

〈一般研究課題〉 超高層住宅における災害時の居住継続性の確保と
日常生活への早期復帰 (Life Continuity) を
目的とした建物管理支援システムの開発



助成研究者 豊橋技術科学大学 増田 幸宏

超高層住宅における災害時の居住継続性の確保と 日常生活への早期復帰 (Life Continuity) を 目的とした建物管理支援システムの開発

増田 幸宏
(豊橋技術科学大学)

Support systems to maintain Building and Life Function Continuity in the event of a disaster to realize resilient buildings

Yukihiro MASUDA
(Toyohashi University of Technology)

Abstract :

In the event of a disaster, it is important to maintain the functions of buildings that will act as a base for operations. Here, we proposed an evaluation method to determine whether maintenance of building functions will be possible in the event of a disaster, and performed a case study on an actual building.

1. はじめに

拠点となる建物の機能が維持されることで、はじめて組織の事業継続が可能となる。災害時において人命や建物の直接被害を守ることは当然最優先されるべきことであるが、建物が機能停止することによる2次的な被害を回避することの重要性を忘れてはならない。災害時においても建物の機能が維持され、業務が継続されることで被災地域の社会的・経済的機能や被災者の生活は守られる。

しかしながら、事業継続の取り組みについては業務の基盤となる建物の機能継続に関する議論は少ない。特に、建物の機能を維持する上で欠かせない建築設備については非常事態発生以後の対

応に関する標準的な手法がない。現場の施設管理担当者の勘と経験に依存しているのが現状であり、建物の機能維持に対する信頼性の確保に大きな問題を抱えている。

そこで非常事態が発生しても事業の継続が可能な建物を提供することを本研究の目的とする。そのためには、災害時に建物の利用の可否を判断できる評価手法が必要である。そこで、本研究では災害時に建物の利用の可否を判断し、損傷個所の特定と応急対応等を支援する「建物設備機能早期復旧支援システム」の基本仕様を開発し、建物の管理者が建物機能の復旧のために適切な判断を下せるための方法論を提示することを目的とする。図-1は本研究の対象となる建物の状況を示している。

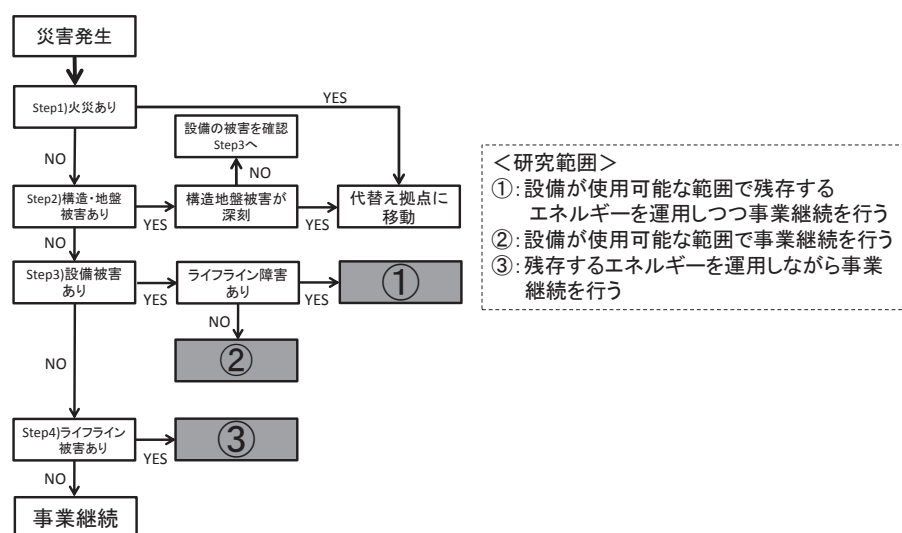


図-1 研究対象範囲

本研究の対象となる状況は図中の①、②、③の状況である。これらの状況は、設備の不具合や故障、もしくはエネルギーが足りないことで建物が機能不全に陥っている状況であり、このような状況下から迅速且つ確実に復旧を推進していくことが必要である。

