

◆特集：新しい時代に向けたダム技術◆

重力式コンクリートダム嵩上げ設計時の
堤体応力特性に関する検討

佐々木 隆* 金縄健一** 山口嘉一***

1. はじめに

近年、自然環境の保全の観点から、ダムの効率的な利用が求められている。ダムの効率的利用を目的とした再開発技術としては、ダム堤体嵩上げによる貯水容量の増大、放流設備等の改造・新設による貯水池運用の変更、複数ダム連携による貯水池運用などが考えられる。そのうち最も有効な

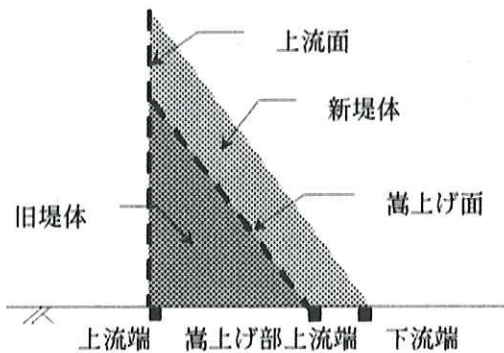


図-1 日本での一般的な嵩上げ方式

表-1 国内における嵩上げ事例

ダム名		完了年	旧堤高	嵩上げ高さ	嵩上げ率
(新)	(旧)	(完了予定年)	(m)	(m)	(%)
桜山	同左	-	25.0	15.0	60
王泊	同左	1959	60.0	10.5	18
三川	同左	1974	48.0	5.0	10
黒田	同左	1980	35.0	10.2	29
川上	同左	1980	46.5	16.5	35
新中野	中野	1985	53.0	21.9	41
鴨川	同左	1996	42.0	0.5	1
萱瀬	同左	2000	51.0	14.5	28
花山	同左	2002	47.8	0.7	1
氷川	同左	2003	56.5	2.0	4
新桂沢	桂沢	(2004)	63.6	11.9	19
三高	同左	(2004)	32.6	11.4	35
野洲川	同左	(2011)	52.7	2.2	4

Study on Characteristics of Generated Stress in Heightened
Concrete Gravity Dam

方法はダム堤体の嵩上げである。貯水池は一般に高い水位になるほど単位高さ当たりの貯水容量が大きくなるので、わずかな嵩上げによっても貯水容量を大幅に増大させることが可能である。そこで、日本においてもこれまで多くの嵩上げ事業が実施されてきたが、今後の社会的要望の高まりにあわせて嵩上げの事例はますます増えると考えられ、嵩上げ設計方法の合理化を進めることが必要である。ここでは対象を重力式コンクリートダムに絞り、ダムの嵩上げにおける堤体応力の特性について検討した結果を報告する。

重力式コンクリートダムの嵩上げ時の断面形状としては、諸外国を含め種々の方法が採用されているが、日本においては図-1に示すように旧堤体と新堤体の上流面を一致させ、旧堤体の下流面側に新コンクリートを打設する方式が一般的である。

国内でのこれまでのコンクリートダムの嵩上げ事例は、表-1のようであり、嵩上げ高さ5.0～20.0m程度、嵩上げ率（＝嵩上げ高／旧堤体の堤高）になおすと10～40%程度であり、旧堤体および新堤体ともに比較的良好な岩盤上に施工される例が多い。

しかし、現在から将来にかけての社会状況を考慮すると、今後は軟弱な岩盤での嵩上げが計画されることも予想される。これまでにも、嵩上げ時の条件が堤体応力に及ぼす影響に関する検討がなされている¹⁾が、1モデルに限られた検討で、設定されたケース数が少ない。そこで、今回は嵩上げ率を変化させ数モデルを設定し、より詳細な条件を設定し検討を実施した。本検討では、嵩上げダムの断面設計に影響を及ぼすと考えられる因子（施工時水位〔施工を行う際の水位〕、嵩上げ率お

