

設計提案への地震リスクマネジメント(SRM)手法の活用

龍神 弘明・水谷 守^{*1}・齊藤 芳人・嶋 登志夫^{*2}

A Utilization of Seismic Risk Management to Design Proposal

Hiroaki RYUJIN, I Mamoru MIZUTANI, Yoshihito SAITO, Toshio SHIMA

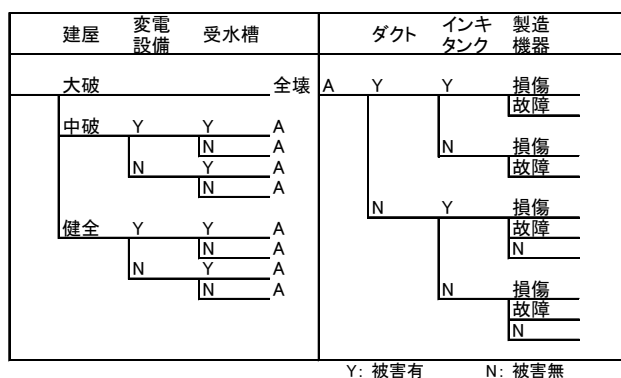


図-1 イベントツリー

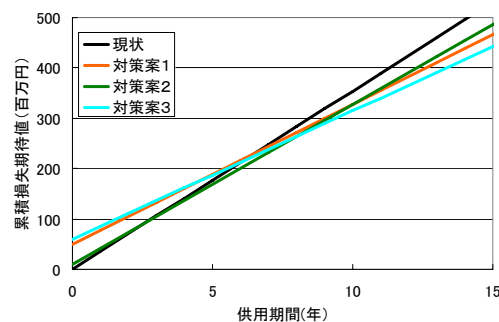


図-2 累積損失期待値

研究の目的

近年、事故・災害時における企業の事業継続（Business Continuity）が注目を集めている。これは、事故や災害が企業に及ぼす被害を、単なる物的被害として捉えるに止まることなく、業務停止などの営業被害を含めて考慮するものである。つまり機能被害を含めた事故・災害リスクマネジメントと考えることができる。いかに効率的にリスクを低減させるかが重要であり、対策を選定する際には合理的な意思決定が行わなければならない。その際、複数の対策案を相互比較するために、リスクを定量化することは、有効な手段である。

リスクを定量的に評価するには、リスクをもたらす被害要因の「発生確率」とそれが発生した場合の「損失の大きさ」の二側面について考える必要がある。そのため、リスクを低減させる対策案の立案には、その二側面からのアプローチができる。一つ目の考え方として、発生確率を減らす対策である。例えば、耐震構造から免震構造にすることによって大きな地震動が建物に inputs する確率を減らすという考え方である。二つ目の考え方として、損失を減らす対策である。例えば、データセンターの多重化やバックアップシステムの整備により、被害の大きさを低減するという考え方である。

本論文では、想定施設に対して二つの側面からアプローチした低減対策案を設定し、それぞれのリスクの低減効果を定量化して効率的な対策案を選定することにより、SRM（Seismic Risk Management）が設計提案に活用できることを示す。

技術の説明

施設の地震対策を提案するため、SRM 手法を活用した。まず、想定施設の現状のリスクを定量的に評価する。次に、イベントツリーにおける被害要因の発生確率をパラメタとした感度解析を実施し、どの要因に対する対策を行えば、リスクを効率よく低減することが可能か評価する。その要因に対して複数設定した対策案のリスクを年間損失期待値および累積損失期待値により定量化し対策案の選定を行った。

主な結論

想定施設を対象として、SRM 手法を活用することにより、効率的な対策案が提案できることを示した。

* 1 ㈱モダンエンジニアリングアンドデザイン

* 2 本店 建築事業本部 リニューアル事業部 営業第 2 グループ

設計提案への地震リスクマネジメント（SRM）手法の活用

龍 神 弘 明 水 谷 守^{*1}

齊 藤 芳 人 嶋 登 志 夫^{*2}

要 旨

近年、事故・災害時における企業の事業継続（Business Continuity：BC）が注目を集めているが、これは、機能的被害を含めた事故・災害リスクマネジメントと考えることができる。企業においては、いかにコストを抑えて効率的にリスクを低減させるかが重要であり、対策を選定する際には合理的な意思決定を行わなければならない。その際、複数の対策案の有効性を相互比較するために、リスクを定量化することは有効な手段である。

本論文では、まず想定施設に対して、イベントツリー手法を用いて地震リスクの定量化を行った。次に、イベントツリーにおける被害要因の感度解析を実施し、どの要因に対する対策を行えば、リスクを効率よく低減することが可能か評価した。さらに、その要因に対して複数設定した対策案のリスクを年間損失期待値および累積損失期待値により定量化し対策案の選定を行った。

キーワード 事業継続／リスクマネジメント／意思決定支援／イベントツリー／供用期間／

目 次

- | | |
|-----------------|-------------------|
| 1. はじめに | 4. 現状および対策案のリスク評価 |
| 2. 対象施設 | 5. まとめ |
| 3. 評価対象の耐力、損傷評価 | |

A UTILIZATION OF SEISMIC RISK MANAGEMENT TO DESIGN PROPOSAL

Hiroaki RYUJIN
Yoshihito SAITO

Mamoru MIZUTANI
Toshio SHIMA

Synopsis:

Business continuity planning in case of accidents and natural disasters is one of the recent major issues. However this is not new but is another aspect of risk management dealing with physical and functional losses against accidents and natural hazards. In companies and enterprises, it is important how to cut down costs and to decrease risks efficiently, and it is necessary to make a reasonable decision about selecting the counter measure. In this case, to quantify the risks is efficient for comparing some counter measures mutually.

