増厚工（コンクリート腹付け工）とアンカー工を取り上げ、各補修工による補修効果の評価を行った。実験的検討については、コンクリートダム堤体内にアンカー体を定着することを想定した基礎的な検討を行うために、実ダムから採取したコンクリートコアを対象にアンカー体引抜き試験を実施した。

●平成 19 年度

平成 19 年度は、数種の堤体形状と入力地震動を組み合わせて大規模地震時の損傷形態の予測を行い、そこで得られるダム堤体の損傷から代表例をいくつか取り上げ、①地震後補修の検討（補修した後に再度地震動を入力し、地震後補修しない場合との比較により補修効果を確認する）、②地震前補強の検討（あらかじめ補強したダム堤体に地震動を入力し、地震前補強しない場合との比較により補強効果を確認する）を行った。対策工法としては、断面増厚工（腹付け工）とアンカー工および両者の組合せを取り上げて、対策の度合いと対策効果の関係を定量的に評価した。

2. 研究方法

図-1 に検討フローを示す。3 種類の異なるダム堤体形状（図-2～図-4 参照）と入力地震動の特性（位相、加速度振幅）をパラメータとし、堤体コンクリートの引張破壊を分布型ひび割れモデルによりモデル化した非線形動的解析により、ダム堤体に発生する様々なクラック形態の推定を行う。入力地震動は、ダムの照査用下限加速度応答スペクトル¹⁾ に対し、1995 年兵庫県南部地震の際にダムで観測された地震動の位相特性を付与した加速度時刻歴波形を用い、加速度振幅を変化させて解析モデルに入力した。その結果から、代表的なクラック発生形態（堤頂部、下流面、フィレット設置部）を抽出し、本検討における補修の対象クラックとする。

本検討では、補修・補強工法として、①断面増厚工法（上流面および下流面腹付け）と②アンカー工法の 2 工法を用い、(a)地震後補修、(b)地震前補強による対策効果の検討を行う。(a)では、ダム堤体モデルに既存クラック（1 回目の地震でクラックが発生した範囲の引張強度＝0 と設定）と対策工（腹付け工、アンカー工）を設定し、1 回目の地震と同じ地震動を再入力し、地震後補修を行った後に再地震を受けた場合における既存クラックの進展防止・抑制効果を検証する。一方 (b)では、地震前（クラック無し）のダム堤体モデルに

対策工（腹付け工、アンカー工）を設定し、(a)と同じ地震動を入力し、地震前補強によるクラック発生防止・抑制効果を定量的に評価する。なお、本解析では、腹付け厚さとプレストレス力を解析パラメータとする。

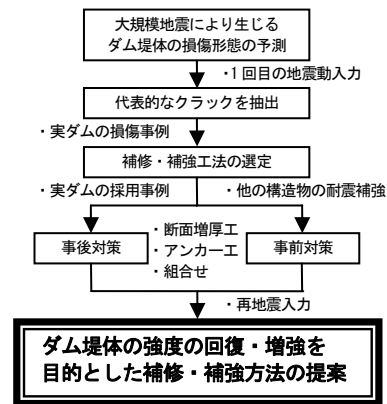


図-1 検討フロー

3. 損傷形態の予測

3.1 解析条件

(1) 解析モデル

図-2～図-4 に堤高 100m の重力式コンクリートダムを想定した解析モデルを示す。また、表-1 に解析モデルの主要諸元を示す。堤体コンクリートの引張破壊については、分布型ひび割れモデル(smeared crack model)により表現する。

(2) 入力地震動

図-5 および図-6 に堤体底面で定義したレベル 2 地震動を示す。入力地震動は、この波形を基礎地盤部底面に引き戻した加速度時刻歴を用いる。なお、図-5 および図-6 中の加速度の符号は、水平上下流方向については下流方向を＋、上流方向を－とし、鉛直方向については、鉛直上方を＋、鉛直下方を－としている。これは、本報告文中で統一しており、応答変位の方角と符号についても同様としている。

このレベル 2 地震動は、ダム L2 指針案に示されている照査用下限加速度応答スペクトル（図-7 参照）に対し、1995 年兵庫県南部地震の時、一庫ダムおよび権現ダムで観測された地震動（水平最大加速度＝182gal（一庫ダム、図-8 参照）、104gal（権現ダム、図-9 参照））の加速度時刻歴が有する位相特性を付与した加速度時刻歴波形（以下、「下限・一庫波」および「下限・権現波」と呼ぶ）である。両波形については、下限・一庫波は主要動が短く（10.48 秒間）、「大きな山が 1 つ」という形状をしているのに対し、下限・権現波は主要動が長く（24.00 秒間）、「同規模の山が長く続く」といった形状をしているという特徴がある。

3.8 コンクリートダム補修・補強に関する研究

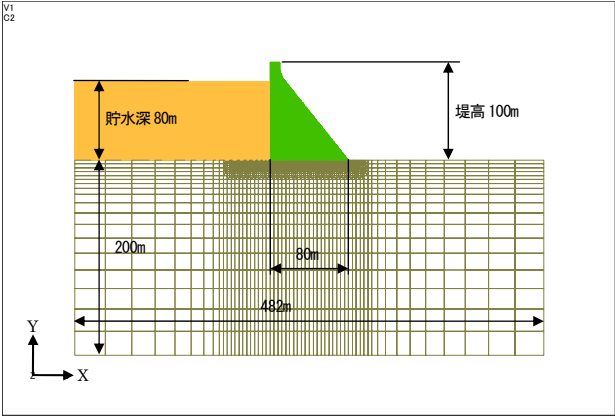


図-2 フィレット無しモデル

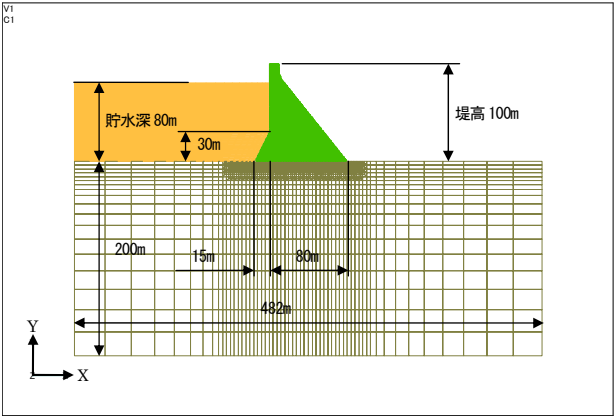


図-3 フィレット勾配1:0.5モデル

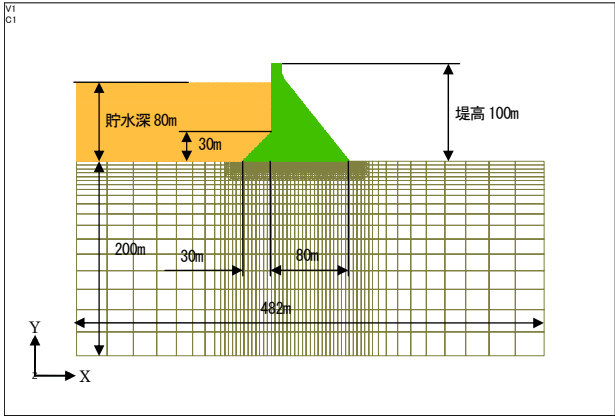


図-4 フィレット勾配1:1.0モデル

表-1 解析モデルの主要諸元

項目	諸元	備考
堤体部	堤高	100m
	下流面勾配	1:0.80
	上流面勾配	鉛直
	フィレット	①無し フィレット無しモデル
		②高さ30m、勾配1:0.5 フィレット勾配1:0.5で分析
		③高さ30m、勾配1:1.0 フィレット勾配1:1.0で分析
堤頂幅	10m	
基礎地盤部	高さ200m×幅482m	堤体底面上下流端から2H程度確保（H：堤高）
貯水池部	貯水深80m	常時満水位程度を想定

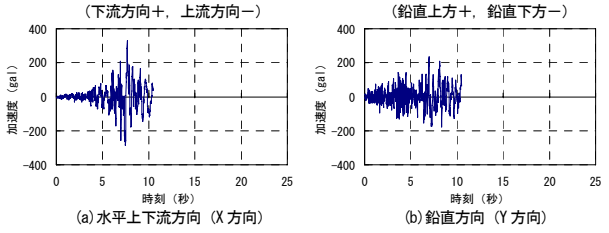


図-5 下限・一庫波

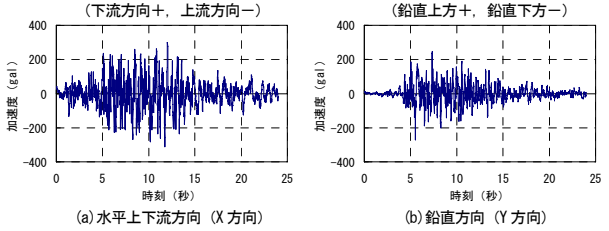


図-6 下限・権現波

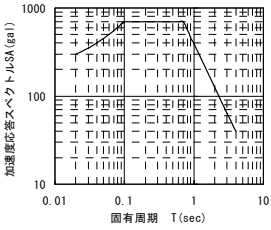


図-7 照査用下限加速度応答スペクトル¹⁾

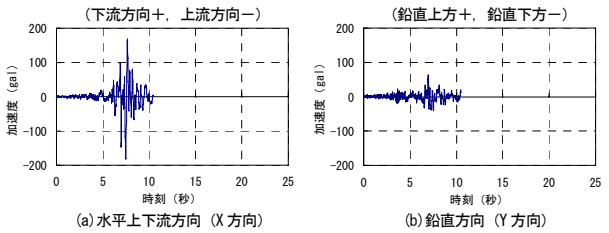


図-8 1995年兵庫県南部地震 一庫ダム観測波

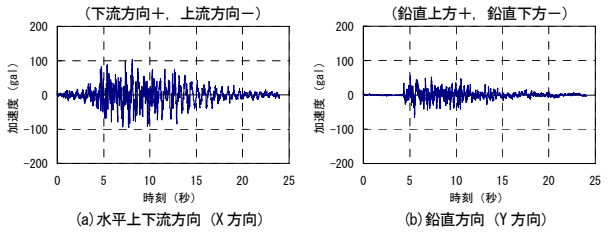


図-9 1995年兵庫県南部地震 権現ダム観測波

(3) 材料物性値

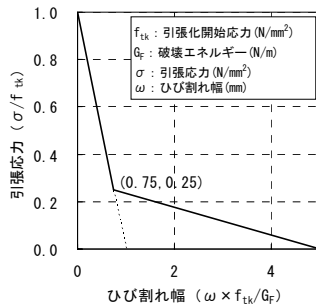
表-2に解析に用いる材料物性値を示す。

表-2 解析に用いる材料物性値

材料物性	堤体	岩盤	貯水
単位容積質量 ρ (kg/m ³)	2,300	2,300	1,000
弾性係数 E (N/mm ²)	29,000	40,000	—
ポアソン比 ν	0.2	0.3	—
減衰定数 h (%)	5 [C(t)]= β [K(t)]	5 [C(t)]= β [K(t)]	—
引張軟化開始応力 f_t (N/mm ²)	2.8	—	—
破壊エネルギー Gf (N/m)	400	—	—
引張軟化曲線	2直線近似	—	—

i) コンクリートの引張軟化特性

堤体コンクリートの引張軟化曲線には、図-10 に示す2直線近似型のものを用いた。

図-10 引張軟化曲線（2直線近似型）²⁾

引張軟化開始応力 f_{tk} は、本モデルダムと同規模の実ダムで得た圧縮強度（平均値 μ - 標準偏差 $\sigma = 28\text{N/mm}^2$ ）の $1/10$ の 2.8N/mm^2 とした。また、破壊エネルギー G_F は、粗骨材最大寸法 $20\sim 150\text{mm}$ のダム用コンクリートのくさび挿入型試験結果³⁾ を用いて、粗骨材最大寸法 150mm の値として 400N/m を設定した。

ii) 減衰特性

a) 減衰マトリックス

減衰マトリックスには、次のものがある。

- ① Rayleigh 減衰 : $[C] = \alpha [M] + \beta [K]$
- ② 質量比例型減衰 : $[C] = \alpha [M]$
- ③ 剛性比例型減衰 : $[C] = \beta [K]$
- ④ 瞬間剛性比例型減衰 : $[C(t)] = \beta [K(t)]$

ここに、 $[C]$: 減衰マトリックス、 $[M]$: 質量マトリックス、 $[K]$: 剛性マトリックス、 t : 時刻、 α および β : 対象とする構造物の支配的な固有振動数に対する減衰定数を設定して定める係数である。

山口ら⁴⁾によると、クラックが貫通しにくい大規模な構造物の解析では Rayleigh 減衰の適用性は高いが、貫通する規模のクラックが生じるようなことまでも含める場合には瞬間剛性比例型の減衰マトリックスが優れており、クラック発生要素の分散も起こりづらいとされている。本研究では、下記 b) に示すように堤体にクラックを誘発しやすい解析条件を設定をしており、規模の大きいクラックが発生することも想定されたため、「④瞬間剛性比例型の減衰マトリックス」を用いることとした。

b) 減衰定数

岩盤もモデル化した既往の解析実績においては、減衰定数 $h=5\sim 10\%$ 程度を用いている。本検討では減衰を小さくして堤体の応答を大きくすることにより、

解析上クラックの発生・進展を促進させるため、減衰定数は小さめの $h=5\%$ とした。

(4) 荷重条件

表-3、図-11 に荷重条件を示す。地震時動水圧は、貯水を非圧縮性流体と仮定し、付加質量マトリックスにより考慮する⁵⁾。地震動は、基礎地盤部底面から入力する。基礎地盤部底面および側面の境界条件は、粘性境界とする。基礎地盤部側面は、粘性境界を介して自由地盤と連結している。揚圧力は、考慮していない。

表-3 荷重条件

荷重		静的解析（初期応力）		動的解析	
		堤体	基礎地盤	堤体	基礎地盤
水平方向	静水圧	○	—	—	—
	地震時動水圧	—	—	○	—
	地震動（上下流）	—	—	○	○
鉛直方向	自重	○	○	—	—
	水重	○	○	—	—
	地震動（鉛直）	—	—	○	○

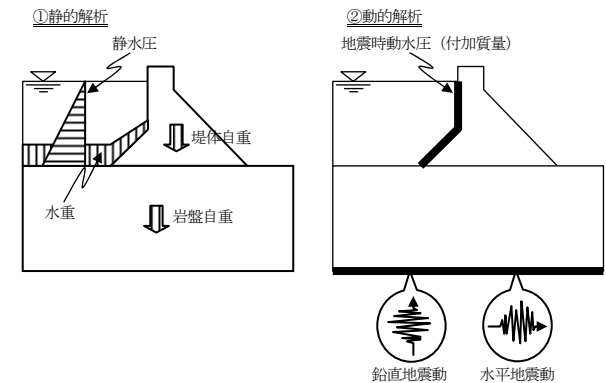


図-11 荷重条件のイメージ

3.2 解析結果

解析結果として、表-6～表-8 にクラック図（最大クラック変位コンター）一覧を示す。また、図-12 に示すとおり、クラック図は、クラック変位（分布型ひび割れモデルでクラックの開口量を模擬した変位量）の大ききで区分し、引張軟化曲線（2直線型）の折れ点に相当するクラック変位で色分けを行った。

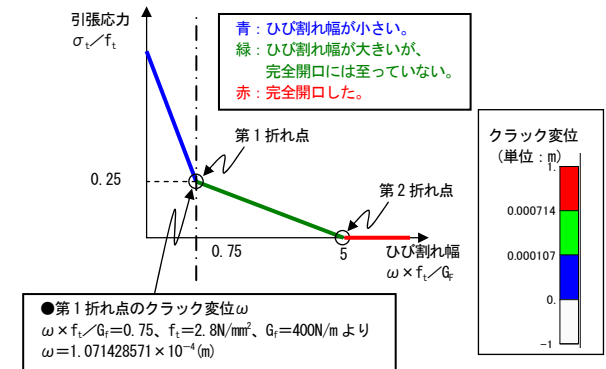


図-12 クラック図（最大クラック変位コンター）の色分け

表-6～表-8 から次のことが考えられる。

- ①ダム堤体（三角形形状を基本とする）に発生すると考えられるクラックを大別すると、(a)堤頂部（堤体下流面の形状変化点）、(b)下流面、(c)フィレット設置部（堤体上流面の形状変化点）、(d)堤体底面の4パターンに分類できると考えられる。
- ②ダム堤体に複数のクラックが発生したケースは、(a)～(d)のクラックの発生原因が複合的に作用した結果であると考えられる。

3.3 本検討における補修・補強の対象とする堤体損傷の選定

本研究では、大規模地震によってダム堤体に生じる損傷（クラック）のうち、代表的であると考えられるクラックを取り上げ、ダム堤体の耐震補強（地震前補強、地震後補修）に関する基礎検討を行うものである。

ここでは、実ダムの地震被害事例や他の研究成果を参考とし、前項 3.2 で得た結果の中から、本検討において補修・補強の対象とするクラックを選定することとする。

(1) 地震被害事例

重力式コンクリートダムの地震被害事例としては、Koyna ダム（インド）で発生したクラックが挙げられる。1967 年 12 月に Koyna ダムから約 13km の地点でマグニチュード M6.5 の地震が発生し、当初設計でミドルサードの条件を満足していなかったダム堤体下流面の勾配変化点付近に水平方向のクラックが発生した（図-13 参照）。

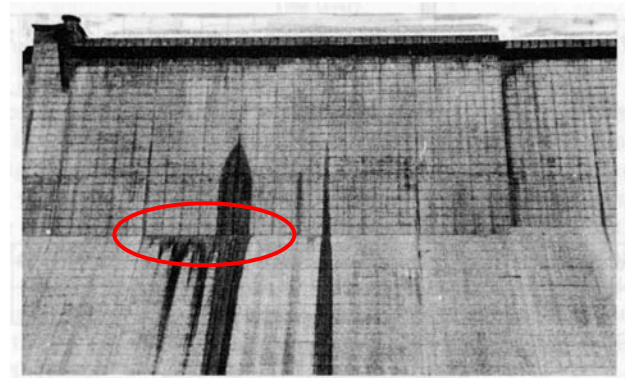
(2) 他の研究成果

Sasaki ら⁶⁾ は、重力式コンクリートダム（基本三角形モデル）の堤高、フィレット高さ（勾配は固定）、入力地震動（下限・一庫波）の加速度振幅をパラメータとし、スミアドクラックモデルを用いた非線形動的解析を実施している。本研究の解析条件（瞬間剛性比例型減衰、2 直線型引張軟化曲線）とは異なる解析条件（Rayleigh 減衰、単直線型引張軟化曲線）を用いているものの、特徴的な損傷箇所として、(a)下流面、(b)上流面、(c)フィレット設置部、(d)堤体底面が挙げられる（表-4 参照）。