2. 建物設備機能復旧支援システムの開発

2.1 システム概要

建物を継続利用するために必要な情報を一元化し管理することで、建物の利用の可否を迅速に判断することができる。本研究では図-2に示すように、建物内の各設備機器の稼働情報から建物サービスの利用の可否を導き、建物の継続利用を判断するシステムを開発する。

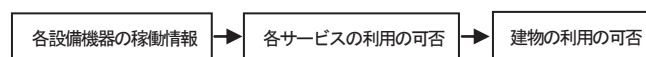


図-2 システムフロー

2.2 システムの目的

建物機能早期復旧支援システムの目的を以下に示す。

- 1) 各設備機器の稼働情報から建物の継続利用の可否を即時に判断する。
- 2) 建物が機能不全に陥り継続利用が不可能となった場合、フォルトツリーを介して機能不全の原因となる箇所を特定し早期復旧を図る。

3) 復旧状況の時間経過による変化を復旧曲線として表現することで事後評価を行い今後の対策に役立てる。

2.3 システム開発手順

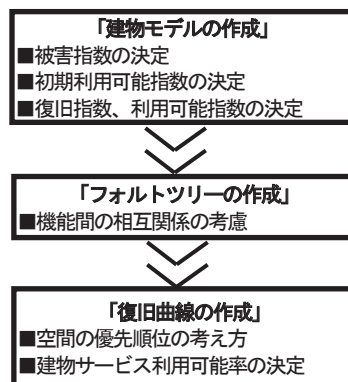


図-3 システム開発手順

システムの開発手順を図-3に示す。はじめにシステムを導入する建物モデルを作成する。次に建物内の各サービスの利用の可否を導くために各設備機器と設備系統毎の建物機能の関係をフォルトツリーで示す。最後に建物の継続利用の可否を判断する為、建物サービスの利用可能率の考え方を示して復旧曲線を描く。

2.4 建物モデル作成

はじめに、表-1に示すように建物のサービスを支える設備機器の表を作成する。まず、災害時に必要となる建物のサービスを選定する。そして、それらのサービスを支える設備機器を列挙し表を作成する。

表-1 建物モデル(作成例)

機能名	方式	設備名	機器番号	機器名	設置場所
空調機能	中央方式	熱源設備	1	ポンプ	B1F
			2	ヘッダー	B1F
			3	熱交換器	B1F
			4	環水槽	B1F
		空調機設備	5	FCU	1F
			6	空調機	1F
給水機能	高置水槽方式	水槽設備	7	受水槽	1F
			8	高架水槽	RF
			9	副受水槽	1F
		搬送設備	10	配管(縦管)	B1~RF
			11	配管(1F)	1F
			12	配管(2F)	2F

次にシミュレーションを行うにあたり、被害指数、初期利用可能指数、復旧指数、利用可能指数を決定し建物モデルを作成する。

1) 被害指数の決定

阪神淡路大震災における建物の設備被害事例を「破損」や「変形」、「移動」等の22種類に整理した。そして、各被害を「大破」「中破」「小破」「その他」に分類した。結果を表-2に示す。

表-2 被害の定義と分類

	定義/該当する被害
大破	取り換えもしくは全面修理が必要
	内部破損/漏水/破損/落下/切断/転倒
中破	補修で使用可能
	制御不能/断線/芯ずれ/基礎ずれ/変形/故障
小破	ほぼ使用可能と考えられるが点検等の対応が必要
	移動・ずれ/二次被害/基礎ボルト緩み・破断/土砂侵入/浮上/沈下/傾き/剥離/亀裂
その他	その他