In this paper seismic risk management procedures are presented with a hypothetical facility. The seismic risks at present status are evaluated using an event tree model of the facility, and sensitivity studies are carried out in order to find significant contributors for the risks, then the potential counter measures are listed. In addition, the risks of counter measures for one factor are quantified by using the annual expected loss and by using the accumulative expected loss during the in-service period, and then the efficient counter measure can be selected.

* 1 株式会社モダンエンジニアリングアンドデザイン

* 2 本店 建築事業本部 リニューアル事業部 営業第2グループ

1. はじめに

近年、事故・災害時における企業の事業継続（Business Continuity：BC）が注目を集めている。これは、事故や災害が企業に及ぼす被害を、単なる物的被害として捉えるに止まることなく、業務停止などの被害を含めて考慮するものである。つまり機能的（生産性）被害を含めた事故・災害リスクマネジメントと考えることができる。

リスクマネジメントの目的は、リスクを効率的に減少させることである。存在するリスクを可能な限り抽出し、それらのリスクの発生の可能性および発生した場合の損失の大きさを評価し、それらを低減する対策を複数設定し、その中から最も効率的な対策を選択し実施する。限られた費用で効率的に対策するには、複数の対策からどれを選択するか、評価した情報をもとに意思決定を行うことになる。

意思決定に際しては、対策を行うことによる利益と不利益の双方を考え、利益／不利益が最大になるような対策を選択する。事故・災害リスクマネジメントでは、対策によりリスクを減じることが利益で、対策費が不利益になる。したがって、リスク低減のための労力・費用が大きすぎるものは良い対策とはいえない。また、リスクの発生過程を詳細に検討することで、簡単で効率的な対策を抽出できる場合も多い。

効率の良い対策を選定するためには、リスクを定量化（数値化）することが有用である。それにより対策案の相互比較をすることができ、複数ある対策案の中から、どの案を採用するか、顧客の意思決定においても合意がとりやすい。

リスクを定量的に評価するには、リスクをもたらす被害要因の「発生確率」とそれが発生した場合の「損失の大きさ」の二側面（リスクの二側面）について考える必要がある。そのため、リスクを低減させる対策案の立案には、その二側面からのアプローチができる。一つ目の考え方として、発生確率を減らす対策である。例えば、耐震構造から免震構造にすることによって大きな地震動が建物に入力する確率を減らすという考え方である。二つ目の考え方として、損失を減らす対策である。例えば、データセンターの多重化やバックアップシステムの整備により、損失の大きさを低減するという考え方である。このような観点を持つことで、対策の幅が広がり、結果的にリスクを総合的に低減することが可能となる。

なお、リスクの低減の有効性を判断する場合には、対策費および今後の供用期間におけるリスクを含めたトータルコスト（以下、累積損失期待値）を考えることも重要である。リスクの低減量/対策費では、対策案相互の比較には良いが、実際に実施するメリットがあるかどうかは、対象施設の供用期間を考慮したリスクで判断する必要がある。供用期間が短ければ、対策を行わない方が、

賢明であることもある。累積損失期待値を比較し、意思決定がなされるべきである。

本論文では、まず機能を簡略化した想定施設に対して、イベントツリー（以下、ET）手法を用いた地震リスクマネジメント手法¹⁾による地震リスクの定量化を行う。その際、ETにおける被害要因の感度解析を実施し、どの要因に対する対策を行えばリスクを効率的に低減することが可能か評価する。次に、リスクの二側面から設定した複数の対策案によるリスクの低減効果および累積損失期待値の比較を行い、設計提案に際して、顧客の意思決定支援にSRM手法を活用することの有用性を示す。

2. 対象施設

2.1 対象施設の設定

対象施設として小規模な印刷工場を想定した。対象施設は、敷地内に鉄骨平屋の工場建屋が一棟建っており、その中に製造機器がある。その製造機器にはダクトが繋がっており、そのダクトは天井から吊下げられている。取り扱っている材料はインキと紙のみとするが、紙の被害は考慮せず、仕掛け品、製品被害も考慮しない。また、変電設備、受水槽は屋外の地盤面に設置しているとする。

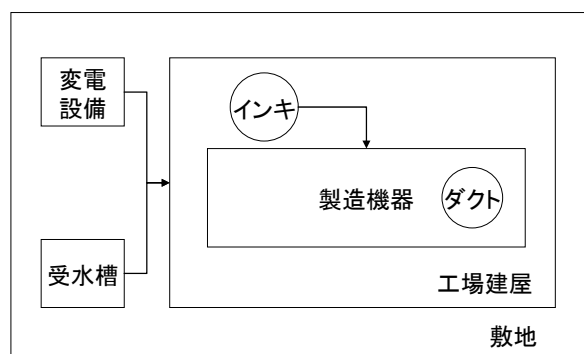


図-1 対象施設モデル概要

2.2 地震被害要因と損傷パラメタの設定

地震被害の要因としては、土砂崩れ、液状化、隆起・陥没などのような「地盤被害」、津波などのような「地震によって誘発される災害被害」、地盤の振動による「振動被害」、建物の崩壊、天井などの落下、荷物の転倒などに起因する「空間相関被害」がある。

