

# 水力発電土木施設のリスクアセスメント

## RISK ASSESSMENT OF CONCRETE STRUCTURES FOR HYDROELECTRIC POWER PLANTS

松田貞則\*

Sadanori MATSUDA

There are various risks in the life cycle of concrete structures used in hydroelectric power plants. Recently, the business environment of the electricity sector has become highly competitive due to opening access to the market. Therefore, in appraising risk electric enterprises, need to select plans with a high cost-benefit ratio.

This paper examines the risk assessment technique in a case study concerning a concrete structure damaged by unexpected external force (a landslide). Appraising the risk for 36 years from the present, an economic plan was selected on the basis of the life cycle cost, which includes the cost of risk.

**Key Words :** risk assessment, landslide fragility curve, performance function, Monte Carlo simulation, risk cost, life cycle cost, risk management

### 1. はじめに<sup>1)</sup>

電気事業においては、図-1に示すリスクの体系が考えられる。水力発電施設は、長期間の供用を前提に築造されるため、施設のライフサイクルが長く、地形・地質的な影響を受けやすい河川際に立地することも多い。このため、供用期間中にリスクが顕在化する可能性が比較的高い。従来はリスクが顕在化しても総括原価制度の中でコスト回収が可能な部分もあり、リスクは吸収できたが、電力自由化の進展により、発電原価の縮減要求が強まる状況においては、経営に及ぼす影響が大きくなっている。このように事業環境が変化してくると、従前より行われている一般の供用状態における耐荷力の評価に留まらず、耐久性の低下や自然災害などによる損傷リスクを考慮した施設損傷に対する性能評価が要求されている。

しかしながら、損傷に対するリスクを評価するためには、性能関数の設定や損傷確率の算定、損失が発生した場合の事

業に及ぼす影響や社会的な影響、時間的な価値変動などの様々な不確定要因を考慮する必要がある。このため、その評価を施設管理の実務において導入した事例はほとんどない。

本稿は、施設管理の実務において合理的で経済的な水力発電施設の施設保全対策を検討する手段として、地すべり損傷リスクを考慮したライフサイクルコストの算出方法を提案する。また、ここでは算出したライフサイクルコストをもとに事業の財務面に及ぼす影響を評価し、その結果に基づき施設保全対策を選択した。

### 2. リスクコストを含むライフサイクルコストの評価手法<sup>2)</sup>

供用期間中に発生する可能性のある事象に起因する潜在的なコストをリスクコストとした場合、これを含むライフサイクルコストは、式(1)のように定義できる。リスクコスト $C_{risk}$ は、ハザード(ここでは地すべり損傷による耐荷力の低下)の年発生確率 $p_i(t)$ とハザードが発生した場合の損失コスト $C_i$ (ここでは再建設コストに相当する物理的損失に営業損失を加えた費用)との積であり、式(2)のように表される。

$$LCC_T = \frac{C_R + C_L}{(1+r)^0} + \sum_{t=1}^T \frac{C_M}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{risk}}{(1+r)^t} \quad (1)$$

$$C_{risk} = p_i(t) \times C_i \quad (2)$$

ここに、 $LCC_T$ ：評価年数Tのライフサイクルコスト

$C_R$ ：対策工事コスト

$C_L$ ：対策工事時の発電停止に伴う営業損失コスト

$C_M$ ：維持管理コスト

$C_{risk}$ ：リスクコスト(期待損失額)

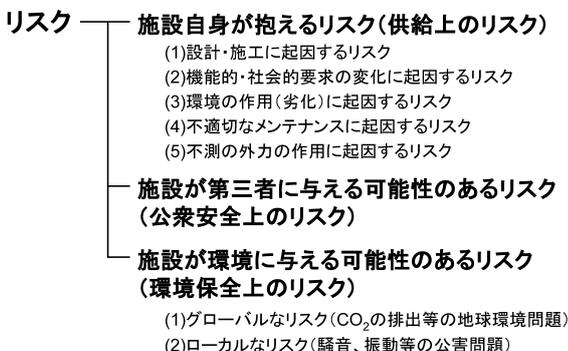


図-1 リスクの体系

\* 首都圏事業部 インフラマネジメント部

- $t$  : 基準年次からの供用年
- $T$  : 評価年数
- $r$  : 割引率 (ここでは4%)
- $p_i(t)$ : 損傷レベル*i*の年発生確率
- $C_i$  : 損傷レベル*i*の損失コスト
- $i$  : 損傷レベルを表す添え字