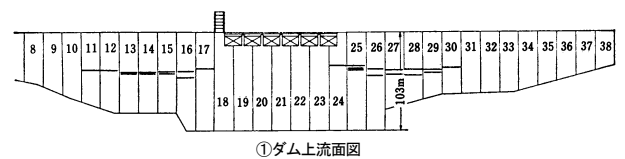
(3) 本検討における補修・補強の対象とする堤体損傷の選定

実ダムの地震被害事例、他の研究成果を参考とし、ダム堤体に発生する代表的なクラックとして、今回の解析結果から表-5 に示す(a)～(c)の 3 つのクラックを選定し、これらを本検討における補修・補強の対象とすることとする。

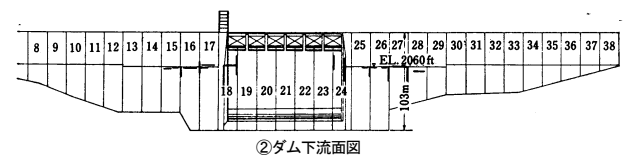
なお、堤体底面に発生すると想定されるクラックに



(a) 下流面に発生したクラック

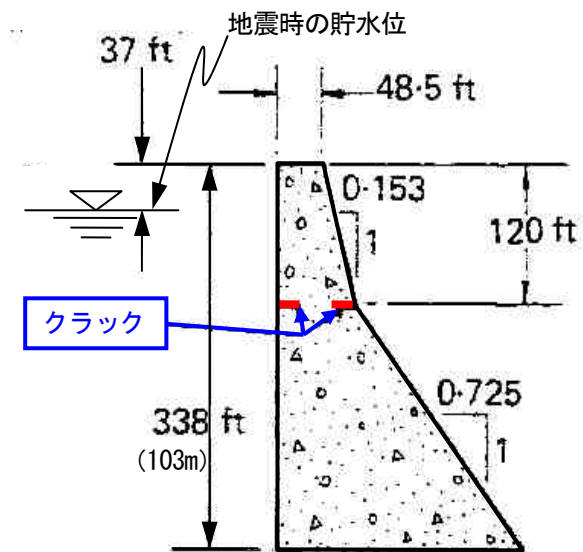


①ダム上流面図



②ダム下流面図

(b) ダム上下流面図



(c) ダム横断面図

図-13 Koyna ダムの Koyna 地震による被害(クラック)事例^{6), 7)}

については、次に挙げる点を考慮し、本検討の対象から外すこととした。

- ①本解析モデルでは基礎地盤部の非線形性（引張破壊、せん断破壊等）、ダム堤体と基礎地盤との不連続性（接合面の付着強度）を考慮していない。そのため、今回の解析により堤体底面に発生すると想定されたクラックは、(a)基礎地盤部の破壊

(引張、せん断等)、(b)ダム堤体が基礎地盤部からはがれる、(c)ダム堤体底面付近の引張破壊、といった複数の現象が、単独あるいは複合的に発生する可能性を示唆するものと考えられる。

②今回の解析モデルは、その複数の現象を同時に評価できるモデルではないこと。

また、ダム堤体に複数のクラックが発生したケースは、今回対象とする3つの代表的なクラック(堤頂部、下流面、フィレット設置部)の発生原因が複合的に作用した結果であると考えられるため、検討対象から外すこととした。

表-4 Sasaki らの解析によるクラック発生位置(PGA=500gal)⁷⁾

	H=50m	H=100m	H=150m
Model-1			
Model-2			
Model-3			

表-5 本検討における補修・補強の対象とするクラック

	クラック図	備考
(a) 堤頂部		フィレット勾配 1:0.5 下限・権現波 S+V+ 振幅 1.56 倍
(b) 下流面		フィレット無し 下限・権現波 S+V+ 振幅 1.2 倍
(c) フィレット設置部		フィレット勾配 1:1.0 下限・一庫波 S-V+ 振幅 1.8 倍

4. コンクリートダム の補修・補強工法

ここでは、コンクリートダム の補修事例およびコンクリート構造物の補修・補強工法の調査結果概要を整理し、5.1～5.3 節の検討に用いるコンクリートダム の補修・補強工法の選定の一助とする。

(1) コンクリートダム の補修・補強事例の調査結果

表-9 に、コンクリートダム に発生した主な変状と推定原因および実施された補修対策を示す。表-9 には、主に漏水、ひび割れ、堤体表面の劣化等に対して原形復旧するための補修対策事例が示されている。

(2) コンクリート構造物の補修・補強工法の調査結果

『実務者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル』⁹⁾、新技術情報提供システム NETIS¹⁰⁾を用い、コンクリート構造物の補修・補強工法について調査を行った。

表-10 にコンクリート構造物の補修工法、表-11 にコンクリート構造物の補強工法の調査結果を示す。補強目的については、表-11 に示すとおり耐震性向上、耐荷性向上が多かった。

(3) 重力式コンクリートダム において想定される耐震補修・補強工法

重力式コンクリートダム において想定される耐震補修・補強工法を表-12 に示す。

(4) 本検討で用いるコンクリートダム の補修・補強工法の選定

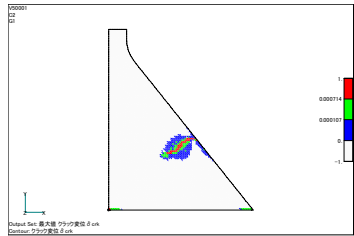
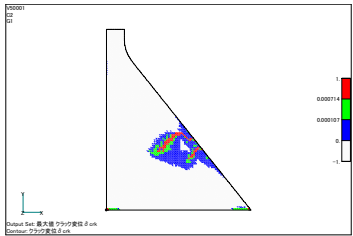
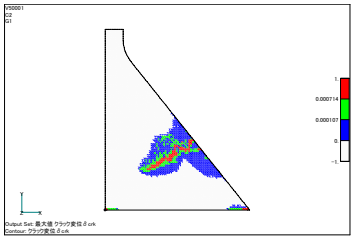
本検討では、コンクリートダム の耐震性能の回復・向上を目的とした補修・補強方法について検討を行うことを目的としている。したがって、表-9～表-11 からコンクリートダム に適用可能と考えられる補強工法を選定し、本検討の対象工法とする。

i) ダム堤体に対して効果的と考えられる耐震補強方法

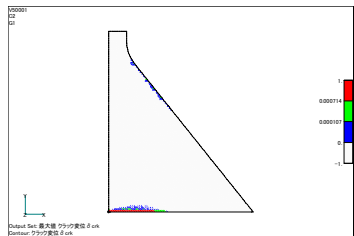
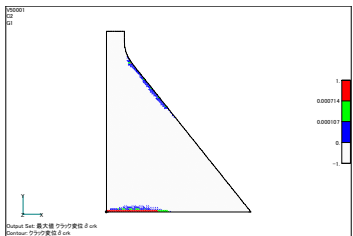
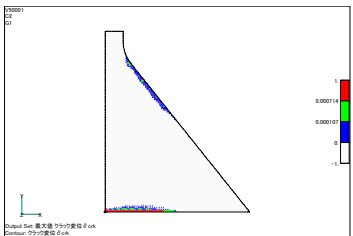
鉄筋コンクリート構造物は、クラックが生じてでも引張応力に対しては鉄筋で受け持つ。それに対し、コンクリートダム のようなマスコンクリートは、基本的に引張応力に対しては、コンクリートの引張強度で受け持つ。また、引張クラックもコンクリート堤体の深部にまで進展することが想定される。したがって、接着工法(表-11 参照)のように表面に補強材を追加する程度では、大規模地震に対する耐震性能を向上させる効果が不足することも考えられる。

表-6 損傷形態の予測計算結果 (1/3) (フィレット無しモデル)

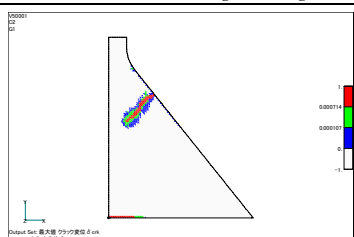
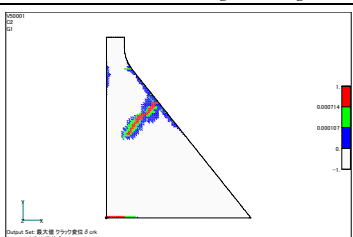
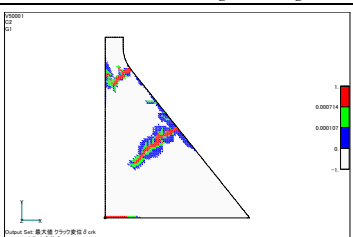
(1) 下限・一庫波・S+V+

入力地震動	下限・一庫波		
入力方向	S+V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.3 倍	振幅 1.4 倍	振幅 1.5 倍
入力加速度	水平上下流方向: +430gal~-373gal	水平上下流方向: +463gal~-401gal	水平上下流方向: +496gal~-430gal
	鉛直方向: +306gal~-232gal	鉛直方向: +330gal~-249gal	鉛直方向: +354gal~-267gal
クラック図			

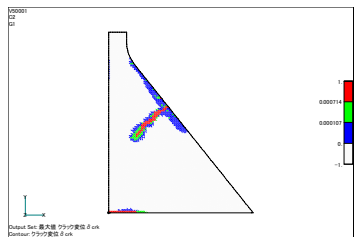
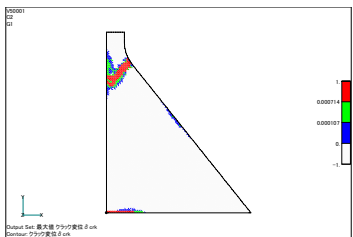
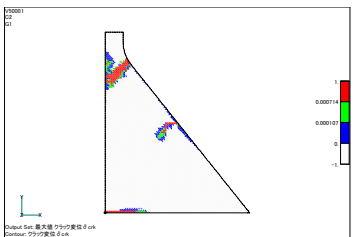
(2) 下限・一庫波・S-V+

入力地震動	下限・一庫波		
入力方向	S-V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.4 倍	振幅 1.5 倍	振幅 1.6 倍
入力加速度	水平上下流方向: +401gal~-463gal	水平上下流方向: +430gal~-496gal	水平上下流方向: +459gal~-529gal
	鉛直方向: +249gal~-330gal	鉛直方向: +267gal~-354gal	鉛直方向: +285gal~-377gal
クラック図			

(3) 下限・権現波・S+V+

入力地震動	下限・権現波		
入力方向	S+V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.2 倍	振幅 1.3 倍	振幅 1.4 倍
入力加速度	水平上下流方向: +360gal~-375gal	水平上下流方向: +390gal~-407gal	水平上下流方向: +420gal~-438gal
	鉛直方向: +296gal~-326gal	鉛直方向: +321gal~-353gal	鉛直方向: +345gal~-380gal
クラック図			

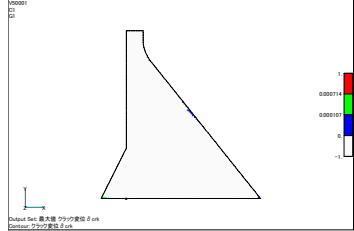
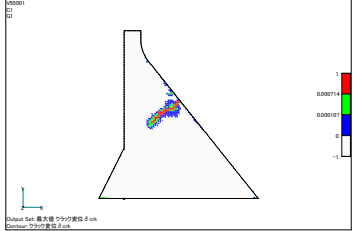
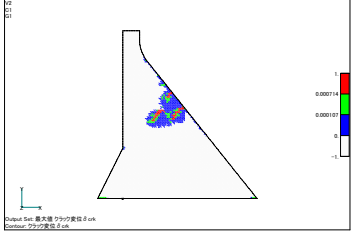
(4) 下限・権現波・S-V+

入力地震動	下限・権現波		
入力方向	S-V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.3 倍	振幅 1.4 倍	振幅 1.5 倍
入力加速度	水平上下流方向: +407gal~-390gal	水平上下流方向: +438gal~-420gal	水平上下流方向: +469gal~-450gal
	鉛直方向: +353gal~-321gal	鉛直方向: +380gal~-345gal	鉛直方向: +407gal~-370gal
クラック図			

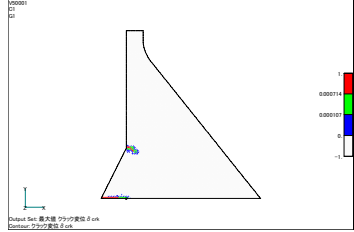
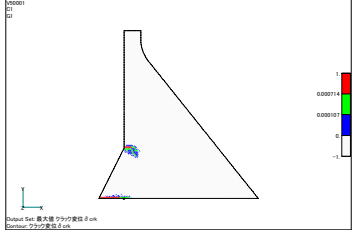
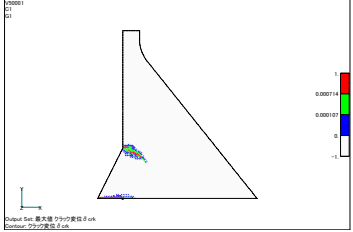
【注】入力方向と加速度振幅の倍率は、図-5および図-6に示す地震動を「S+V+、倍率 1.0 倍」とし、水平上下流方向を反転して入力した場合は「S-V+」、加速度振幅の倍率を変えた場合は「振幅●●倍」と表記した。

表-7 損傷形態の予測計算結果 (2/3) (フィレット勾配 1:0.5 モデル)

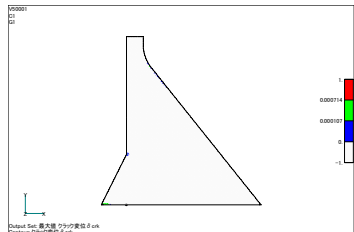
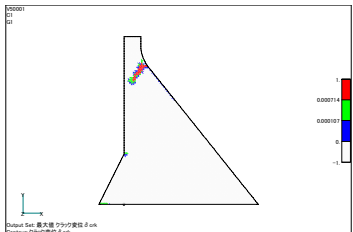
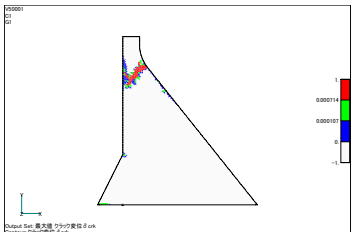
(1) 下限・一庫波・S+V+

入力地震動	下限・一庫波		
入力方向	S+V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.6 倍	振幅 1.7 倍	振幅 1.8 倍
入力加速度	水平上下流方向: +529gal~-459gal	水平上下流方向: +562gal~-487gal	水平上下流方向: +595gal~-516gal
	鉛直方向: +377gal~-285gal	鉛直方向: +401gal~-303gal	鉛直方向: +424gal~-321gal
クラック図			

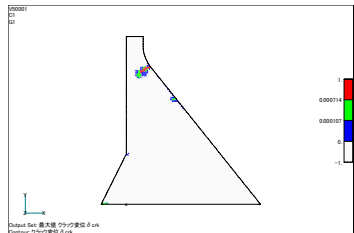
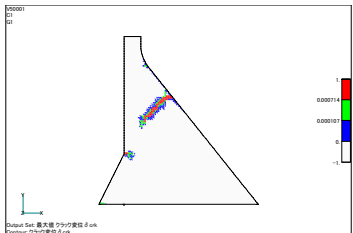
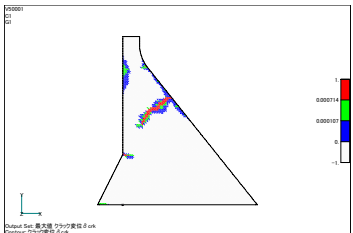
(2) 下限・一庫波・S-V+

入力地震動	下限・一庫波		
入力方向	S-V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.8 倍	振幅 1.9 倍	振幅 2.0 倍
入力加速度	水平上下流方向: +516gal~-595gal	水平上下流方向: +545gal~-628gal	水平上下流方向: +573gal~-662gal
	鉛直方向: +321gal~-424gal	鉛直方向: +339gal~-448gal	鉛直方向: +356gal~-471gal
クラック図			

(3) 下限・権現波・S+V+

入力地震動	下限・権現波		
入力方向	S+V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.5 倍	振幅 1.56 倍	振幅 1.6 倍
入力加速度	水平上下流方向: +450gal~-469gal	水平上下流方向: +468gal~-488gal	水平上下流方向: +510gal~-532gal
	鉛直方向: +370gal~-407gal	鉛直方向: +385gal~-423gal	鉛直方向: +395gal~-434gal
クラック図			

(4) 下限・権現波・S-V+

入力地震動	下限・権現波		
入力方向	S-V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.5 倍	振幅 1.6 倍	振幅 1.7 倍
入力加速度	水平上下流方向: +469gal~-450gal	水平上下流方向: +501gal~-480gal	水平上下流方向: +532gal~-510gal
	鉛直方向: +407gal~-370gal	鉛直方向: +434gal~-395gal	鉛直方向: +461gal~-419gal
クラック図			

【注】入力方向と加速度振幅の倍率は、図-5および図-6に示す地震動を「S+V+、倍率 1.0 倍」とし、水平上下流方向を反転して入力した場合は「S-V+」、加速度振幅の倍率を変えた場合は「振幅●●倍」と表記した。

表-8 損傷形態の予測計算結果 (3/3) (フィレット勾配 1:1.0 モデル)

(1) 下限・一庫波・S+V+

入力地震動	下限・一庫波		
入力方向	S+V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.5 倍	振幅 1.6 倍	振幅 1.7 倍
入力加速度	水平上下流方向: +496gal~-430gal 鉛直方向: +354gal~-267gal	水平上下流方向: +529gal~-459gal 鉛直方向: +377gal~-285gal	水平上下流方向: +562gal~-487gal 鉛直方向: +401gal~-303gal
クラック図			

(2) 下限・一庫波・S-V+

入力地震動	下限・一庫波		
入力方向	S-V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.7 倍	振幅 1.8 倍	振幅 1.9 倍
入力加速度	水平上下流方向: +487gal~-562gal 鉛直方向: +303gal~-401gal	水平上下流方向: +516gal~-595gal 鉛直方向: +321gal~-424gal	水平上下流方向: +545gal~-628gal 鉛直方向: +339gal~-448gal
クラック図			

(3) 下限・権現波・S+V+

入力地震動	下限・権現波		
入力方向	S+V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.3 倍	振幅 1.4 倍	振幅 1.5 倍
入力加速度	水平上下流方向: +390gal~-407gal 鉛直方向: +321gal~-353gal	水平上下流方向: +420gal~-438gal 鉛直方向: +345gal~-380gal	水平上下流方向: +450gal~-469gal 鉛直方向: +370gal~-407gal
クラック図			

