

製造装置の生産能力を考慮した 地震時復旧曲線の定量的評価

境 茂樹*

東南海・南海地震や首都直下地震の切迫性が騒がれる中、中央省庁や企業では事業継続計画（BCP）の取組みが浸透し、地震時復旧曲線の概念は理解されてきている。しかし、ソフト対策が優先され、肝心のハード対策が遅れているのが現状である。その原因の1つとして、耐震対策の費用対効果が定量的に明示されていないことがあげられる。本論文は、生産施設を対象とし、製造装置の生産能力を考慮した地震時復旧曲線の定量的な評価法について提案し、事例解析によりその適用性を検討したものである。

キーワード：BCP、生産施設、地震リスク評価、復旧曲線、復旧期間、生産能力

1. はじめに

東南海・南海地震や首都直下地震の切迫性が騒がれる中、中央省庁や企業では事業継続計画（BCP）¹⁾の取組みが浸透してきた。しかし、ソフト対策が優先され、肝心のハード対策が遅れているのが現状である。その原因の1つに、耐震対策の費用対効果が定量的に明示されていないことがあげられ、発災直後に事業停止となる可能性やどの程度の事業停止期間となるのかを定量的に推計することが重要である。

地震時の復旧期間の定量評価については、システム信頼性手法をベースに建築設備の機能を対象とした研究^{2),3)}、生産工場の製造機能に着目した研究⁴⁾、さらに道路網⁵⁾などや上水と電力の相互関連を考慮した研究⁶⁾などがある。これらは対象を構成要素が連なるシステムとして捉えると共に、システム性能の復旧期間や復旧過程を評価することを目的としている。特に文献 2)～5)は復旧過程を視覚的に把握する、いわゆる復旧曲線の評価に軸足を置いている。

一方、生産工程の多くは複数の工程を擁し、さらに個々の工程は複数の製造装置から構成されている。これら装置は必ずしも本来持つ100%の性能で稼動しているわけではなく、また受注状況に応じて稼動していない製造装置もある。つまり、個々の製造装置や生産能力には一定の余力があり、発災時にはこの余剰性能が生産能力を補うと共に、システムとしての冗長性を補完することになる。上記の諸研究は、構成要素は稼動するか否かの2対応を前提としたものであり、構成要素が持つ個々の性能を考慮したものではない。そこで本研究は、生産工場のBCPの実務に資することを目的に、製造装置の性能あるいは余力を考慮した地震時復旧曲線を評価する方

法を提案し、事例解析を通じて手法の適用性と余力を付与した際の復旧期間の改善効果について検討を行った。

なお、本論文の内容は文献8)に基づくもので、一部詳細に記述し検討を加えたものである。

2. 構成要素の性能を考慮した復旧曲線

復旧曲線は当初の性能が低下あるいは停止し、その後性能が完全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期間、縦軸は当初の性能を1.0とした性能回復率である。地震被害の発生や復旧期間の不確実性を考慮とすると、図-1に示すように無数の曲線が予想でき、その平均値を復旧曲線として代表する。また、復旧曲線は復旧期間と性能回復率の2軸に描画されるため、それぞれの軸方向の平均値を採ると2種の曲線⁷⁾が求められる。図中太線のT曲線とD曲線がこれらに相当する。D曲線は性能回復率を確率変数とし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、T曲線は復旧日数を確率変数とし横軸に分布する曲線群の平均値を復旧率に対し結んだ曲線である。