ここに示す損傷確率 $p_i(t)$ は、時間とともに増加する特性をもつ関数であるが、対策工事を実施した場合、その確率は小さくなり、潜在的なリスクコスト $C_{risk}$ は低減する。損傷が完全に防止または回避できる場合には低減された状態が保持されるが、補修程度で対策後も損傷が再び進行する可能性がある場合には、点検や監視の強化が必要になり、維持管理コスト $C_M$ は増加する。すなわち、維持管理に要するコストとリスクを保有することによるコストの最小和を求めることが、ライフサイクルコストを最小にする施設保全対策を決定することになる。

### 3. 地すべり損傷を受けた施設のリスクアセスメント<sup>3)</sup>

#### (1) 検討の背景

検討対象の取水施設 (以降“モデル施設”と称す)は、供用開始6年目より地すべりの影響を受けてひび割れなどの損傷が生じ、供用開始から21年経過した現在も年間約6mmの速度で変位が進行している。損傷原因と想定される地すべりは幅約500m、深さ約75mと大規模なため、地すべり防止対策を行うためには莫大な費用を投入する必要があり、事業に及ぼす財務上の影響が極めて大きい。一方で、耐用年数 (57年間)まで施設を延命化させて事業を継続するためには、リスクを保有しなくてはならない。施設管理活動の意思決定において合理的で経済的な施設保全対策を選択するためには、経年的に増大する地すべり損傷リスクの把握が要求される。

#### (2) 地すべり損傷リスクの定量評価

図-2に地すべり損傷リスクの定量評価のフローを示す。モデル施設は図-3に示すように、地すべりブロック内にある取水路と堰堤との接合部分においてせん断によるひび割れ損傷が集中しており、その損傷モードから、片持ちのはり構造のような状態で変形が進行していると想定した。なお、この構造モデルに作用する荷重は、後述する損傷度カーブの予測値と過去の計測値 (変位置)とが整合するように10tf/m/年と設定している。実構造物の場合、構造モデルを構成する部材の強度 $X_R$ と、地すべりの作用を受けて部材に発生する応力 $X_S$ にはばらつきがある。

