調整池のBuffer効果を考慮した 水力発電水路施設の復旧過程に関する研究

土居 賢彦¹・静間 俊郎²・中村 孝明³

¹正会員 東京電力株式会社 技術開発研究所 (〒235-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

E-mail: doi.masa@tepcoco.jp

²正会員 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1)

E-mail: shizuma@shinozokaken.co.jp

³正会員 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1)

E-mail: naka@shinozokaken.co.jp

水力発電所は、火力発電所の起動電源としての役割を担うため、水力発電所の機能維持は非常時の電力供給の面から重要である。また、発災時において調整池下流側設備が健全であれば、上流側からの取水が停止しても調整池の貯水により、一定時間の発電が可能である。つまり、調整池は緩衝材 (Buffer) としての役割を有し、火力発電所の起動電源としての役割を担うことができる。本研究は地震時の発電機能の信頼度や復旧期間を評価し、これを基に耐震化の優先順位を合理的に定める方法の整備を目的とする。本論は送水能力の余力や調整池のBuffer効果、ならびに構成設備の損傷相関を考慮した水力発電水路施設の地震時信頼度、復旧曲線の評価手法を整備する。また、水力発電所の水路施設の事例に適用し、調整池のBuffer効果や損傷相関の影響について考察する。

Key Words : *hydroelectric power station, system reliability, recovery curve, seismic damage correlation*

1. はじめに

水力発電の発電比率は総発電量の約14%程度であるが、一部の水力発電所は、揚水式の発電所および火力発電所の起動電源としての役割を担っている。このため、東京湾岸地域の地震により主力の火力発電所が停止し、さらに起動電源としての水力発電所が停止すると、都市域への送電が長期に亘り停止する可能性がある。つまり、電力網の系統維持並びに電力の安定供給の観点に立つと、水力発電所の機能維持、早期復旧は重要な課題である。一方、流れ込み式の水力発電所施設は、取水堤、ゲート、導水路、調整池、水圧鉄管、発電所建屋等の構成設備が有機的に連結したシステムとして機能している。ところが、これまでの耐震設計あるいは耐震検討は、構造物個々の耐震性能を照査するもので、発電施設を含めた水路総体としての機能維持・早期復旧を目標としたものではない。このため、システムとして捉えた際の構成設備の耐震性能の過不足は不明であり、設備によっては不十分な耐震性能によるボトルネック化なども懸念される。そこで著者ら¹⁾は、水

力発電所の水路施設をシステムとしてモデル化し、発災時の発電停止期間を確率論的に評価すると共に、ボトルネックとなる設備の抽出を試みた。

一方、水力発電水路施設は昼夜や季節など、電力需要の変化に応じて運転調整が行なわれる。具体的には、水路の送水能力に一定の余力を持たせたり、調整池の貯水を需要の大きい時間帯に利用するなどである。また、地震により調整池上流側の施設が被害を受けても、発電所を含めた調整池下流側が健全であれば、河川管理者等の了解が得られた場合には調整池の貯水により一定期間の発電は可能である。つまり、調整池は緩衝材 (Buffer) としての役割を持ち、火力発電所の起動電力を確保する上で重要な役割を担うことが可能である。これまでの研究では送水能力の余力やBufferとしての調整池の効果は考慮されておらず、この点現実との乖離がある。そこで本論は送水能力の余力や調整池の効果を検討した送水機能のシステム信頼度や復旧期間を評価すると共に、耐震化の判断や優先順位を合理的に決定する方法の整備を目指す。

システムの地震時復旧期間に関する研究を概観する

と、星谷・宮崎²⁾は順次復旧、同時復旧の場合に分けそれぞれの復旧評価の基本的な考え方を示し、能島・亀田³⁾は復旧過程を可視化した復旧曲線の評価手法を提示している。最近では、事業継続計画（BCP）への関心の高まりとともに、製造業の生産ラインを対象に地震時の性能の低下や復旧期間を評価する研究⁴⁾、浄水場管路の送水機能の復旧に着目した研究⁵⁾、建築設備機能の復旧期間を評価する研究⁶⁾など、機能をシステムとして捉え、経過時間と伴に変化する性能の回復過程、いわゆる復旧曲線を評価する研究が見られる。また、システムを構成する要素の損傷相関を考慮した研究^{4,7)}では、システム性能の信頼度は損傷相関の影響が極めて大きいことを論じている。

本論の内容は、復旧曲線の評価一般を示し、送水能力の余力、ならびに構成設備間の損傷相関を考慮したシステムフローの確率関数の評価手法を示す。これら手法は既往の研究を取りまとめたものである。また水力発電所の水路施設の事例に適用し、調整池のBuffer効果ならびに損傷相関の影響などについて考察する。