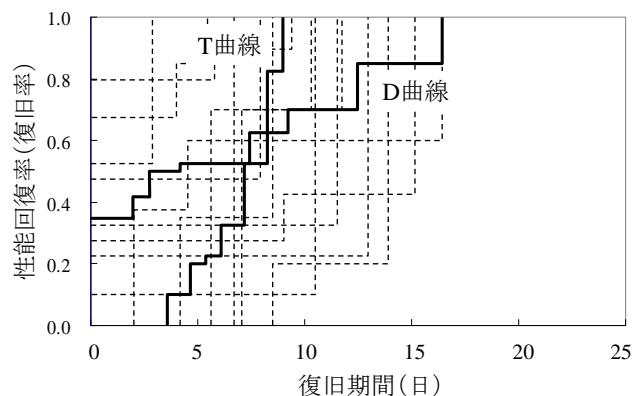


図-1 復旧曲線の概念図

* 技術研究所

本論では、機能が限定されるシステムの復旧過程を把握するのに優れているT曲線を復旧曲線とする。式では以下のようになる。

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} G_T(t|r) dt \quad (1)$$

ここに、 $R_T(r)$ は復旧曲線を表し、 $G_T(t|r)$ は性能を条件とした復旧期間の超過確率関数である。具体的には性能回復率 r で横に切断し、切断面を通過する曲線群の初通過確率分布の超過確率関数になる。以下では $G_T(t|r)$ を求める方法について示す。

n 個の構成要素から成るシステムを想起し、地震による構成要素（以下要素と記す）の被災を確率事象とする。要素 i の持つ性能を r_i とし、被災により性能は 0.0 になるとする。まず並列システムでは、システムの性能は要素の性能の和として得られる。

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

ここに、 R_{sys} はシステムとしての性能の確率変数を表す。 R_i は要素 i の性能の確率変数であり、具体的には図-2 のようになる。図中 p_i は要素の損傷確率を表しフラジリティ・カーブによって求められ、地震の発生を条件としたものである。

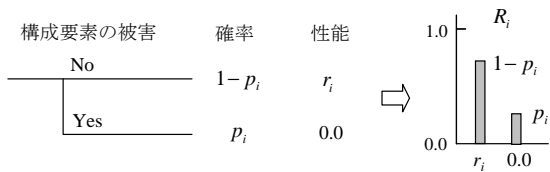


図-2 構成要素 i の損傷確率と性能の確率変数

直列システムでは要素の性能の最小値を採用することになり、以下のようになる。

$$R_{sys} = \min_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

一方、図-3 は直列・並列が混在するシステムの例である。図の例では(2)式、(3)式を参照し、システム性能の確率変数は以下のようになる。

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

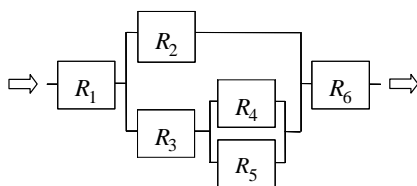


図-3 並列・直列混在システムの例

(2)式は多変数の確率和により求められる。(3)式は要素間の損傷事象の独立を仮定すると、以下のようになる。

$$G_R(r) = \prod_{i=1}^n G_{R_i}(r) \quad (5)$$

ここに、 $G_R(r)$ はシステム性能の超過確率関数、 $G_{R_i}(r)$ は要素 i の性能の超過確率関数である。

次に、要素の復旧期間は軽微や大破などの被災状況に応じて変わる。そこで、被災状況に応じた復旧期間 t を所与とし、 t 以上になる要素の損傷確率（例えば軽微以上の確率）を求める。復旧期間 t を条件として(2)、(3)式を計算する。これを復旧期間の数だけ繰り返し、復旧期間 t を条件としたシステム性能の超過確率関数 $G_R(r|t)$ を求める。文献7)より、復旧過程については以下の関係が導かれている。

$$G_T(t|r) = 1 - G_R(r|t) \quad (6)$$

(6)式より、性能を条件とした復旧期間の超過確率関数 $G_T(t|r)$ が求められ、これを(1)式に適用することで復旧曲線を求めることができる。なお、構成要素は同時に復旧を行い最短で修復が完工するよう配慮されると考える。

3. 簡単なシステムモデルによる計算過程

本提案手法による計算過程を簡単な直列・並列の混在システムを用いて説明する。システムモデルは、図-4 に示すように 2×2 の直列・並列の混在システムとし、各要素の被害モードは大破のみとし、大破に対するフラジリティを対数正規分布で与え、その耐力中央値と複合偏差²⁾、ならびに各要素の生産能力を表-1 のように設定する。また、どの製造装置も復旧に要する期間は 30 日とする。