今回は、阪神淡路大震災の設備被害を大破/中破/小破に分類し、その中で最も多い被害を代表的な被害としてシミュレーションで使用する。

次に各設備機器の被害の程度を表す指標として被害指数を決定する。考え方を図-4に示す。

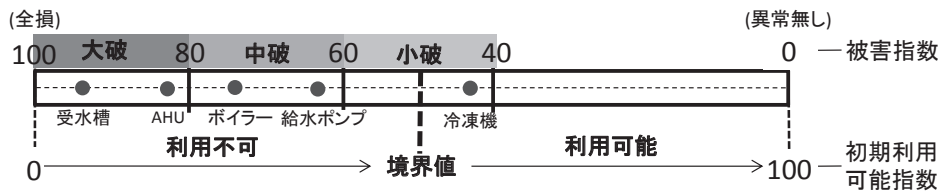


図-4 被害指数/初期利用可能指数の考え方

被害指数は最小値を0(異常無し)、最大値を100(全損)と考える。今回のシミュレーションでは、被害指数を $100 \geq \text{大破} > 80 \geq \text{中破} > 60 \geq \text{小破} > 40$ と考えた。

シミュレーションでは各設備機器の代表的な被害を被害指数に変換することで災害が発生したと想定する。

2) 初期利用可能指数の決定

各設備機器の初期利用可能指数を決定する。考え方を図-4に示す。初期利用可能指数とは被災後、建物内の設備機器が災害発生直後の状態を示した値である。最小値を0(全損)、最大値を100(異常無し)と考える。

算出式を式-1に示す。

$$\text{初期利用可能指数} = 100 - \text{被害指数} \quad (\text{式-1})$$

初期利用可能指数は100(異常のない状態)から被害指数を引いた値とする。

次に、初期利用可能指数の境界値を設定する。境界値は設備機器の利用の可否の境目であり、指数が境界値以上であれば利用可能、境界値以下であれば利用不可と考える。本研究では各被害の定義より、小破の範囲内で境界値を設定する。

3) 復旧指数の決定

復旧指数とは各設備機器の復旧の程度を示す値である。復旧指数の算出式を式-2に示す。

$$\text{復旧指数} = \frac{\text{初期利用可能指数の境界値} - \text{初期利用可能指数}}{\text{設備機器の利用が可能になるまでに要する時間}} \quad (\text{式-2})$$

復旧指数は初期利用可能指数の値と設定した境界値の差を機器が利用可能になる(境界値に達する)までに要した日数で割った値である。

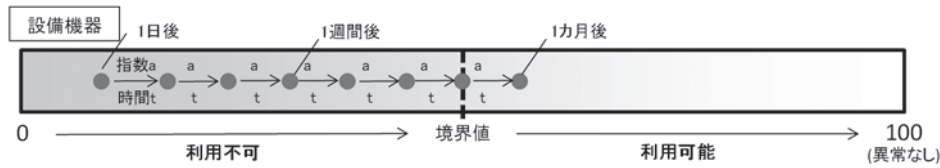


図-5 復旧指数について

図-5は復旧指数の考え方を示している。tは単位時間(毎分、毎時、毎日等)、aは復旧指数である。復旧指数は初期利用可能指数に単位時間ごとに加算される。

そして、初期利用可能指数に復旧指数を足したものを利用可能指数とする。利用可能指数の算出式を式-3に示す。

$$\text{利用可能指数} = \text{初期利用可能指数} + \text{復旧指数} \times \text{経過単位時間} \quad (\text{式-3})$$

利用可能指数とは、経過時間(Σt)における設備機器の状態を示す値である。利用可能指数が境界値以上であれば利用可能、境界値以下であれば利用不可と考える。尚、境界値は初期利用可能指数の算出時に決定した境界値と同じとする。

本研究では、設備機器の被害情報(被害の種類や程度、復旧にかかった日数等)から各指数を算出し、シミュレーションを行う。

2.5 フォルトツリーの作成

図-6に示すように各設備機器の相互作用により設備システムは機能し、各設備システムの相互作用により建物のサービスは提供される。また、各サービスの間でも、空調サービスや給水サービス、電気設備機能等は互いに影響を与えあっている。そのような環境の中、建物の管理者が被災時に多数の設備機器の情報から必要な情報のみを選定し、適切に対処することは困難である。そこで建物が機能不全に陥った場合、早期復旧を促進させるため、建物内の設備機器間の関係性を可視化し、明確にすることが必要と考えた。

