

アースダムの最適補強戦略の策定方法の開発

九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門

古 川 愛 子

アースダムの最適補強戦略の策定方法の開発

九州大学大学院 古川愛子、大塚久哲、綿島敬太

1. 序論

我が国のダムの耐震設計は震度法、耐震照査は修正震度法に基づいており、レベル2地震動を考慮したものではない。土質材料を盛りたてて施工されるアースダムは、老朽化したダムが多く、近年の新潟県中越地震・新潟県中越沖地震では亀裂が生じるなどの被害が報告されている。来る大地震での惨事を避けるためには、限られた時間と予算の中で効率的に耐震補強を進める必要があり、補強の必要性と優先順位を決定する手法の開発は極めて重要である。本研究では、階層型意思決定手法（AHP法）を援用して、様々な寸法、剛性、強度を有するアースダムの耐震評価点数を簡易に決定する方法の開発を行なう。耐震評価点数は、最適な補強優先順位の決定に活用できる。

2. 内容

2.1 AHP法によるアースダムの耐震評価点数の算出

AHP法とは、階層型意思決定手法（Analytic Hierarchy Process）の略称である。いくつかの代替案の中から1つを決定するとき、人間は判断の過程で、様々な評価項目に基づいて各代替案を吟味し、代替案に優先順位を付け、総合的に最も好ましいものを選択している。AHP法は、数量化が困難な主観的価値基準や選択候補の優先度を数値化することで、客観的、合理的に意思決定を行うための手法である。本研究では、AHP法によって様々なアースダムの耐震評価点数を求める方法を開発した。アースダムの被災形態として円弧すべりを想定し、すべり量の大きいアースダムの耐震評価点数が高くなるように点数付けをした。以下に、耐震評価点数の決定の手順を示す。

- ① n 個のアースダムを評価の対象とする。それぞれのアースダムを AHP 法の代替案とする。
- ② AHP 法における評価項目 i を設定する。本研究では、堤体の勾配（寸法）、ダム高（寸法）、N 値（剛性）、粘着力（強度）、内部摩擦角（強度）の 5 つ（ $i=1\sim 5$ ）を設定する。
- ③ 評価項目 i 毎に評価基準 j を設定する。勾配の評価基準は 1:2、1:2.5、1:3 の 3 通り（ $j=1\sim 3$ ）、ダム高の評価基準は 20、30、40、50、60m の 5 通り（ $j=1\sim 5$ ）、N 値の評価基準は 15、10、7 の 3 通り（ $j=1\sim 3$ ）、粘着力の評価基準は 0、2.5、5、7.5、10 kN/m² の 5 通り（ $j=1\sim 5$ ）、内部摩擦角の評価基準は 35、37.5、40、42.5、45° の 5 通り（ $j=1\sim 5$ ）とした。
- ④ 各評価項目 i のウェイト（重要度） \hat{w}_i を算出する。具体的な手順は次の通りである。まず、評価項目ごとに仮のウェイト w_i を設定する。本研究では、後述のように数値解析で求めたすべり量から仮のウェイト w_i を設定した。次に、評価項目を互いに一対比較し、ウェイトの比をとる。各評価項目のウェイト（重要度） \hat{w}_i は、幾何平均法を用いて式(1)により求まる。

$$\hat{w}_i = \sqrt[n]{a_{i1}a_{i2} \cdots a_{i5}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{a_{i1}a_{i2} \cdots a_{i5}} \quad (1)$$

ここに、評価項目 i と k の仮のウェイト w_i 、 w_k の比を a_{ik} （ $a_{ik} = w_i/w_k$ ）とする。既往の研究を参考に、 a_{ik} を 1/9～9 の範囲で設定した。 a_{ik} が 1/9 より小さいときは 1/9、9 より大きいときは 9 と置いた。

- ⑤ それぞれの評価項目 i について、各評価基準 j のウェイト \hat{v}_{ij} を算出する。④と同様に、すべり量から仮のウェイト v_{ij} を設定し、一対比較によりウェイト \hat{v}_{ij} を決定する。
- ⑥ 各アースダムの耐震評価点数を、100 点満点として $100 \sum \hat{w}_i \hat{v}_{ij}$ により求める。