(4) 下限・権現波・S-V+

入力地震動	下限・権現波		
入力方向	S-V+		
加速度振幅の倍率	振幅 1.4 倍	振幅 1.5 倍	振幅 1.6 倍
入力加速度	水平上下流方向: +438gal~-420gal 鉛直方向: +380gal~-345gal	水平上下流方向: +469gal~-450gal 鉛直方向: +407gal~-370gal	水平上下流方向: +501gal~-480gal 鉛直方向: +434gal~-395gal
クラック図			

【注】入力方向と加速度振幅の倍率は、図-5および図-6に示す地震動を「S+V+、倍率 1.0 倍」とし、水平上下流方向を反転して入力した場合は「S-V+」、加速度振幅の倍率を変えた場合は「振幅●●倍」と表記した。

表-9 コンクリートダムに発生した主な変状と推定原因および補修対策

変状		推定原因	補修対策		
			分類	工法	使用材料
漏水	下流面		注入・充填		エポキシ樹脂、アクリル樹脂、樹脂系モルタル、
	継目		注入・充填		超微粒子セメント、エポキシ樹脂、無収縮モルタル
				U(V)カット	エポキシ樹脂、ポリウレタン系樹脂
			水中注入		セメントミルク、急結剤、セメントミルク+ベントナイト
ひび割れ		温度応力など	注入・充填	U(V)カット	微粒子セメント、無収縮モルタル、エポキシ樹脂
堤体表面の劣化		凍結融解作用	断面修復	打ち替え工法	コンクリート、スチールファイバー補強コンクリート
				パッチング	高炉スラグ超微粒子ポリマーセメントモルタル
	骨材の不良 (ローモンタイト含有)	表面保護	表面被覆		モルタル、アクリル系ポリマーセメント、ポリマーモルタル
				表面処理	アクリル系塗料、塩化ビニール系塗料、ポリウレタン系塗料、エポキシ系塗料、湿気硬化型塗料
				断面修復	コンクリート
構造部材の損傷 (天端橋梁)		骨材の不良 (ローモンタイト含有)	プレストレス の導入	内ケーブル	アンカーテンドン
堤体内部の空洞	打設時の締固め不良		注入・充填		無収縮セメント、セメントミルク
				U(V)カット	アイガス
			表面保護	表面被覆	レジンモルタル
			表面保護	表面処理	ポリウレタン系樹脂、珪酸質塗布剤、浸透性防水材

表-10 コンクリート構造物の補修工法の調査結果

工法の分類		主な使用材料	劣化対象	対象構造物
大分類	中分類			
注入・充填工法	高圧注入工法	樹脂系、セメント系	ひび割れによる漏水、鉄筋腐食	発電所、ダム、水槽壁、鉄道、地下構造物他
	低圧注入工法	樹脂系	ひび割れ	橋脚、床版他
	U(V)カット工法			
断面修復工法	打ち替え工法	無収縮モルタル	塩害、中性化、アルカリ骨材反応、凍害	港湾、トンネル、高架橋他
	吹付工法	セメント系、樹脂系	塩害、中性化、凍害	発電所導水路、浄化場、港湾、トンネル、高架橋、道路、橋、高欄、橋脚他
	パッチング工法	セメント系、	塩害、中性化、アルカリ骨材反応、凍害	橋梁、棧橋、ダム、港湾、トンネル、高架橋、道路、橋、鉄道他
	プレバクト工法	セメント系	塩害、中性化	空港舗装
表面保護工法	表面被覆工法	樹脂系	塩害、中性化、アルカリ骨材反応、凍害、化学的腐食、化学的劣化、キャビテーション	道路、橋、高欄、下水道施設、海洋鋼構造物、トンネル、立坑、水路構造物他
	表面処理工法		塩害、中性化	スラブ桁端部他
	埋設型枠工法	プレキャスト板、埋設型枠	塩害、中性化、アルカリ骨材反応、凍害	水路トンネル、トンネル、

表-11 コンクリート構造物の補強工法の調査結果

工法の分類		主な使用材料	補強目的	対象構造物
大分類	中分類			
コンクリート部材の交換	打ち替え工法	プレキャスト板、鉄筋、コンクリート	耐久性向上、耐荷性向上、耐震性向上	道路橋床版、鉄道高架橋
コンクリート断面の追加	増厚工法	コンクリート	耐久性向上、耐荷性向上、耐震性向上	橋脚、高架橋床版、トンネル、水路橋
	巻き立て工法		耐久性向上、耐震性向上、耐力増強	鉄道高架橋、道路橋、ボックスカルバート、道路トンネル
部材の追加	梁（桁）の増設			
	壁の増設	コンクリート、PC鋼板	耐震性向上	工場、文化会館、共同住宅
支持点の追加	支持点増設工法		耐震性向上	ボックスカルバート、道路高架橋
補強材の追加	接着工法	炭素繊維シート、樹脂系、フッ素接着樹脂	耐荷性向上、耐震性向上、ひび割れ防止	高架橋、道路橋、床版、護岸擁壁、トンネル内壁
	巻き立て工法		耐荷性向上、耐震性向上	橋脚、ビル柱、工場
プレストレスの導入	外ケーブル	アラミドFRP ロッド、無収縮モルタル	耐力増強	プレ・ポストテンションT 桁
	内ケーブル		耐震性向上	道路橋、高架橋

大きな地震時慣性力に抵抗し、重力式コンクリートダムの耐震性能を効果的に向上させるためには、断面を増厚する（ダム堤体の上流面あるいは下流面にコンクリートを腹付けする）ことが有効と考えられる。また、上流面腹付けは、強度の他にダムの止水性の向上においても有効である。

別の有効な耐震補強方法としては、プレストレスを導入して断面の耐荷力を向上させることが考えられる。

ii) コンクリート標準示方書〔維持管理編〕

『2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕』¹²⁾によると、耐震補強について、「耐震性能を向上させる方法には、部材の耐力を高める方法、変形

性能を高める方法、地震時慣性力を低減させる方法などがある。これに応じ、耐震補強工法にも、部材の増厚、鉄筋コンクリートや鋼板等による巻き立て、補強材の設置、鋼板や FRP 等の接着、減衰装置の設置など、各種の工法がある。」とある。

コンクリートダムでは、断面増厚工により変形性能が高められ、プレストレスの導入により断面の耐力が高められることができるものと考えられる。

iii) 本研究で検討対象とする補修・補強工法

以上より、本研究で検討対象とする補修・補強工法として、①断面増厚工(上流面あるいは下流面腹付け)、②アンカー工を取り上げることとする(5.1～5.3 節)。

表-12 重力式コンクリートダムにおいて想定される耐震補修・補強工法（文献11）に加筆）

	断面増厚		
	上流腹付け	下流腹付け	コンクリートマット腹付け
概要図			
基本方針	・断面を増厚して応力集中や応力レベルを低減することにより、地震時のクラック進展を抑制し、安定性向上を図る。		
特徴および効果	・堤体の上流面にコンクリートの増厚を行い、上流側の止水とクラックの補強を図る。	・堤体の下流面にコンクリート増厚を行い、クラックの補強を図る。	・ダム高が大きい河床部を対象に、マットコンクリートを設け、上下流腹付けと同等の効果を目指す。
施工実績	五本松布引堰堤	Upper Glendevon ダム、Koyana ダム	—
概要図	鋼材補強	ダウエリリング	アンカー
	・クラック発生箇所を鋼材で補強し、引張・せん断に抵抗させることにより補強を行う。	・監査廊からダウエルトンネルを施工し、トンネル内からクラック発生箇所のコンクリートの置き換え、鋼材補強等を行う。	・クラック発生箇所アンカーによるプレストレスを導入し、引張力に対して抵抗させる方式。
	・補修箇所周辺からクラックが進展する可能性があり、堤体基礎部のクラックに対しての効果は低い。	・補修箇所周辺からクラックが進展する可能性がある。	・補修箇所周辺からクラックが進展する可能性があるとともに、再緊張等のメンテナンスが必要である。
施工実績	(橋梁等の構造物の耐震補強事例がある)	—	Koyana ダム、Stewart Mountain ダム、Muldenberg ダム

(5) コンクリートダムの補修・補強による耐震対策効果について

『2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕』¹²⁾では、2007 年の改訂に当たり、ISO 等の国際規格と整合を図るため、補修および補強の定義が見直された。その定義のイメージを図-14 に示す。本研究においても、『2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕』を参考とし、力学的性能に関する補修および補強を次のとおり定義する。

- 補修：建設時にダムが保有していた程度以内まで、力学的な性能を回復させるための対策。
- 補強：建設時にダムが保有していたよりも高い性能まで、力学的な性能を向上させるための対策。

本検討では、分布型ひび割れモデルを用いた非線形動的解析を行い、主にクラックの発生および進展の抑制に着目し、コンクリートダムの補修・補強による耐震対策効果を定量評価する。評価指標としては、例えば、本研究で用いた「リガメント残存率」等が考えられる（5.1(4)参照）。

そこで、本検討では、コンクリートダムの初期の耐

震性能を、「想定した大規模地震動により耐震補強無しのコンクリートダム堤体を受ける損傷の度合い（クラック発生後のリガメント残存率）」と設定する。この初期性能に対し、対策後に再度同じ地震動を受けた場合（地震前補強：補強後に 1 回目の地震、地震後補修：損傷した堤体を補修した後に 2 回目の地震）、初期の耐震性能として設定した損傷度合いと同じ度合いの損傷（同じリガメント残存率）を受ける（同じ度合いの損傷にとどまる）場合には、「対策後のダム堤体は対策前（初期）のダム堤体と耐震性能が同じ」とみなし、損傷度合いの減少度（リガメント残存率の増大度）に応じ、対策時の耐震性能（要求性能）を決める。

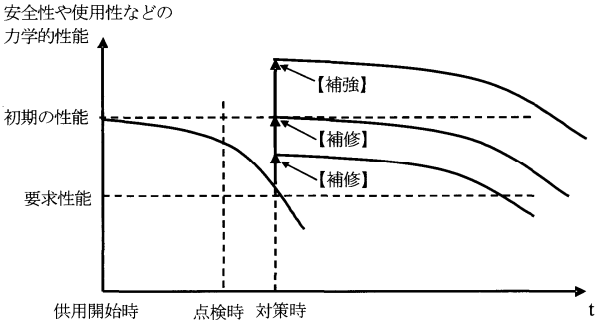


図-14 補修・補強の定義（2007 コンクリート標準示方書）¹²⁾

5. コンクリートダムの補修・補強効果に関する検討

5.1 断面増厚工を用いた補修・補強に関する検討

(1) 腹付け厚さ

本検討では、クラック発生位置（クラック始端）の標高において、クラック水平長（投影長さ）に対して腹付け厚さ（水平方向）を3パターン変え（図-15 参照）、腹付け厚さの違いが地震後補修および地震前補強の効果に及ぼす影響に関する検討を行った。

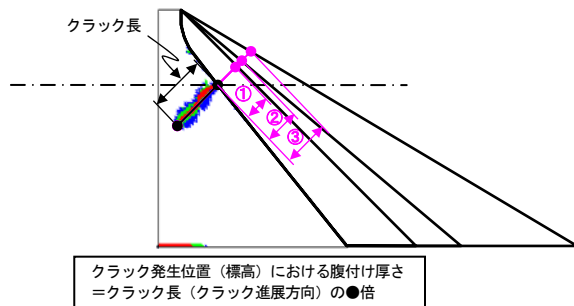


図-15 本検討における腹付け厚さの考え方のイメージ

腹付け厚さの変え方は、次のとおりとした。

- ① 1 パターン目の腹付け形状として、クラック発生位置の標高において、腹付け厚さをクラック水平長と等しく設定する。
 - ② ①で定めた規模の断面増厚を行っても補修・補強効果があり得られない場合（既存クラックが進展する等）、2 パターン目の腹付け形状として、腹付け厚さを1パターン目より厚くする。
 - ③ 逆に、①で定めた規模の断面増厚を行った場合、補修・補強効果が十分に得られた場合（既存クラックが全く進展しない等）、2 パターン目の腹付け形状として、腹付け厚さを1パターン目より薄くする。
 - ④ 3 パターン目の腹付け形状は、2 パターン目の解析結果を踏まえ、②と③の考え方により決定する。
- (2) 地震後補修の検討における既存クラックの設定方法について

本検討では、地震前補強（クラックがない状態で対策工を施した後に1回目の地震を受ける）と並んで、地震後補修、すなわち、1回目の地震で損傷が発生したダム堤体に対策工（断面増厚工、アンカー工）を施した後、2回目の地震を受けた場合の補修・補強効果に関する検討も行う。その際、解析モデルには、1回目の地震でダム堤体に発生したクラック（以下「既存クラック」と呼ぶ）を設定する必要がある。

地震前補強を行わない場合の地震応答解析（「3. 損傷形態の予測」で実施）でクラックが発生した要素は、地震終了時には各々異なる軟化状態となっている。し

かし、解析モデル作成に当たっては、照査上安全側（クラックが進展しやすい）の検討とすることとし、1回目の地震でクラックが発生した範囲のうち、引張軟化曲線（2直線近似）の第1折れ点を超えて軟化が進行した要素の引張軟化開始応力 $f_t=0(\text{MPa})$ とし、 $\sigma_1>0$ （引張応力発生）となった瞬間にクラックが発生するよう条件設定を行った（図-16 参照）。

なお、第1折れ点までのクラックについては、補修後解析の主要クラック進展に与える影響は小さいと判断し、引張クラックが発生していない状態に戻している。

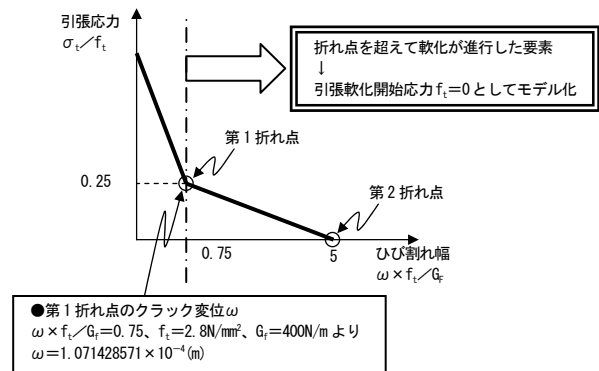


図-16 地震後補修の検討における既存クラックの設定方法

(3) 解析結果

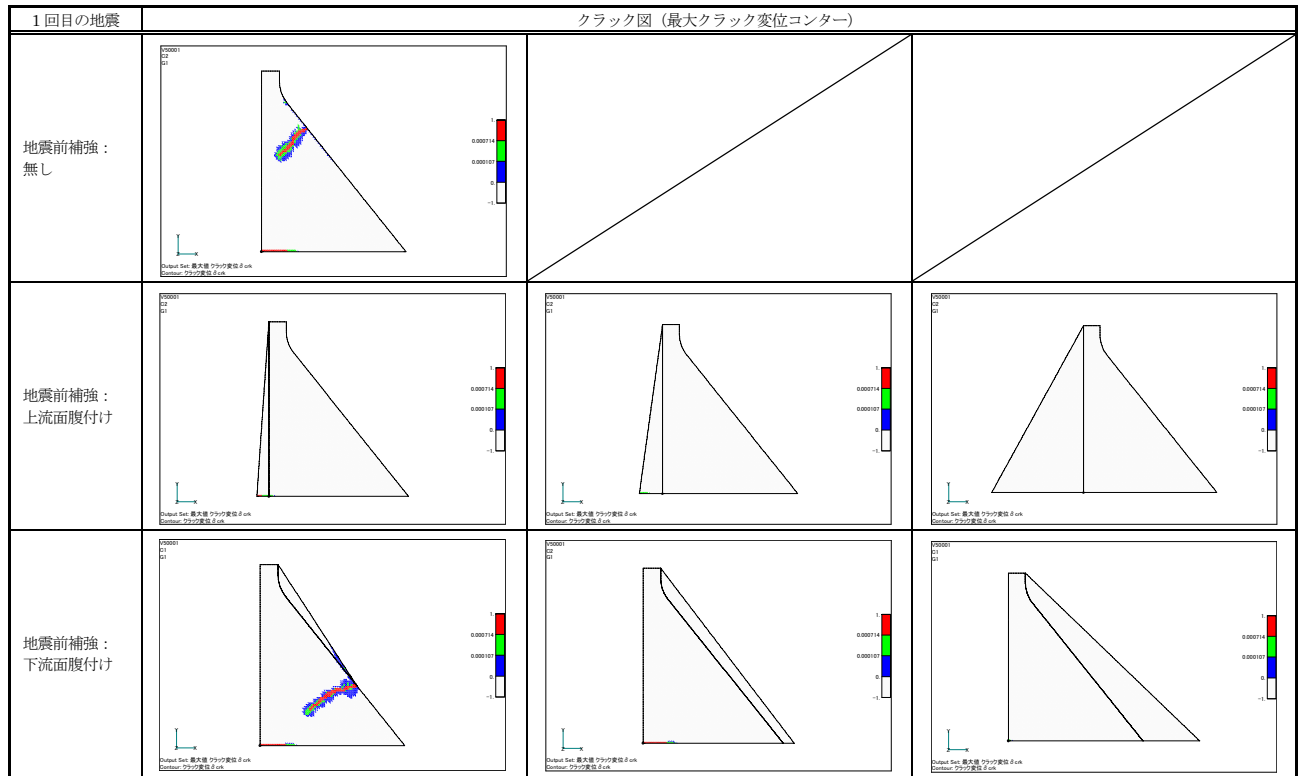
断面増厚工を用いた地震前補強および地震後補修の解析結果として、表-13～表-15にクラック図一覧を示す。各表は、上段が地震前補強の解析結果（1回目の地震）、下段が地震後補修の解析結果（2回目の地震）となっており、それぞれ対策無しの場合との比較表として構成してある。

表-13～表-15から次のことがいえる。

- ① 腹付け厚さが厚いほど、新規クラックの発生、既存クラックの進展を抑制する効果がある。
- ② 既存クラック（ダム堤体の表面にあるクラック始端部）を覆う形の断面増厚（堤頂部・下流面のクラックに対する下流面腹付け、フィレット設置部のクラックに対する上流面腹付け）では、腹付け厚が薄い場合には、既存クラックの開口により腹付けコンクリートに内部（新旧コンクリートの接合面、既存クラックの始端部）から新規クラックが発生することがある。
- ③ 断面増厚により断面形状が変わり、ダム堤体の振動特性も変わるため、補強対象箇所が補強できても、他の部位に弱部ができることがある。