但し、研究の前提として発災時に送電系統が被災しても、関東周辺の多重化された系統にて送電機能は確保されているとする。

2. 復旧曲線の評価

復旧曲線は、本来の性能が低下あるいは停止し、その後、元の性能に回復するまでの経時的なプロセスを描いた曲線と定義する。横軸は復旧に要する日数、縦軸は本来の性能を1.0とした性能回復率である。一方、地震被害の発生や復旧期間には不確実性を伴い、確定的に設定することはできない。つまり一貫して確率論的アプローチを採る必要がある。この場合、図-1に示すように、様々な（無数の）復旧過程が予想され、予想に漏れがない限りこの中の一つは必ず実現することになる。しかしながら、実現するであろう復旧過程を特

図-1 復旧曲線の概念

定することはできないため、平均的な復旧過程を復旧曲線として採用する。また、復旧曲線は復旧期間と性能回復率の2つの軸に描画されるため、基本的には2種類存在⁸⁾する。図中D曲線とT曲線である。

D曲線は性能回復率を確率変数とした縦軸に分布する曲線群の平均値を、復旧期間に対し結んだ曲線である。一方のT曲線は復旧期間を確率変数とした横軸に分布する曲線群の平均値を、性能回復率に対し結んだ曲線である。T曲線は機能が限定され、その機能の復旧期間を知りたい場合に有効とされる⁸⁾。一方、上水や電力システムのように、システムとしての性能の低下や復旧過程を診る場合には、D曲線は実状をよく説明できるとの報告⁹⁾がある。そこで本研究では、送水能力の余力や調整池のBuffer効果を診ることから、性能の経時変化に着目したD曲線を評価対象とする。D曲線は復旧時間 t を条件とした性能回復率 r の確率密度関数 $f_R(r|t)$ より、以下のように求めることができる。

$$R_D(t) = \int_0^{1.0} r \cdot f_R(r|t) dr \quad (1)$$

実計算では、 $f_R(r|t)$ は離散確率密度関数となるため、以後これを $P_R(r|t)$ と記し、システムフローの確率関数と呼ぶ。以下にこの評価方法を示す。

3. システムフローの確率関数の評価

(1) システムフローの確率関数⁴⁾

n 個の要素で構成される並列システムでは、システムフロー（本論では流量）は、要素の性能の確率変数 R_i ; $i=1 \sim n$ の和として以下のように表される。

$$R_{sys} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2)$$

ここに、 R_{sys} はシステムフローの確率変数を表す。直列システムでは各要素の性能の最小値を採ることになり、以下ようになる。

$$R_{sys} = \min(R_1, R_2, \dots, R_n) \quad (3)$$

図-2に示す並列と直列が混在したシステムの例では、要素の連結性から以下のように求められる。

$$R_{sys} = \min[R_1, \{R_2 + \min(R_3, (R_4 + R_5))\}, R_6] \quad (4)$$

式(4)は代数演算順位に従い、和算やMinimumの確率演算を施すことで、余力フローを含めたシステムフローの確率関数を求めることができる。ここで、システムがネットワーク構成の場合には、このような定式化はできず、ネットワークシステムの最大フロー問題⁷⁾として扱わなければならない。なお、本論で対象とする水路施設は並直システムであることから、式(4)のような定式化が可能となる。

図-2 並直システムの例

損傷形態	確率	復旧期間	フロー R
無被害	p_s	0	r
軽微	p_1	t_1	0
崩壊	p_2	t_2	0

図-3 構成要素の確率変数 R

(2) 時間を条件とした要素フローの確率関数

要素の確率変数 $R_i, i=1 \sim n$ について示す。以下、添字 i は省く。図-3に示すように、健全な場合はフロー r を維持し、損傷の場合は0となる2値の確率関数として表す。さらに損傷形態に応じた復旧期間(図中 t_1, t_2)を設定する。図より、確率変数 R は復旧期間とフローの2つのパラメータによって特徴付けられる。

図中の確率 p_s, p_1, p_2 はFragility Curveから求められる軽微以上被害の発生確率 p_{slight} と崩壊被害の発生確率 $p_{collapse}$ から以下のように求める。

$$\begin{aligned} p_s &= 1 - p_{slight} \\ p_1 &= p_{slight} - p_{collapse} \\ p_2 &= p_{collapse} \end{aligned} \quad (5)$$

p_{slight} と $p_{collapse}$ は、一般的に、地震動 x の条件付きとして以下のように求めることができる。

$$p(x) = \int_0^x f_C(c; c_m, \zeta_C) dc \quad (6)$$

ここに、 $f_C()$ は対数正規確率密度関数であり、 c_m は軽微(slight)以上、ならびに崩壊(collapse)の地震動に換算した耐力中央値である。 ζ_C は対数標準偏差である。