よび基礎岩盤の変形性)が嵩上げ後の新堤体に発生する応力に与える影響について二次元有限要素法解析(以下「FEM解析」とする)により検討を行った。

2. 一般的な嵩上げダムの設計手法

重力式コンクリートダムの断面設計は、新設、嵩上げにかかわらず、想定される荷重の組み合わせに対して①転倒しない、②滑動しない、③材料強度を超える応力が発生しない、という三つの条件を満足するように実施される。今“転倒しない”という条件については、梁理論で計算された上流端応力が引張応力にならないという条件に置き換えて設計が行われている。嵩上げダムは、既設堤体が施工中に維持される貯水位分の静水圧の作用による応力が旧堤体に発生している状態で新堤体のコンクリートを打設するので、新設ダムとは上流端で発生する応力に違いがある。そこで、嵩上

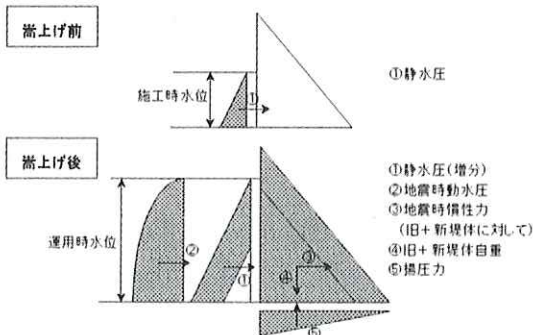
げダムの断面設計に、新設ダムで用いている上流端に鉛直方向の引張応力が発生しないことと同義の「ミドルサードの条件」で確認する方法も考えられるが、現状では垣谷が提案した「嵩上げ公式」²⁾を用いて、上流端の鉛直応力が引張とならないように下流面勾配を決定している。本報では、「嵩上げ公式」の導出に用いられた“転倒しない”という条件に絞って検討を行うこととする。「嵩上げ公式」を用いて設計すると施工時水位が高いほど下流面勾配が大きくなる。しかし、「嵩上げ公式」で考慮している荷重条件は、嵩上げ前の旧堤体に作用する荷重は静水圧のみで、嵩上げによって新たに加わる荷重は静水圧(嵩上げによる増分)、堆砂圧、地震時動水圧、地震時慣性力、揚圧力および堤体自重である(図-2、荷重条件①)。嵩上げ前の旧堤体の自重は、既に旧堤体に作用しているという実際の荷重条件(図-2、荷重条件②)とは異なった仮定をしている。そのため、「嵩上げ公式」を用いて断面形状を決定すると、条件によっては新規ダムを設計する場合に比べて下流面勾配が著しく大きくなることがある。

本報では、FEM解析を用いて嵩上げダムの堤体応力の特性を検討するとともに、「嵩上げ公式」により求められる応力とも比較検討する。

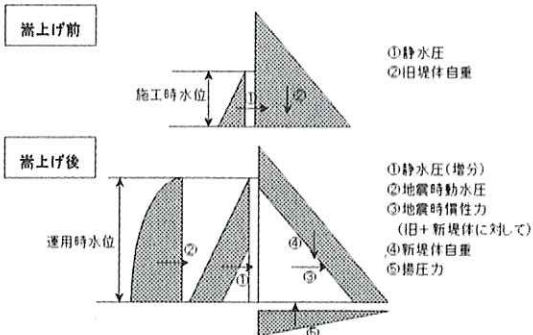
3. 解析方法

3.1 解析条件

解析モデルを図-3に示す。堤体の形状は上流面が鉛直の直角三角形形状とし、下流面勾配は1:0.85



荷重条件①(「嵩上げ公式」)



荷重条件②(実条件)

図-2 嵩上げ設計荷重条件の比較

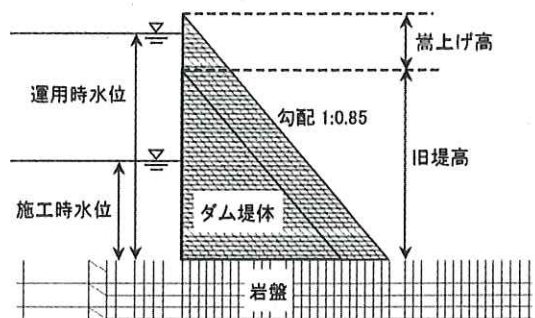


図-3 解析モデル

とした。解析に用いた基本とする材料物性値を表-2に示す。なお、堤体部については、一般的なダムコンクリートの物性を想定して設定した。また、基本とする基礎岩盤の物性にはC_M級岩盤を想定して設定したが、基礎岩盤の変形性の影響を検討する場合には、岩盤としてC_L～C_H級の各岩級を想定して設定した表-3に示す物性値を用いた³⁾。FEM解析において考慮した荷重は、静水