表-13 断面増厚工による補修・補強効果（クラック図）（1/3）（フィレット無しモデル）

(1) 地震前補強（1回目の地震）



(2) 地震後補修（2回目の地震）

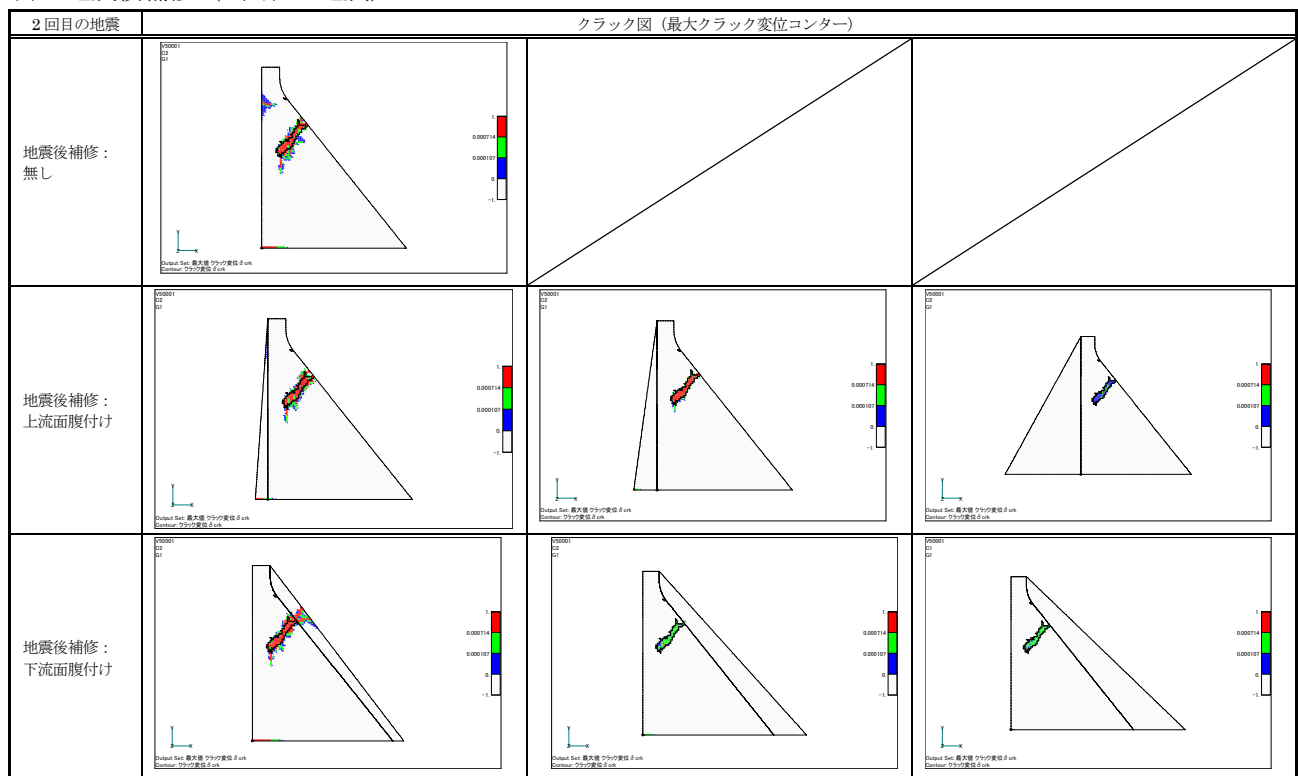
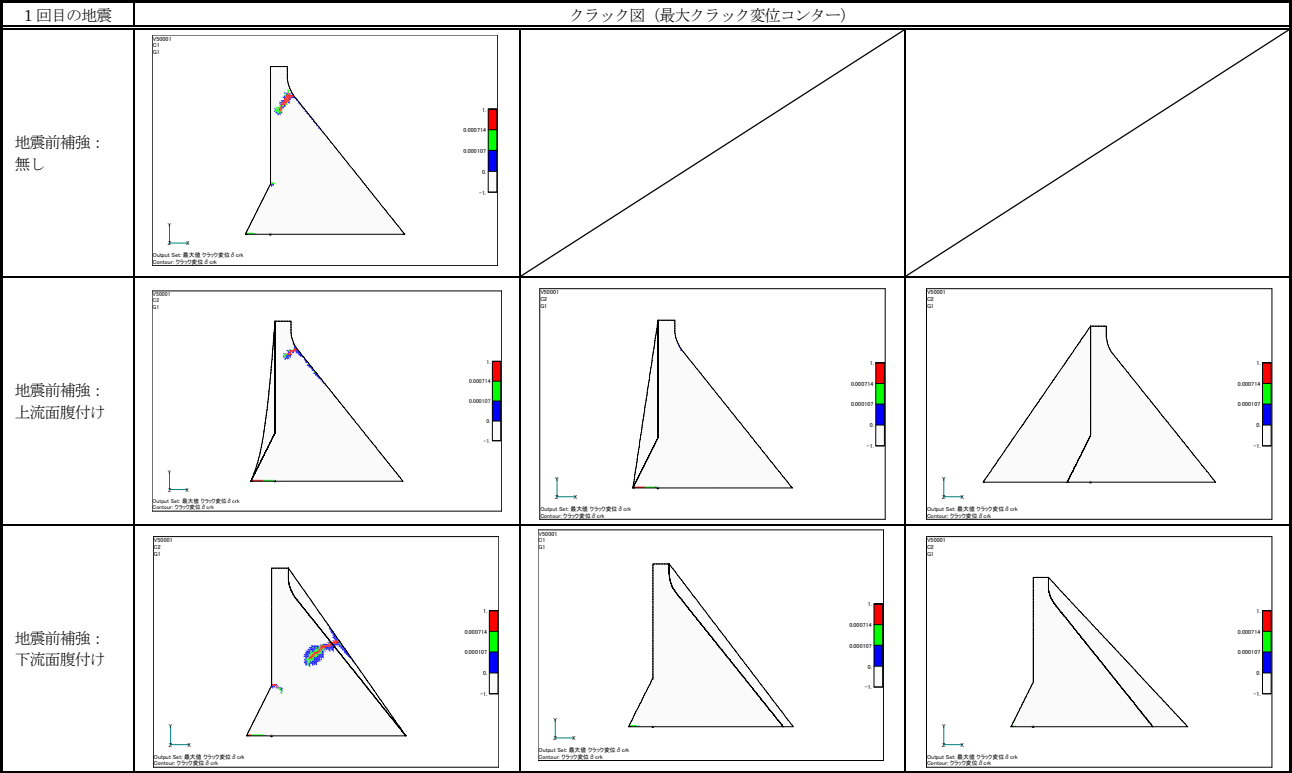


表-14 断面増厚工による補修・補強効果（クラック図）（2/3）（フィレット勾配 1:0.5 モデル）

(1) 地震前補強（1回目の地震）



(2) 地震後補修（2回目の地震）

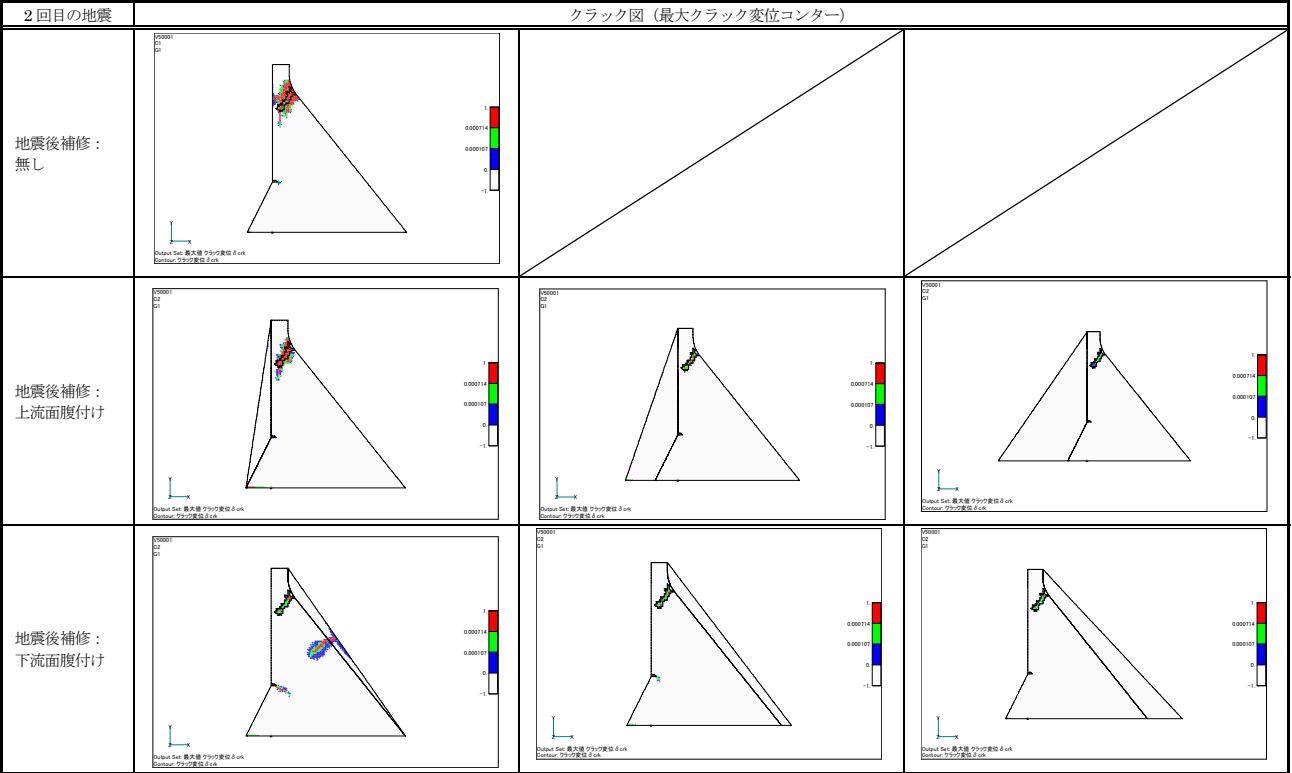
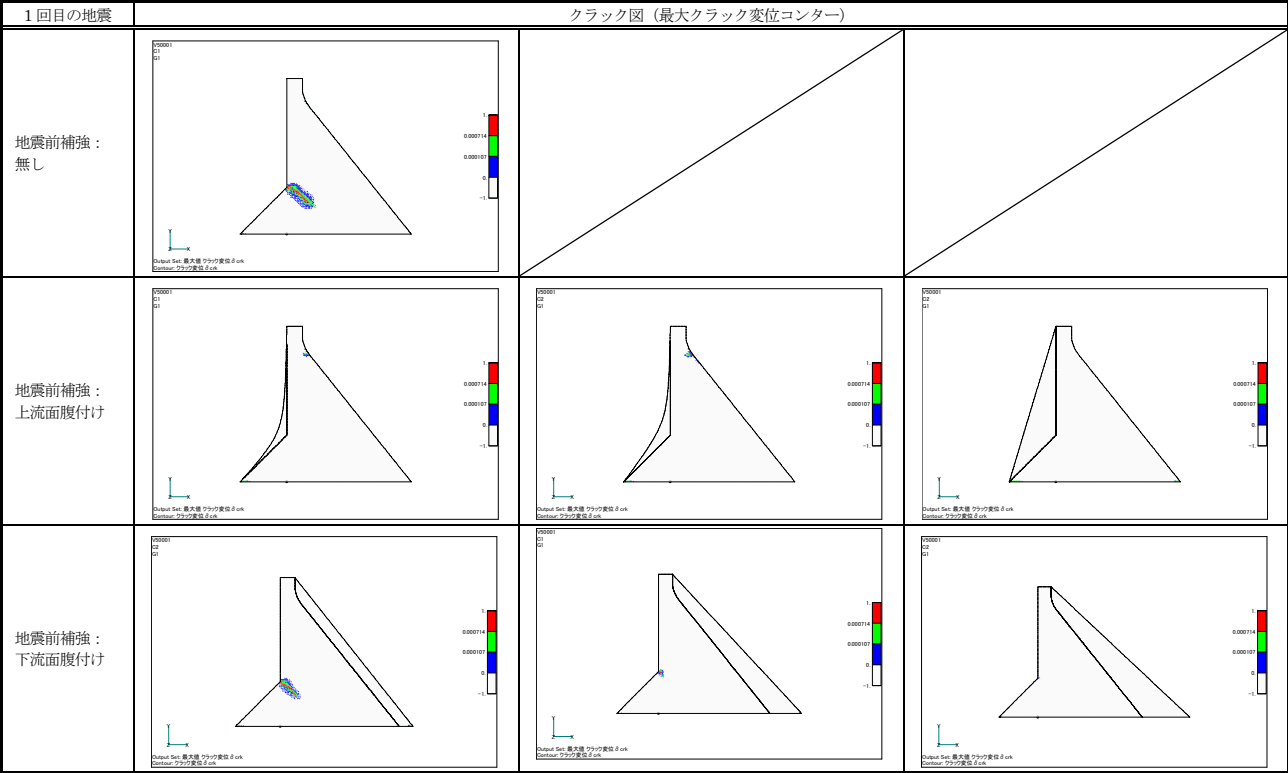
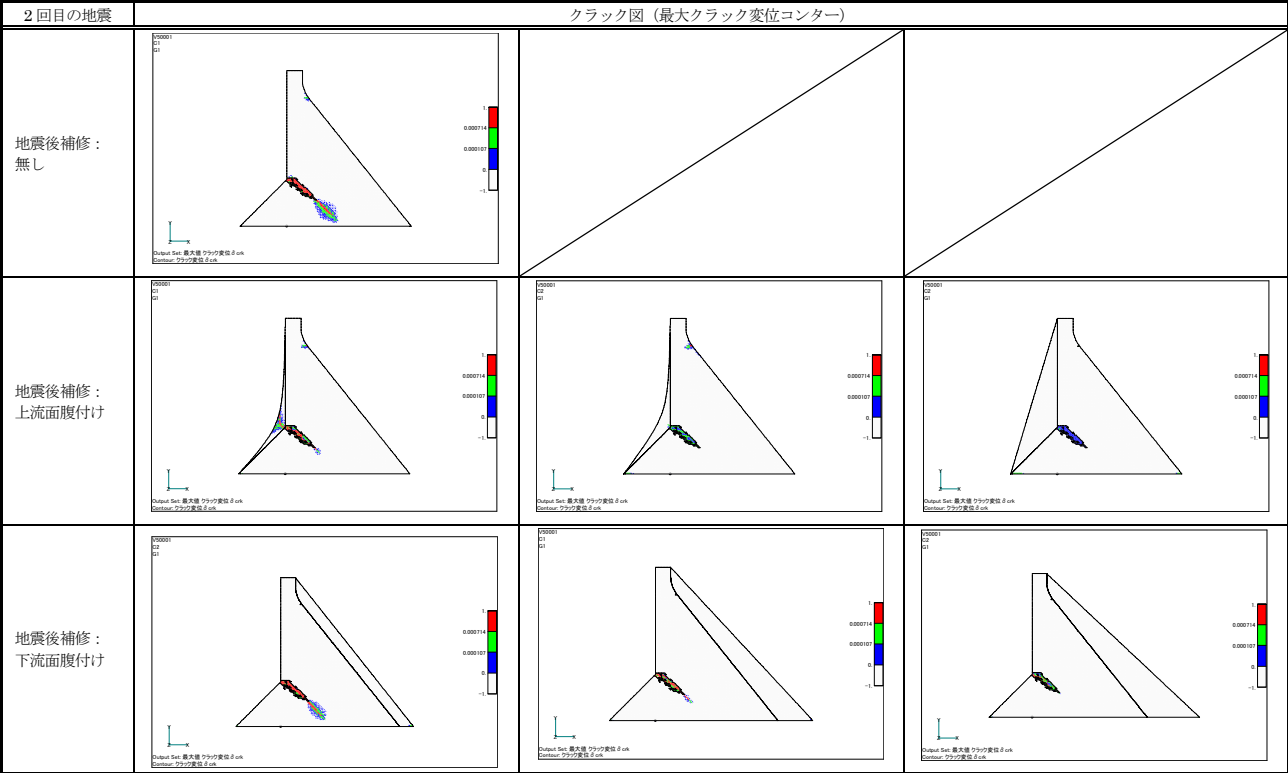


表-15 断面増厚工による補修・補強効果（クラック図）（3/3）（フィレット勾配 1:1.0 モデル）

(1) 地震前補強（1回目の地震）



(2) 地震後補修（2回目の地震）



(4) リガメント残存率による補修・補強効果の評価

i) リガメント残存率の定義

補修・補強による対策効果の評価指標として、ここでは「リガメント残存率」を用いることとする。

リガメント残存率を次式で定義する。

$$\text{リガメント残存率} = (t - L) / t$$

ここに、 t : クラックの進展方向に沿って測った堤体厚さ、 L : クラック長。

リガメント残存率とは、堤体厚さのうちクラック未発生部分の割合を示すものであり、リガメント残存率が大きければ、クラックが発生した場合でも堤体の分断に至る危険度が小さく、逆にリガメント残存率が小さい場合には、堤体の分断の危険性が大きいことを示すものである。

図-17～図-19 に本検討で用いるリガメント残存率のイメージを示す。クラック進展方向は、「3. 損傷形態の予測」で選定したクラック図から直線で定め、その延長線上で堤体厚さを定義する。堤体厚さは、ダム堤体の上下流面を貫く点を結ぶものとする。なお、クラック進展方向が堤体底面と交差する場合は、交差点～堤体底面下流端に向けて堤体厚さを設定することとした。

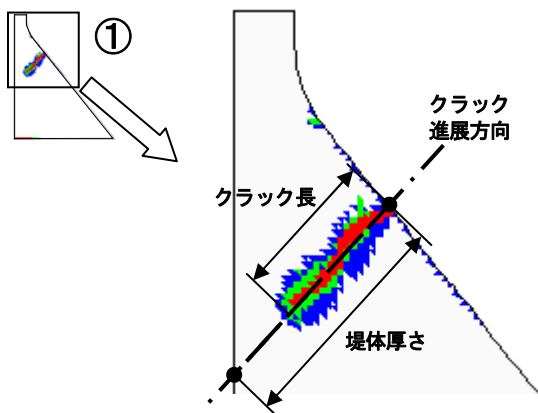


図-17 リガメント残存率の定義 (1/3)
(フィレット無しモデル)

ii) リガメント残存率を用いた補修・補強効果の評価

図-21～図-23 に、クラック進展方向の増厚率とリガメント残存率の関係を示す。図中の白抜きプロットが地震前補強、黒塗りプロットが地震後補修を示す。なお、図中の一点鎖線は、地震前補強を行わずに1回目の地震を受けた際の状況を示すものであり、このラインに対する地震前補強および地震後補修の位置付けは次のとおりである。