AHP法を用いる場合、仮のウェイト w_i 、 v_{ij} の設定が重要となる。本研究では、すべり量のばらつきの範囲が大きい評価項目ほど耐震性能を支配する重要な変数であると考え、 n 個のアースダムの中から評価項目 i の値のみ異なるものを抽出し、（最大すべり量—最小すべり量）/（すべり量の平均値）を評価項目 i の仮のウェイト w_i と置いた。評価基準の仮のウェイトも同様にして設定した。

2.2 解析概要

解析モデルは、図 1 に示すような上流側と下流側の堤体の勾配が等しく、堤体の中央に幅 6m の遮水層があり、堤体の上流側にダム高の 1/2 の高さまでの貯水があるモデルとした。有限要素法に基づく地震応答解析により堤体の応答加速度を求め、応答加速度を入力としたすべり変形解析によりすべり量を算定した。有限要素解析において、底面の境界条件は固定とした。

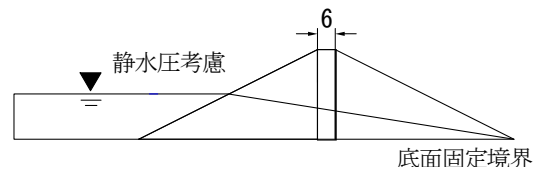


図 1 解析モデル

表 1 地盤定数

	N 値	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	減衰定数
遮水層	4	37	11	0.45	20.6	0.10
堤体	変動	変動	変動	0.45	22.1	0.05

表 2 評価項目 (堤体の地盤定数)

項目	a	b	c	d	e
勾配	勾配 1:2	勾配 1:2.5	勾配 1:3		
ダム高	20m	30m	40m	50m	60m
N 値	15	10	7		
粘着力 (kN/m ²)	0	2.5	5	7.5	10
内部摩擦角 (°)	35	37.5	40	42.5	45

解析に用いた遮水層の地盤定数と、堤体のポアソン比、単位体積重量、減衰定数を表 1 に示す。表 2 に黄色で示す堤体の勾配 1:2、ダム高 20m、N 値 15、粘着力 0 kN/m²、内部摩擦角 40° のモデルを基準モデルとし、評価項目 (勾配、ダム高、N 値、粘着力、内部摩擦角) が表 2 のように様々に異なる全 405 モデルの解析を行った。評価項目のうち、地震応答解析に用いるのは勾配、ダム高、N 値である。また、粘着力と内部摩擦角はすべり変形解析にのみ用いられる。

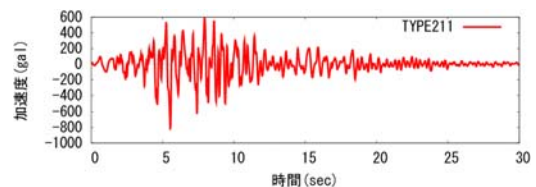


図 2 入力地震動

解析には、図 2 に示す TYPE II-I-1 のレベル 2 地震動を用いた。

2.3 各評価項目がすべり量に与える影響

各評価項目がすべり量に与える影響を検討するため、基準モデルのダム高、N 値、粘着力、内部摩擦角のそれぞれを変化させたときの勾配とすべり量の関係を図 3 に示す。

図 3 のいずれのグラフにおいても、勾配の差によるすべり量の差は大きく、勾配はすべり量を支配する重要な評価項目であることがわかる。また、図 3(a) より、ダム高が大きくなればすべり量が大きく低減しており、ダム高もすべり量を支配する重要な評価項目であることがわかる。ダム高が大きいと固有周期が長くなり、加速度が増幅しにくくなるため、すべり量が小さくなるものと考えられる。ダム高が 20m のときの勾配 1:2 と 1:3 のすべり量の差と、勾配が 1:2 のときのダム高 20m と 60m のすべり量の差を比較すると、後者の方が大きく、ダム高の方が勾配よりもすべり量に与える影響が大きい結果となった。図 3(b) より、N 値の違いによるすべり量の差は非常に小さいが、この理由は、本研究で設定した N 値の範囲では地震応答解析結果にほとんど差が生じず、かつ N 値はすべり変形解析の入力変数ではないためである。図 3(c)(d) より、すべり量は粘着力と内部摩擦角によって変化し、特に内部摩擦角による差が大きいので、内部摩擦角も支配的な評価項目であることがわかる。異なるダム高、粘着力、内部摩擦角間のすべり量の差は、勾配が急なほど大きくなっており、すべり量に及ぼす各評価項目の影響には相関があることが見てとれる。