表-2 基本とする材料物性値

対象箇所	弾性係数(N/mm ²)	ポアソン比	単位体積質量(g/cm ³)
堤体部	25,000	0.2	2.3
貯水部	—	—	1.0
岩盤部	2,500	0.2	2.3

表-3 岩盤の弾性係数

岩級区分	C _L 級岩盤	C _M 級岩盤	C _H 級岩盤
弾性係数(N/mm ²)	1,000	2,500	9,000
せん断強度(N/mm ²)	0.7	1.9	2.0
内部摩擦係数(度)	45	45	50

表-4 基本とする解析ケース

設定項目	設定値
旧堤高(m)	100
新堤高(m)	130
嵩上げ率(=嵩上げ高/旧堤体堤高)(%)	30
施工時水位(旧堤高に対する割合)(%)	50
運用時水位(新堤高に対する割合)(%)	100
基礎岩盤	C _M 級

表-5 検討ケース(新設ダムとの比較)

ダムの種類	堤高(m)		施工時水位 (%)	運用時水位 (%)
	旧堤高(m)	嵩上げ率(%)		
新設ダム	130		—	100
嵩上げダム	130		100	100
	100	30		

表-6 検討ケース(施工時水位の影響)

施工時水位(%)	運用時水位(%)	旧堤高(m)	嵩上げ率(%)
0、50、100	0	100	30
0、50、100	100		

表-7 検討ケース(嵩上げ率の影響)

嵩上げ率(%)	旧堤高(m)	新堤高(m)	施工時水位(%)	運用時水位(%)
0	—	130	—	100
30	100	130	50	
50	86.7	130		
100	65	130		

圧、自重、地震時度慣性力、地震時動水圧、揚圧力で、荷重条件は図-2に示す荷重条件②とした。揚圧力については、上流端の揚圧力係数1/3、下流端水位を0とした三角形分布とした。設計震度は0.12とし、動水圧はWestergaardの式によった。岩盤底面は剛結、側方は鉛直可動・水平固定、上面は自由とした。基本とする解析条件を表-4に示す。なお、運用時水位とは嵩上げ後ダムを実際に運用する際の水位のことである。

3.2 検討項目

新設ダムおよび嵩上げダムを対象に、FEM解析により嵩上げダムの堤体発生応力の特徴を検討した。また、図-2の荷重条件①での梁理論に基づく「嵩上げ公式」²⁾により求められる応力とも比較検討した。

(1) 新設ダムと嵩上げダムの比較

嵩上げダムでは施工時水位分の静水圧を旧堤体で受け応力が発生した状態で新コンクリートを打設するため、新設ダムとは発生応力に違いがある。そこで、表-5のケースについて新設ダムと嵩上げダムの発生応力の比較を行い、嵩上げダムの堤体応力の特徴を抽出した。なお、基礎岩盤はC_M級とした。

(2) 施工時水位の影響

嵩上げダムの下流面勾配の決定にあたり、大きな影響を与える条件として施工時水位がある。そこで、施工時水位が発生応力に与える影響について検討を実施した。基本解析ケースを含む比較検討に用いたケースを表-6に示す。なお、基礎岩盤はC_M級とした。

(3) 嵩上げ率の影響

嵩上げ率の違いによる堤体に発生する応力の変化について検討を実施した。基本解析ケースを含む比較検討に用いたケースは、表-7に示すように嵩上げ後の新堤高を130mに揃えて設定した。なお、基礎岩盤はC_M級とした。