計算過程を以下に示す。今、作用地震動が 500 cm/s^2 とすると、各要素の損傷確率は表-2 のようになる。また、性能は表-3 となる。各工程における要素の損傷事象の発生確率は表-4 となり、これより、各工程の性能の発生確率と超過確率、A と B の工程を直列システムとした性能の超過確率、性能を条件とした復旧期間の超過確率、および復旧期間は、表-5 のように左から順に求められる。そして、性能に対する復旧期間を順に並べて復旧曲線を図5 のように描くことができる。

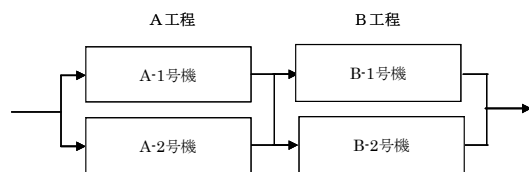


図-4 2×2 のシステムモデル

表-1 要素のフラジリティと性能

製造装置	耐力(中央値) (cm/s ²)	複合偏差	生産能力 (%)
① A-1号機	400	0.4	40
② A-2号機	600	0.4	60
③ B-1号機	300	0.4	50
④ B-2号機	700	0.4	50

表-2 要素の損傷確率 表-3 要素の生産能力 (性能)

	A工程	B工程
1号機	0.7115	0.8992
2号機	0.3243	0.2001

	A工程	B工程
1号機	0.4	0.5
2号機	0.6	0.5

表-4 各工程における事象の発生確率

	A	B
全て健全	0.19493	0.08062
1号機損傷	0.48081	0.71926
2号機損傷	0.09354	0.02017
1, 2号機損傷	0.23072	0.17995
検算	1.00000	1.00000

表-5 性能と復旧期間の超過確率と期待復旧期間の計算

性能	発生確率		工程の超過確率		システム性能の超過確率		復旧期間の超過確率	期待復旧期間
	A	B	G _A (rt)	G _B (rt)	G(r,t)	G(tr)	RC(日)	
1.00	0.19493	0.08062	0.19493	0.08062	0.01572	0.98428	29.529	
0.60	0.09354		0.28847	0.08062	0.02326	0.97674	29.302	
0.50		0.73943	0.28847	0.82005	0.23656	0.76344	22.903	
0.40	0.48081		0.76928	0.82005	0.63084	0.36916	11.075	
0.00	0.23072	0.17995	1.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.000	

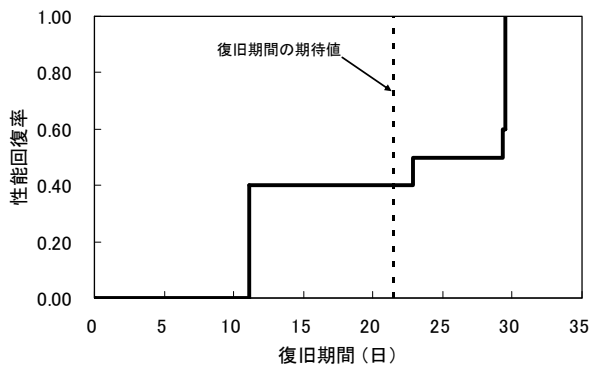


図-5 システムの復旧曲線

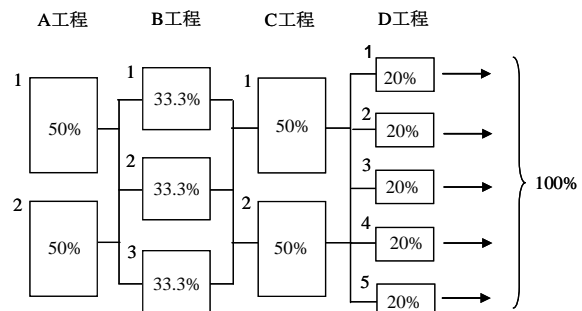
この計算例では、性能が40%まで回復するのに11日を要し、完全復旧までに、最大である30日に漸近している。また、システムの復旧期間の期待値は、復旧曲線の左側の面積で表され、この例では21.4日(図の破線)となる。