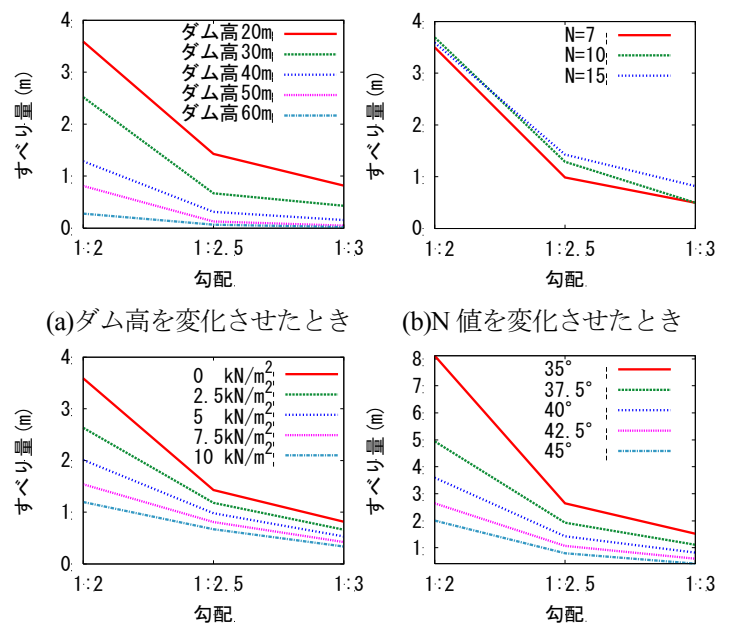


図 3 基準モデルのダム高、N 値、粘着力、内部摩擦角を様々に変化させたときの勾配とすべり量の関係

異なるダム高、粘着力、内部摩擦角間のすべり量の差は、勾配が急なほど大きくなっており、すべり量に及ぼす各評価項目の影響には相関があることが見てとれる。

2.4 AHP 法によるウェイトの算出と耐震評価基準の設定

2.1 で述べた手順により、各評価項目と各評価基準のウェイトを算出した。各評価項目のウェイトを表 3 に示す。図 3 から各要因の重要度を定量的に比較することが難しいが、AHP 法によって数値として比較することが可能となり、表 3 よりダム高、内部摩擦角、勾配、粘着力、N 値の順に重要度が高いことがわかった。表

表 3 各評価項目のウェイト

評価項目	ウェイト
勾配	0.238
ダム高	0.305
N値	0.027
粘着力	0.192
内部摩擦角	0.239

4 に各評価基準のウェイトを評価項目毎に示す。表 3、4 のウェイトより、解析を行った 405 のモデルの耐震評価点数（以下、評価点数）を算出し、図 3 にすべり量と評価点数の関係を示す。すべり量の大きいモデルの評価点数が高くなっているが、ばらついている。AHP 法では各評価項目の影響の相関性を考慮できないためである。

表 4 評価項目毎の各評価基準のウェイト

勾配	ウェイト	ダム高 (m)	ウェイト	N値	ウェイト	粘着力 (kN/mm ²)	ウェイト	内部摩擦角 (°)	ウェイト
2.0	0.709	20	0.467	15	0.412	0	0.328	35	0.423
2.5	0.195	30	0.257	10	0.327	2.5	0.242	37.5	0.249
3.0	0.096	40	0.145	7	0.261	5	0.184	40	0.161
		50	0.098			7.5	0.139	42.5	0.101
		60	0.033			10	0.106	45	0.065

表 5 評価点数のゾーン分け

最大加速度	100gal	200gal	300gal	400gal	500gal
基準点数	44点	41点	40点	39点	38点
崩壊ゾーン	49点以上	46点以上	45点以上	44点以上	43点以上
危険ゾーン	39点～49点	36点～46点	35点～45点	34点～44点	33点～43点
安全ゾーン	39点以下	36点以下	35点以下	34点以下	33点以下