(4) 基礎岩盤の変形性の影響

新設ダムではダム軸を決定する際に地形、地質

条件から最適な位置に選定しているので、ダム堤敷で極端に岩盤の硬軟の差が大きい基礎岩盤が出現するようなことは少ないと考えられる。しかし、嵩上げダムについては、これまで国内で実施された嵩上げ型式では嵩上げ堤体の基礎岩盤は旧堤体の下流側に配置され、基礎岩盤選定の自由度はほとんどない。また、旧堤体は地形、地質条件から最適と考えられる岩盤にダム軸をもってきているため、旧堤体部と嵩上げ部で岩盤の硬軟が変化する、場合によってはその差が大きいということは十分に起こり得ると考えられる。

また、現行のダム設計では基礎岩盤の変形性を考慮しない手法で断面決定がなされており、このことは嵩上げダムの設計で用いる「嵩上げ公式」においても同様である。そこで、岩盤の弾性係数が、嵩上げダムの発生応力に与える影響について検討を実施した。比較検討ケースについて、岩盤の弾性係数が均一の場合を表-8に、嵩上げ部岩盤が旧堤体部岩盤より軟らかい場合を表-9に、嵩上げ部岩盤が旧堤体部岩盤より硬い場合を表-10に示す。基礎岩盤の条件以外は基本検討ケースと同じである。

表-8 検討ケース (均一の場合)

嵩上げ部岩盤の弾性係数 (N/mm ²)	旧堤体部岩盤の弾性係数 (N/mm ²)
1,000 (Cl級)	1,000 (Cl級)
2,500 (Cm級)	2,500 (Cm級)
9,000 (Ch級)	9,000 (Ch級)

表-9 解析ケース (嵩上げ部岩盤が軟らかい場合)

嵩上げ部岩盤の弾性係数 (N/mm ²)	旧堤体部岩盤の弾性係数 (N/mm ²)
9,000 (Ch級)	9,000 (Ch級)
1,000 (Cl級)	9,000 (Ch級)
2,500 (Cm級)	9,000 (Ch級)
1,000 (Cl級)	2,500 (Cm級)

表-10 解析ケース (嵩上げ部岩盤が硬い場合)

嵩上げ部岩盤の弾性係数 (N/mm ²)	旧堤体部岩盤の弾性係数 (N/mm ²)
2,500 (Cm級)	2,500 (Cm級)
9,000 (Ch級)	2,500 (Cm級)

4. 解析結果

(1) 新設ダムと嵩上げダムの比較

図-4は上流端からの距離と堤敷の鉛直応力の関係を示したものであり、表-5に示すケースのFEM解析結果および嵩上げダムに対しては図-2の荷重条件①下での「嵩上げ公式」により、また新設ダムに対しては「梁理論」より算出した結果を示している。なお、FEM解析結果は堤体直下の岩盤部要素の応力値を示している。解析結果として得られた鉛直応力は、引張側を正（プラス）とした。図より、上流端においてFEM解析による応力を比較すると嵩上げダムの方が新設ダムより引張側にあり、嵩上げ部上流端において嵩上げダムでは旧堤体側と新堤体側で応力差が生じていることが分かる。この現象は施工時水位分の静水圧を旧堤体のみで受け持つことに起因する。また、上流端において設計に用いる「梁理論」および「嵩上げ公式」とFEM解析結果を比較すると、新設ダム

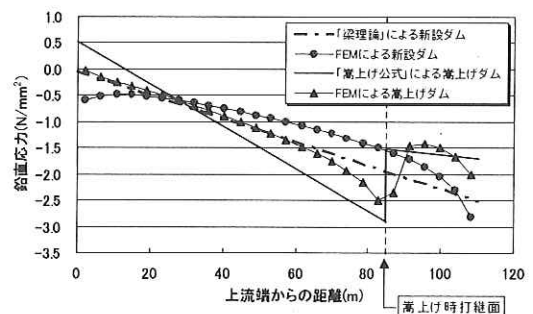


図-4 ダム堤敷での鉛直応力 (新設ダムとの比較)