地盤被害や地震によって誘発される災害被害は、立地に依存するもので、今回は両被害の可能性はないものとする（表-1）。

表-1 地震被害要因の考慮の有無

地震被害要因	考慮の有無
地盤被害	×
地震によって誘発される災害	×
振動被害	○
空間相関被害	○

振動被害については、鉄骨フレームの工場とした場合、大破要因として柱の座屈、鉛直構面ブレースの破断などを原因とした「構造体の崩壊」、中破要因として圧縮ブレースの座屈を原因とした「構造体の変形」を考える。そして損傷パラメタとして柱の座屈強度やブレースの破断強度を用いることもあるが、本論文では、表-2 に示すように簡単に大破、中破とも層間変形角で評価することにする。また、天井から吊り下げられているダクトの損傷要因は、屋根面の振動の大きさが支配するものと考え、その大きさを屋根面の応答加速度スペクトルから評価する。変電設備、受水槽、インキタンクおよび製造機器の損傷要因は、地表面の振動の大きさが支配するものと考え、その大きさを地表面の加速度応答スペクトルから、それぞれ評価する。なお、具体的に検討するために、ダクトは、周期 1.5 秒の屋根面の応答加速度を、変電設備、受水槽、インキタンクそして製造機器は、それぞれ 0.3 秒、1.5 秒、1.0 秒、0.3 秒の地表面の応答加速度をパラメタとして設定した。このとき製造機器には交換が必要な「損傷」、修理が必要な「故障」の複数の損傷モードを設定した。

また、下流の被害要因（ダクト、インキタンク、製造機器）への空間相関被害を考慮し、要因ごとに表-3 のように空間相関被害の発生確率を仮定した。空間相関被害とは、要因の位置関係によって発生する被害である。天井の落下によるダクト、インキタンクおよび製造機器の損傷あるいはダクトの落下によるインキタンクおよび製造機器の損傷などである。例えば、被害要因「ダクト被害」では、建屋の損傷モードが中破の場合は、天井落下による空間相関被害が付加され、建屋の損傷モードが無被害の場合は、空間相関被害は付加されず、ダクト被害は振動によるもののみを考える。振動によるダクトの被害発生確率を P_d 、天井落下による被害（空間相関被害）発生確率を $P_{d|s}$ とすると ET の分岐確率は表-4 のようになる。

2.3 イベントツリーモデル

今回の被害推定に利用する ET を図-2（左側の右端 A に右側の A をつなぎ合わせたもの）に示す。損傷を考慮する対象を、建屋、変電設備、受水槽、ダクト、インキタンク、製造機器を考えると、帰結は 81 ($1+8 \times 10$) 通りとなった。ここで、ダクト被害が発生すると必ず製造機器被害（損傷あるいは故障）が発生するものと考えている。また、表-2 のようにダクトによる製造機器、インキタンクへの空間相関被害は考慮するが、インキタンクによる製造機器への空間相関被害はない（インキタンクと製造機器の設置場所が離れていて、インキタンクが転倒しても製造機器に被害が発生しない）と考える。なお、公共インフラの損傷による送電、給水の停止は考慮していない。

表-2 考慮する地震被害状態とその要因

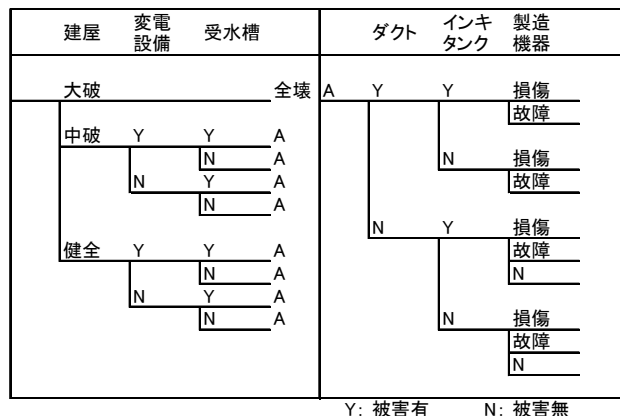
被害要因	損傷モード		パラメタ	周期
建屋被害	大破		層間 変形角	-
	中破			
	無被害			
変電設備被害	送電不可		地表面 応答加速度	0.3
	無被害			
受水槽被害	供給不可		地表面 応答加速度	1.5
	無被害			
ダクト被害	空間相関 被害あり	被害あり	屋根面 応答加速度	1.5
		無被害		
	空間相関 被害なし	被害あり	屋根面 応答加速度	
		無被害		
インキタンク被害	空間相関 被害あり	被害あり	地表面 応答加速度	1.0
		無被害		
	空間相関 被害なし	被害あり	地表面 応答加速度	
		無被害		
製造機器被害	空間相関 被害あり	損傷	地表面 応答加速度	0.3
		故障		
		無被害		
	空間相関 被害なし	損傷	地表面 応答加速度	
		故障		
		無被害		

表-3 空間相関被害の発生確率

要因	ダクト被害	インキタンク被害	製造機器被害
天井の落下	0.5	0.4	0.3
ダクトの落下	-	0.1	0.1

表-4 考慮する地震被害状態とその要因

被害要因	損傷モード		ET分岐確率
ダクト被害	空間相関被害あり (建屋中破)	被害あり	$1-(1-P_d)(1-P_{d s})$
		無被害	$(1-P_d)(1-P_{d s})$
	空間相関被害なし (建屋健全)	被害あり	P_d
		無被害	$1-P_d$