①地震前補強：地震前に対策を行うことにより、無損傷の状態（リガメント残存率=1.0）からのリガ

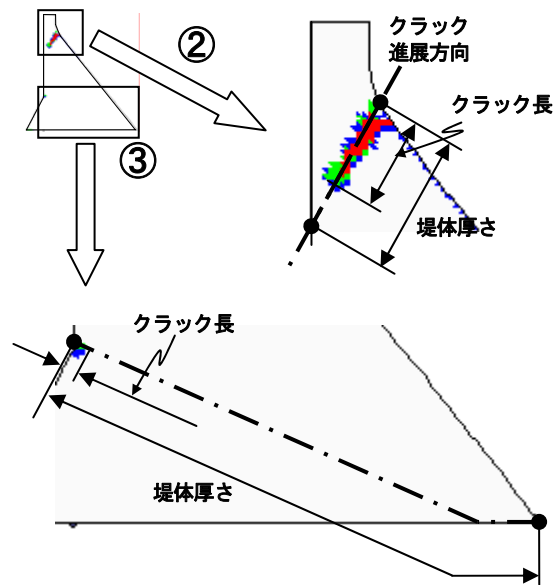


図-18 リガメント残存率の定義 (2/3)
(フィレット勾配 1:0.5 モデル)

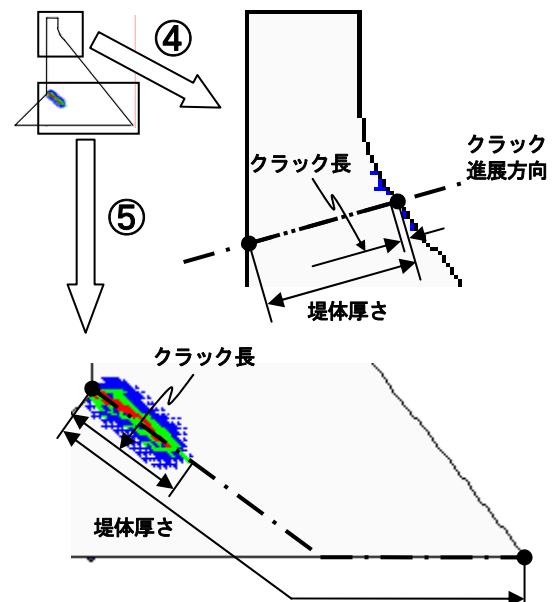


図-19 リガメント残存率の定義 (3/3)
(フィレット勾配 1:1.0 モデル)

メント残存率の低下を、図-21～図-23 中の一点鎖線より上に保ち、地震時の被害を極力小さくする。

②地震後補修：地震後に損傷したダム堤体を補修することにより、補修後に再び同規模の地震が発生した場合にも、図-21～図-23 中の一点鎖線からのリガメント残存率の低下（既存クラックの進展）を極力抑制する。

図-21～図-23 から、次のことが概略推定できる（図-20 参照）。

①地震（1 回目）前に補強（腹付け）を行い、要求性能を満足するために向上させる必要のある耐

震性能（リガメント残存率）を確保するために必要な腹付け厚さを推定する。

- ②地震（1 回目）後に補修（腹付け）を行い、要求性能を満足するために回復させる必要のある耐震性能（リガメント残存率）を確保するために必要な腹付け厚さを推定する。

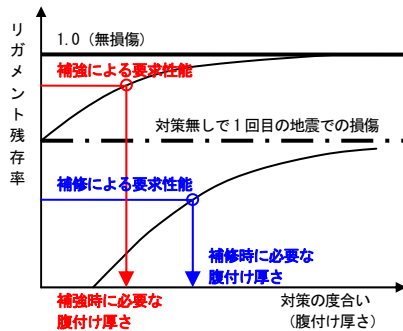


図-20 要求性能と補修・補強のイメージ

図-21～図-23 から、次のことがいえる。

- ①増厚率が大いほどリガメント残存率は低下しない。
- ②同程度の増厚率であっても、地震前補強ではクラックの発生を防ぐことができるのに対し、地震後補修では現状維持（既存クラックの進展を防ぐこと）も難しい場合がある。
- ③図-23（フィレット勾配 1:1.0・堤頂部のクラック）によると、地震前補強を行ったにもかかわらず、補強無しよりもリガメント残存率が小さくなっている。これは、断面増厚を行って断面形状が変わり、ダム堤体の振動特性が変わったためであると考えられる。着目箇所（フィレット勾配 1:1.0 モデルでは、フィレット設置部のクラックに着目して増厚形状を定めた）が補強できても、別の箇所に弱部ができてしまった例といえる。

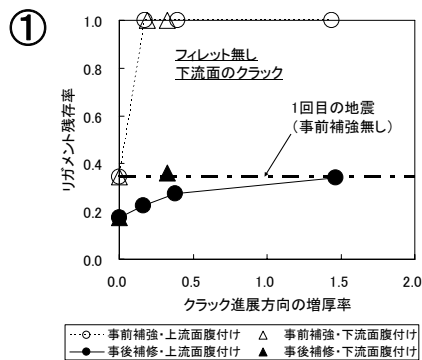


図-21 増厚率とリガメント残存率の関係（1/3）
（フィレット無しモデル）

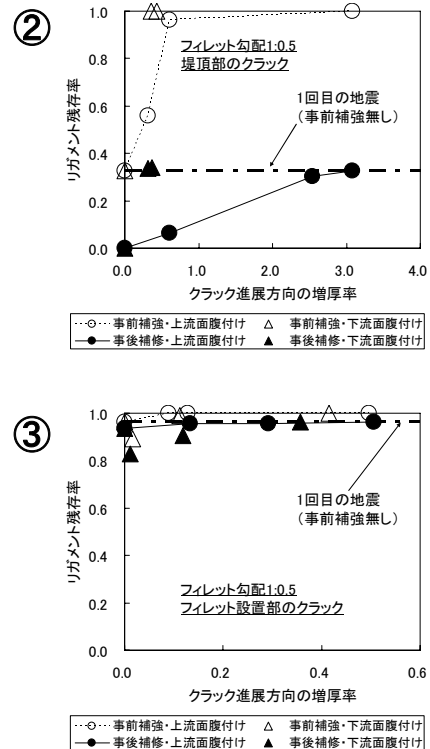


図-22 増厚率とリガメント残存率の関係（2/3）
（フィレット勾配 1:0.5 モデル）

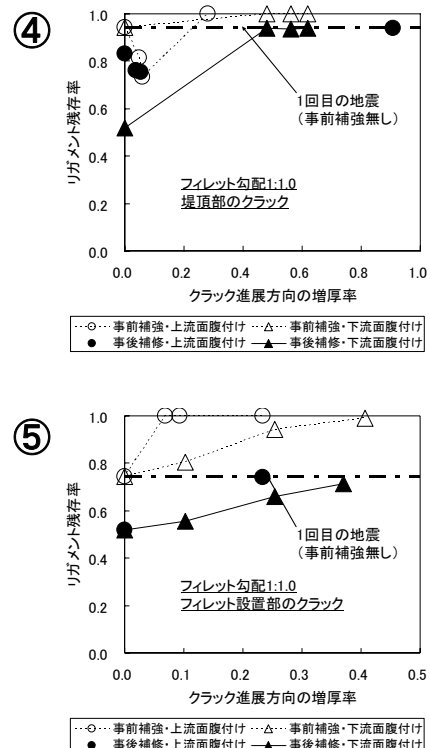


図-23 増厚率とリガメント残存率の関係（3/3）
（フィレット勾配 1:1.0 モデル）

5.2 アンカー工を用いた補修・補強に関する検討

(1) プレストレス力

本検討で設定するプレストレス力は、次の考え方により求めた。

- ①「3. 損傷形態の予測」で補修・補強対象として選定した3ケースについて別途線形動的解析を実施し、クラック始端の位置に相当する箇所生じた引張側主応力 σ_1 （最大値発生時刻の値）を合計し、クラック始端部に作用する総引張力とする。
- ②クラック始端部に作用する総引張力を打ち消すだけのプレストレス力をアンカーに導入する。

各モデルに導入したプレストレス力（アンカー1本当たり）は、次のとおりである。

- (a) フィレット無しモデル…………… $P=2.5\text{MN/本}$
- (b) フィレット勾配 1:0.5 モデル…………… $P=2.6\text{MN/本}$
- (c) フィレット勾配 1:1.0 モデル…………… $P=9.8\text{MN/本}$

本節では、プレストレス力をパラメータとした補修・補強効果の検討を行うこととし、上記プレストレス力を導入したケースの他、プレストレス力をその1/2 および 1/4 と変えたケースの解析も実施する。

(2) アンカー工のモデル化

アンカー工のモデル化には、簡易モデルとしてロッド要素を用いた。ロッド要素とは、両端部に構造節点（本解析モデルではダム堤体の節点）に結合する拘束点を有する棒状の要素である。本検討では、ロッド要素両端の拘束点に、それぞれ互いに向かい合う方向の節点荷重を与えることにより、ダム堤体に導入するプレストレス力をモデル化した。

また、ロッド要素下端の拘束点を5点（拘束点間の距離=1m）とすることにより、アンカー体長（4m）を簡易的にモデル化した。プレストレス力は、各拘束点に単純平均した荷重を作用させることにより、アンカー体に沿った荷重分散効果を簡易的に表現した。

なお、アンカー頭部については、受圧板を想定し、ロッド要素上端両脇のダム堤体節点（2節点）とロッド要素上端を結合し、これら3点に単純平均したプレストレス力（節点荷重）を載荷した。

(3) アンカー工の配置

クラックの始端・中央・先端をアンカー工で締め付けることとし、解析断面内で3列とした。また、奥行き方向のアンカー間隔を1.5mと仮定し、解析断面の厚み（単位奥行き 1m）で割り戻したアンカー工（ tendon ）の物性値（断面積、単位長さ当たり質量）を設定した（表-16 参照）。

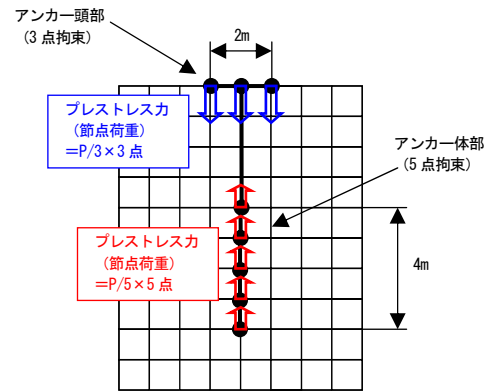


図-24 ロッド要素両端の条件設定のイメージ

アンカーの角度は、クラック進展方向に概ね垂直となる 45° とした。アンカー体の上端（ロッド要素下端の拘束点（5点）のうち最上部の点）は、『グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説』¹³⁾を参考とし、補修・補強対象とするクラックから5m程度離れた。

表-16 ロッド要素に設定した物性値

	フィレット無しモデル	フィレット勾配 1:0.5 モデル	フィレット勾配 1:1.0 モデル
鋼材断面積	0.0018426 m ²	0.0018426 m ²	0.0072388 m ²
単位長さ当たり質量	14.448 kg/m	14.448 kg/m	56.772 kg/m
弾性係数	2.0×10 ⁶ N/mm ²		
ポアソン比	0.3		

（備考）鋼材断面積は、導入するプレストレス力に応じ、KTБ システム総合カタログ（KTБ 協会）¹⁴⁾を参考としてアンカー工の簡易設計を行った。

(4) 地震後補修の検討における既存クラックの設定方法について

前節 5.1(2)と同様とした。

(5) 解析結果

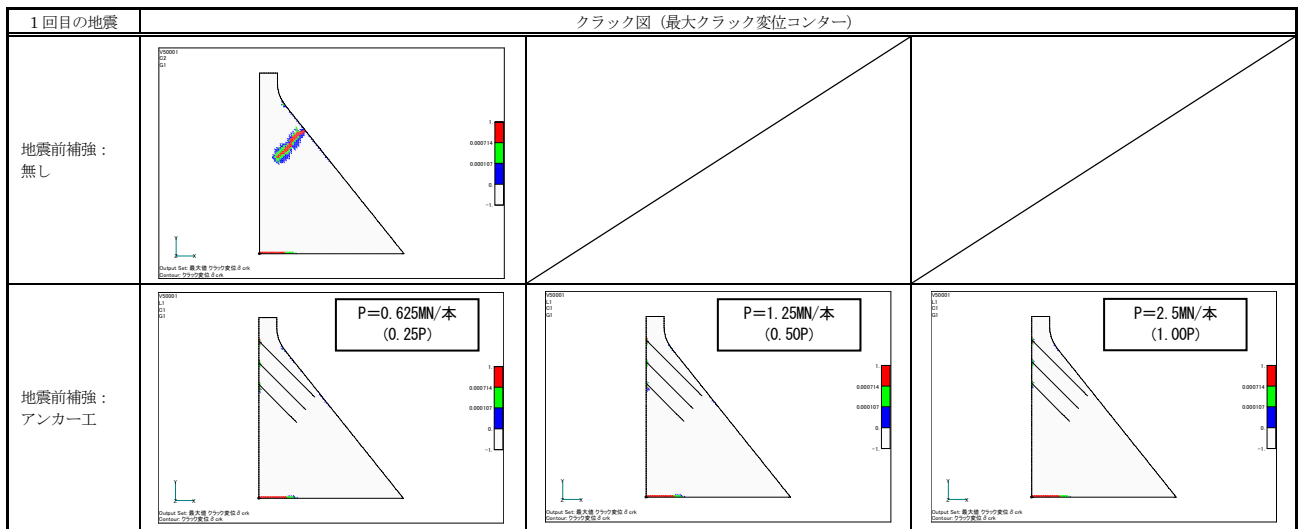
各モデルについて、アンカー工を用いた地震前補強および地震後補修の解析結果として、表-17～表-19にクラック図一覧を示す。各表は、上段が地震前補強の解析結果（1回目の地震）、下段が地震後補修の解析結果（2回目の地震）となっており、それぞれ対策無しの場合との比較表として整理した。

表-17～表-19から次のことがいえる。

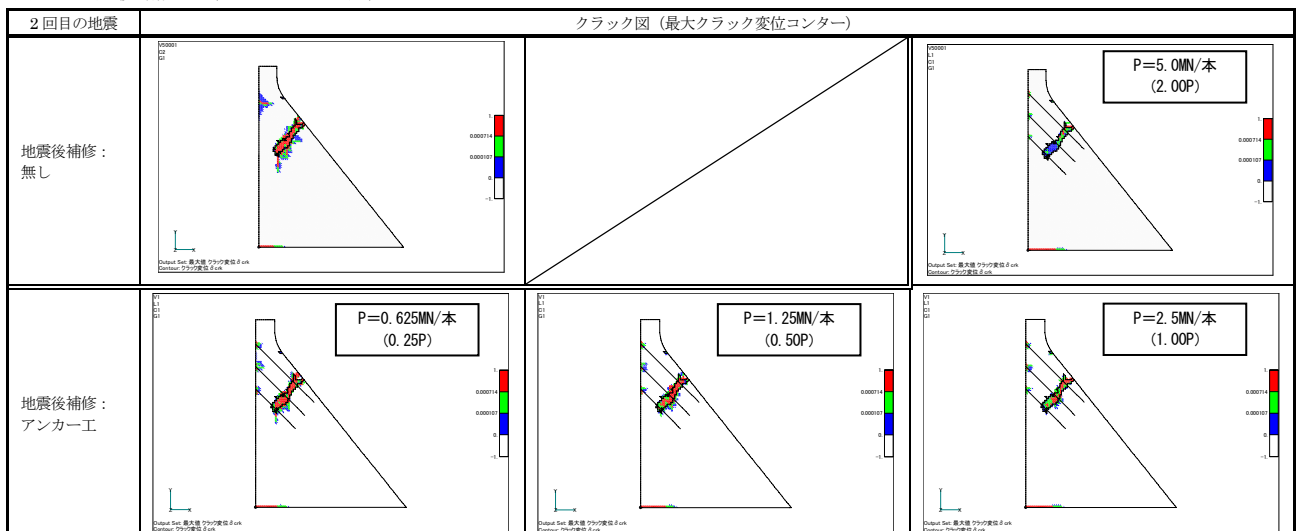
- ①地震前補強について、堤体表面から想定クラックまでの距離が比較的短く、アンカー工により締め付ける範囲が比較的小～中規模であるケース（堤頂部・下流面の補強）では、プレストレス力の大小に関係なく、クラックの発生をほとんど防止することができた。
- ②地震前補強について、堤体表面から想定クラックまでの距離が長く、アンカー工により締め付ける範囲が大規模であるケース（フィレット設置部の補強）では、アンカー工のみではクラック発生を防止できなかったが、地震前補強を行わない場合に比べると、導入するプレストレス力が大きいほど、クラック発生規模を縮小することができている。

表-17 アンカー工による補修・補強効果（クラック図）（1/3）（フィレット無しモデル）

(1) 地震前補強（1回目の地震）



(2) 地震後補修（2回目の地震）



③地震後補修について、導入するプレストレス力がいかに、既存クラックの進展を抑制することができる。また、既存クラックが進展しなかったケースでは、導入するプレストレス力がいかに、既存クラックのクラック変位（分布型ひび割れモデルで模擬したクラックの開口量）を縮小することができる（クラック変位コンター（表-17～表-19）より）。

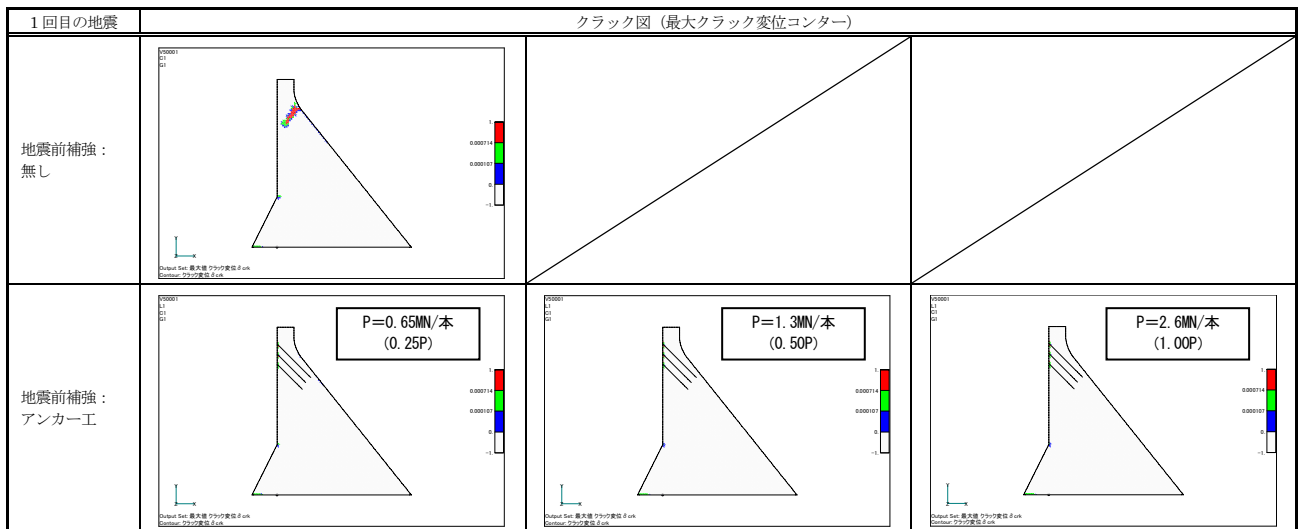
④堤頂部の地震後補修（表-18）について、補修箇所（堤頂部）自体の既存クラック進展は抑制できている。一方、フィレット設置部のクラックに着目すると、補修無しの場合に比べて、補修有りの場合の方がクラック規模が大きくなっている。これは、補修無しの場合、主に堤頂部のクラックに負荷が集中して既存クラックが進展するのに対して、補修有りの場合は、堤頂部が補修されたこと