被災の復旧は同時並行的に複数の要素の復旧を進めるものとする。これにより、他の要素とは独立に、発災からの経過時間 t までは損傷確率 p_1+p_2 、 $t_1 \sim t_2$ までは損傷確率 p_2 となる(図-4を参照)。さらに t_2 を超えると損傷確率は0になる。つまり、任意の時間切片において要素フローは r と0の2値問題として扱うことができ、経過時間と共に確率が変化していく。時間と共に変化する要素フローの確率関数を(4)式などに適用することで、経過時間に対応したシステムフローの確率関数 $P_R(r|t)$ が得られる。

(3) 要素の損傷相関の評価^{h10)}

地震 S を想定した場合、波動伝播の不確実性、表層地盤の増幅特性のばらつき、構造物の応答の推定誤差等、これらばらつきが複合した作用地震動を考慮する必要がある。そこで、全確率の定理を使い地震 S による作用地震動下でのシステムフローの確率関数を、付録

図-4 発災からの経過時間に対応した要素フローの確率関数

式(A.9)を参照し、以下のように求める。

$$P_R(r|t, S) = \int_0^{1.0} P_R(r|t, x) \cdot dp(x|S) \quad (7)$$

ここに、 $P_R(r|t, S)$ はシナリオ地震 S によるシステムフローの確率関数、 $P_R(r|t, x)$ は作用地震動 x によるシステムフローの確率関数である。 $dp(x|S)$ は地震 S による作用地震動 x が生じる微小確率を示している。また、 $dp(x|S)$ は作用地震動の確率変数 X の密度関数を用いて記述でき、 $f_X() = dp/dx$ の積分変数の変換を行い、以下のように表される。

$$P_R(r|t, S) = \int_0^{\infty} P_R(r|t, x) \cdot f_X(x; x_m, \zeta_X | S) dx \quad (8)$$

ここに、 $f_X()$ は作用地震動の対数正規確率密度関数である。 x_m, ζ_X は中央値、対数標準偏差である。なお、式(8)の積分は陽に解けないため、数値積分を行う。

次に、要素に作用する地震動 X を要素間において完全相関と仮定する。これより、完全相関成分である作用地震動の条件付として要素の損傷確率を与え、全確率の定理による確率の積和(式(8)の積分)を実行する。

要素間の損傷の相関係数を所与とし、また作用地震動や耐力のばらつきを複合した、いわゆる複合偏差が一定の場合には、損傷相関係数 ρ_F と複合偏差 ζ_F を付録の式(A.7)に適用し、作用地震動の対数標準偏差 ζ_X を得る。さらに、付録の式(A.8)から要素の耐力の対数標準偏差 ζ_C を得る。これらの対数標準偏差を使い、式(8)の積分を実行することで、損傷相関係数 ρ_F の下でのシス

図-5 対象とする水力発電水路施設のシステムモデル

テムフローの確率関数を得る．なお，要素間の損傷相関が異なる場合は文献10)の方法を利用できる．

4. 水力発電水路施設の事例

対象とする水力発電水路施設のシステムモデルを図-5に示す．同施設は関東圏域にあり，東京湾岸の火力発電所の起動電源の役割を担うことが可能な地域に位置している．取水施設から始まり，沈砂池，排砂路，導水路トンネル，調整池，水圧鉄管，発電所建屋，放水路などで構成され，各所に余水路がある．全長はおよそ15kmである．図中の□は要素を表す．要素の損傷形態は幾つかの要因で表される．また，土構造物（盛土，切土，自然斜面），各種ゲート，ゲート電源，送電のための変電設備，制御管理建屋および関連設備も評価対象とした．なお，発電機は4機あり，これに伴い水圧鉄管も4つあるが，隣接して存在し建設年代も同じであることから損傷相関は高いと考え，本論ではそれぞれ一つの要素とした．

発電用水は河川からの取水 $25\text{m}^3/\text{s}$ ，上流側発電所からの放水 $25\text{m}^3/\text{s}$ ，計 $50\text{m}^3/\text{s}$ を取水できる．しかし導水路の容量は調整池上流では $30\text{m}^3/\text{s}$ ，下流側は $40\text{m}^3/\text{s}$ である．また，調整池の有効貯水量は約 $500,000\text{m}^3$ であり，およ

そ $10\text{m}^3/\text{s}$ の用水を12時間流すことができる．これは電力需要の大きい昼間に調整池の貯水を併せて利用することで最大流量（ $40\text{m}^3/\text{s}$ ）を確保する仕組みである．また，この $10\text{m}^3/\text{s}$ は火力発電の起動電源を賄う最低限の流量である．調整池の貯水を活用する場合には，図-5の調整池（31番）に損傷の対象とならない並列要素から $10\text{m}^3/\text{s}$ の用水が流れこむようにモデル化する．この時，運用上，貯水量の変動はあるものの，本研究では，ほぼ満水状況を想定した．