Y: 被害有 N: 被害無

図-2 ET 概要

2.4 損失コストの設定

各損傷モードの損失額の大きさを考え、ET で分類された状況が起きたらどのくらい損害があるのかを想定して決める。損害を明確に数値に置き換えられない場合は、意思決定者が、他の項目との相対的な比較により、主観量として決めることになる。実際の金額と一致するとは限らないが、その不確定性については後述する感度解析（4.1 項）を行うことにより、全体の評価に対する影響度を知ることができる。なお、考慮すべき被害を大別すると直接被害と間接被害に分類することができる。

直接被害は、地震による工場建屋や製造機器の損傷などの「物的被害」と機能損失により製品の製造ができなくて利益が得られない「機能的被害」がある。物的被害は再調達価格より、機能的被害は復旧に必要な日数（生産停止日数）に一日の損失額（5 百万円とする）を乗じた金額より算定することにする。表-5 に再調達価格と復旧に必要な日数を設定する。復旧作業は同時に進めることができるとして、ET の帰結の要因の中で最も長い復旧日数をその帰結の生産停止日数とする。なお、本論文で設定した価格、日数は仮定した値である。

間接被害は、被災地の購買力の低下などの「社会情勢の変化」、復旧時間がかかり同業他社へ顧客が流出するなどの「評価の低下」などがあるが、今回は考慮しない。

3. 評価対象の耐力、損傷評価

3.1 応答確率の推定

(1) 推定方法

応答確率とは、その大きさを特定の地震動指標によって規定された地震動の入力に対して、構造物に発生する応答（応力や変形）の大きさを示すものである。地震動は地震動指標（例えば最大加速度、最大速度など）に対して一意には定まらず、様々な時刻歴として存在することから、応答は確定的には定まらず、ばらつきを持つために、確率として表現される。応答確率は多くの場合、対数正規分布することが知られているため、ここではその中央値と対数標準偏差を推定する。その推定方法として、様々な地震動入力に対する応答の大きさを評価し、統計処理を利用することとする。本検討に用いた地震波は、これまでに観測された地震動のうち、地震規模が大きく、また、異なる最大加速度レベルで記録精度の比較的良好な 108 波²⁾を採用した。地震波の応答スペクトルを図-3 に示す。なお、建屋は、非線形 3 次元立体フレームにモデル化した。

地震動の大きさと応答の大きさの中央値の関係は、これまでの経験³⁾から、両対数軸上での線形式により近似できるものとする。このとき、応答の対数標準偏差を地震動強さに依存しないと仮定することにより、中央関係式の近似式は、両対数軸上の最小二乗法を用いて評価することが出来る。この方法により、応答確率は地震動

指標の大きさに依存した中央値と、それに依存しない一定の対数標準偏差として評価される。

(2) 推定に用いた地震動指標

地震動の大きさを表現する指標として、最大加速度や最大速度が利用される場合が多いが、構造物の応答特性を考慮できる指標として、ここでは平均応答加速度⁴⁾（以下、ASA）を利用する。

図-4 は地震動指標として応答加速度を用いた場合の応答確率の中央関係式の対数標準偏差の大きさを示したものである。対数標準偏差が大きいと推定式の精度が悪く、指標としての説明力が小さい。逆に対数標準偏差が小さいと推定式の精度が良く、指標としての説明力が大きいことを示している。この検討には、地震被害要因で考えている層間変形角などのほか、ブレースの軸力などに関して検討した結果をあわせて示している。同図から、すべての応答パラメタ（屋根面の応答加速度には、応答値の大きい Y 方向を採用）に対し、0.3 秒から 0.6 秒の周期帯で対数標準偏差が小さくなっていることが分かる。この周期帯は建屋の 1 次からほぼ 3 次までの固有周期（表-6）を含み、また、1 次周期より長い周期まで含んでいる。構造物の非線形応答まで考えれば、この周期帯の ASA を震動指標とすることが合理的であると考えることが出来る。従って、今回の対象施設の建屋に対しては、0.3 秒から 0.6 秒の周期帯での ASA を地震動指標とする。

表-5 再調達価格と復旧日数

対象	再調達価格	復旧日数
建屋大破	700	200
建屋中破	100	60
変電設備	20	3
受水槽	10	7
ダクト	10	14
インキタンク	10	21
製造機器(損傷)	250	30
製造機器(故障)	50	15