により堤体の振動変形モードが変化し、地震に対する堤体の弱部が別の部位（フィレット設置部）に移行したためであると考えられる。

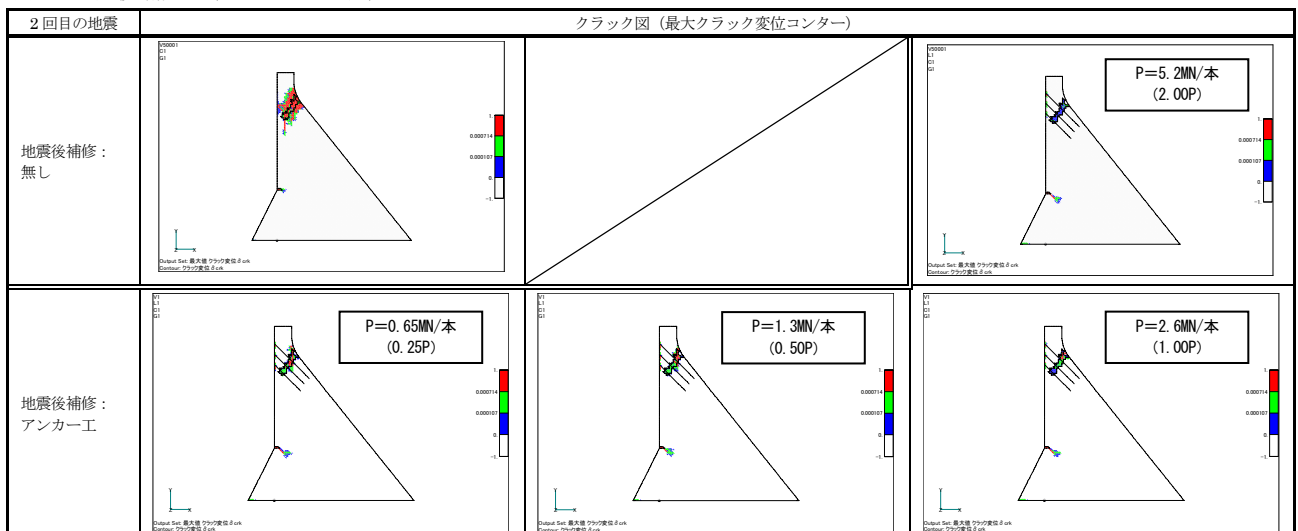
⑤全ケースに共通して、アンカー頭部にクラックが発生している。これは、受圧板を想定した拘束点（3点：前掲の図-24 参照）がダム堤体内部に押し込まれる（プレストレス力によって）ことにより、アンカー頭部周辺のダム堤体要素には引張応力が発生したためであると考えられる。このことは、堤体内部の拘束点（5点：前掲の図-24 参照）についても同様と考えられる。しかし、堤体内部には初期状態で圧縮応力が作用しているため、プレストレス力によりアンカー体周辺のダム堤体要素に多少の引張応力が作用しても、引張破壊が生じる程度まで応力が引張側にシフトしなかったためであると考えられる。

表-18 アンカー工による補修・補強効果（クラック図）（2/3）（フィレット勾配 1:0.5 モデル）

(1) 地震前補強（1回目の地震）



(2) 地震後補修（2回目の地震）



(6) リガメント残存率による補修・補強効果の評価

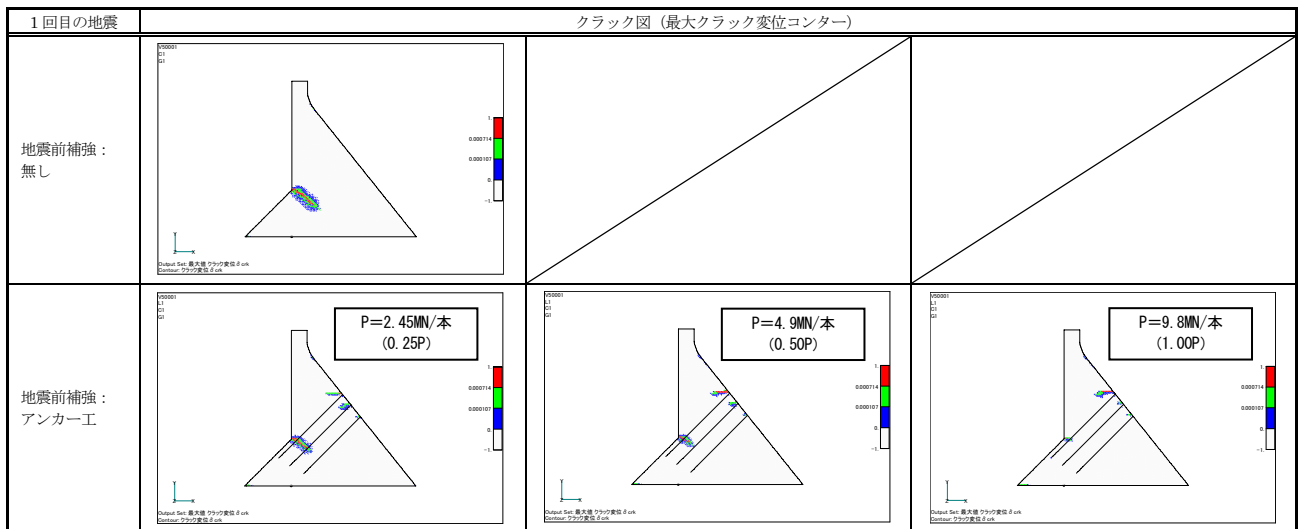
図-25～図-27 に、プレストレス力とリガメント残存率の関係を示す。図中の白抜きプロットが地震前補強、黒塗りプロットが地震後補修を示す。なお、図中の一点鎖線は、地震前補強を行わずに 1 回目の地震を受けた際の状況を示すものである。

図-25～図-27 から、アンカー工を用いた場合には、適切なプレストレス力を導入すれば、地震前補強ではクラック発生をかなり縮小できる。また地震後補修では、既存クラックの進展を抑制することができる。しかし、地震後補修では、プレストレス力が小さければ既存クラックの開口による振動により、アンカー頭部付近に新たなクラックが発生する場合もある。また、今回の地震前補強の解析についても、クラックの発生位置を前もって知り得た上での結果である。アンカー工の補修・補強に対する効果は大きい、単独対策で

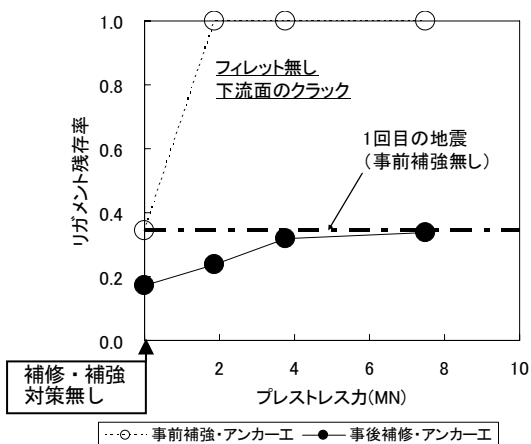
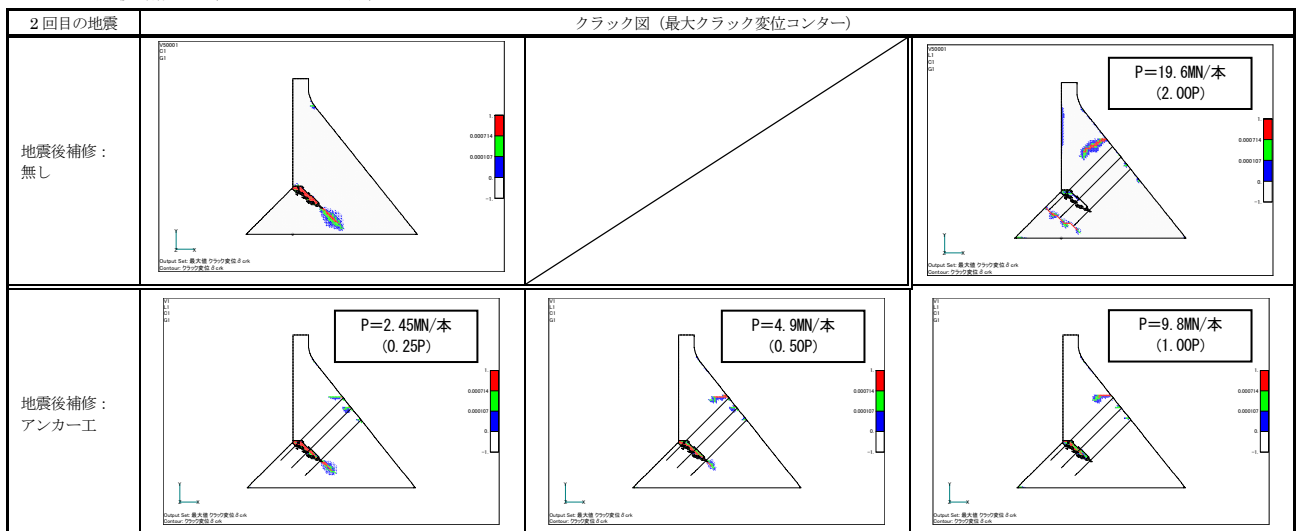
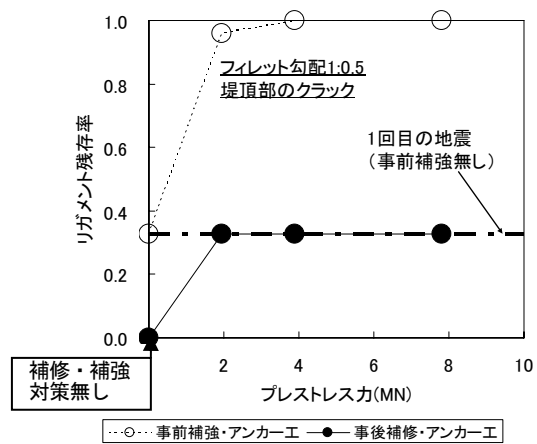
なく、断面増厚工等の他工法との併用が望ましいといえる。

表-19 アンカー工による補修・補強効果（クラック図）（3/3）（フィレット勾配 1:1.0 モデル）

(1) 地震前補強（1回目の地震）



(2) 地震後補修（2回目の地震）

図-25 プレストレス力とリガメント残存率の関係（1/3）
（フィレット無しモデル）図-26 プレストレス力とリガメント残存率の関係（2/3）
（フィレット勾配 1:0.5 モデル）

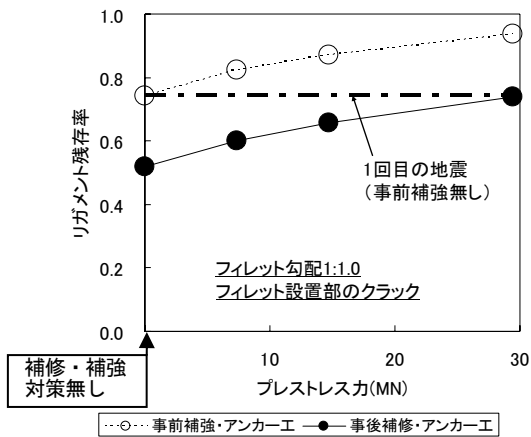


図-27 プレストレス力とリガメント残存率の関係 (3/3)
(フィレット勾配 1:1.0 モデル)

5.3 断面増厚工とアンカー工の組合せを用いた補修・補強に関する検討

5.1 節および 5.2 節の検討結果を踏まえ、本節では、断面増厚工とアンカー工を組合せた場合、あるいは断面増厚工同士の組合せた場合（上流面および下流面腹付け）の補修・補強対策効果に関する検討を行う。

(1) 検討ケース

ここでは、断面増厚工で補修・補強効果があまり得られなかったケースにアンカー工を組み合わせる場合、あるいは断面増厚工同士の組合せ（上流面および下流面腹付け）について検討を行った。これらの組合せは、以下に示す事項を想定し、考慮したものである。

①上流面腹付けは、ダム堤体断面を構造的に安定した台形に近づけることができるという特徴を有する。しかし、上流面腹付けを行う場合には、施工上、貯水池を空虚にする必要性が高いと考えられるため、治水・利水機能確保等の貯水池運用上の問題を解決できない場合には、上流面腹付けを採用できないものと考えられる。

②仮に上流面腹付けが採用できたとしても、地形・地質条件から腹付け厚さが制限される場合には、上流面腹付けに下流面腹付け、あるいはアンカー工を組み合わせる必要が生じることが想定される。

③下流面腹付けは、上流面腹付けに比べると施工中の貯水池運用に及ぼす影響は小さいと考えられ、上流面腹付けに比べて採用されやすい可能性が考えられる。

④下流面腹付けが採用できたとしても、②と同様に、地形・地質条件から腹付け厚さが制限される場合には、下流面腹付けにアンカー工を組み合わせる

必要が生じることが想定される。

以上のように、既存のダム堤体の補修・補強に当たっては、様々な技術的・経済的・社会的な制約条件が存在することが考えられる。そのような制約条件下で最大限の耐震対策を行ったとしても、単独の工法で十分な効果が得られない場合には、複数の工法を組み合わせる必要が生じることが想定され、また、その方が効果的・経済的である場合も考えられる。本検討は、複数の工法の組合せによる技術的な面での補修・補強対策効果について検討する。

表-20 に対策工の組合せを検討する単独対策の各ケースを示す。本節では、地震後補修における対策工の組合せについて検討を行うものとする。地震前補強については、5.1 節および 5.2 節の検討結果より、単独対策によって対策効果（クラック発生防止・抑制）が得られるケースが多いこと、また、局所的なクラック推定位置に対するアンカー工による地震前対策は非現実的であることから、検討対象から外すこととした。

(2) 解析結果

断面増厚工とアンカー工の組合せを用いた地震後補修の解析結果として、表-21～表-23 にクラック図一覧を示す。各表は、地震後補修無し、地震後補修（単独対策）および地震後補修（複合対策）の比較表として構成してある。

表-21～表-23 から、単独対策では対策効果が十分に得られなかった（既存クラックの進展が生じる等）工法であっても、それらを組み合わせた複合対策を行うことにより、ダムの耐震性能の回復・向上に効果的となる場合がある。

また、複合対策では、既存クラックの進展を抑制するだけでなく、既存クラックの開口を抑制する効果も大きく、対策箇所以外の他の部位にクラックを誘発するようなことも少なくなっている。

表-20 対策工の組合せを検討する単独対策のケース

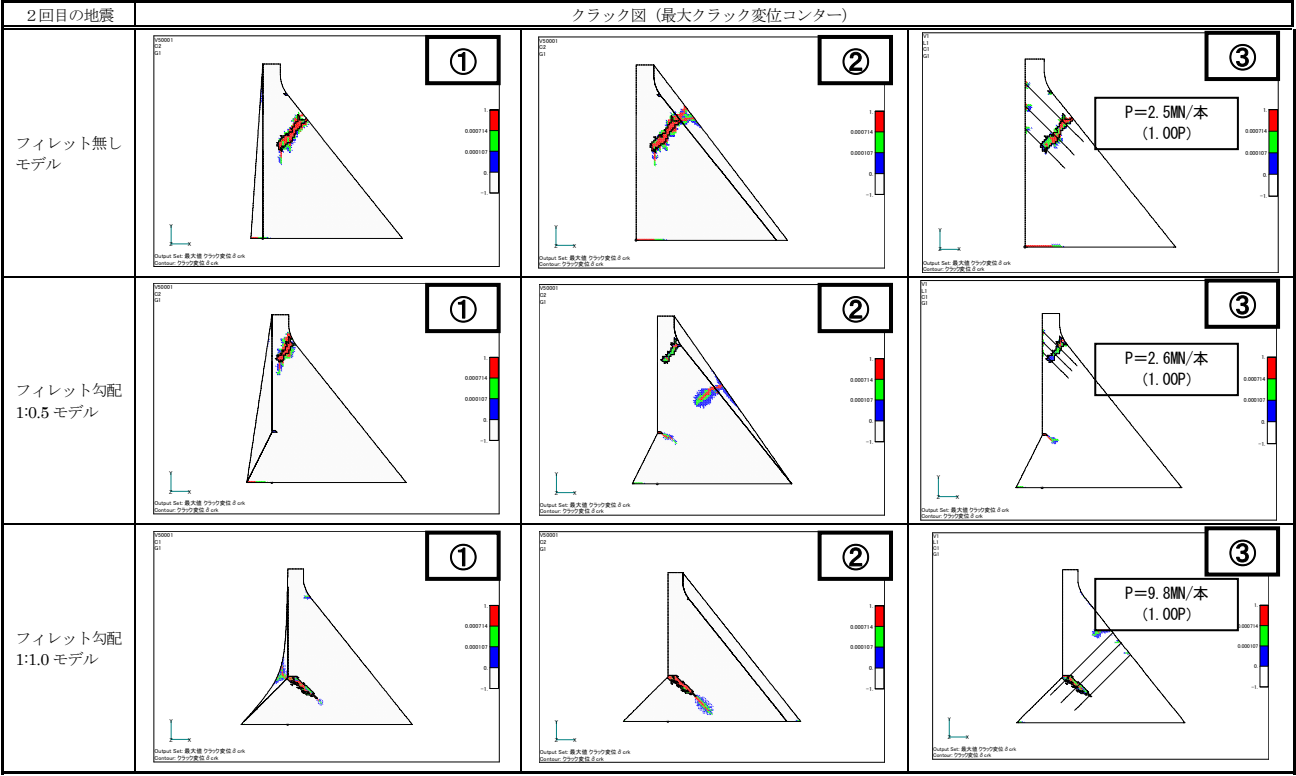


表-21 組合せによる補修・補強効果 (クラック図) (1/3) (フィレット無しモデル)