表-1には各要素の損傷形態とその耐力中央値，ならびに復旧期間をまとめて示している．耐力中央値について，対象地域は山間域であることから表層地盤の増幅（地盤増幅率1.0）は考慮せず，損傷形態が発生する加速度耐力をPBA（Peak Base-rock Acceleration）換算値とした．

耐力中央値の評価について，取水堤，沈砂池，開水路，余水路，放水路などの水路構造物に加え，水圧鉄管（支台），ゲート，発電所建屋等については設計図書等に基づき耐震性能を評価した．その際，建屋を除いた構造物は剛体を仮定できることから，損傷形態が発生する耐力を静的な水平震度として求め，これを最大加速度に換算した．発電機ならびに受変電設備はGround Levelに設置されていることから応答は考慮せず，

表-1 要素の損傷形態とその耐力, 復旧期間

要素	損傷要因	耐力中央値(PBA換算値)(cm/s^2)				復旧期間(日)			
		軽微	中破	大破	倒壊 (崩壊)	軽微	中破	大破	倒壊 (崩壊)
(1)取水ダム	土砂吐ゲート 構造被害	600	—	—	3000	3	—	—	60
	ゲート操作設備 構造被害	440	—	—	660	0	—	—	3
	取水堰 構造被害	2530	—	—	5060	15	—	—	300
(2)引込電柱	電柱 構造被害	—	—	—	440	—	—	—	1
(3)自家発電屋	建屋 構造被害	240	460	640	840	0	5	15	60
	自家発電機 構造被害	650	—	—	970	1	—	—	5
(4)取水口	ピア 構造被害	410	—	—	1790	15	—	—	300
	ゲート操作設備 構造被害	440	—	—	660	0	—	—	3
(5)放水路	放水路擁壁 構造被害	470	—	—	940	3	—	—	60
(6)沈砂池甲	沈砂池擁壁 構造被害	470	—	—	940	3	—	—	60
(7)沈砂池乙	沈砂池擁壁 構造被害	470	—	—	940	3	—	—	60
(8)排砂路甲	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	ゲート操作設備 構造被害	—	—	—	660	—	—	—	1
(9)排砂路乙	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	ゲート操作設備 構造被害	—	—	—	660	—	—	—	1
(10)排砂路共通	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(11)1号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(12)1号開渠	水路側壁 構造被害	370	—	—	740	2	—	—	30
	斜面 崩壊被害	360	—	—	550	2	—	—	60
(13)開渠余水路	水路側壁 構造被害	370	—	—	740	2	—	—	30
	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(14)2号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(15)1号水路橋	水路側壁 構造被害	—	—	—	4410	—	—	—	360
(16)3号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(17)2号水路橋	水路側壁 構造被害	410	—	—	820	2	—	—	30
(18)2号開渠	斜面 崩壊被害	670	—	—	1000	2	—	—	60
(19)4号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	斜面 崩壊被害	670	—	—	1000	2	—	—	30
(20)3号水路橋	水路側壁 構造被害	410	—	—	820	2	—	—	30
(21)5号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(22)3号開渠	斜面 崩壊被害	670	—	—	1000	2	—	—	30
(23)4号水路橋	水路側壁 構造被害	410	—	—	820	2	—	—	30
(24)4号開渠	水路側壁 構造被害	260	—	—	530	2	—	—	30
	斜面 崩壊被害	670	—	—	1000	2	—	—	60
(25)6号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(26)7号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(27)8号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(28)9号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(29)10号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(30)11号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	斜面 崩壊被害	470	—	—	700	2	—	—	60
(31)調整池	堤体(ダム) 崩壊被害	500	—	—	1000	5	—	—	240
(32)調整池余水路	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	余水吐 構造被害	1340	—	—	2680	15	—	—	300
(33)調整池取水口	水槽擁壁 崩壊被害	2720	—	—	5440	5	—	—	60
	ゲート操作設備 構造被害	440	—	—	660	1	—	—	3
	引込電柱 構造被害	—	—	—	440	—	—	—	1
(34)12号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(35)13号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(36)14号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(37)15号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(38)立坑	立坑 構造被害	—	—	—	660	—	—	—	1
(39)16号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(40)17号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(41)18号トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(42)発電所水槽	斜面 崩壊被害	470	—	—	700	2	—	—	30
	水槽擁壁 構造被害	350	—	—	690	5	—	—	120
	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
(43)発電所水槽余水路	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	斜面 崩壊被害	470	—	—	700	2	—	—	60
(44)水圧鉄管	水圧鉄管基礎 構造被害	930	—	—	1400	2	—	—	30
(45)発電所建屋	建屋 構造被害	350	730	1050	1360	0	10	30	120
	発電機 構造被害	1080	—	—	1620	2	—	—	30
(46)変電設備	変電設備 構造被害	1080	—	—	1620	3	—	—	150
(47)放水路トンネル	トンネル 構造被害	740	940	1170	2500	0	5	30	360
	斜面 崩壊被害	360	—	—	550	2	—	—	30
(48)放水路	水路側壁 構造被害	470	—	—	940	2	—	—	30
(49)制御所建屋	建屋 構造被害	420	810	1160	1490	0	15	30	220
	天井 落下被害	—	—	—	700	—	—	—	5
	制御管理設備 構造被害	640	—	—	960	1	—	—	5