次に、評価点数から耐震補強の必要性を判断するための基準点を

設定する。土木研究所資料「大規模地震に対するダムの耐震性能照査指針（案）・同解説」に「沈下量が 1m 以下のときに耐震性能が満足されるとしてよい」とあるので、すべり量 1m を基準とすることにした。しかし、図 3 において、すべり量が 1m となるダムの評価点数は 25 点～35 点の範囲でばらついていることから、評価点数を崩壊、危険、安全の 3 つのゾーンに分類した。崩壊ゾーンは、全てのダムが 1m 以上すべる評価点数、安全ゾーンは全てのダムのすべり量が 1m 以下の評価点数、危険ゾーンはその間とした。基準点数は誤判定率が最小となる値とした。さらに、建設地点において想定される最大加速度を考慮した耐震評価を行なうため、100gal～800gal の範囲の最大加速度毎に、TYPE II-II-1 を振幅調整して基準点及び各ゾーンの評価点数の範囲を算定した（表 5）。

本研究で提案する耐震評価のフローチャートを図 4 に示す。まず、内部摩擦角が 35°以下のダムは、1m 以上のすべり量が発生する可能性が高いと考えられるため（図 3(d)）、詳細な検討が必要と考える。内部摩擦角が 35°以上のダムを対象に AHP 法により耐震評価点数を決定する。レベル 2 地震動に対して安全ゾーンに属するダムは補強の候補から外す。崩壊、危険ゾーンに属するダムに対しては、建設地点において想定される最大加速度を算出し、再評価を行い、崩壊、危険ゾーンに属するダムに対して詳細な検討を行うこととする。安全ゾーンに属するダムの詳細検討を省略し、評価点数の高い順から検討を行うことで、耐震照査の効率化が図れる。

崩壊ゾーン 危険ゾーン 安全ゾーン

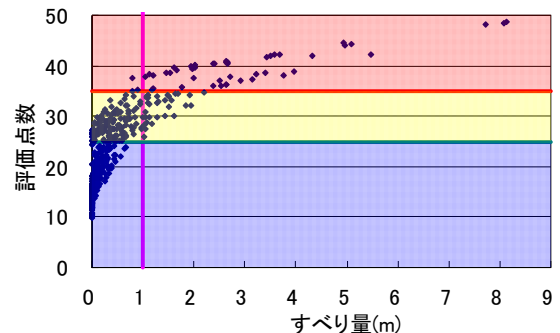


図 3 すべり量と評価点数の関係

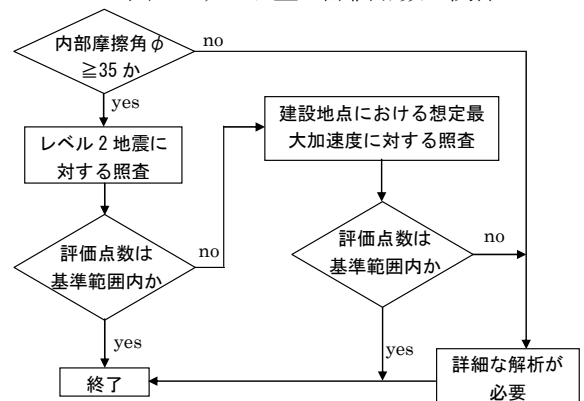


図 4 耐震評価のフローチャート

表6 解析諸元

ケース	勾配	ダム高 (m)	N値	内部摩擦角(°)	粘着力 (kN/mm ²)	再現期間100年の加速度(gal)
1	2.5	21	20	43	0	32
2	2.5	37	19	39	0	118
3	2.5	32	20	45	0	128
4	2.2	32	19	44	0	230
5	2.0	16	20	45	0	177
6	2.3	22	20	45	0	174
7	2.3	22	18.5	42	0	165
8	2.5	32	18	40	0	191

表7 すべり量及び評価点数

ケース	評価点数	TYPE211のすべり量(m)
1	28.1	0.89
2	22.4	0.65
3	21.0	0.43
4	28.6	0.76
5	42.8	1.27
6	31.7	0.92
7	32.7	0.80
8	23.2	0.86

表8 再現期間100年の

最大加速度に対するすべり量及び評価点数

ケース	評価点数	再現期間100年のすべり量(m)
1	28.1	0.00E+00
4	28.6	5.49E-05
5	42.8	0.00E+00
6	31.7	0.00E+00
7	32.7	0.00E+00