4. 事例解析による適用性の検討

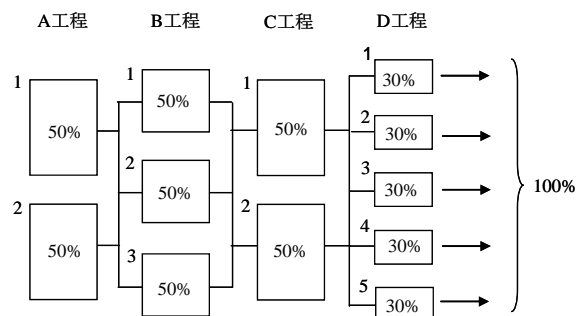
4.1 対象施設と生産工程のシステムモデル

静岡県浜松市に位置した平屋建ての生産工場を対象とし、製造装置の生産能力を考慮した地震時復旧曲線を評価する。図-6は、生産工程のシステムをモデル化したもので、工程はA~Dの4工程で構成されるものとする。図中の口は製造装置を表し、数値は各工程のシステム的能力を100%とした際の装置の生産能力(性能)を表す。図-6の(1)のケースでは、どの工程も装置の性能の和は100%で余剰性能はないが、(2)のケースでは、BとDの工程はどちらも150%であり余剰性能を持っている。

また、各生産装置は工程毎に全て同じ仕様とし、被害モードとして小破、大破をそれぞれ考慮する。各装置のフラジリティは装置の寸法や重心高さから求まる転倒限界加速度⁹⁾を参考として設定し、最大加速度に換算した装置の耐力ならびに被害モードに対応した復旧日数を表-6に示す。表中の複合偏差は装置の耐震耐力、作用地震動等の不確実性を対数標準偏差で示したものである。



(1) 余剰性能が無い場合 (現状のシステム)



(2) 余剰性能が有る場合 (BとD工程)

図-6 生産工程のシステムモデル

表-6 要素のフラジリティと復旧期間

工程	被害モード	耐力中央値 (cm/sec ²)	複合偏差	復旧期間 (日)
A	小破	980	0.4	1
	大破	1120	0.4	30
B	小破	420	0.4	1
	大破	550	0.4	30
C	小破	700	0.4	1
	大破	850	0.4	30
D	小破	400	0.4	1
	大破	450	0.4	30

本解析では、余剰性能のない図-6の(1)のケースを基本とし、余剰性能の地震時復旧曲線に与える効果を検討する。

4.2 シナリオ地震による復旧曲線

図-7は対象サイトと想定地震の震源を図示したもので、想定地震として、南海トラフ全域 (M8.6)、想定東海 (M8.0)、東海地域 (M7.2) を取り上げ、余剰性能のないケースについて復旧曲線を評価する。それらのシナリオ地震に対するサイトの地震動は、安中¹⁰⁾の距離減衰式を使い、工学的基盤最大加速度としてそれぞれ 478.4, 393.5, 317.0 cm/s² となる。また、ここでは表層地盤の増幅は考慮していない。

それぞれの想定地震による復旧曲線を図-8にまとめて示す。南海トラフ全域 (M8.6) では、作用地震動 (478.4 cm/s²) に比べD工程の装置が脆弱であり (表-6参照)、完全復旧は最大の復旧期間である30日に漸近している。また、それぞれの性能の回復過程は比較的類似している。