図-6 発災からの経過時間に対応したシステムフローの確率関数

アンカーボルト等の支持限界をPBA換算した。一方、盛土、切土、自然斜面の崩壊、トンネル被害については純統計的な方法を採用した。盛土、切土は建設後相当な年数が経過していることから、全て自然斜面と考え、文献11)に示された斜面崩壊のFragility Curveを採用した。トンネル被害については既往の研究は少ないことから、2004年新潟県中越地震および2007年新潟県中越沖地震の被害事例を収集し、統計的に分析を行った。詳細は文献1)を参照されたい。復旧期間については文献12),13),14)などを参照し、各要素の損傷形態毎に設定した。また、例えば、(30)11号トンネルのように、要素の中にトンネル構造被害と斜面崩壊被害の複数の損傷要因がある場合、それぞれの損傷要因は直列に連結したシステムの要素として扱う。トンネル被害の損傷形態は統計解析の結果¹⁾を参照し、中破、大破を加えた。建屋については、構造系としての靱性を考慮し、中破、大破を加えた。これにより、トンネルと建屋については、図-3の損傷形態の分岐が無被害を含め5になり、図-4の要素フローの確率関数も経過時間に対応して増えることになる。次に、吉川ら¹⁵⁾が取りまとめた各種構造物の複合偏差の統計情報の内、特に土木施設のそれを参照し、複合偏差を0.54とした。その内訳は作用地震動の対数標準偏差を0.45、耐力のそれを0.3とした。ここで、Wang and Takada¹⁶⁾は作用地震動のマクロ空間相関を指数関数(距離相関28.1km)により求めている。これによると、線状の水路全長はおおよそ15kmであることから、各要素に作用する地震動の相関係数は1.0~0.59程度とな

る。また、各要素の耐力の相関係数を0.2と仮定⁷⁾すると、各要素の損傷相関は0.76~0.47程度となる。文献7),17)では、損傷相関が異なる施設群を対象としたシステムフローの分析において、平均化した相関係数を用いても結果への影響は少ないことが示されており、本論でも平均化した相関係数を一律用いることとする。

5. 解析結果と考察

シナリオ地震として、東京湾岸の火力発電所の一時的停止が予想される南関東地震(1703,1923年)の再来を想定する。マグニチュードはM8.0である。この震源は文献18)を参照し、安中ら¹⁹⁾の距離減衰式を使い水路施設の要素に作用する地震動を個々に計算した。作用地震動はPBA換算で、最小で 400cm/s^2 最大で 450cm/s^2 であった。

(1) 調整池のBuffer効果の検討

損傷相関は平均化した相関係数 $\rho_r=0.6$ とし、調整池の貯水(Buffer)を利用する場合と、しない場合を比較する。まず、発災から経時的に変化するシステムフローの確率関数 $P_R(r|t)$ を図-6(a),(b)に示す。(a)は調整池のBufferを考慮、(b)は考慮しない場合である。それぞれ横軸は流量(m^3/s)、縦軸は確率で、発災からの経過時間毎に示している。一方、発災から数日後には火力発電所の応急復旧や諸検査が終了し、起動電力が必要となることから、発災から2日後の関数とその値を朱書きし、

(a) 完全復旧までの復旧曲線

(b) 発災から15日までの復旧曲線

図-7 調整池のバッファ考慮、非考慮の復旧曲線

比較している。図より経過時間と共に復旧が進み、最大流量（通常時）の確率が1.0に漸近していく様子が分かる。また、(a)には流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ の確率が示されているのに対し、(b)には現れていない。さらに最大流量も(a)は $40\text{m}^3/\text{s}$ 、(b)は $30\text{m}^3/\text{s}$ となっている。図-7はそれぞれの復旧曲線を比較したもので、縦軸は確保できる流量、横軸は経過時間である。(a)は完全復旧までの復旧過程を、(b)は発災から15日までを拡大したものである。図より調整池のBufferを考慮しない場合に比べ、考慮した場合は流量において常に上回っている。ただし、Bufferとしての $10\text{m}^3/\text{s}$ は上流からの補給がない限り12時間しか利用できない。