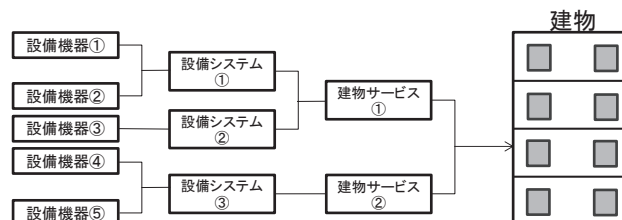


図-6 建物内の設備機器や設備システム、建物サービスの関係

本システムでは各設備機器の稼動情報から各建物サービスの利用の可否を判断するフォルトツリーを作成する。建物が機能不全に陥った場合でも即時に機能不全の原因の箇所を特定し、建物サービスの早期復旧を可能にする。フォルトツリーの考え方を図-7に示す。

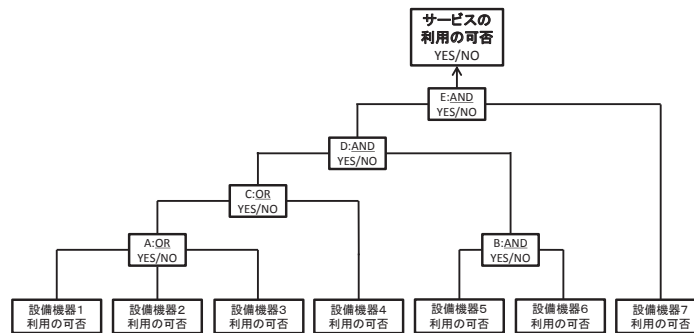


図-7 フォルトツリーの考え方

図中のアルファベットは各ポイント（機器同士の結合点）を示し、ANDとORの条件をつけた。ポイントでは“YES”（利用可能）か“NO”（利用不可）が表示される。各ポイントで“YES”を表示させるにはANDの条件下では関連する設備機器が全て利用可能でなければならない。ORの条件下では関連する設備機器が1つでも利用可能であれば良い。

2.6 復旧曲線の作成

時間経過による建物機能の復旧状況を示すために、縦軸を建物サービス利用可能率、横軸を経過時間とした復旧曲線を描く。復旧曲線を描くことで事前対策や事後対応の価値を数値化し、効果を比較することで事後評価が可能となる。また、被災後の復旧に関する情報を保存することも可能となる。

1) 建物サービス利用可能率の決定

利用可能指数から建物設備機器の利用の可否を判断し、建物のサービスの利用の可否を判断することで建物サービス利用可能率を導く。

建物サービス利用可能率とは、経過時間（ Σt ）において建物のサービスの利用の可否を百分率で示した値である。空調や換気、給排水、電気等のサービスの利用の可否から値を決定する。最大値100、最小値0とし、100は通常の状態（各期間において求められているサービスが被災前の状態）と考える。0は基幹電気設備が被災し建物内に電力供給を出来ない状態とする。理由は建物内の設備機器は電力を供給しないと稼働せず機能を維持することができないためである。

2) 空間の分類

建物内の空間を重要空間、活動支援空間、その他に分類し、各空間に必要なサービスを決定する。

3) 対応期間の決定

被災後から復旧完了までの期間を緊急対応期間、継続対応期間、復旧対応期間に分類する。表-3に各期間の役割を示す。

表-3 各対応の役割

<対応>	<役割>
緊急対応(短期)	被害の軽減、二次被害の拡大を防ぐ
継続対応(中期)	重要業務を守り、継続する
復旧対応(長期)	被災以前の状態へ戻す

4) 目標サービス利用可能率 α の決定

重要空間の復旧を最優先と考え、重要空間に必要なサービスが利用可能であれば建物は利用可能と考える。目標サービス利用可能率 α とは、各対応期間において建物が事業を継続するために必要な建物のサービスを備えている状態を示し、本研究では目標サービス利用可能率 α を重要空間の建物サービス利用可能率と考える。