2.5 耐震評価手法の妥当性検証

図3、4に示すウェイトと、表5に示す基準点数の妥当性を確認するため、実在する農業用アースダムを単純化した8通りの解析モデルに対して、すべり量、評価点数を算出した。モデルの諸元を表6に示す。設計図書には内部摩擦角が記載されていないため、修正震度法を満たす値を設定した。各モデルの評価基準のウェイトは、表4に示すウェイトを線形補完して求めた。

TYPE II-I-1 に対するすべり量及び評価点数を表7に、すべり量と評価点数の関係を図5に示した。ダム高が非常に小さく勾配が急なケース5のモデルですべり量は最大となった。また同様に評価点数もケース5が最大となった。図5から、崩壊ゾーンに分類されたケース5は1m以上、危険ゾーンに分類されたケースは1m前後、安全ゾーンに分類されたケースは1m未満のすべり量となり、評価点数及び基準点数の妥当性が確認できた。

次に、TYPE II-I-1 に対して崩壊ゾーンに分類されたケース5と、危険ゾーンに分類されたケース1、4、6、7について、建設地点における想定最大加速度に対する再評価を行った。本研究では一例として、地震危険度解析によって求めた再現期間100年の最大加速度を用いた。各モデルの建設地点の最大加速度を表6に示す。TYPE II-I-1の最大加速度が表6の値となるように振幅調整した地震動に対して、すべり量を算出した。評価点数とすべり量を表8に示す。ケース1は100gal以下であるため表5の100galの基準点数を用いて、同様に、ケース4では300gal、ケース5、6、7では200galの基準点数を用いて耐震評価を行ったところ、ケース5以外はすべて安全ゾーン、ケース5は危険ゾーンという判定結果になった。危険ゾーンとなったケース5について詳細な解析を実施したところ、再現期間100年の最大加速度を持つ地震動に対してすべり量は0mとなり(表8)、耐震性能が確保できることがわかった。また、安全ゾーンと判定されたケース4~7に対しても再現期間100年間の最大加速度を持つ地震動に対するすべり量を算出したところ、表8のように全て1m以下となり、耐震性能を満足することがわかった。

以上のように、本研究で提案した手法によって、危険ゾーンに分類されたアースダムはすべり量が1mを超過しており、また安全ゾーンに分類されたアースダムのすべり量は1mを超過しておらず、手法の妥当性が検証できた。

3. 結論

本研究では、様々な寸法、剛性、強度を有するアースダムの地震応答解析とすべり変形解析により、耐震性及び各要因の影響を明らかにするとともに、階層型意思決定手法(AHP法)を採用してアースダムの耐震評価点数を簡易かつ定量的に決定する方法の開発を行なった。また、耐震評価点数を崩壊、危険、安全の3つのゾーンに分類し、耐震評価点数からどのゾーンに属するかを判定するため基準点数を設定した。地震動は、レベル2地震動だけでなく、建設地点における想定地震動にも対応するため、様々な最大加速度に対して基準点数を設定した。実在する8つのアースダムを単純化したモデルを用いて、提案手法の妥当性を示すことができた。

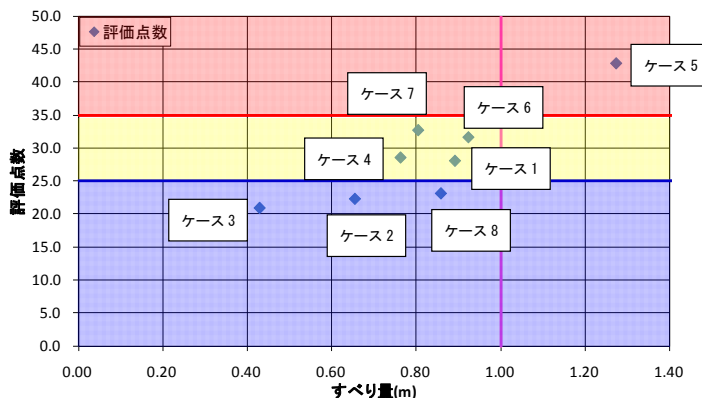


図5 すべり量と評価点数の関係