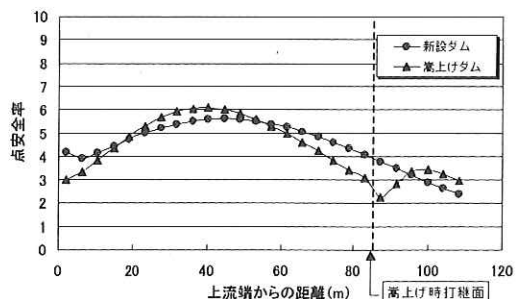


図-5 ダム堤敷での点安全率 (新設ダムとの比較)

と嵩上げダムもどちらもFEM解析結果が圧縮側の応力となっている。これより、基本的には「梁理論」および「嵩上げ公式」で安全側の設計ができてることが確認できる。

一方、図-5にFEM解析による岩盤のせん断に対する点安全率（以下、「点安全率」とする）を示したが、新設ダムと比較して嵩上げダムでは、上流端および嵩上げ部上流端付近において点安全率が低下していることが分かる。

(2) 施工時水位の影響

図-6および図-7は、運用時水位を100%および0%に固定し、施工時水位と上流端、嵩上げ部上流端および下流端に発生する鉛直応力を示したものである。図での上流端、嵩上げ部上流端、下流端の位置は図-1に示したとおりである。なお、上流端については梁理論に基づく「嵩上げ公式」により算出した応力も併記している。図-6より、施工時水位が高くなれば上流端に発生する鉛直応力は引張側に移行するが、0から50%までの発生鉛

直応力の変化率はそれほど大きくはないことが分かる。図-7より、運用時水位が0%の場合についても同様のことが言える。

下流端においても、運用時水位にかかわらず施工時水位の上昇とともに応力が引張側へ移行する。また、施工時水位100%、運用時水位0%のケースでの下流端鉛直応力に着目すると、相当引張側に近い値となっている。これは、施工時水位が高い状態で施工を行った嵩上げダムにおいて運用時に水位が大きく下がる、もしくは、下げなければいけないという場合には、下流端での応力にも留意する必要があることを意味する。

上流端において、「嵩上げ公式」とFEM解析との応力を比較すると、施工時水位増加に伴う鉛直応力の増加傾向は似ているが、「嵩上げ公式」による応力が引張側にあることから、施工時水位によらず「嵩上げ公式」を用いた場合、安全側に応力を評価することになる。