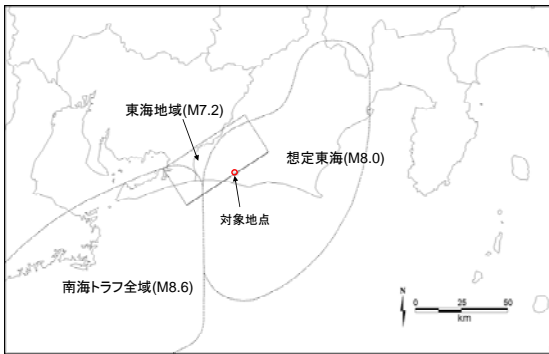


図-7 対象サイトと想定地震の震源

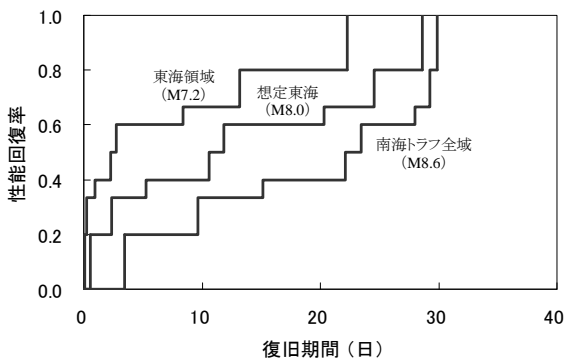


図-8 シナリオ地震による復旧曲線 (余剰性能なし)

4.3 余剰性能の復旧曲線に与える影響

余剰性能の復旧曲線に与える効果を検討する。なお、以下はすべて南海トラフ全域の地震に対する検討である。

まず、余剰性能の有無が復旧曲線に与える効果を検討するため、図-6に示す2つのケース (余剰性能無し、

BとD工程の生産能力 150%) について復旧曲線を評価し、これを図-9に比較して示す。その結果、復旧曲線は余剰性能有りが余剰性能無しに比べて性能回復率が高まり、復旧期間の期待値 (図中の破線) は 19.295 日から 14.575 日となり、余剰性能の付加は復旧期間を短縮する効果があることが示された。これは、余剰性能による生産システムの冗長性を定量的に評価したことによる。

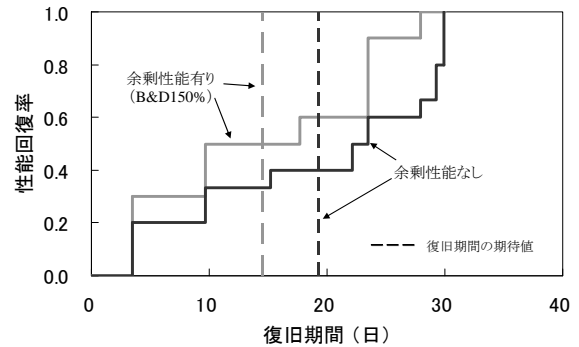


図-9 余剰性能の有無による復旧曲線

4.4 余剰性能と耐震性能の復旧曲線に与える影響

次に、余剰性能の復旧曲線に与える効果を、製造装置の耐震性能と合わせて検討する。

図-6(1)の余剰性能無しのケースに対して、A、BおよびDのいずれかの工程の生産能力を150%に高めるケース、BとDの両方を150%に高めるケースについて、それぞれ比較して図-10に示す。その結果、元々耐震性の高い装置を有するA工程の余剰性能を高めても復旧曲線に与える効果は小さいのに対し、耐震性能の最も低いD工程に対し余剰性能を付加することは復旧期間を短縮する効果大きい。このことから余剰性能は耐震性の低い工程に対して付加することがより効果的であることが示された。

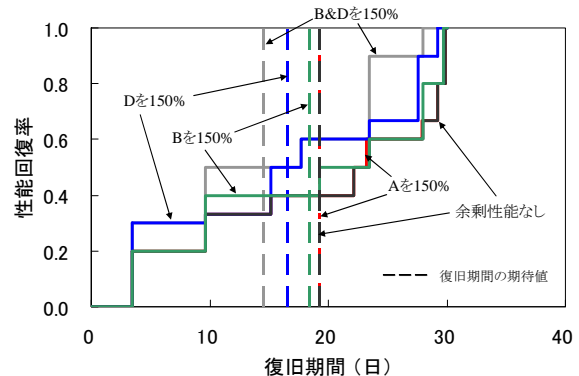


図-10 余剰性能を与える工程の耐震性の違いによる復旧曲線

さらに、耐震補強による効果を検討するため、D工程の製造装置の脚部に固定金物を用いた補強を行い、フラジリティの耐力中央値を1.5倍に高めるケースと、DおよびBとDの工程の生産能力を150%に向上させるケースの復旧曲線を比較検討する。結果を図-11に示す。図より、D工程の耐震補強を施すケースと生産能力を150%に向上させるケースを比較すると、耐震補強のケースは、余剰性能の付加より復旧期間の短縮効果が大きいことが示され。さらに耐震補強のケースは、BとD両工程の性能150%とするケースと同等以上の効果が見られた。なお、耐震補強策として、D工程のエリアに免震床等を採用し作用地震動を1/1.5にする場合も、耐力を1.5倍にするものと同様の結果となる。

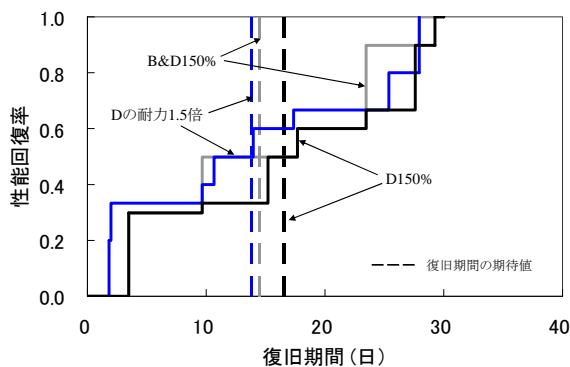


図-11 余剰性能付加と耐震補強による復旧曲線の比較

4.5 ボトルネック工程の明示

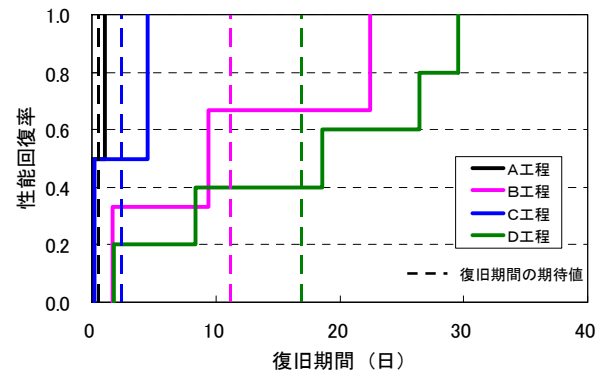
上記では、提案手法により生産ラインの工程における製造装置の余剰性能および耐震性が復旧曲線に与える効果を示した。しかし、これらの復旧曲線はシステム全体の復旧過程を示したものであり、この復旧曲線のみから、どの工程がボトルネックとなっているかを一目で判断することはできない。

そこで、システム全体の復旧曲線を算出する計算過程の途中で得られる工程毎の性能に対する超過確率から、各工程の復旧期間の超過確率を計算し、これを用いて各工程の復旧曲線を算出して、ボトルネックとなる工程を明示する。

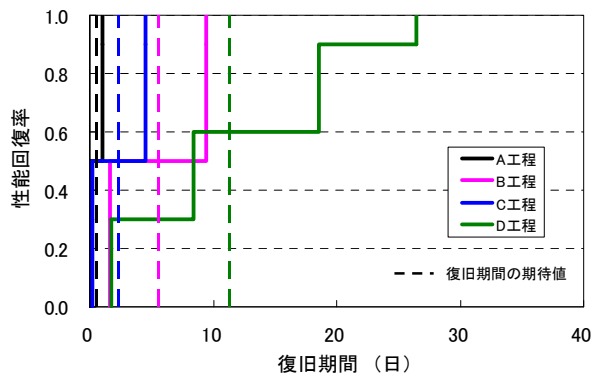
図-12(1)には、図-6(1)の余剰性能無しの場合について、図-12(2)には、図-6(2)の余剰能力有り(BとDの工程150%)のケースに対する工程毎の復旧曲線を示す。

この図から、D工程が完全復旧までに最大の日数を要し、復旧期間の期待値も最も大きく、次いでB工程が大きいことが分かる。BとD工程に余剰性能を付加すると、AとC工程には及ばないが、現状のシステムよりも復旧期間が短縮され、改善されていることが分かる。

このように、工程毎の復旧曲線の算出により現状のシステムのボトルネック工程を把握することができ、どの工程に対策をとるべきか容易に判断することができる。



(1) 余剰性能無し



(2) 余剰性能有り (BとD工程を性能150%)

図-12 工程毎の復旧曲線

5. まとめ

生産施設を対象として、製造工程の余剰性能を考慮した地震時復旧曲線を評価する方法を提案し、事例解析によりその適用性を検討した。

その結果、提案手法により余剰性能の復旧曲線に与える効果を定量的に評価することができ、余剰性能は生産システムの早期復旧に貢献することが分かった。また、事例解析から以下のことが示された。

- ① 余剰性能の付加は、耐震性能の低い工程に与えるほど効果的である。
- ② 耐震性能を1.5倍に向上させることは、余剰性能を1.5倍にするよりも復旧期間の短縮に与える効果は大きい。
- ③ 工程毎に復旧曲線を算出し比較することで、ボトルネックとなる工程を示すことができる。

なお、①と②は生産システムの構成、工程内の装置数や現状の耐震性能、さらに装置間の損傷相関などにも依

存するものと考えられ、一般性のある結論とは必ずしも言えない。

本提案手法により、耐震性能と余剰性能の効果を同時に検討することができ、各対策の費用対効果を比較しながら最適な耐震対策を選択することができ、BCPの実務において非常に有益である。また、本手法は水道や道路ネットワーク、港湾や空港等の荷役システムなどにも応用が可能であり、利用範囲は広いと考えられる。

課題としては、構成要素の損傷事象を独立としており、この点実状を反映していない。相関を考慮した評価は今後の課題である。

なお、本研究は平成 21 年度に東京都市大学総合研究所にて実施された重点推進研究「地震時システムリスク研究会」の成果を活用してとりまとめたものであり、ご指導いただいた東京都市大学吉川教授、中村客員教授をはじめ、研究会の関係者に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 内閣府：中央省庁業務継続ガイドライン第一版，2007.
- 2) 中村孝明，遠藤透：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，建築学会総合論文誌，No.7 都市・建築に関わる安全・安心のフロンティア，pp.87-92. 2009.1
- 3) 境茂樹，加藤貴司：BCP を支援する建築機能の地震リスク評価手法の研究，建築学会大会，構造-I，pp.19-20，2009.8

- 4) 中村孝明：BCP 策定支援情報としての操業停止評価と財務影響分析，土木学会第 8 回地震災害マネジメントセミナー講演集，2007.3.
- 5) 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.2，2009.6
- 6) Shinozuka M, & et al. : 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.
- 7) 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
- 8) 中村孝明，境茂樹，吉川弘道：製造装置の余剰性能を考慮した生産施設の地震時復旧曲線，第 13 回日本地震工学シンポジウム，pp.591-596，2010.
- 9) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，2003 年第 2 版
- 10) 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，pp161-164，1997.

Study on Seismic Recovery Curves for Manufacturing Process Considering Surplus Performance of Production Devices

Shigeki SAKAI

The manufacturing process is not usually in the state of full operation. There also are some production devices that do not work according to an order situation. Therefore, the manufacturing process generally has surplus performance. When an earthquake disaster occurs, surplus performance contributes to the improvement of recovery curves. In this paper, an evaluation method of the recovery curves of manufacturing processes due to an earthquake was proposed considering a surplus performance of production devices. Case studies were carried out and the applicability of the method was discussed.