(2) 損傷相関の影響

水路施設の損傷相関の影響を検討する。前記したように、各要素の損傷相関は $0.76\sim 0.47$ で、平均的には 0.6 程度である。これを踏まえ、要素間の損傷相関は一律同じとし、相関係数 $\rho_F=0$ （独立）、 0.6 を跨いで $0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 、さらに完全相関 $\rho_F=1.0$ を加え、計7ケースについて評価した。なお、以降は全てBufferを考慮したケ

図-8 損傷相関の違いによるシステムフローの確率関数（発災から2日後）

図-9 損傷相関の違いによる特性値（発災から2日後）

図-10 損傷相関の違いによる復旧曲線

ースである。まず、発災から2日後のシステムフローの確率関数 $P_R(r|t)$ （図-6の朱書部分）を取り上げ、損傷相関を変えて比較したものを図-8に示す。図より、損傷相関が高くなると最大流量を確保できる可能性が高まる傾向にある。また、図-9に同確率関数の特性値（平均、標準偏差、変動係数）を比較して示す。相関が高くなるに従い、平均値、標準偏差共に上昇している。平均値の上昇は直列システムの特徴的な傾向⁷⁾と言えるが、標準偏差の上昇は各要素の損傷確率に依存す

図-11 10m³/s以上送水できる確率の推移

図-12 発災から3日以上機能停止する損傷要因の確率

る。本ケースでは要素の損傷確率は微小から0.6まで幅があることから、このような結果になったと考える。図-10は損傷相関を変えたケースの復旧曲線を比較している。同曲線はBufferを考慮したケースである。図より、損傷相関の違いによる影響は顕著であり、損傷相関を考慮することの重要性が分かる。

(3) 耐震対策の検討

電力網の系統維持並びに安定供給の観点から、発災後、火力発電所の起動電力を確保できるか否かが問題となる。そこで流量10m³/s以上を送水できる信頼度(確率)を、経過時間に対し評価したものを図-11(図の現状を参照)に示す。なお、以降の評価検討は全て $p_F=0.6$ である。図は発災から15日までを拡大したものである。

図より、発災当初は信頼度は20%以下、2日経過すると復旧が進みおよそ30%となる。一方、発災から数日後には火力発電所の応急復旧や諸検査が終了し、起動電力が必要となると仮定する。この仮定を前提とすると、2日経過後の信頼度30%は低い。そこで、脆弱な要素を把握するため、発災から3日以上機能が停止する損傷要因の確率を大きい順に列記したものを図-12に示す。図より、発電所水槽擁壁(水圧鉄管に流れ込む水槽の壁)の確率が最も大きい。そこでこの擁壁から発電所水槽斜面までの7要素を耐震対策の対象とする。図には対策を実施したと仮定した場合の損傷要因の確率を併記している。なお、この値は具体的な補強を想定したものではなく、水槽擁壁は耐力 c_m を倍に、その他は50%増とした。また、システム内の脆弱要素を見出す幾つかの指標^{7,20)}があるが、本論では、対象がほぼ直列システムであることから、確率重要度⁷⁾と等価な損傷確率の大小で判断した。

対策後の流量10m³/s以上を送水できる信頼度(確率)については、図-11に併記している。図より、対策により2日経過後の信頼度は60%まで改善する。また、5日後には70%、10日後には80%まで上昇する。これら信頼度が十分かどうかは施設管理者の判断に委ねられるが、対策の効果を信頼度で示すことができ、また、経時的な変化として把握できることは、対策の実施判断に有用である。また、図-13には現状(対策前)と対策後の復旧曲線を比較している。図より対策の効果が確認できる。しかしながら、復旧曲線は平均値であることから実際の流量を把握することはできない。このことから、復旧曲線は復旧過程を概観視する場合に有効であるが、具体的な流量やその信頼度を情報として利用するには限界がある。図-11に示したように、必要流量を確保できる信頼度、ならびにその経時的変化に着目する方が、より有用と考える。

6. おわりに

火力発電所の起動電源としての役割の一翼を担う水力発電所の機能維持は、電力網の系統維持並びに電力の安定供給の観点から重要である。その際、被害の様態によっては調整池の貯水を有効に活用することができる。これを定量的に評価し、耐震対策の必要性や優先順位の判断に役立てるため、水路施設の送水能力の余力や調整池のBuffer効果、ならびに構成設備(要素)の損傷相関を考慮した水力発電水路施設の地震時復旧曲線の評価手法を提示した。また水力発電所水路事例に適用し、以下の結論を得た。

(1) システムフロー(水路の流量)の復旧過程の平均値を示す復旧曲線は、復旧過程全体を概観するに

(a) 完全復旧までの復旧曲線

(b) 発災から15日までの復旧曲線

図-13 現状と対策後の復旧曲線

は適しているが、具体的な流量やその信頼度を知ることにはできない。

- (2) 必要な時期に必要な流量を確保できるか否か、この信頼度ならびに、対策による改善効果を確認することができた。
- (3) 要素間の損傷相関の影響は顕著であり、この種の解析では、損傷相関を考慮することが極めて重要である。