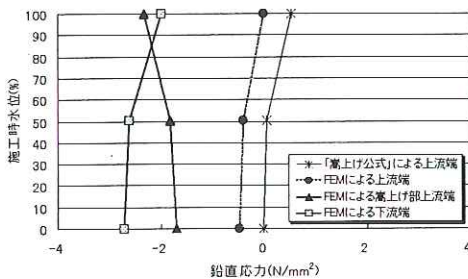


図-6 ダム堤敷上流端・下流端での鉛直応力（運用時水位100%）

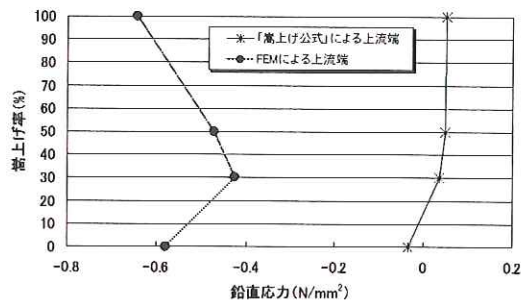


図-8 ダム堤敷上流端での鉛直応力（嵩上げ率の影響）

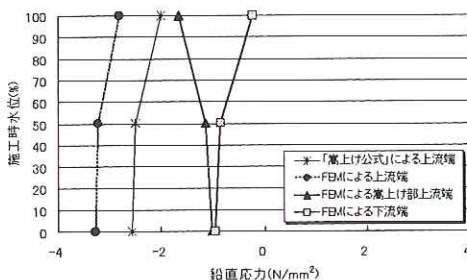


図-7 ダム堤敷上流端・下流端での鉛直応力（運用時水位0%）

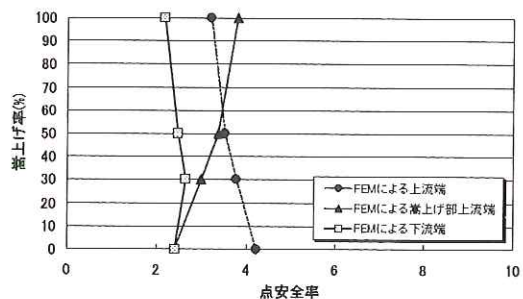


図-9 ダム堤敷上流端・下流端での点安全率（嵩上げ率の影響）

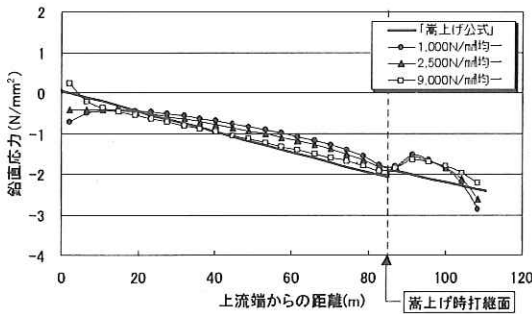


図-10 ダム堤敷での鉛直応力（弾性係数均一）

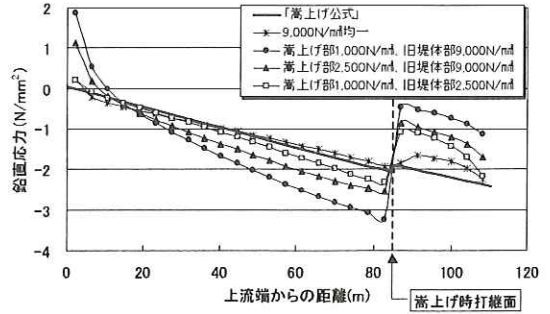


図-12 ダム堤敷での鉛直応力（嵩上げ部岩盤が柔らかい）

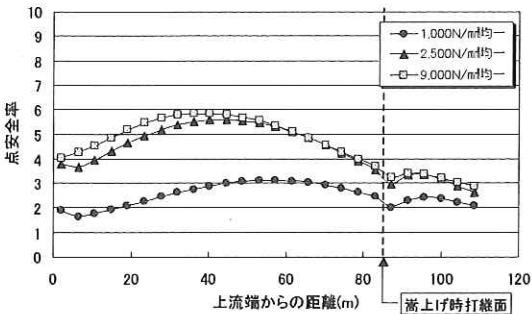


図-11 ダム堤敷での点安全率（弾性係数均一）

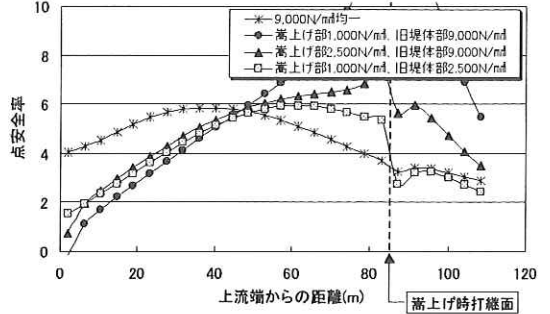


図-13 ダム堤敷での点安全率（嵩上げ部岩盤が柔らかい）

(3) 嵩上げ率の影響

図-8は、嵩上げ後の新堤高130mに固定し、嵩上げ率と上流端での鉛直応力の関係を示したものである。FEM解析では、嵩上げ率によらず応力は圧縮側であるが、嵩上げ率が30%の時に最も引張側に移行し、それ以上に嵩上げ率が大きくなると圧縮側に移行する傾向がある。一方、「嵩上げ公式」によると、FEM解析結果とは異なり嵩上げ率が大きいほど、応力は引張側になる。また、嵩上げの規模によらず「嵩上げ公式」による応力は引張側の値を示す。

図-9は、嵩上げ率と点安全率との関係を、上流端、嵩上げ部上流端および下流端ごとに示したものである。最小値は嵩上げ率によらず下流端で発生している。また、嵩上げ率が上昇すると上流端、下流端では点安全率が低下し、嵩上げ部上流端において上昇する傾向にある。