算出式を式-4に示す。

$$\alpha = \frac{\text{経過時間}(\Sigma t)\text{において重要な業務を行うために必要なサービス数}}{\text{全体のサービス数}} \quad (\text{式-4})$$

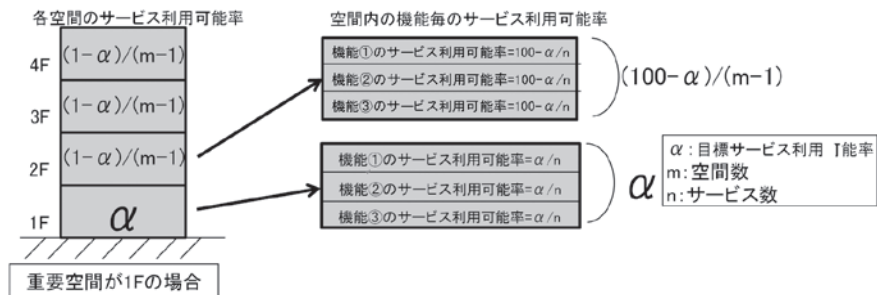


図-8 空間内の機能毎の建物サービス利用可能率の算出法

α を決定した後、他の空間のサービス利用可能率を決定する。重要空間は「 α 」、他の空間は全体で1なので「 $1 - \alpha / \text{他の空間数}$ 」でサービス利用可能率を算出する。次に、算出されたサービス利用可能率を各空間に必要なサービス数で割ることで、空間内の機能毎のサービス利用可能率を算出する。考え方を図-8に示す。

5) 計算方法

建物サービス利用可能率は建物全体で1である。各空間内のサービスが利用可能になると、建物サービス利用可能率に加算されていく。

はじめに基幹電気設備の利用の可否をみる。基幹電気設備が利用可能でなければ他のサービスが使用可能であっても0%とする。基幹電気設備の復旧が完了次第、重要空間のサービス利用可能率のみを加算していく。そして重要空間の復旧が完了次第、他の空間のサービス利用可能率を加算する。計算手順を図-9に示す。

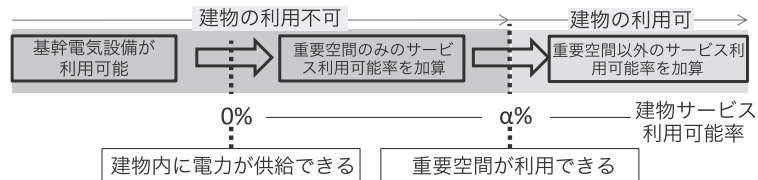


図-9 建物サービス利用可能率の計算手順

本システムでは、単位時間(毎分、毎時、毎日等)を設定し、単位時間ごとに建物サービス利用可能率を計算し、直線で結ぶことで復旧曲線を作成する。

3. 阪神淡路大震災を想定した復旧シミュレーション

3.1 対象概要

阪神淡路大震災と同程度の災害を想定し、災害発生から復旧完了までの復旧状況のシミュレーションを行った。モデル建物の概要を表-4に示す。

表-4 建物概要

構造	SRC造
階層	4階
空調方式	中央方式
給排水方式	高置水槽方式(高置水槽 28m ³ ,中水高置水槽 5m ³)

3.2 モデル建物の作成

事業継続に必要な建物のサービスを選定し表-5に示す。サービスを支える設備機器、被害指数、初期利用可能指数、復旧指数、利用可能指数を決定し、建物モデルを作成する。作成した建物モデルの1例として空調サービスの熱源設備を表-6に示す。

表-5 事業継続に必要な建物のサービス

系統	建物サービス
空調系統	空調
	換気
給水系統	上水給水
	中水給水
排水系統	排水
	汚水排水
電気系統	照明
	コンセント

表-6 建物モデル(空調サービス/熱源設備)