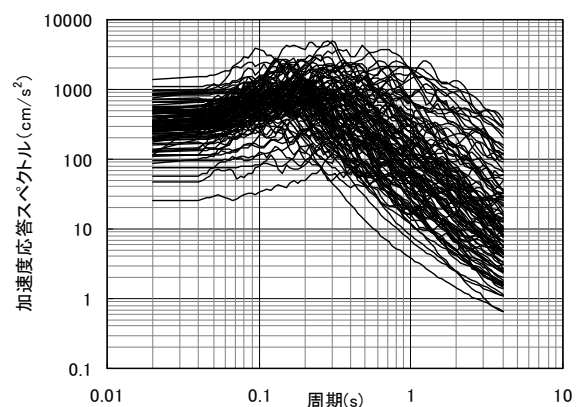


図-3 加速度応答スペクトル

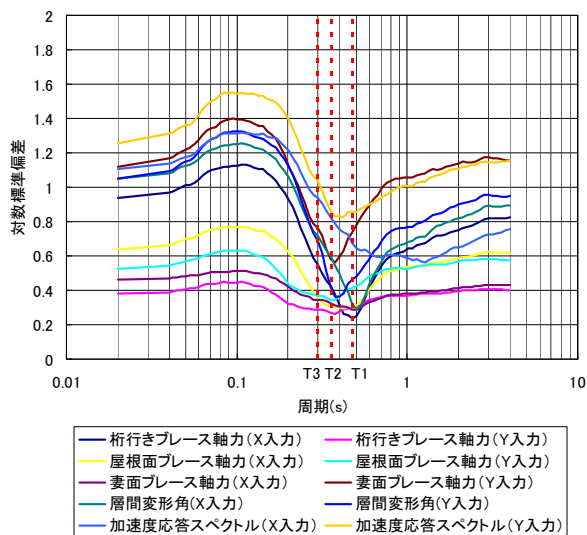


図-4 応答パラメタ推定式の対数標準偏差

表-6 建屋固有周期

次数	周期(秒)
1次(T1)	0.474
2次(T2)	0.362
3次(T3)	0.298

(4) 応答確率の評価

地震動指標として 0.3 秒から 0.6 秒の ASA を採用した応答確率推定式を式 [1] とした場合の係数 a, b および対数標準偏差を表-7 にまとめて示す。また、この地震動指標と応答指標（層間変形角，応答加速度）の関係を図-5 から図-9 に示す。なお，図中には応答確率推定式（赤線）を示している。

$$\ln Y = a \cdot \ln(ASA) + b \quad [1]$$

ここで，Y は応答指標

表-7 応答確率推定式

対象	係数		対数標準偏差
	a	b	
建屋	1.33	-14.19	0.39
変電設備	0.88	1.05	0.32
受水槽	1.14	-2.72	0.88
ダクト	1.36	-2.24	0.82
インキタンク	1.13	-2.06	0.74
製造機器	0.88	1.05	0.32

3.2 損傷確率の評価

前項で，応答解析により，設定した損傷モードに関する応答確率の推定を行った。そこから損傷確率を評価するためには耐力確率を設定する必要がある。耐力確率は対数正規分布するものとし，表-8 のように損傷モードご

とに層間変形角，地表面あるいは屋根面の応答加速度で中央値及び対数標準偏差を設定した。なお，表中の対数標準偏差は，耐力確率の対数標準偏差を 0.3 として応答確率の対数標準偏差と合成したものである。応答確率も対数正規分布であることから，損傷確率も対数正規分布となり，図-10 のように地震動強さに応じた損傷の発生確率を示す地震損傷度曲線を得ることが出来る。