(4) 基礎岩盤の変形性による影響

a) 岩盤の弾性係数が均一の場合

図-10および図-11は、基礎岩盤の弾性係数が1,000、2,500、9,000N/mm²で均一な場合の上流端からの距離と堤敷での鉛直応力および点安全率との関係を示したものである。図-10には、「嵩上げ公式」により算出した応力も併記している。図-10より岩盤の弾性係数が均一な場合は、弾性係数が大きい方が上流端での鉛直応力は引張側に移行することがわかる。

図-11より、基礎岩盤の弾性係数が大きいほど点安全率が大きくなっているのはせん断強度が高いためである。図より、基礎岩盤の弾性係数が小さいと上流端で点安全率が最小値をとるが、弾性係数が大きくなると下流端で最小値をとることが分かる。

b) 嵩上げ部岩盤が軟らかい場合

図-12および図-13は、表-9に示す嵩上げ部岩盤が軟らかいケースについて、上流端からの距離

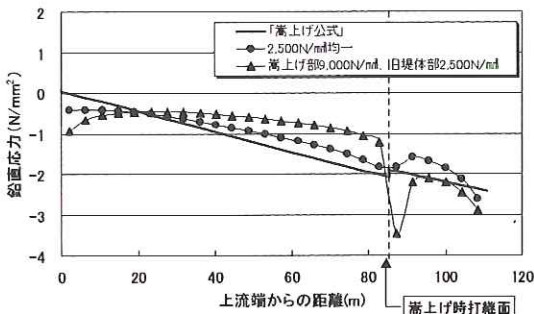


図-14 ダム堤敷での鉛直応力（嵩上げ部岩盤が硬い）

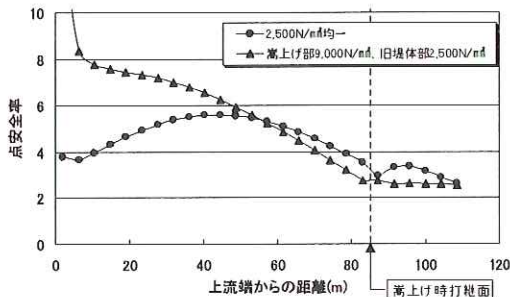


図-15 ダム堤敷での点安全率（嵩上げ部岩盤が硬い）

と堤敷での鉛直応力および点安全率の関係を示したものである。なお、図-12には「嵩上げ公式」により算出した応力も併記している。図-12より、嵩上げ部岩盤の弾性係数が旧堤体部より小さいと嵩上げ時の打継面における応力差が大きくなっていることが分かる。また、上流端においては嵩上げ部岩盤の弾性係数が旧堤体部より小さいと鉛直応力が引張側に移行し、旧堤体部岩盤と嵩上げ部岩盤の弾性係数比が大きくなるに従い、その傾向が強くなる。これは、嵩上げ部の岩盤が軟らかいため嵩上げ部側が下方へ沈み込み、上流端が引っ張られるためと考えられる。また、上流端においては「嵩上げ公式」により算出した応力よりFEM解析の方が引張側になっていることから、下流側の岩盤が軟らかい場合には必要に応じて下流面勾配を緩くするなどして対策を検討することが望まれる。なお、堤体の下流側岩盤が軟らかい場合には上流端に引張応力が発生するのは、嵩上げダムだけでなく新設ダムにおいても同様である。