図-4はばらつきをもった部材応力の進行と、ばらつきをもった部材強度の関係を模式的に示したものである。部材応力は地すべり滑動とともに大きくなり、ある時点から

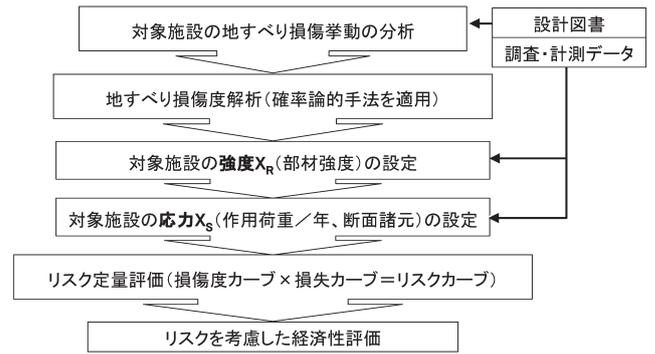


図-2 地すべり損傷リスクの定量評価のフロー

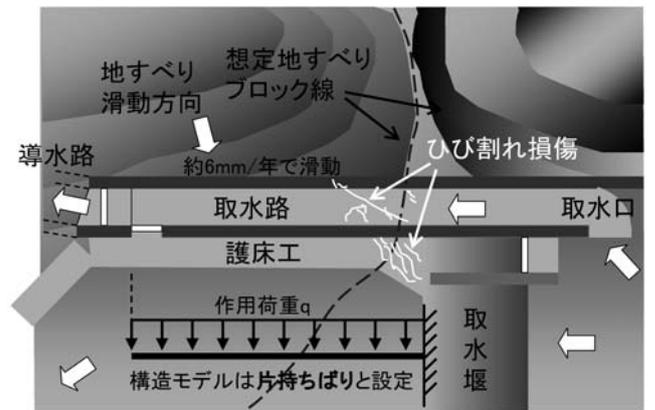


図-3 モデル施設の地すべり損傷挙動

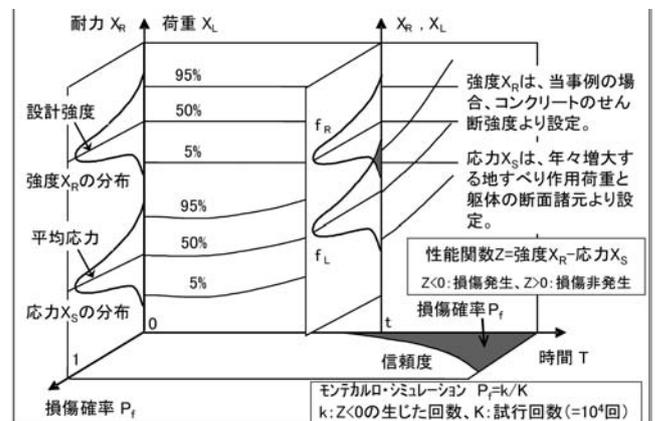


図-4 ばらつきを考慮した地すべり損傷確率の算定概念

部材応力の分布は、部材強度の分布と重なるようになる。このことは、損傷がある確率で存在することを示している。ここでは、これらのばらつきが対数正規分布 (変動係数0.5)になると想定し、2つの分布の重なり具合、すなわち、地すべり損傷度を評価するための性能関数 $Z$ を式 (3)のように設定した。また、変動係数は基礎岩盤の出現状況により底版コンクリートの厚さが場所によって異なることなどを考慮して設定している。

$$Z = X_R - X_S \tag{3}$$

ここに、 $Z$ : 性能関数

$X_R$ ：部材強度の確率変数

$X_S$ ：部材に発生する応力の確率変数

そして、 $Z < 0$ ならば損傷発生、 $Z > 0$ ならば損傷非発生とする。これをモンテカルロシミュレーションによって解析し、経過年数と地すべり損傷確率との関係を示す損傷度カーブ（フラジリティカーブ）を求めた。損傷度カーブは、モデル施設の地すべりに対する脆弱性の経年変化を表すものである。また、地すべり損傷リスクは式（2）に示すように、地すべり損傷の発生確率と損失コストとの積で表され、ある大きさの荷重が作用したときのモデル施設の潜在的な損失期待値の大きさを示すものである。なお、ここではモデル施設の損失の大きさを資産のもつ価値に対する百分率で表している（表-1）。

表-1 地すべり損傷確率と管理水準との対応

損傷レベル	リスクレベル	リスク対策レベル	損傷確率 P	損失の大きさ C	リスクの大きさ R (=P × C)
破局期	施設が損壊する可能性大	至急改善	75%以上	75%以上	56%以上
加速期	過度に変形する可能性大	改善優先	50~75%	50~75%	25~56%
進展期	段差・剥離する可能性大	改善検討	15~50%	15~50%	2~25%
発見期	ひび割れ発生（経過監視）	注意行動	5~15%	5~15%	0.3~2%
潜伏期	許容可能	通常行動	5%以下	5%以下	0.3%以下

(3) 地すべり損傷確率に基づく管理水準の設定

リスク対策の将来のシナリオを描くためには、モデル施設の地すべり損傷レベルやリスク対策レベルを定量化する必要がある。地すべり損傷確率で管理水準を定量化する場合、対象施設の供給上の重要度や公衆安全性を踏まえて、事業者の施設管理思想に基づき設定することになる。ここでは、モデル施設の損傷を受容することを前提とした場合の管理水準指標として、表-1に示す各レベルに対して、それに見合う地すべり損傷確率、損失やリスクの大きさを考案した。また、モデル施設の損傷レベルが加速期以上（地すべり損傷確率50%）になると、要求機能を満たさなくなると設定した。