地震損傷度曲線により，地震動指標の大きさに応じた各損傷モードの発生確率を求めることができ，これを ET の分岐確率として用いた。

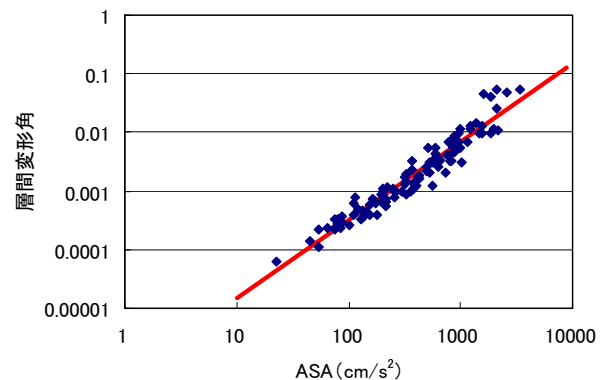


図-5 層間変形角【建屋】

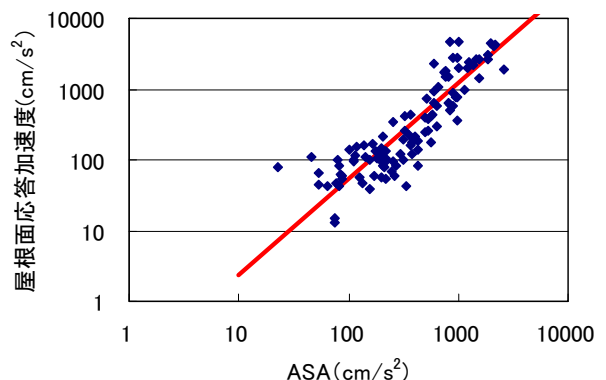


図-6 屋根面応答加速度(T=1.5s)【ダクト】

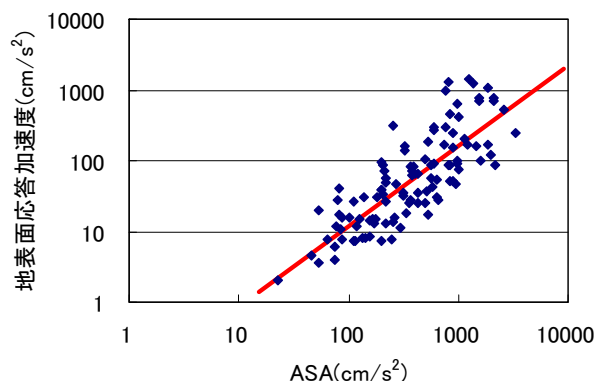


図-7 地表面応答加速度(T=1.5s)【受水槽】

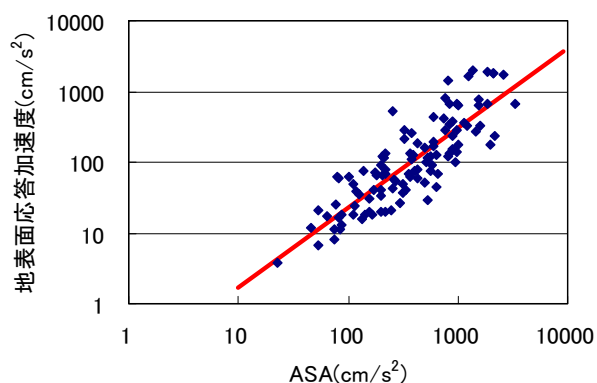


図-8 地表面応答加速度 (T=1.0s) 【インキタンク】

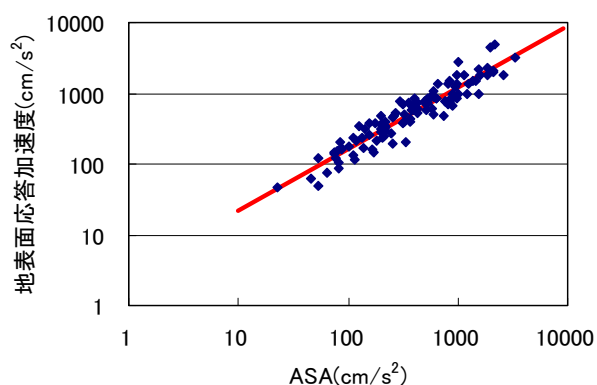


図-9 地表面応答加速度 (T=0.3s)
【変電設備, 製造機器】

表-8 耐力パラメタの中央値と対数標準偏差

損傷モード		中央値	対数標準偏差	対象周期
建屋	大破	層間変形角=1/10	0.49	-
	中破	層間変形角=1/100	0.49	-
変電設備	送電不可	地表面Sa=3000cm/s ²	0.44	0.3
受水槽	供給不可	地表面Sa=3000cm/s ²	0.93	1.5
ダクト	損傷	屋根面Sa=1500cm/s ²	0.87	1.5
インキタンク	損傷	地表面Sa=1400cm/s ²	0.80	1.0
製造機器	損傷	地表面Sa=4000cm/s ²	0.44	0.3
	故障	地表面Sa=2000cm/s ²	0.80	

Sa: 応答加速度

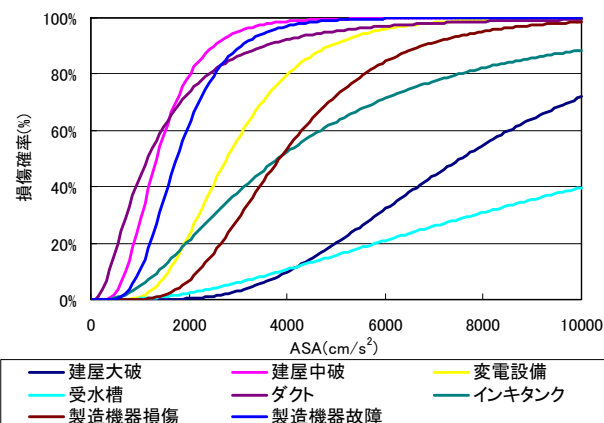


図-10 地震損傷度曲線

これより、本建物のリスクを低減するには、建屋が健全における機能的被害、つまり復旧日数を短縮する対策案が効果的だということが分かる。

次にどの要因に対して対策を講ずればよいか、感度解析を実施して分析する。具体的には、要因ごとに損傷発生 の分岐確率を小さく（表-8 の耐力パラメタの中央値を 10 倍）した場合の年間損失期待値を算出して、リスク低減効果を比較する。現状の年間期待損失は 35.39 百万円で、各要因で実施した結果を表-9 に示す。

例えば、変電設備を対策により損傷しないようにしたとしても年間期待損失が 35.39 百万円から 35.27 百万円になった程度である。よって、この建物では変電設備の耐震性を改善してもほとんどリスク低減にはならないことが分かる。このようにして ET では効果的にリスク低減できる要因を探すことができる。これより、リスク低減効果が最も大きいのはダクトに対して対策することである。

4.2 対策案によるリスクの低減

(1) 対策案

現状評価を参照し、リスクの二側面を考慮して対策案を考える。発生確率を減らす対策として、工場建屋の制振補強 (X, Y 各 4 構面) を対策案 1、損失を減らす対策として、ダクトの落下防止 (天井の落下防止を含む) を対

4. 現状および対策案のリスク評価

4.1 現状評価

図-11 に、ASA に対する現状リスクを示す。物的被害と機能的被害の割合をみると、ASA が小さいところでは機能的被害の方が若干大きく、ASA が 2000cm/s² 付近で大小関係が入れ替わり、物的被害の割合が大きくなるが、その後、ほとんど割合の変化は見られない。ただし、図-11 では、ASA が決まればどれだけの損失額となるか読み取ることにはできるが、これだけではリスクが高いのか低いのか、またどうすれば効率的にリスクが低減できるかが見えてこない。そこで、立地の地震環境（ハザード）を考慮して現状のリスクを評価する。図-12 に本検討に用いた地震ハザード曲線を示す。地震ハザードの地震動指標は、周期帯 0.3 秒から 0.6 秒の ASA とする。