地震後補修 (2 回目の地震)

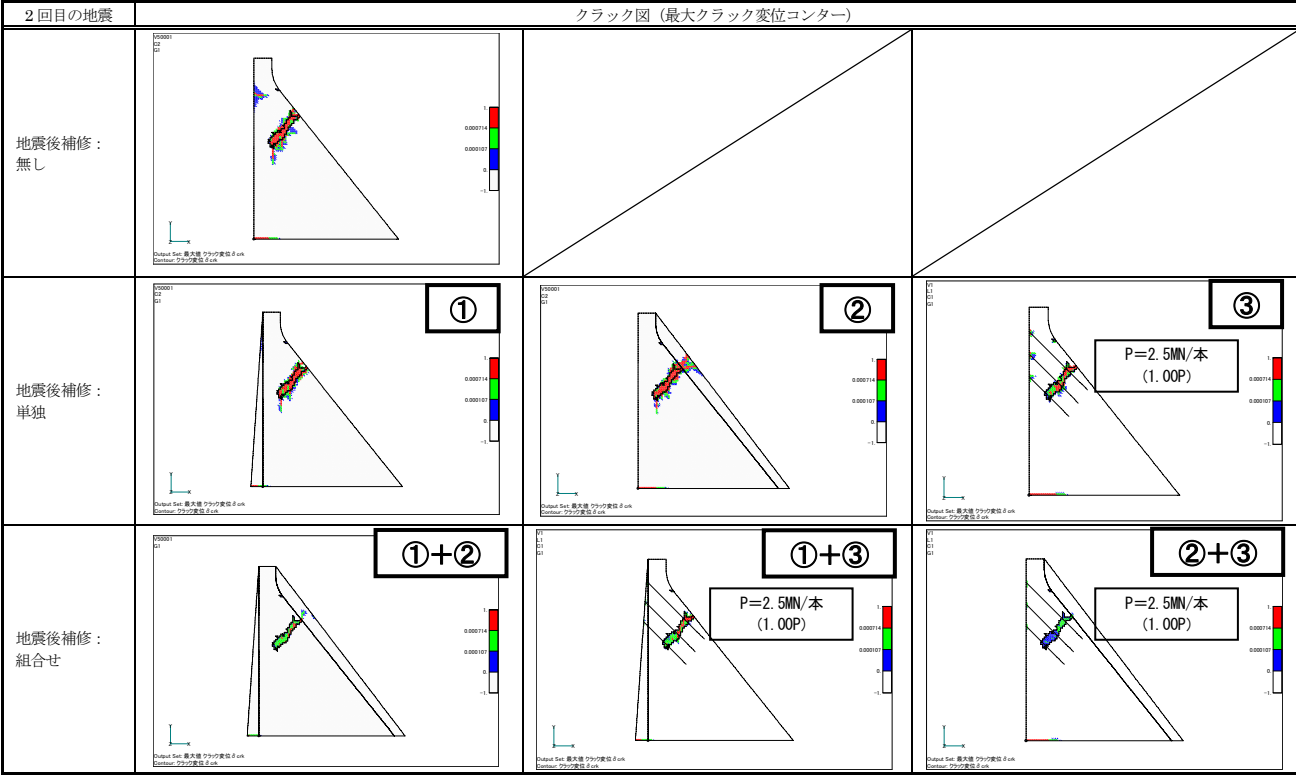


表-22 組合せによる補修・補強効果（クラック図）（2/3）（フィレット勾配 1:0.5 モデル）

地震後補修（2回目の地震）

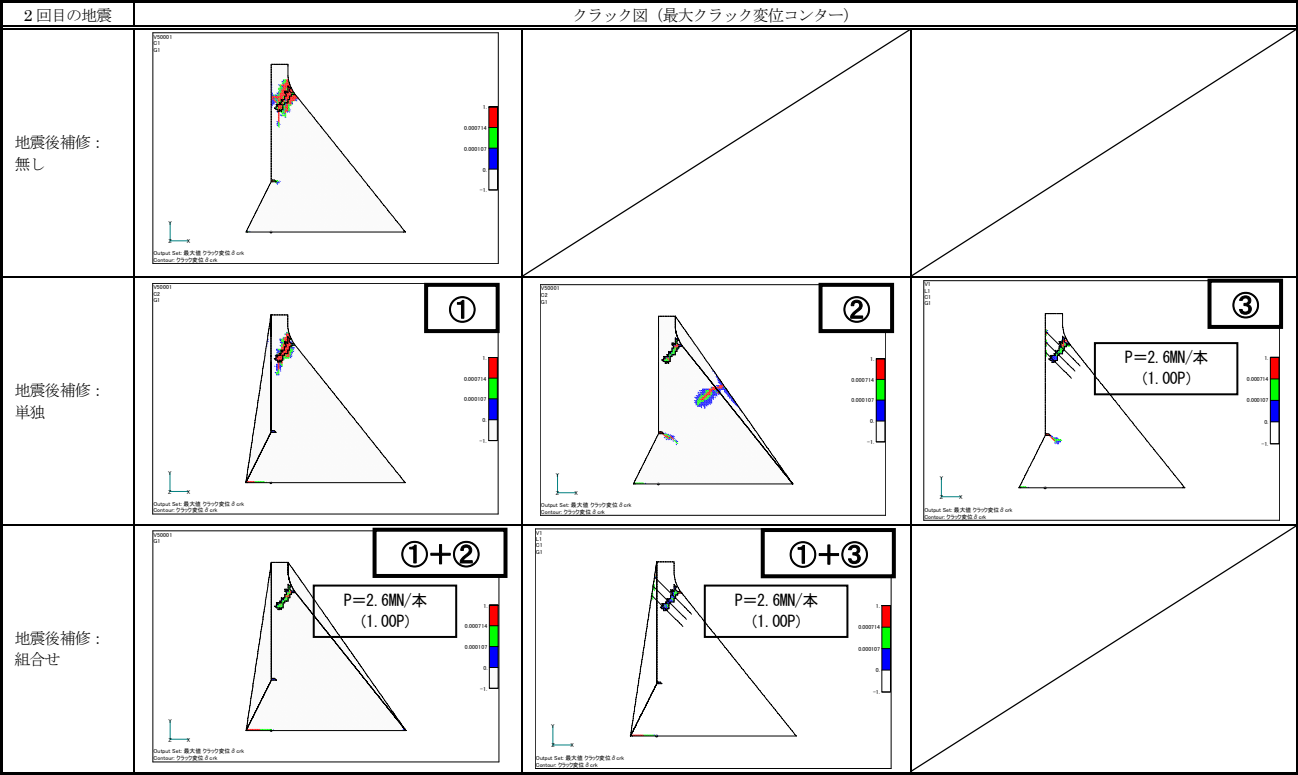
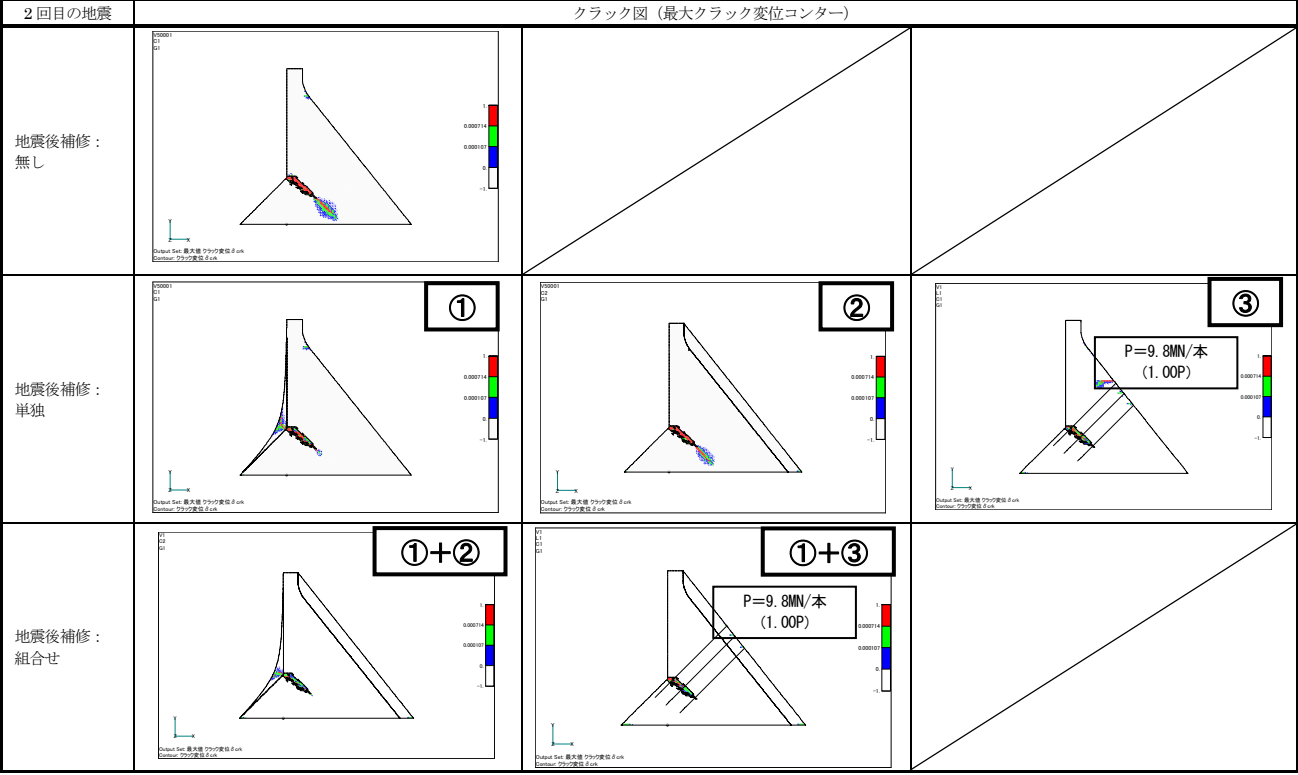


表-23 組合せによる補修・補強効果（クラック図）（3/3）（フィレット勾配 1:1.0 モデル）

地震後補修（2回目の地震）



5.4 アンカー工法に関する実験的検討

5.4.1 概要

アンカー工によるコンクリートダムの補修・補強について検討を行うに当たって、アンカー体をコンクリートダム内に定着した場合、付着力や、せん断抵抗などの未確認事項が多いのが現状である。

そこで、コンクリート中に設置したアンカー体の破壊条件のうち、アンカー体の周面摩擦抵抗を計測することを目的とし、模擬アンカー体を作製し、引抜き試験を実施した。

5.4.2 試験条件

(1) 周面摩擦抵抗

アンカーが終局限界状態の破壊を生じる際に発生するアンカー力を極限アンカー力という。コンクリートダム堤体内にアンカーを敷設した場合に考えられるアンカーの終局極限状態の破壊は、①テンドンの破壊、②テンドンがアンカー体から引き抜けることによる破壊、③アンカー体がダム堤体から引き抜けることによる破壊が考えられる。これらのうち最も弱い部分で終局限界状態の破壊が生じる。

上記の、①と②については、アンカー製品それぞれに特徴があり、多様な条件を選定することができる。③のアンカー体がダム堤体から引き抜けることによる破壊については、『グラウンドアンカー設計・施工基準同解説』¹³⁾において、地盤の種類によってアンカーの極限周面摩擦抵抗が示されているが、コンクリート内にアンカー体を設置した場合の条件は極めて少ない。また、選定にあたっては、実際に用いるアンカーと同様の条件、すなわち実際に設置する地盤で引き抜き試験を実施することが好ましい旨が示されている。

そのため、本研究では、③のアンカー体がダム堤体から引き抜けることによる破壊を調査するために、ダムの強度を模擬したコンクリート供試体内に、アンカー体を作製し、引抜き試験を実施した。

試験により得られる結果は、アンカーとダムコンクリートとの間の周面摩擦抵抗（ τ ）である。周面摩擦抵抗（ τ ）は、引抜き試験により求められた極限引抜き力から算定する。周面摩擦抵抗（ τ ）の算定式を次式に示す。

$$\tau = \frac{T_{ug}}{\pi \cdot d_A \cdot l_a}$$

ここに、 τ ：周面摩擦抵抗、 T_{ug} ：極限引き抜き力、 d_A ：アンカー体径、 l_a ：アンカー体長である。

(2) 試験条件

試験は、模擬堤体コンクリート硬化後、表-24 に示すようにコアとジャックハンマによる掘削を9本行い、アンカー体長を換えた試験体を作製し、引き抜き試験を実施した。

表-24 試験項目

掘削方法	掘削孔 ϕ (mm)	アンカー体 長さ (mm)	本数
コア	50	50	3
	50	60	3
	50	70	3
ジャック ハンマ	50	50	3
	50	60	3
	50	70	3

以下、具体的に、①模擬堤体コンクリート作製状況、②アンカー孔掘削状況、③アンカー体作製状況、④引き抜き試験方法について示す。

① 模擬堤体コンクリート作製状況

模擬堤体コンクリートは、縦 1500mm×横 1500mm×高さ 300mm の型枠 2 体に、呼び強度 13.5N/mm²、スランプ 8cm、骨材最大寸法 25mm のコンクリートを流し込み、作製した。硬化後の模擬堤体コンクリートの様子を写真-1 に示す。



写真-1 周辺コンクリート硬化後

② アンカー孔掘削状況

アンカー孔は、表-24 の試験項目に示すように、 ϕ 50mm の孔を、コアによる掘削を9本、ジャックハンマによる掘削を9本の計18本削孔した。

コア抜き状況を写真-2 に、コア掘削後の状況を写真-3 に示す。また、ジャックハンマによる掘削状況を写真-4 に、ジャックハンマによる掘削後の状況を写真-5 に示す。



写真-2 コア抜き状況



写真-3 コア抜き後



写真-4 ジャックハンマによる削孔状況

③ アンカー体作製状況

掘削したアンカー孔に、表-24 の条件でアンカー体を作製した。アンカー体作製概要を図-28 に示す。

アンカー体は、テンドンのみが抜け出ることを避けるため、ナットによる補強を行った。テンドンとナットの外観を写真-6 に示す。テンドンは、異形 PC 鋼棒



写真-5 ジャックハンマによる削孔後

B 種 1 号 SBPD 930/1080 23mm を使用した。

アンカー体長は 50mm、60mm、70mm の 3 種類作製した。アンカー体に用いたグラウト剤は、セメントは無収縮セメント（太平洋ユーロックスセメント）を使用し、配合は一般的なアンカー体の配合である $W/C=45\%$ とした。グラウト注入時には、写真-7 に示すように試験時に垂直に引き抜けるようにするため、補助鉄筋で固定した。グラウトの注入状況を写真-8 に示す。

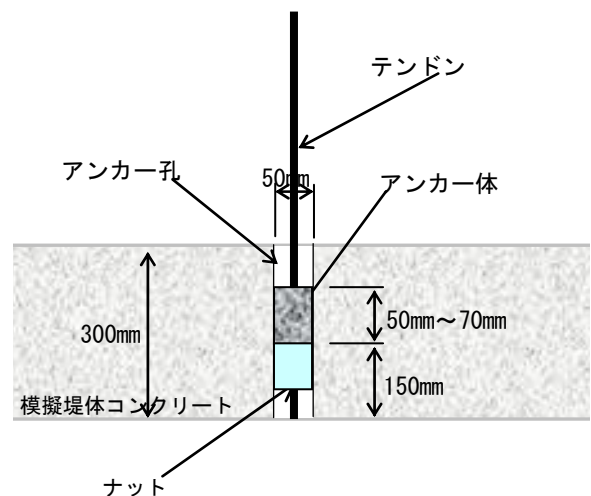


図-28 アンカー体作製概要



写真-6 テンドンとナット



写真-7 補助筋配置



写真-8 グラウト注入の様子

④ 引き抜き試験方法

引抜き試験は写真-9 に示すようにセンターホールジャッキを用いて引抜き荷重を与え、変位をダイヤルゲージで測定し、荷重-変位曲線を求める。



写真-9 センターホールジャッキの外観

5.4.3 試験結果

引き抜き試験結果を図-29 と図-30 に示す。図-29 は掘削をコアで行った孔にアンカー体を打設し引き抜き試験を実施した結果、図-30 は掘削をジャックハンマで行った孔にアンカー体を打設し引き抜き試験を実施した結果を示す。それぞれの図は、横軸が引き抜き変位、縦軸が引き抜き試験機により計測された荷重を示す。

図-29 に示す掘削孔がコアの試験結果より、コアに打設したアンカー体の引き抜き試験の特徴として、C-50-2 と C-70-1 を除き、荷重が増加するに従い変位が増え、最大荷重を計測した後は、荷重の増加と変位の増加、荷重の開放を繰り返す結果を得た。アンカー体がある位置の摩擦限界が越えた後に荷重が開放されることが繰り返されていると推測される。これらの試験については、試験結果後のアンカー体の目視観測から、アンカー体自体が破壊されていないことを確認した。試験後の破壊していないアンカー体の例を写真-10 に示す。また、C-50-2 と C-70-1 については、写真-11 に示すように、試験後の目視観測時にアンカー体にクラックが入っていることが確認された。C-50-2 と C-70-1 とともに、1mm 程度変位が発生したときに、クラックが発生し、摩擦応力が減少し、その後引き抜き荷重を増加させることで、荷重の開放を繰り返さずにずり抜けるようにアンカー体が抜けたと推測される。

図-30 に示す掘削孔がジャックハンマの試験結果より、ジャックハンマに打設したアンカー体の引き抜き試験の特徴として、J-50-1 と(b)アンカー体長 60mm の試験結果を除き、変位が 3mm 付近で最大荷重を計測した後は、荷重は少しずつ減少していく傾向にあることがわかる。J-50-1 と(b)アンカー体長 60mm の試験結果には一度荷重の増加がとまるが、さらに荷重を

加えていくと変位の伸びとともに荷重も増加し、変位が5mm～9mmとなったところで最大荷重を計測した。しかし、アンカー体の目視観測結果より、これらの引き抜き試験結果に明確な特徴は現れていないことが確認された。

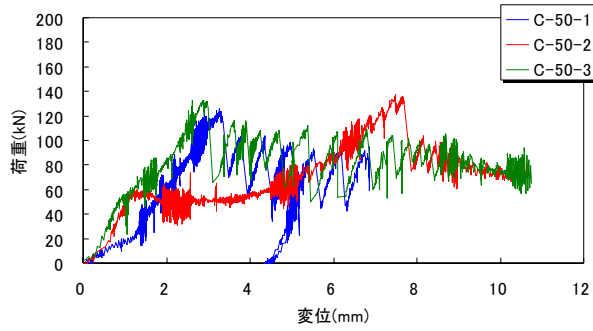
試験後の模擬堤体コンクリートの壁面を写真-12 と写真-13 に示す。写真-12 はコア掘削、写真-13 はジャックハンマによる掘削の試験後の写真である。