今後の研究は、損傷確率ならびに復旧期間について、その根拠をより確かなものにするための被害統計の整備、水力発電水系への拡張などが必要であると考えられる。

付録 全確率の定理を用いた損傷相関の評価法

本論で扱う損傷相関は損傷の物理的な従属関係ではなく、統計的相関を意味する。ここでは全確率の定理を用いた損傷相関の評価方法を簡単な例を使い示す。

図-A.1に示す隣接する2つの構造物に震源Sによる地震動が作用した場合を想起する。

構造物の耐力ならびに作用地震動を確率変数 C_1, C_2, X と置く。それぞれは対数正規分布に近似でき、互いに

 図-A.1 2つの構造物 C_1, C_2 と作用地震動 X

独立とする。損傷を定義する関数として、以下を設定する。

$$F_i = C_i / X, \quad i = 1 \sim 2 \quad (\text{A.1})$$

式(A.1)の対数を取り共分散を求め、相関係数に変換すると以下ようになる。

$$\rho_F = \zeta_X^2 / \zeta_F^2 \quad (\text{A.2})$$

ここに、 ρ_F は構造物 C_1 と C_2 の損傷相関係数、 ζ_X は作用地震動の対数標準偏差、 ζ_F は複合偏差であり、以下のようになる。

$$\zeta_F^2 = \zeta_C^2 + \zeta_X^2 \quad (\text{A.3})$$

ここに、 ζ_C は構造物 C_1, C_2 の耐力の対数標準偏差であり、便宜上同じ値とする。

構造物 C_1, C_2 に任意の地震動 x が作用した場合の損傷確率を以下のように表す。

$$p_{Ci}(x) = F_{Ci}(x; c_{mi}, \zeta_C), \quad i = 1 \sim 2 \quad (\text{A.4})$$

ここに、 $F_{Ci}(\cdot)$ は対数正規分布の非超過確率関数を表し、 c_{mi} は構造物の地震動に換算した耐力中央値である。構造物は2つであるから、無被害を含めた損傷形態の組合せ事象は計4つとなる。各事象の生起確率を全確率の定理を使い求める。まず、2つの構造物が同時に損傷する確率は、地震 S を条件として以下のように求められる。

$$p_{C1 \cdot C2}(S) = \int_0^\infty p_{C1}(x) p_{C2}(x) \cdot f_X(x; x_m, \zeta_X | S) dx \quad (\text{A.5})$$

ここに、 $f_X(\cdot)$ は作用地震動の対数正規確率密度関数である。 x_m は作用地震動の中央値である。 C_1 のみ損傷する確率は以下ようになる。

$$p_{C1 \cdot \bar{C}2}(S) = \int_0^\infty p_{C1}(x) (1 - p_{C2}(x)) \cdot f_X(x; x_m, \zeta_X | S) dx \quad (\text{A.6})$$

図-A.2 損傷相関係数 ρ_F と ζ'_X と ζ'_C の関係
(複合偏差 $\zeta_F=0.54$)

C_2 のみ損傷，全て健全などの組合せ事象の生起確率も同様に求められる．ここで得られた組合せ事象の確率は，式(A.2)の損傷相関係数の下での確率となる．極例として， $\zeta_X = 0.0$ の場合，構造物 C_1, C_2 の独立成分に支配され，独立の組合せ事象の生起確率が計算される．一方， $\zeta_C = 0.0$ の場合，2つの構造物に同じ地震動が作用する，つまり完全相関成分に支配され，組合せ事象の確率は完全相関として計算される．

次に，損傷の相関係数 ρ_F と複合偏差 ζ_F を所与とする．式(A.2)から，作用地震動の対数標準偏差を求める．その際，元の ζ_X と区別するため， ζ'_X と置く．

$$\zeta_X'^2 = \rho_F \cdot \zeta_F^2 \quad (\text{A.7})$$

さらに，式(A.3)から耐力の対数標準偏差 ζ'_C を求める．

$$\zeta_C'^2 = \zeta_F^2 - \zeta_X'^2 \quad (\text{A.8})$$

ζ'_X と ζ'_C を使い，式(A.5), (A.6)等を計算すると，所与である損傷の相関係数 ρ_F の下での組合せ事象の確率を得る．この方法は作用地震動である ζ'_X を完全相関成分，構造物の耐力である ζ'_C を独立成分と仮定し，複合偏差 ζ_F を一定として， ζ'_X と ζ'_C を制御することで，任意の損傷相関係数 ρ_F の下での組合せ事象の確率を計算するものである．複合偏差 ζ_F を0.54とし，損傷相関係数 ρ_F と，作用地震動および耐力の対数標準偏差 ζ'_X と ζ'_C の関係をグラフで示すと図-A.2のようになる．また，式(A.5), (A.6)等の基本となる式は，以下である．

$$P(S) = \int_0^{1.0} P(x) \cdot dp(x|S) \quad (\text{A.9})$$

ここに， $P(x)$ は任意の地震動 x の作用下での，組合せ事象の生起確率， $P(S)$ は地震 S による組合せ事象の生起確率である． $dp(x|S)$ は地震 S による作用地震動 x が生じる微小確率であり，式(A.5), (A.6)とは $f(x) = dp/dx$ の変数変換により関係付けられる．