(4) 定量化した地すべり損傷リスクの経年変化

図-5は、モデル施設のリスク対策の比較検討案として抽出した方策である。このうち、「地すべり防止工」と「新規ルート工」は、対策することで地すべりによる損傷が完全に防止または回避できるものと考え、対策後のリスクはゼロになるとした。

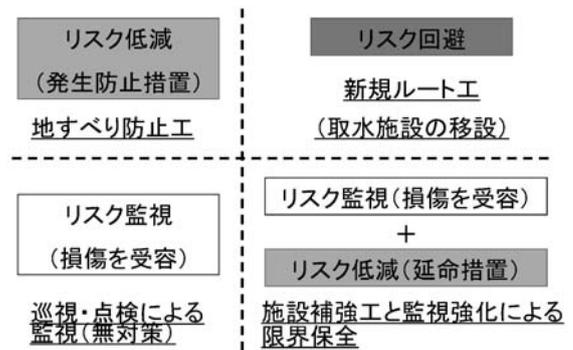


図-5 モデル施設のリスク対策の比較案

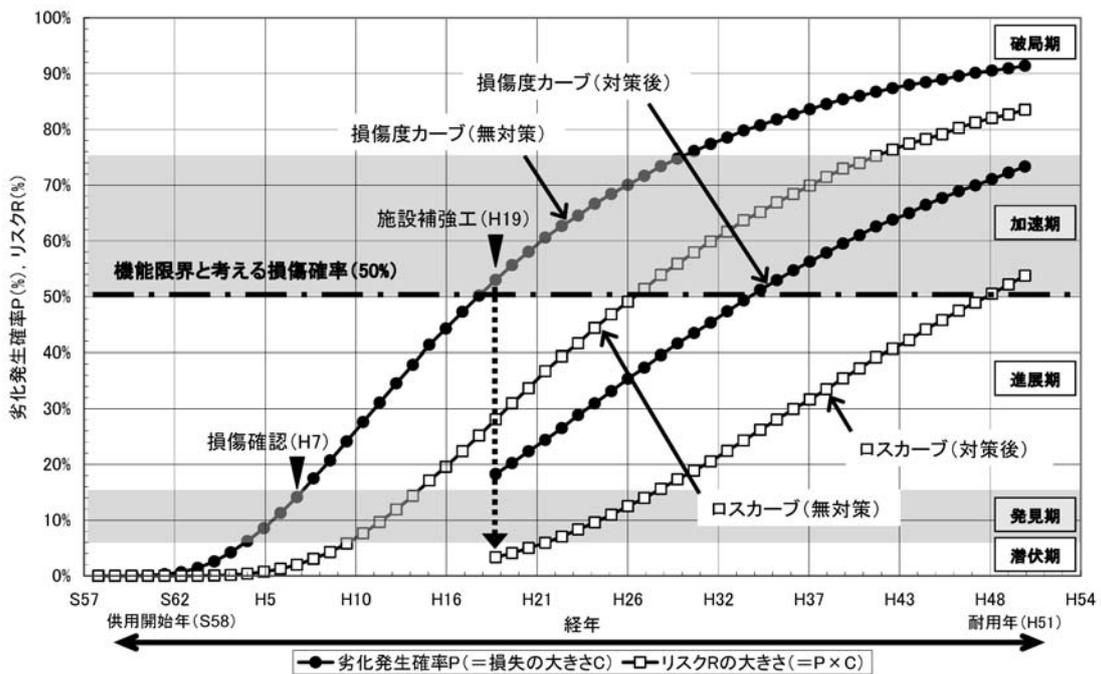


図-6 無対策と施設補強工のリスク評価

他方で、現状のまま無対策でリスクを監視するケースと、施設補強工と監視の強化を併用するケースについては、今後もリスクを保有することになる。ここでは、この2つのケースを対象に経年的に変化する地すべり損傷リスクの定量化を行った。図-6は、モデル施設の供用開始年から耐用年数である57年後までを評価対象期間として、再現・予測した損傷度カーブならびにロスカーブである。「無対策」のケースは、実際の損傷発見時期と整合するように損傷度カーブを求め、「施設補強工」のケースは、地すべり損傷確率が機能限界水準に達した時点で補強を実施するシナリオで予測したものである。

#### 4. リスクコストを含むライフサイクルコストの算定

ライフサイクルコストは、図-5に示す4つのリスク対策における対策工事コスト $C_R$ やその時の発電停止に伴う営業損失コスト $C_L$ 、維持管理コスト $C_M$ 、対策によって変化するリスクコスト $C_{risk}$ を式(1)、(2)に基づき算出した。評価対象期間は平成15年を基準年次として、減価償却が満了するまでの残存供用年数36年間とした。図-7は各年のコストの経年変化を示したもので、図-8は図-7の累積値として表したものである。ライフサイクルコストの構成コストは、表-2の値を用いた。また、モデル施設の損失コスト $C_i$ は、全損(損失率100%)の場合で1,850百万円(再建設コストに相当する物理的損失830百万円に営業損失1,020百万

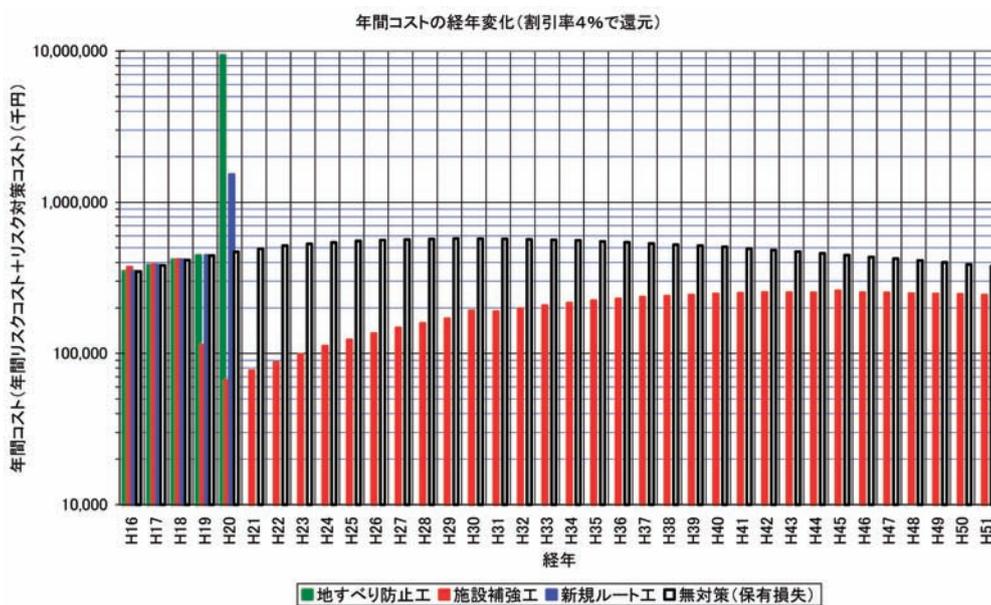


図-7 年費用 (年間リスクコスト+リスク対策コスト)

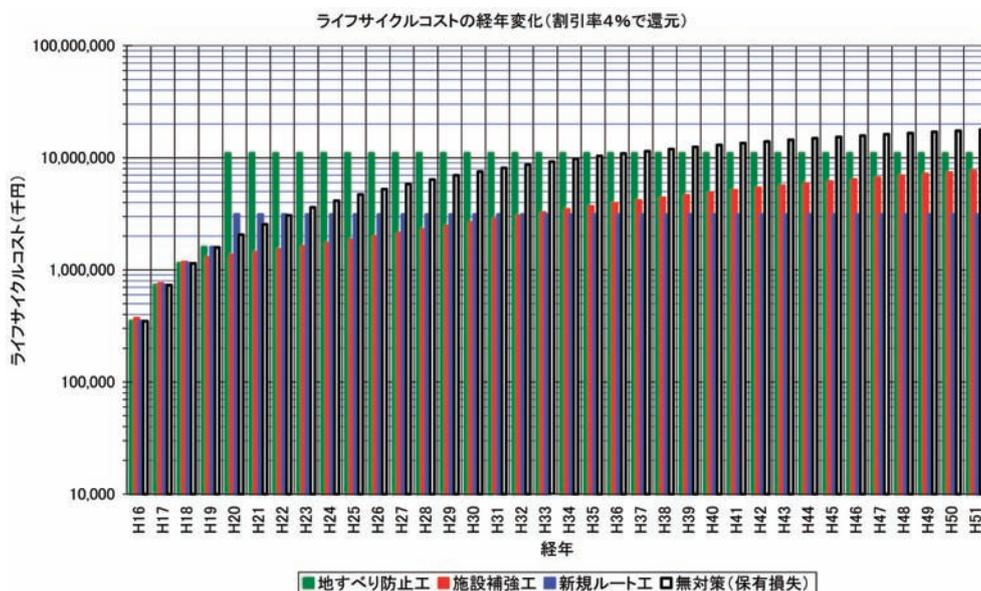


図-8 リスクコストを含むライフサイクルコスト

円を加えた費用)と設定する。損失コストについては、単に再建設に要するコストやその時の営業損失コストといった事業上の損失だけでなく、当該施設の時間的な価値変動や第三者損失なども考慮したものとするべきであるが、本事例では現実的な値の算出が困難であるため、ここでは算出対象から除外している。

### 5. リスク対策の便益

リスク対策の便益は、現状の施設管理活動のままで特別な対策を講じず、すべてのリスクを長期間にわたって保有する場合(無対策)と、リスク低減やリスク回避を行って保有するリスクを変化させた場合とのリスクコストの差がこれに相当するものと考えた。図-9および表-3にその結果を示す。

表-2 リスク対策ごとの構成コスト

コスト項目	ケース	地すべり防止工	施設補強工+監視強化	新規ルート工	備考
対策工事コスト	工事費(千円)	11,400,000	20,000	1,770,000	地すべり・新規ルート:平成20年に完成 施設補強:平成19年に完成
	営業損失費(千円)	0	46,580	83,840	施設補強:50日発電停止 新規ルート:90日発電停止
維持管理コスト	観測機器費(千円)	0	20,000	0	常時観測機器の新規導入費
	解析費(千円)	2,000	5,000	2,000	地すべり・新規ルート:完成年まで既存機器で毎年観測 施設補強:残存期間中は毎年観測

### 6. リスク対策の経済性評価

#### (1) 費用対効果分析

リスク対策は事業戦略上の投資として実施されるため、リスク対策に係わる費用と、それにより発生する便益(リスクコストの低減効果)を相対的に評価し、経済的な観点からその対策の正当性を評価する必要がある。ここでは、費用対効果分析に用いられる一般的な指標のうち、①費用便益比(B/D, Cost Benefit Ratio: CBR)および②純現在価値(B-C, Net Present Value: NPV)を用いて評価を行った。表-3にその結果を示す。

#### (2) 財務インパクト評価

リスク対策は一定の予算制約下で行われるため、財務諸表に及ぼす影響をあわせて評価しておく必要がある。財務インパクトは、図-7に示す年費用発生時とPML発生時の収

表-3 費用対効果分析の結果

ケース	残存供用年数36年間の総便益・総費用とその評価			
	低減するリスクコスト(総便益)	ライフサイクルコスト(総費用)		費用便益比(純現在価値)
		リスクコスト(間接損失)	リスク対策費(直接費用)	
無対策	-	177.7億円	-	- (-177.7億円)
地すべり防止工	161.8億円	15.9億円	93.8億円	1.48 (52.1億円)
施設補強工	103.1億円	74.6億円	1.9億円	1.35 (26.6億円)
新規ルート工	161.8億円	15.9億円	15.3億円	5.19 (130.6億円)

ライフサイクル地すべりコストの経年変化(割引率4%で還元)

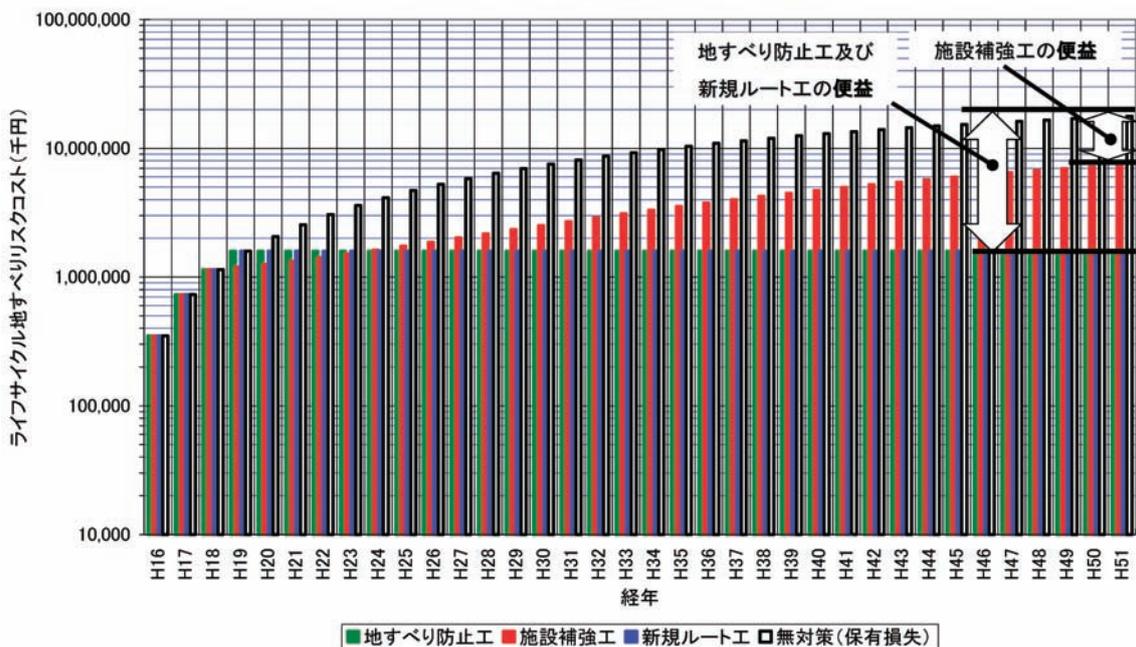


図-9 総便益(低減するリスクコスト)

益あるいは取り崩し資産の減少量をもとに評価を行った。

PML (Probable Maximum Loss)とは、ある一定の条件下で想定した予想最大損失率(予想最大損失/再建設コスト)を表すものである。図-6に示すように、モデル施設が今後36年間に被る可能性のある地すべりによる損失の大きさは、おおむね100%(全損)に近く、損傷リスクは非常に高い。一般にPMLは施設のみ被害率を表し、営業中断による営業損失や第三者に対する保障費などの二次的な被害は含まれていないが、モデル施設は水力発電の要である発電用水を取水するための施設である。ここでは、BI (Business Interruption: 営業中断期間)を3年間と想定し、その間の営業損失を含めて1,850百万円とした。また、評価指標には、表-4に示す、①当該発電所の収益の減少量、②当該事業全体でみた場合の収益の減少量、③供給上の施設重要度あるいは公衆安全上の影響度の大きさに配慮して資産を取り崩して財務手当した場合の内部留保資金の減少量、の3つを設定した。

表-5は残存供用期間中(36年間)において発生する各年の費用を示したものである。このうち、「新規ルート工」のケースは、リスク対策に要するコストとリスクを保有することによるコストの最小和の観点から、費用対効果分析において正当な投資と評価されたが、リスク回避のために要する対策コストが14.5億円となり、当該事業においては内部留保資金の取り崩しが必要となる。採算性・収益性を重視した施設管理を行うためには、年度の収益を目安に投資計画を策定することが要求される。本事例の場合、経営に及ぼす影響が懸念された。ここでは、保有すべきリスク

表-4 財務インパクト評価の指標

年間投入費用の限度額			
保全の観点	発電所単位の収益管理に基づく保全	事業全体の収益管理に基づく保全	施設重要度に基づく重点保全
評価指標	発電所の年間利益	事業全体の年間利益	内部留保資金(手元流動性残高)
限度額	1億円/年	12億円/年	70億円 (=内部留保資金 -年間事業費×0.3)

※内部留保資金=流動資産-流動負債-引当金-貯蔵品  
年間事業費の30%は、公益事業を適切かつ継続的に行うために最低限必要な内部留保資金とした。

表-5 残存供用期間中に発生する年費用

ケース	残存供用年数36年間で発生する年費用	
	年リスクコスト (B/S上に表れない負債= オフ・バランス負債)	年リスク対策コスト (資本的支出または修繕費と して取り扱う)
無対策	1.2億円	-
地すべり防止工	0.9億円	93.8億円 (工事費)
施設補強工	0.8億円	0.2億円 (補強費)
新規ルート工	0.9億円	14.5億円 (工事費)

は大きくなるが、直接的な支出は小さく、常時観測による安全管理を徹底することで施設の状態を監視しながら運用していく「施設補強工」のケースが、合理的で経済的な施設保全対策であると判断した。

7. おわりに

本稿は、地すべり損傷リスクを考慮したライフサイクルコストの算出にあたり、地すべり損傷挙動に基づき構造モデル(片持ちばり)を設定し、ばらつきをもった部材応力と、ばらつきをもった部材強度から地すべり損傷確率の経年変化を算定した。損失コストは再建設コストをもとに設定し、これに地すべり損傷確率を乗じて地すべり損傷リスクを定量評価した。また、施設管理活動の意思決定における施設保全対策の選択にあたり、費用対効果分析と財務インパクト評価を行った結果、ここでは、施設補強工と監視強化による限界保全が最も有効な対策であると結論づけられた。

本稿に示す提案は、図-10に示すリスクマネジメント活動を恒常的に行い、その実効性を高めていくためのサイクルであるI-PDCAのIとPに該当する。したがって今後、図-10のD-C-Aを実践しながら、次の点に留意して検証・評価を行っていく予定である。

- ① 地すべりによる施設損傷の予測精度の検証
- ② 経年の施設損傷に伴い生じる損失の評価方法の見直し
- ③ リスクの特性を考慮した意思決定するための評価指標の見直し

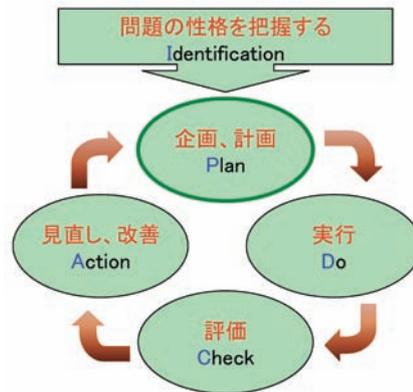


図-10 リスクマネジメントのサイクル

参考文献

- 1) 松田貞則：水力発電土木設備のライフサイクルマネジメントに関する一考察、土木学会第59回年次学術講演会、Vol.59/VI-352、pp.701-702、2004
- 2) 星谷勝、中村孝明：構造物の地震リスクマネジメント、山海堂、2002
- 3) 岩間倫秀、新屋浩明、馬場貴志、藤原民章、松田貞則：大規模地すべりに関するライフサイクルコストの検討、第44回日本地すべり学会研究発表会、Vol.44、pp.229-232、2005