図-11 と図-12 の情報をもとに年間損失期待値を求める。図-13 は、現状での年間損失期待値と各損傷モードの寄与率を示しており、左の棒グラフは、建屋の損傷モードで分類したもので建屋健全での損失が 59%占めている。建屋には損傷がないが、変電設備、受水槽、ダクト、インキタンクあるいは製造機器が損傷するリスクである。また、大破・中破では物的および機能的被害が同じ程度であるが、建屋健全では機能的被害の割合が大きい。

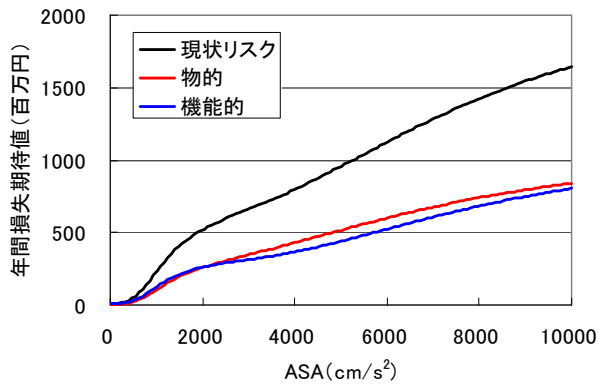


図-11 現状でのリスク評価

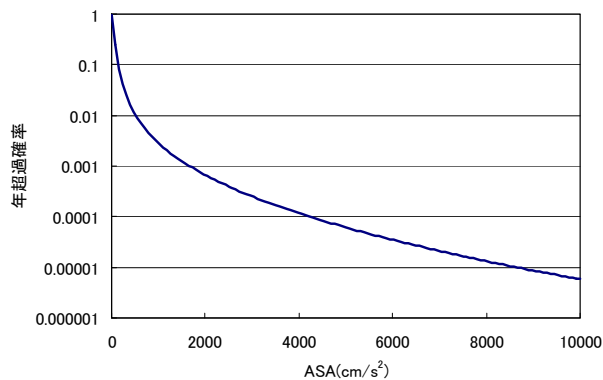


図-12 地震ハザード曲線

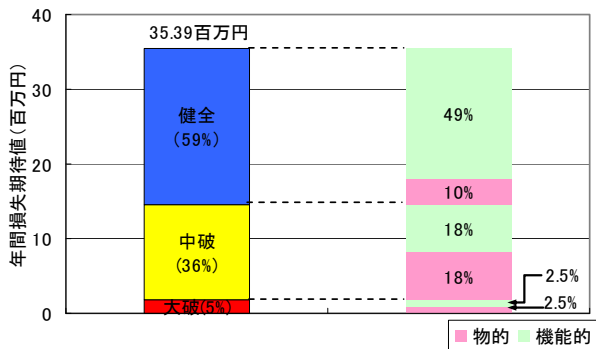


図-13 年間損失期待値と損傷モードの寄与率

表-9 感度解析結果 (単位: 百万円)

	変電設備	受水槽	ダクト	インキ	製造機器
損失期待値	35.27	35.38	31.86	35.27	34.76

策案2とする。後者は、4.1の感度解析結果を踏まえ、対策による損失期待値の低減効果が高いダクト被害の対策を選択したものである。また、対策案1と対策案2の両方を行う対策案3もあわせて評価する。各対策案の費用は、表-10に示す通りとし、対策案3は、対策案1と対策案2の単純累加として60(百万円)とした。

対策案1は、制振ダンパーを設置することにより、応

表-10 対策案費用

	対策案1	対策案2
対策費(百万)	50	10

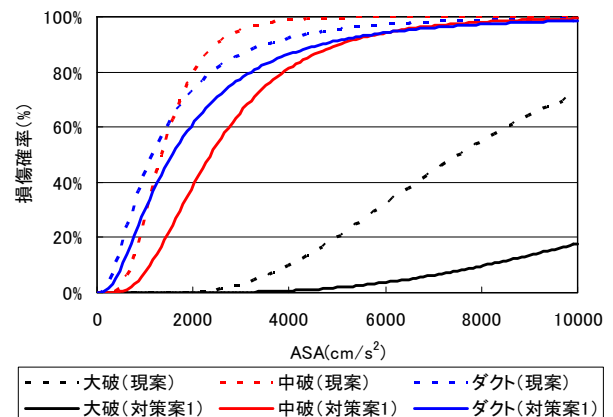


図-14 対策前後の地震損傷曲線

答評価に用いた108波の入力地震動による層間変形角の平均値が、補強前のおよそ3割低減した。この対策により、同じ地震動を受けても、被害の発生確率が低くなる。つまり、被害要因「建屋被害」、「ダクト被害」の地震損傷確率が低減されることになる。図-14に対策前後の地震損傷曲線を示す。

対策案2は、まずダクトの落下対策を行うことにより、表-8の耐力パラメタの中央値を1500cm/s²から3000cm/s²として再評価する。また、天井の落下防止をすることにより、天井の落下に起因するダクトや製造機器の破損の可能性がないとした。ETで考慮していた天井落下を原因とする空間関連被害(表-3上段)の発生確率を0として再評価した。

(2) 対策案の評価

図-15に現状(図-11)および対策案のリスクをASAに対する損失額で示す。また、表-11に現状および対策案の年間損失期待値とリスクの低減効率を示す。リスクの低減効率は、現状と対策案の年間損失期待値の差を対策費で除した値とする。

図-15と表-11より、リスクの低減量は対策案3が最も大きい。対策に費やした費用に対する効率で比較すると、対策案2の効率が良いことになる。ただし、対策案の低減効率だけからでは、実際に対策を行うメリットがあるかどうか分からない。そこで、累積損失期待値を比較する。