参考文献

- 1) 土居賢彦，村口英之，中村孝明，小田川昌史：水力発電所構造物の地震時システム機能性評価手法の開発，電気学会 電子・情報・システム部門大会，熊本，2010.9
- 2) 星谷勝，宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文集，第331号，pp.45-54，1983.3
- 3) 能島暢呂，亀田弘行：幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム，土木学会論文集，No.450/I-20，pp.171-180，1992.7
- 4) 中村孝明，境茂樹，吉川弘道：損傷相関を考慮した地震時システム性能評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第76巻，第661号，pp.713-719，2011.3
- 5) 馬場啓輔，大嶽公康，静間俊郎，吉川弘道：地震システム解析を用いた浄水場配管の最適投資額の算定，第13回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1724-1729，2010.11
- 6) 坂本成弘：事務所ビルの地震後復旧曲線，建築学会大会梗概集，B-1，pp.65-66，2007.8
- 7) 能島暢呂：要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション，土木学会論文集A1，Vol.65，No.1，pp.776-788，2009.
- 8) 静間俊郎，中村孝明：復旧曲線の理論的考察とBCPへの適用，土木学会第1回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム論文報告集，pp.231-236，2009.11
- 9) Shinozuka, M., Chang, S.E., Cheng, T-C., Feng, M., O'Rourke, T.D., Saadeghvaziri, M.A., Dong, X., Jin, X., Wang, Y. and Shi, P.: Resilience of integrated power and water systems, Seismic Evaluation and Retrofit of Lifeline Systems, Articles from MCEER's Research Progress and Accomplishments Volumes, pp.65-86, 2004.
- 10) 中村孝明：相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価，日本建築学会構造系論文集，第73巻，第623号，pp.49-56，2008.1
- 11) 中村孝明，岡田和明，本間直樹：統計手法による地震時斜面崩壊確率に関する研究，土木学会論文集，第570号/I-40，pp.73-82，1997.
- 12) (社)土木学会東北支部：1978年宮城県沖地震調査報告書，1980.
- 13) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 ライフライン施設の被害と復旧，1997.
- 14) 東地域電源調整会議・技術小委員会・地質調査グループ：釧路沖地震と北海道南西沖地震における電力設備の被害調査・分析および対策，1995.3
- 15) 吉川弘道，大滝健，前田欣昌，中村孝明：地震リスク解析におけるフラジリティ曲線と地震損失関数，コンクリート工学会誌，Vol.45，No.10，pp.26-34，2007.10
- 16) Wang, M. and Takada, T.: Macrospatial Correlation Model of Seismic Ground Motions, Earthquake Spectra, Vol.21, No.4, pp.1137-1156, Nov. 2005.
- 17) 静間俊郎，中村孝明，吉川弘道：地震損傷相関を考慮した施設群の機能停止評価，土木学会論文集 A，Vol.65，No.2，pp.299-309，2009.
- 18) 文部科学省 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：

全国を概観した地震動予測地図, 2008.4

- 19) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.
- 20) Henley, E. J. and Kumamoto, H.: *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice Hall, 1981.

(2012. 11. 16 受付)

A STUDY ON THE RESTORATION PROCESS OF HYDROELECTRIC FACILITIES IN CONSIDERATION OF THE BUFFER EFFECT OF REGULATING RESERVOIR

Masahiko DOI, Toshiro SHIZUMA and Takaaki NAKAMURA

Some of the hydroelectric stations take a role to supply electric power to the thermal power stations as restarting power generation. Therefore, it is an important subject to continue the function of the hydroelectric station at the time of an earthquake occurrence. On the other hand, if the facilities of the lower stream of a regulating reservoir are safe in earthquake disaster, by using storage water of a regulating reservoir, we can generate electricity for a while. That is, a regulating reservoir has a role of buffer effect, then it can play an important role in supplying electric power to the thermal power stations. In this paper, we proposed the evaluation method of the system reliability and restoration curve for the hydroelectric station with buffer effect of a regulating reservoir. In evaluation, a damage correlation of components is considered. To evaluate the performance of method, it is applied to an actual hydroelectric station, and buffer effect of a regulating reservoir and the influence of the damage correlation are discussed.