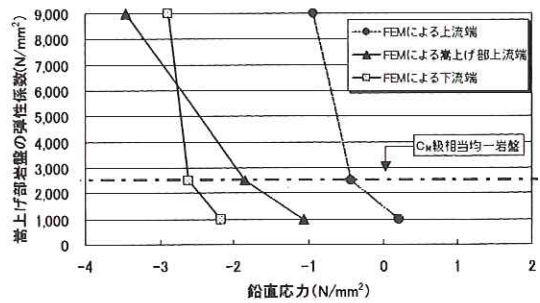


図-16 ダム堤敷上下流端での嵩上げ部岩盤の弾性係数と鉛直応力

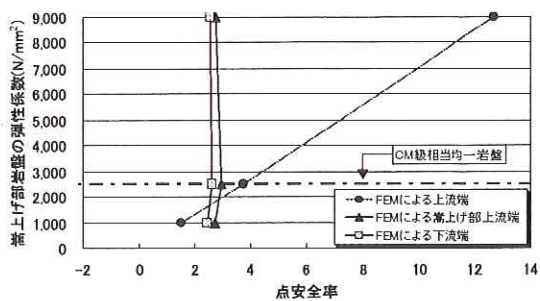


図-17 ダム堤敷上下流端での嵩上げ部岩盤の弾性係数と点安全率

図-13より、嵩上げ部岩盤の弾性係数が小さい場合には、上流端で急激に点安全率が小さくなり、上流端で最小値をとることが分かる。嵩上げ部の岩盤性状が劣る場合には、応力解析等を行い上流端での局所的なせん断安全性を把握することが必要であると考えられる。

c) 嵩上げ部岩盤が硬い場合

図-14および図-15は、表-10に示す嵩上げ部岩盤が硬いケースについて、上流端からの距離と堤敷での鉛直応力および点安全率の関係を示したものである。なお、図-14には梁理論に基づく「嵩上げ公式」により算出した応力も併記する。図-14より、嵩上げ部岩盤の弾性係数が大きい場合には、上流端の鉛直応力は圧縮側へ移行することが分かる。

図-15より、嵩上げ部岩盤の弾性係数が大きい場合には、上流端では点安全率は急激に上昇し、逆に旧堤体下流端から嵩上げ部では若干の低下がみられることが分かる。

d) 嵩上げ部岩盤の弾性係数の影響の総括

図-16および図-17は、旧堤体部岩盤が C_M 級相当であった場合の、嵩上げ部岩盤の弾性係数と鉛直応力および点安全率の関係で、上流端、嵩上げ部上流端および下流端について示したものである。図-16より、嵩上げ部岩盤に弾性係数の小さい岩盤が存在すると、鉛直応力は引張側に移行し、逆に弾性係数大きいと圧縮側に移行することが分かる。

図-17より、嵩上げ部岩盤の弾性係数変化しても嵩上げ部上流端および下流端においては、点安全率は大きな変化を示さないことが分かる。しかし、上流端の点安全率は、嵩上げ部岩盤の弾性係数により大きな影響を受け、弾性係数が小さいと点安全率は小さくなり、弾性係数が大きくなると点安全率は大きくなる。

5. 結論

既設ダムの嵩上げに関する堤体応力特性の検討結果より、以下のことが明らかになった。

- (1) 嵩上げダムと新設ダムを比較すると、鉛直応力については、嵩上げダムの方が上流端で引張側の値となる傾向にある。点安全率については、嵩上げダムの方が上流端、嵩上げ部上流端付近において値が小さくなる。
- (2) 施工時水位が高くなると、上流端、下流端における鉛直応力は引張側に移行する。施工時水位上昇に対する鉛直応力の変化率は施工時水位が高いほど大きい。
- (3) 嵩上げの規模によらず、点安全率は下流端で最低値をとり、嵩上げ率の上昇とともに下流端および上流端の点安全率が低下する。
- (4) 嵩上げ部岩盤の弾性係数が旧堤体部より小さい場合は、上流端に大きな引張応力が発生する可能性が大きい。

今後、上述した嵩上げダムの応力的な特徴に着目し、合理的な嵩上げダムの設計手法を構築していく予定である。

参考文献

- 1) 水野光章, 安田成夫: コンクリートダムの嵩上げに関する研究, 土木研究所資料, 第1663号, 1981.2.
- 2) 垣谷正道: 嵩上げ堰堤の安定計算について, 日本発送電工, 第1202号, 1946.
- 3) 斉藤孝三, 片平博: ダム基礎岩盤の原位置試験に関する諸検討と考察, 土木研究所資料, 第1899号, 1983.1.

佐々木 隆*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物主任研究員
Takashi SASAKI

金縄健一**



同 水工研究グループダム構造物研究員
Kenichi KANENAWA

山口嘉一***



同 水工研究グループダム構造物上席研究員, 工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI