

建築機能を考慮した地震リスク評価手法による BCPの復旧曲線の定量化に関する研究

境 茂樹*・加藤貴司*

東南海・南海地震や首都直下地震等が切迫する中、既存不適格建物の耐震化は不十分な状況である。中央官庁や企業では事業継続計画（BCP）の取組みが浸透し、その概念は理解されてきたものの、耐震化の費用対効果を定量的に明示する手法が確立していないため、ハード対策の立ち遅れが見られる。本論文は、建物機能を考慮した地震リスク評価手法によりBCPの復旧曲線の定量化を試み、東京のオフィスビルに適用して、耐震化の費用対効果の明示を検討したものである。

キーワード：BCP，地震リスク評価，復旧曲線，機能停止期間，機能維持率

1. はじめに

東南海・南海地震や首都直下地震等が切迫する中、既存不適格建物の耐震化はまだ不十分な状況である。一方、中央官庁や企業では事業継続計画（BCP）の取組みが浸透し、BCPの概念は理解されてきたものの、耐震化の費用対効果が不明なため、実質的に有効なハード対策が立ち遅れているケースが多く見られる。

本論文は、建物機能を考慮した地震リスク評価手法によりBCPの復旧曲線の定量化を試み、東京に建つオフィスビルに適用して、耐震化の費用対効果の明示を検討したものである。

BCPにおいては、地震直後の機能維持の確保と復旧時間の短縮が求められる。その実現のためには、災害抵抗性と災害対応力の2つが重要であり、ハード対策は、その両方の力に関係している（図-1）。

BCPを支援する地震リスク評価手法として、中村らは、建築の諸機能を直列あるいは並列システムとしてモデル化し、信頼性理論を取入れた定量評価を行っている^{1),2)}。

本研究では、中村らの考え方を参考とし、建築機能をその構成要素の直列システムにモデル化し（図-2）、BCPの復旧曲線を機能維持率と復旧時間によって表し、建物の耐震性能の違いによる復旧曲線と間接被害（復旧曲線に囲まれた面積）の変化を検討した。

2. イベントツリーによる地震リスク評価手法の概要

復旧曲線を形成する機能維持率と復旧時間は、イベントツリーを用いた解析で算出することができる。

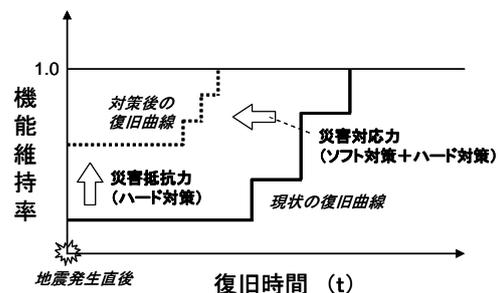


図-1 復旧曲線の概念図



図-2 建物機能の直列システムモデル

例えば、簡単なケースとして図-3のように、ある機能がA（躯体）、B（仕上げ）、C（設備）の3要素から構成され、被害モードを無被害・大破の2つのモード（ただし、Aが大破の場合はB、Cも大破）と仮定する。

この場合、各イベントの発生確率を P_k 、修復コストを C_k 、復旧期間を T_k 、機能影響度係数を F_k とすると、図-4に示すように、あるイベントの修復コストは各構成要素の修復コストの合算で求まる一方、復旧期間および

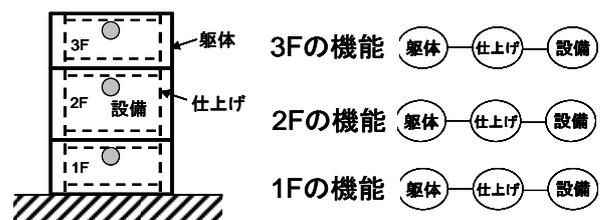


図-3 機能が3要素から構成されると仮定した建物

* 技術研究所

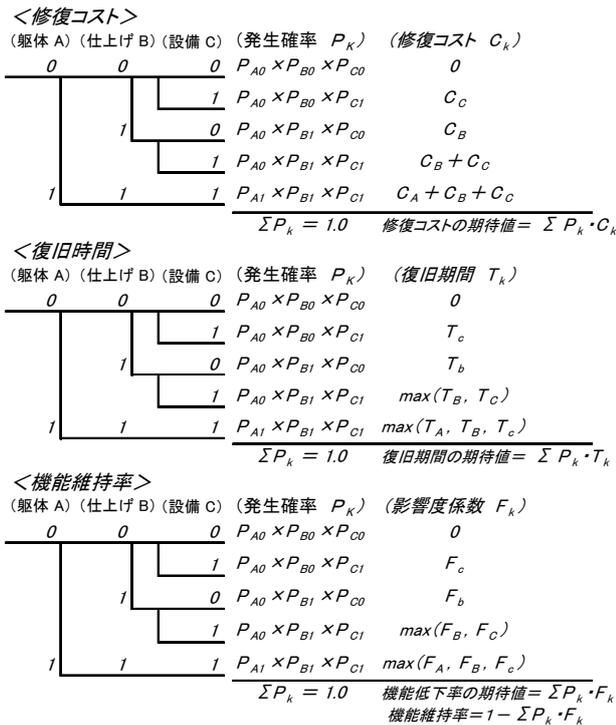


図-4 3要素で構成される機能のイベントツリーと修復コスト・復旧期間・機能維持率

機能低下率は、複数の構成要素の同時復旧を仮定すると、各構成要素の最大値 (MAX 演算) で決定される。

建物の機能が各階ごとと並列にあるとすれば、修復コスト DC 、復旧期間 RT 、機能維持率 FC 、および間接被害 IC の期待値は、それぞれ以下の式で求められる。

$$DC = \sum_j \left(\sum_i P_{ij} \cdot C_{ij} \right) \quad (1)$$

$$RT = \sum_j \left(\sum_i P_{ij} \cdot T_{ij} \right) \quad (2)$$

$$FC = 1 - \sum_j \left(\frac{1}{m} \sum_i P_{ij} \cdot F_{ij} \right) \quad (3)$$

$$IC = \left\{ \sum_j \left(\frac{1}{m} \sum_i P_{ij} \cdot F_{ij} \right) \cdot \left(\sum_i P_{ij} \cdot T_{ij} \right) \right\} \cdot SA \quad (4)$$

ここで、 P_{ij} は発生確率、 C_{ij} : 修復コスト、 T_{ij} : 復旧期間、 F_{ij} : 機能影響度係数、 SA : 1日の売上又は利益、 m : 建物の階数

なお、実際には機能維持に外部のライフラインの供給停止が問題となるが、ここでは企業者側の対策効果に着目し、ライフラインの供給停止は考慮しない。

3. 9階建てオフィスビルへの適用事例

3.1 適用条件

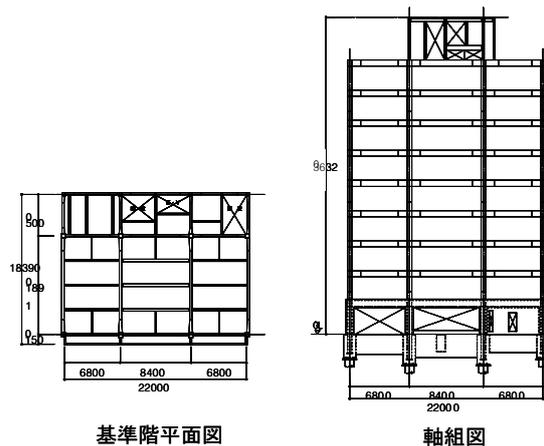


図-5 検討対象とした建物の平面図と軸組図

上記の建物機能を考慮した地震リスク評価を、東京に建つ旧耐震基準の9階建S造建物に適用した³⁾。対象建物の基準階平面図と軸組図を図-5に示す。

建築設備の機能としては、電気、衛生、空調、通信、輸送、消防などが挙げられる。業種によって重要となる機能は当然異なり、例えば情報産業であれば電気・通信設備機能が、ホテルや病院であれば、電気、衛生設備機能が特に重要になると考えられる。ここでは、一般的なオフィスとして、電気、衛生の2つの機能に着目した検討を行った。

図-6に、構造部材、内外装材を含む、電気と衛生設備機能の直列システムを構成する要素を示す。

また、図-7に各機能の構成要素の配置の模式図を示す。

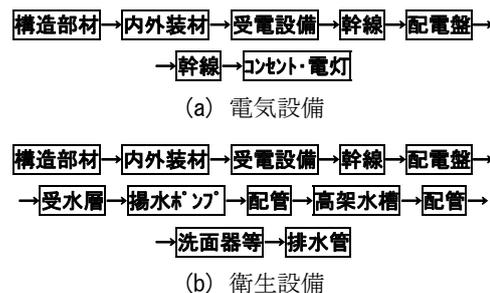


図-6 機能構成要素の直列システム

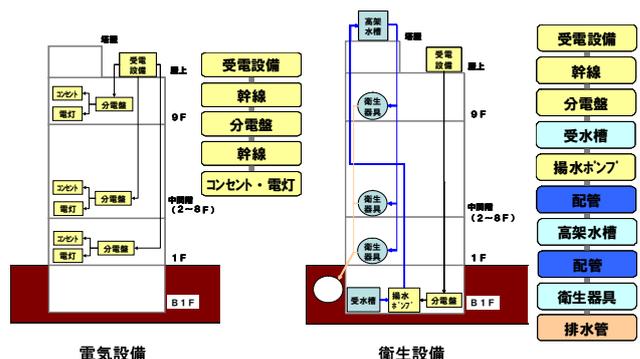


図-7 電機設備と衛生設備の配置図

各構成要素の被害モードは図-8のように設定し、この組合せによるイベントツリー解析を行った。なお、構造部材が倒壊の場合は、内外装材は倒壊、各設備は大破として分岐を削減した。

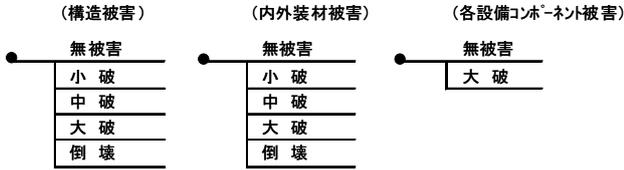


図-8 各部材の被害モードとイベントツリーの分岐

本検討では、一様ハザードスペクトル（東京2種地盤で再現期間500年^{4),5)}を入力とし、多質点系のスペクトルモーダルアナリシス（SRSS法⁶⁾により、各階の応答加速度、応答変位（層間変形角）を算出し、各部材の損傷を評価した。各部材の損傷評価は、HAZUS9.9⁷⁾を参考とし、構造部材と内外装材は層間変形角依存型、設備機器のうち配管系は層間変形角依存型、ポンプなどの重量設備は応答加速度依存型として評価した。

各部材の損傷確率は対数正規分布に従うとして、確率密度関数の中央値と対数標準偏差を設定した。 fragility curves are shown in Figure 9 and Figure 10.

対象建物の耐震化の概要は文献3)に記載しているが、対象建物は旧耐震基準の建物で、その建物を設備改修（屋上の受電設備と高架水槽のみ改修し配管類の改修はなし）、制震改修（減衰10%、15%、20%付加）、免震改修（1階床下免震）の6ケースの改修方法として検討した。

3.2 適用結果

再現期間500年の一様ハザードスペクトルに対する、電気および衛生設備機能の復旧曲線の結果を図-11、12に示す。どちらの機能の場合も構造部材・内外装材による機能停止が顕著となるため、設備要素のみによる復旧曲線の結果も合わせて示した。

その結果、建物全体の復旧曲線をみると、設備改修のケースではほとんどその効果が認められず、また制震・免震改修は、電気設備機能に対しては復旧期間の短縮と機能低下の防止効果は大きいですが、衛生設備機能に対しては電気設備ほどの効果は認められない。さらに、構造部材・内外装材を除く設備の構成要素のみを考慮した復旧曲線をみると、電気設備の場合は各階の機能が段階的に回復するのに対して、衛生設備の場合は回復の立ち上が

りが急である。これは、電気設備の配管系が独立方式であるのに対して、衛生設備の配管系は各階共通のため、ある箇所の損傷が全体の機能低下に影響すること、地下の受水槽、揚水ポンプは、耐震性能向上の影響を受けないことが理由と考えられる。

図-13には、復旧曲線の面積から算定される間接被害の既存建物に対する比率を示す。これも復旧曲線の傾向と同様に、間接被害に対する耐震化の効果は、衛生設備機能に比べて電気設備機能に対する効果が大きい結果となった。

表-1 構造部材と内外装材の設定パラメータ

被害要因	被害形態	中央値	単位	対数標準偏差	復旧期間(日)	機能影響度係数	復旧費用比率*	応答の評価位置
構造部材	小破	0.0025	変形角	0.4	1	0.0	0.12	最大の階
	中破	0.005	変形角	0.4	30	0.5	0.25	
	大破	0.015	変形角	0.4	300	1.0	0.40	
	倒壊	0.04	変形角	0.4	800	1.0	1.00	
内外装材	小破	0.004	変形角	0.5	1	0.0	0.12	最大の階
	中破	0.008	変形角	0.5	3	0.5	0.25	
	大破	0.025	変形角	0.5	75	1.0	0.40	
	倒壊	0.05	変形角	0.5	200	1.0	1.00	

*復旧費用比率は倒壊を1.0とした場合のコスト比率

表-2 電気設備、衛生設備に関する設定パラメータ

<電気設備ラインの構成要素>								
被害要因	被害形態	中央値	単位	対数標準偏差	復旧期間(日)	機能影響度係数	復旧費用比率*	応答の評価位置
受電設備	大破	1.0	震度	0.6	90	1.0	0.25	屋上
配電盤	大破	0.025	変形角	0.6	15	1.0	0.3	各階
幹線	大破	0.025	変形角	0.6	15	1.0	0.2	各階
コンセント・電灯	大破	0.025	変形角	0.6	30	1.0	0.25	各階
<衛生設備ラインの構成要素(ラインに繋がる電気設備は上記と同じ)>								
受水槽	大破	0.600	震度	0.6	30	1.0	0.04	B1F
揚水ポンプ	大破	0.400	震度	0.6	90	1.0	0.14	B1F
高架水槽	大破	1.000	震度	0.6	90	1.0	0.04	屋上
衛生器具	大破	0.025	変形角	0.6	15	1.0	0.54	各階
配管	大破	0.025	変形角	0.6	15	1.0	0.24	最大の階

*復旧費用比率は電気設備全体あるいは衛生設備全体を1.0としたコスト比率を示す。

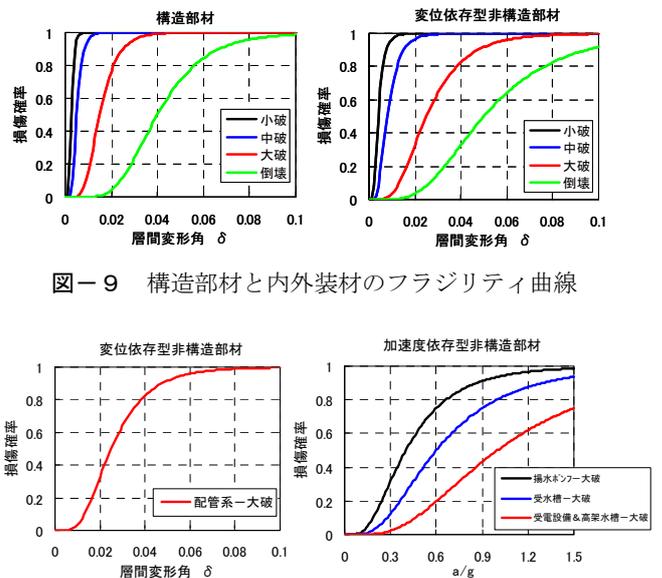


図-9 構造部材と内外装材の fragility curves

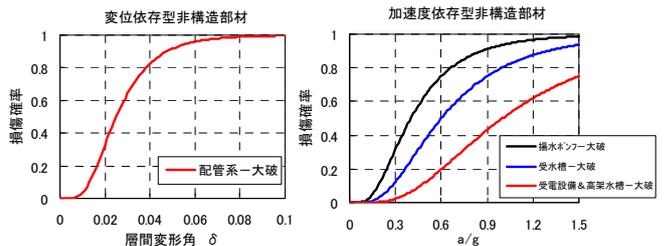


図-10 設備機器の fragility curves

各ケースの耐震化の効果を、イニシャルコストを含むトータルコストで比較した。その結果を図-14 に示す。

設備補強の場合は、トータルコストで見てもあまり効果が認められない。一方、制震改修は減衰を大きくすると、改修に要するイニシャルコストの増加に比べて修復費用と間接被害の低減が大きくなっている。また、免震改修は直接被害と間接被害は最小になるものの、トータルコストで見ると、制震改修（10%減衰）とはほぼ同様の結果となった。

4. まとめ

建物機能を考慮した地震リスク評価法によりBCPの復旧曲線および間接被害を定量化し、東京に建つオフィスビルに適用して耐震化の費用対効果を検討した。その結果、制震改修、免震改修は修復費用および間接被害の低減に有効であり、イニシャルコストを含むトータルコストで見た場合、減衰 20%を付加した制震改修が最も効果的であることが示された。

機能影響度係数等の諸パラメータの設定は今後の課題

であり、実被害からその実態を調査する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 星谷, 中村: 構造物の地震リスクマネジメント, 山海堂
- 2) 中村, 遠藤: BCP への貢献を目的とした建物機能確保に関する研究, 日本建築学会総合論文誌, pp. 87-92, 2009. 1
- 3) 境, 加藤: 建築設備の機能停止を考慮したオフィスビルの地震リスク評価事例, pp. 310-313, 日本地震工学会大会梗概集, 2008
- 4) 福島: 建築・土木構造物の要求性能と地震荷重, シンポジウム資料, pp. 33-40, 2006. 10
- 5) 境, 井上: 一様ハザードスペクトルに基づく鉄骨造建物の地震リスク評価, 日本建築学会大会梗概集, pp. 71-72, 2007
- 6) 岡野, 小鹿, 吉川: 高次モードを考慮した等価線形化法によるせん断型モデルの応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 591 号, pp. 113-121, 2005
- 7) Federal Emergency Management Agency, HAZUS99 technical manual, Washington, D.C., NY, 1999

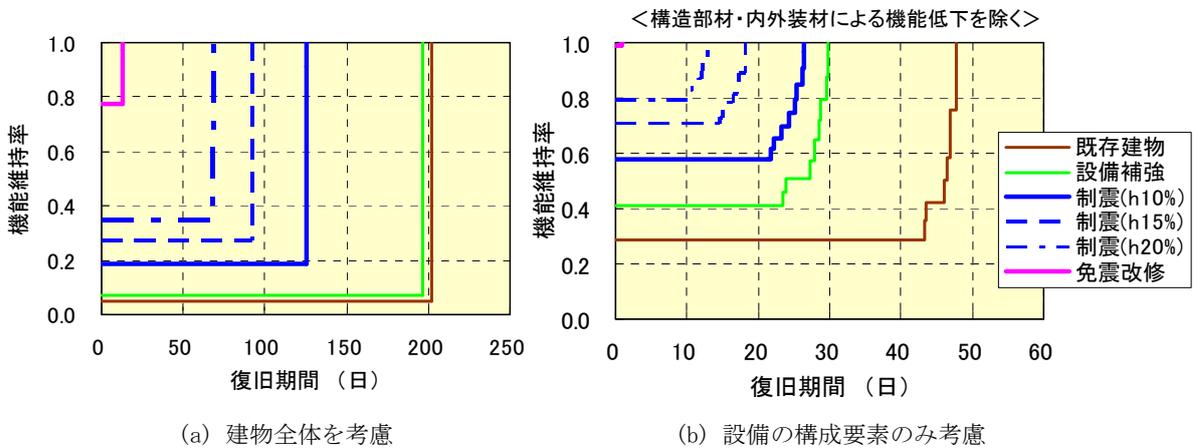


図-11 電気設備の復旧曲線

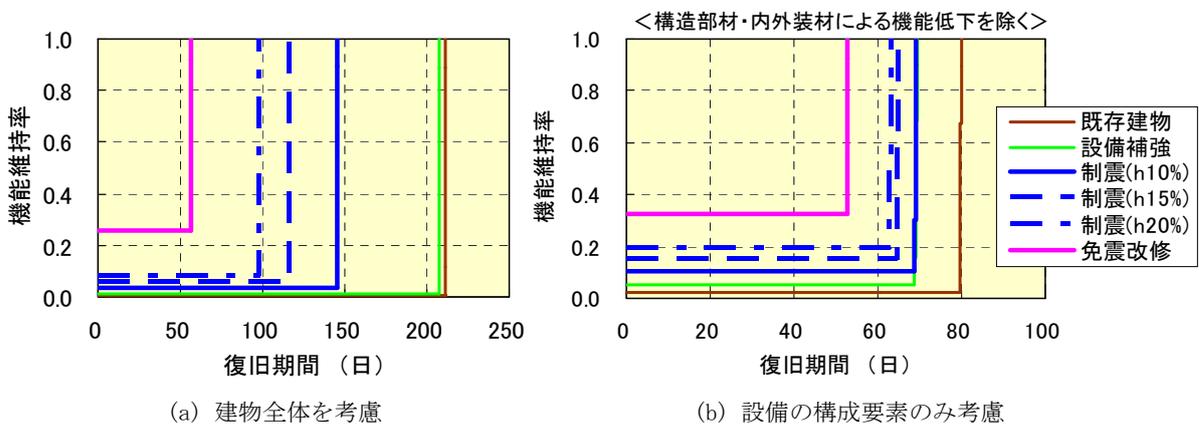


図-12 衛生設備の復旧曲線

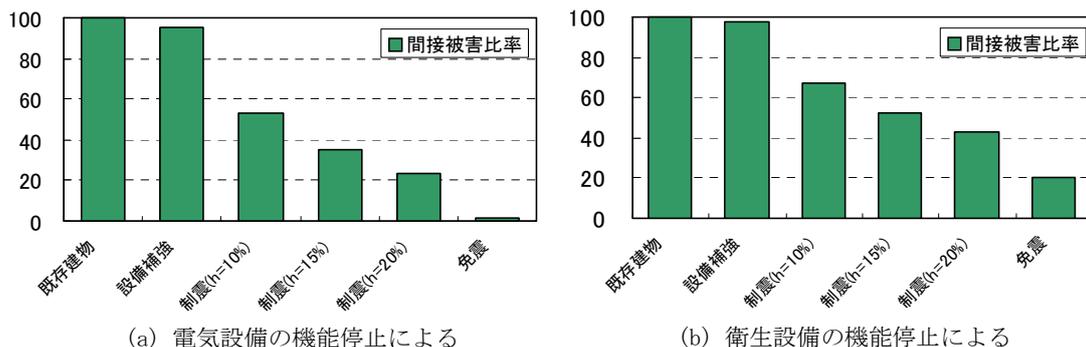


図-13 耐震化の違いによる間接被害の比較

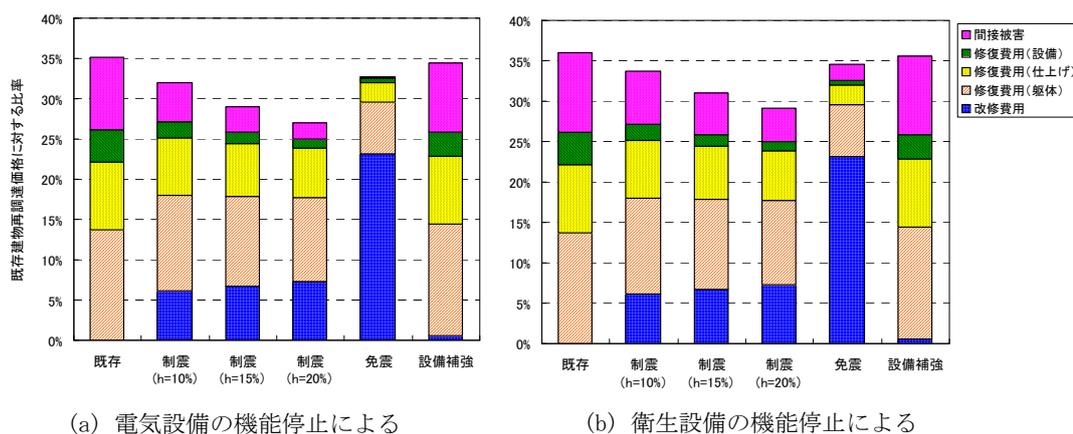


図-14 耐震化の違いによるトータルコストの比較

A Study on Quantification of Recovery Curve in Business Continuity Plan by Seismic Risk Assessment Considering a Functional Stop of Building Equipments

Shigeki SAKAI, Takashi KATO

Although the occurrence of the next Tonankai-Nankai Earthquake, the North Tokyo Bay Earthquake, and so on is imminent, the seismic reinforcement of the existing disqualified buildings is insufficient. The concept of business continuity plan (BCP) has been understood by the government authorities and companies, but the method to quantitatively specify the cost effectiveness of the seismic reinforcement of structures has not been established, and the delay of hard measures is seen.

This paper shows the quantification of recovery curves of BCP by the seismic risk assessment technique considering a functional stop of building equipments and the cost effectiveness of seismic reinforcement of a building, by applying it to an office building in Tokyo as an example.

As results, the seismic reinforcement of a building has an effect to shorten the recovery time and to reduce the functional loss of the building, and the effectiveness in the reduction of the economic loss is shown. Also, as for the base isolation retrofit, the initial cost is large but the repair cost and indirect damage is the smallest. It is found that the case to which the damping system is added (damping factor of 20%) is most effective.