図-16に累積損失期待値の比較を示す。対策案はそれぞれ初期費用として対策費が発生する。対策費が大きいほど、初年度の損失期待値が大きくなる。また、リスク低減量が大きいほど、グラフの勾配が小さくなり、対策によるリスク低減効果が発生するまでの期間が短くなる。

対策案1では7年後に、対策案2では3年後に、対策案3では6年後に、現状より累積損失期待値が低くなる。また、対策案1と対策案2の比較をした場合、10年後には、対策案1が対策案2より累積損失期待値が低くなる。これより、供用期間が10年未満の場合は対策案2を、10年以上とする場合は対策案1を実施するのが、効率の良い対策案の選択となる。

このように、対策案を実施するメリットを考える場合は、供用期間を考慮して判断する必要がある。例えば、本事例の場合、3年以下の供用期間を考えている場合には、何も対策しないのが、最もリスクが低いことになる。

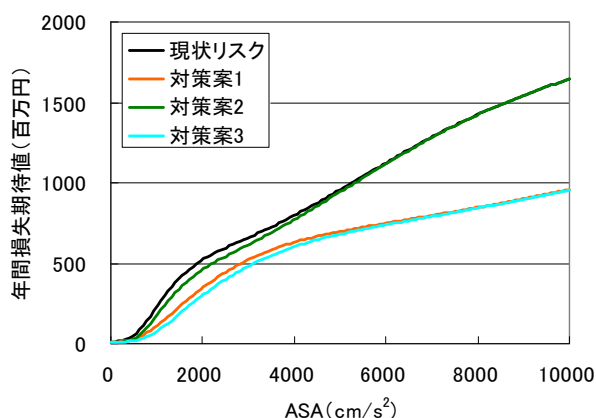


図-15 対策案の比較

表-11 年間損失期待値とリスクの低減効率

	年間損失期待値 (百万円)	対策費 (百万円)	リスクの 低減量	低減 効率
現状	35.4	-	-	-
対策案1	27.8	50	0.79	0.15
対策案2	31.8	10	0.90	0.36
対策案3	25.5	60	0.72	0.17

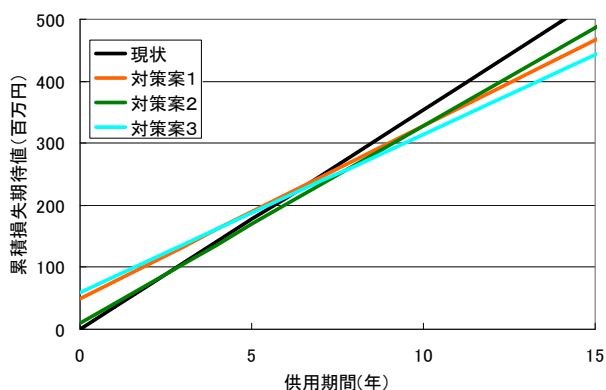


図-16 累積損失期待値の比較

5. おわりに

想定施設を対象に「発生確率を低減させる」、「損失を低減させる」の二側面からの対策案の提案を行い、地

震リスクの低減効果を比較した。複数考えられる対策の中で、効率よくリスクを低減する対策を選択する際、対策効果を定量化することは有用である。設計提案に際して、顧客の意思決定支援にSRM手法を活用することの有用性を示した。

今回は、事例を示すことに重点を置き、できるだけ簡略化したモデルで実施した。ETを簡略化するために建屋小破を考慮せず、またダクトが損傷すると必ず製造機器が損傷あるいは故障になるETとなっている。そのため、地震動指標の小さいところで損失額がほぼゼロ（図-11）になり、また、ダクト被害が発生するレベルでは、損失が大きめにでしてしまう傾向がある。実際にETを組む際には、起こりうる損傷モードを想定できる限り網羅すべきである。

限られたコストで効率よく対策を行うには、効率よくリスクを低減できる要因を特定する必要がある。要因が増え複雑になってくると特定することが難しくなる。そこで、ETを利用し、地震損傷度曲線（図-10）や物的損失金額などをパラメタとした感度解析を実施することにより影響度の高い要因を特定することが可能となる。

様々な低減策について、その費用と効果を並べ、最も効率的なものを選ぶことになる。ここで、効率的というのは必ずしも絶対値だけではない。現実には、費用対効果で判断するか、リスクの低減効率で判断するのかは、主体者（顧客）が持つ価値観に従って選択すべきである。その際に、意思決定の支援として、対策案の相互比較に地震リスクマネジメント手法を活用することは有用である。

謝辞：本研究では、地震波は防災科学技術研究所のK-NETデータを利用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水谷守, 小椋桂治, 中村孝明, 中村正則, 木村雄一: 地震リスクマネジメント (SRM) 手法による地震対策の定量評価 (その1～その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.99-104, 1996年9月
- 2) 独立行政法人防災科学技術研究所: 強震ネットワーク, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 3) 龍神弘明, 水谷守, 嶋登志夫, 小野一明, 棟方章晴: 建物被害推定に関する検討 その1 地震動指標の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) B-2, pp. 333-334, 2007.
- 4) 水谷守, 川瀬喜雄, 宮本英治: 地震動指標の相互関係に関する統計的分析 (第一次), 土木学会地震工学委員会第24回地震工学研究会講演論文集, 第1分冊, pp.217-220, 1997