写真-12 に示す、掘削孔がコアの場合は、周囲の模擬ダムコンクリートの骨材が明確に見え、アンカー体のみが限界摩擦を越えた後に滑っていることがわかる。しかし、写真-13 に示す、掘削孔がジャックハンマの場合は写真に示すように周囲のコンクリートの凹部に入ったアンカー体が破壊（まきこみ）しながら少しずつ引き抜けていることがわかる。

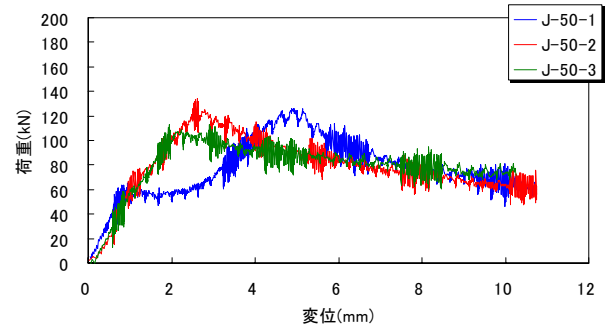
図-29 と図-30 の最大荷重より算出した周面摩擦抵抗を表-25 と表-26 に示す。表-25 は模擬堤体コンクリートがコア掘削の試験結果、表-26 は模擬堤体コンクリートがジャックハンマ掘削の試験結果を示す。最大荷重より算出した周面摩擦抵抗については、掘削孔がコアの試験結果とジャックハンマの試験結果とでは大きな差は見られなかった。

iv) まとめ

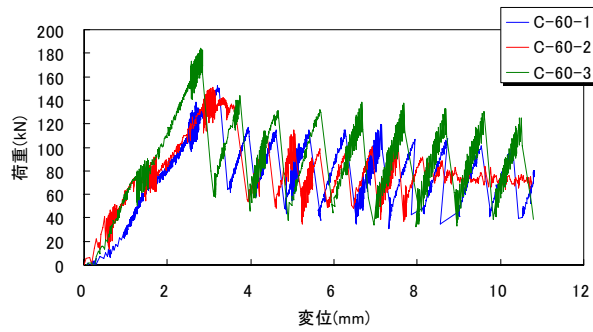
掘削孔がコアとジャックハンマによる試験では、最大引抜荷重から算出した周面摩擦抵抗は、ほぼ同じ値であったが、アンカー体が滑動するまでの挙動、滑動した後の挙動に違いがあることがわかった。今回は静的な試験のため、実際の地震時の挙動とは異なるが、実際の設計時には、地震の破壊を想定したうえで、どのようなコンクリートの形態がよいか判断した上で施工を行うための基礎資料になると考えられる。



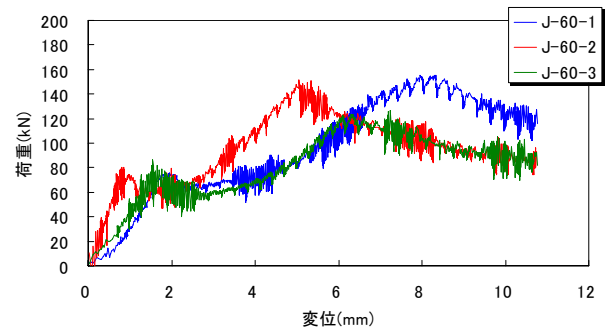
(a) コア アンカー体長 50mm



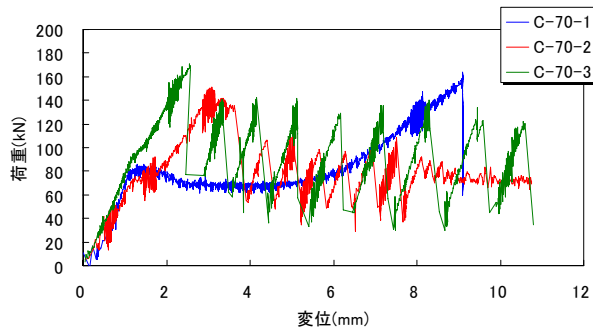
(a) ジャックハンマ アンカー体長 50mm



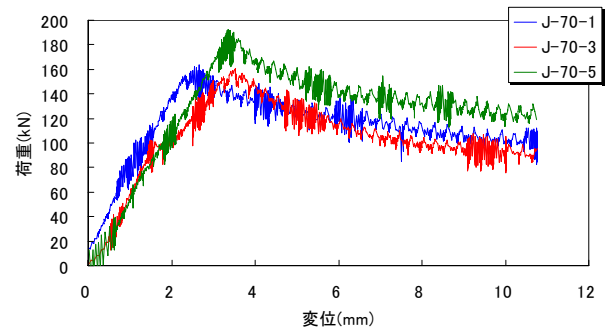
(b) コア アンカー体長 60mm



(b) ジャックハンマ アンカー体長 60mm



(c) コア アンカー体長 70mm



(c) ジャックハンマ アンカー体長 70mm

図-29 引き抜き試験結果（コア）

図-30 引き抜き試験結果（ジャックハンマ）

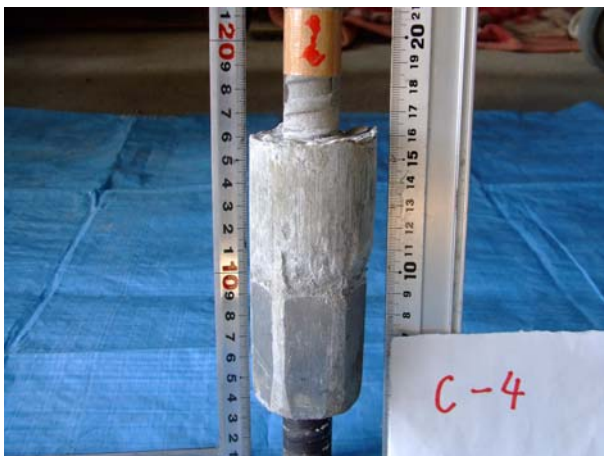


写真-10 破壊していないアンカー体

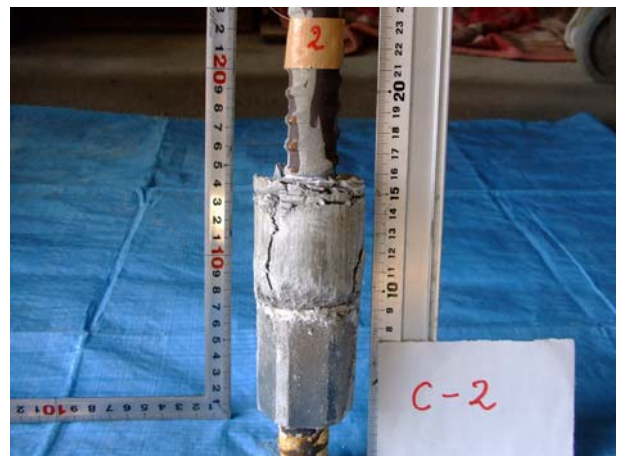


写真-11 破壊したアンカー体



写真-12 コア



写真-13 ジャックハンマ

表-25 周面摩擦抵抗（コア）

No.	供試体の 圧縮強度 N/mm ²	グラウトの 圧縮強度 N/mm ²	グラウト 径 mm	定着長 Mm	抵抗 面積 mm ²	最大 荷重 kN	最大荷重 発生時変位 mm	周面摩擦抵抗 N/mm ²		
C-50-1	22.918	36.013	52	51	8332	125.0	3.3	15.00	15.38	14.93
C-50-2	22.918	36.013	52	53	8577	137.3	7.6	16.01		
C-50-3	21.516	40.355	52	51	8332	126.1	3.0	15.14		
C-60-1	22.918	36.013	52	59	9638	152.3	3.1	15.80	14.93	
C-60-2	22.918	36.013	52	65	10537	151.2	3.1	14.35		
C-60-3	21.516	40.355	52	65	10619	155.6	2.8	14.65		
C-70-1	22.918	36.013	52	65	10619	163.7	9.1	15.42	14.48	
C-70-2	22.918	36.013	52	71	11599	151.2	3.1	13.04		
C-70-3	21.516	40.355	52	67	10945	163.9	2.6	14.98		

表-26 周面摩擦抵抗（ジャックハンマ）

No.	供試体の 圧縮強度 N/mm ²	グラウトの 圧縮強度 N/mm ²	グラウト 径 mm	定着長 Mm	抵抗 面積 mm ²	最大引抜 荷重 kN	最大荷重 発生時変位 mm	周面摩擦抵抗 N/mm ²		
J-50-1	21.516	40.355	52	51	8332	126.1	5.0	15.14	14.79	14.88
J-50-2	21.516	40.355	52	53	8577	134.3	2.6	15.66		
J-50-3	21.516	40.355	52	51	8332	113.1	2.0	13.58		
J-60-1	21.516	40.355	52	65	10619	155.6	8.3	14.65	14.30	
J-60-2	21.516	40.355	52	59	9638	151.6	5.1	15.73		
J-60-3	21.516	40.355	52	62	10128	126.7	6.4	12.51		
J-70-1	21.516	40.355	52	67	10945	163.9	2.5	14.98	15.55	
J-70-2	21.516	40.355	52	68	11109	160.7	3.5	14.47		
J-70-3	21.516	40.355	52	68.5	11190	192.4	3.4	17.19		

6. まとめ

6.1 検討結果の総括

数種類の形状の重力式コンクリートダムを対象とした大規模地震に対する補修・補強方法に関する検討の結果、以下のことがわかった。

(1) 断面増厚工

- ①腹付け厚さが厚いほど、新規クラックの発生、既存クラックの進展を抑制する効果がある。
- ②断面増厚により断面形状が変わり、ダム堤体の振動特性（固有値、各次数の振動変形モード形状、各次数の寄与度等）も変わるため、補強対象箇所が補強できても、他の部位に弱部ができることがある。
- ③既存クラック（ダム堤体の表面にあるクラック始端部）を覆う形の断面増厚を行った場合、腹付け厚が薄い場合には、既存クラックの開口により腹付けコンクリートに内部（新旧コンクリートの接合面、既存クラックの始端部）から新規クラックが発生することがある。
- ④同程度の増厚率であっても、地震前補強ではクラックの発生を防ぐことができるのに対し、地震後補修では現状維持（既存クラックの進展を防ぐこと）も難しい場合がある。このことから、地震前補強による対策効果の優位性は明らかである。

(2) アンカー工

- ①地震前補強について、堤体表面から想定クラックまでの距離が比較的短く、アンカー工により締め付ける範囲が比較的小～中規模である場合には、クラックの発生規模を縮小（場合によっては完全に防止）することができる。
- ②地震前補強について、堤体表面から想定クラックまでの距離が長く、アンカー工により締め付ける範囲が大規模である場合には、アンカー工のみではクラック発生を防止することは難しいものの、地震前補強を行わない場合に比べると、導入するプレストレス力大きいほど、クラック発生規模を縮小することができる。
- ③地震後補修について、導入するプレストレス力大きいほど、既存クラックの開口変位を縮小し、既存クラックの進展を抑制することができる。
- ④堤頂部の地震後補修（表・18）で見られたように、堤体形状とクラック発生位置によっては、アンカー工を用いて補修したことにより、ダム堤体の振動特性が変わり、補修対象箇所が補修できても、他の部位に弱部ができることがある。

(3) 断面増厚工とアンカー工の組合せ

- ①単独対策では対策効果が十分に得られなかった（再地震動入力時に既存クラックの進展が生じる等）工法であっても、他工法と組み合わせた複合対策を行うことにより、ダムの耐震性能の回復・向上に効果的となる場合がある。
- ②複合対策では、既存クラックの進展を抑制するだけでなく、既存クラックの開口を抑制する効果も大きく、対策箇所以外の他の部位にクラックを誘発する可能性が小さい。

6.2 コンクリートダム堤体の大規模地震に対する補修・補強方法の提案

(1) 地震前補強

i) 断面増厚工

- ①上流面腹付け：クラックの発生防止・抑制に対して非常に効果が高い。上流面に形状変化点（フィレット設置部等）があるダム堤体では、上流面腹付けを行って形状変化点を無くすことにより、十分な対策効果が得られるものと考えられる。重力式コンクリートダムは三角形を基本形状としているため、上流面にコンクリートを増厚することによりダム堤体断面形状が構造的により安定した台形に近付くためであると考えられる。
- ②下流面腹付け：腹付け厚さが厚いほど対策効果（クラックの発生防止・抑制）が大きい。ただし、上流面に形状変化点（フィレット設置部等）があるダム堤体では、上流面腹付けと同程度の断面積増加では、上流面の形状変化点から発生するクラックを防ぐことができない場合がある。
- ③共通事項：断面増厚により断面形状が変わり、ダム堤体の振動特性（固有値、各次数の振動変形モード形状、各次数の寄与度等）も変わるため、補強する当たって着目した箇所（クラック発生が想定される箇所）が補強できても、他の部位に弱部ができることに留意する必要がある。

ii) アンカー工

- ①堤体表面から想定クラックまでの距離が比較的短く、アンカー工により締め付ける範囲が比較的小～中規模である場合には、クラックの発生防止・抑制に対して非常に効果が高い。

(2) 地震後補修

i) 断面増厚工

- ①腹付け厚さが厚いほど、既存クラックの進展を防止・抑制することができる。ただし、地震前補強と同規模の断面増厚では、既存クラックの進展を

抑制できない場合がある。

- ②既存クラック（ダム堤体の表面にあるクラック始端部）を覆う形の断面増厚を行った場合、腹付け厚が不足する場合には、腹付けコンクリートに内部からクラックが発生する可能性があることに留意する必要がある。

ii) アンカー工

- ①アンカー工単独による地震後補修を行う場合、地震前補強と同程度のプレストレス力の導入では、既存クラックの進展を防止・抑制することが難しい。

iii) 複合対策

- ①単独対策（断面増厚工あるいはアンカー工のいずれか片方）で十分な対策効果が得られない度合いの対策でも、他工法と組み合わせると、耐震性能の回復・向上において効果が上がる。②したがって、単独対策で実力不足（対策効果が十分に得られない）のものであっても、対策工の候補から直ちに除外することなく、工法の組合せについて検討を行うことが望ましい。

(3)耐震対策としてアンカー工を採用する場合に関する提案

今回の検討は、あらかじめクラックの発生位置を決めた上での検討で、実際に起こりうるダム堤体の損傷を全て網羅したわけではない。実際には、発生する地震動の特性（振幅、位相）や地震発生時の貯水位は不確定要素であり、ダム堤体のコンクリート強度についても経年劣化する可能性もあるため、ダム堤体のどの箇所にどの程度（規模）のクラックが発生するかを正確に知ることは難しい。また、数値解析上の課題（アンカー工の件に限らず）として、減衰特性（減衰形、減衰定数）、コンクリートの材料特性（引張強度（静的、動的）や引張軟化曲線（破壊後の挙動の条件設定））の設定により、解析結果が変わることが挙げられ、解析結果の評価方法についての課題がある。

アンカー工を採用する場合には、クラックの発生位置と規模を確定した上で詳細設計を行う必要があるが、上記のような事情を勘案すると、アンカー工を単独でコンクリートダムの耐震対策工として採用することには不確実性を伴うことは避けられない。

一方、地震前補強としてアンカー工を用いる場合には、断面増厚工等の他工法との組合せによることが望ましい。断面増厚工は、今回の検討で耐震性能の回復・

向上において有効であることが確認されており、アンカー工を採用する場合に比べれば、クラックの発生位置と規模を確定する必要性は小さい。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説、2005.3
- 2) 社団法人土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕、pp.27-28、2002.3
- 3) 堀井英之、内田善久、柏柳正之、木全宏之、岡田武二：コンクリートダム耐力評価のための引張軟化特性の検討、電力土木、No.286、pp.113-119、2000.3
- 4) 佐々木隆、山口嘉一、高藤啓：無筋コンクリートのクラック進展解析における解析パラメータに関する検討、ダム工学、Vol.16 No.4、pp.282-293、2006
- 5) 永山功、佐々木隆、平塚毅彦：重力式コンクリートダムに作用する地震時動水圧に関する考察、ダム技術、No.58、pp.30-41、1991
- 6) Okamoto, S.: INTRODUCTION TO EARTHQUAKE ENGINEERING Second Edition, pp.407-409, UNIVERSITY OF TOKYO PRESS, 1984.6
- 7) Hansen, K.D. and L.H. Roehm: The Response of Concrete Dams to Earthquakes, Water Power and Dam Construction, pp.27-31, 1979.4
- 8) 佐々木隆、金縄健一、山口嘉一、千葉淳哉：地震動強度、堤体形状が重力式コンクリートダムのクラック損傷程度に与える影響、大ダム、No.193、pp.81-87、2005.10
- 9) 社団法人日本土木工業協会：実務者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル、2000.6
- 10) 新技術情報提供システム NETIS
(New Technology Information System) :
<http://www.cbr.mlit.go.jp/chugi/netis/index.htm>
- 11) 米崎文雄、川崎秀明、金銅将史：ダムの耐震補強・補修の事例とレベル 2 地震動による損傷を想定した対策工の検討、ダム技術、No.227、p.133、2005.8
- 12) 社団法人土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、2008.3
- 13) 社団法人地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説、2000.3
- 14) KTB システム総合カタログ（KTB 協会）
<http://www.ktb-kyoukai.jp/download/index.shtml>

RESEARCH ON REHABILITATION AND REINFORCEMENT OF CONCRETE DAMS

Abstract : There are many effective methods for rehabilitation and reinforcement of the concrete structures in the field of bridges and tunnels, and a lot of practical cases are reported. In the dam engineering field, there are many cases of rehabilitation methods against the water leakage through concrete dam bodies. However, the strengthening measures have not been established. Because the crack damages are expected in concrete dams due to large-scale earthquake motions, it is strongly desired to develop rehabilitation and reinforcement method.

In this research theme, we studied the method of rehabilitation and reinforcement for concrete dam bodies and general concrete structures. And, we selected add-on concrete method, anchoring method, and combined method of add-on concrete method and anchoring method. Numerical simulations were conducted to evaluate the effect of rehabilitation and reinforcement for concrete dam body to large-scale earthquake motions, and the strengthening measures for concrete dam body were evaluated.

Key words : Concrete dam, Rehabilitation, Reinforcement, Add-on concrete method, Anchoring method, Nonlinear analysis