機能名	方式	設備名	機器番号	機器名	設置箇所	初期利用可能指数	利用の可否
空調機能	中央方式	熱源設備	1	冷温水発生機1	RF	66	OK
			2	冷温水発生機2	RF	66	OK
			3	冷温水発生機3	RF	63	OK
			4	ボイラー	B1F	80	OK
			5	蒸気ヘッダー	B1F	24	NO
			6	加熱用熱交換器1	B1F	62	OK
			7	加熱用熱交換器2	B1F	77	OK
			8	温水循環ポンプ1	B1F	64	OK
			9	温水循環ポンプ2	B1F	61	OK
			10	環水槽	B1F	41	OK
			11	環水給水ポンプ1	B1F	66	OK
			12	環水給水ポンプ2	B1F	63	OK
			13	冷温水ヘッダー1	B1F	19	NO
			14	冷温水ヘッダー2	B1F	21	NO
			15	冷温水ヘッダー3	B1F	1	NO
			16	冷温水ヘッダー4	B1F	62	OK
			17	密閉型冷温水槽1	B1F	48	OK
			18	密閉型冷温水槽2	B1F	79	OK
			19	冷温水循環ポンプ1	B1F	66	OK
			20	冷温水循環ポンプ2	B1F	68	OK
			21	冷温水循環ポンプ3	B1F	71	OK
			22	膨張水槽	RF	74	OK

3.3 フォルトツリーの作成

各建物サービス(空調、換気、給排水、中水給水、汚水排水、照明、コンセント機能)のフォルト

ツリーを作成した。図-10に熱源設備のフォルトツリーを示す。

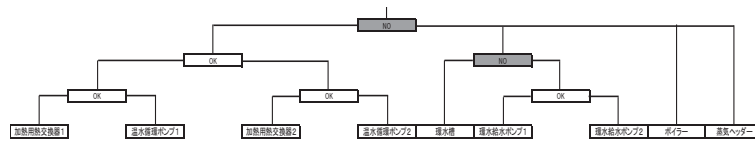


図-10 フォルトツリー(熱源設備一例)

本システムではエクセルを用いてフォルトツリーを作成した。確認したい経過時間(t)を打ち込むとその時点の各設備機器の稼働状況から各サービスの利用の可否を判断することができる。

3.4 復旧曲線の作成

目標サービス利用可能率 α を算出するため、対応期間を決定し、期間ごとに必要な機能を選定した。結果を表-7に示す次に目標サービス利用可能率の復旧曲線を描く。

表-7 目標サービス利用可能率の算出

対応期間	事業継続に必要なサービス	目標サービス利用可能率
緊急対応 (災害発生~3日)	4 サービス 給水/排水/照明/コンセント	$\alpha = 50\% (=4/8)$
継続対応 (3日~1ヶ月)	6 サービス 空調/換気/給水/排水/照明 /コンセント	$\alpha = 75\% (=6/8)$
復旧対応 (1ヶ月)	8 サービス 空調/換気/給水/中水給水/排水/汚水排水/照明/コンセント	$\alpha = 100\% (=8/8)$

次に空間进行分类する。今回はフロア毎で空間进行分类し1Fを重要空間と想定した。そして各空間内の各機能のサービス利用可能率を算出した。

今回は単位時間を1日として建物サービス利用可能率を計算し復旧曲線を描く。今回は神戸市民病院の復旧事例を参考に“復旧対応の無しの場合”、対応がある場合“給水車対応”“非常用発電対応”の3種類の場合を想定し復旧曲線を描く。

図-11は“対応無し”、図-12に“給水車による対応”“非常用発電による対応”を行った復旧曲線を示す。“給水車及び非常用発電による対応”では“対応無し”と比較すると、緊急対応では復旧を20日早めることができた。次に継続対応では19日遅れる結果となってしまったが“対応無し”と比較すると6日復旧が早く完了した。復旧対応では2日遅れる結果であり、“対応無し”と比較すると3日復旧が早くなった。“非常用発電対応”では電気設備の機能不全を回避することで、建物サービス利用可能率が0%になることを避けることができ、重要空間ではコンセント及び照明サー

ビスを守ることができている。

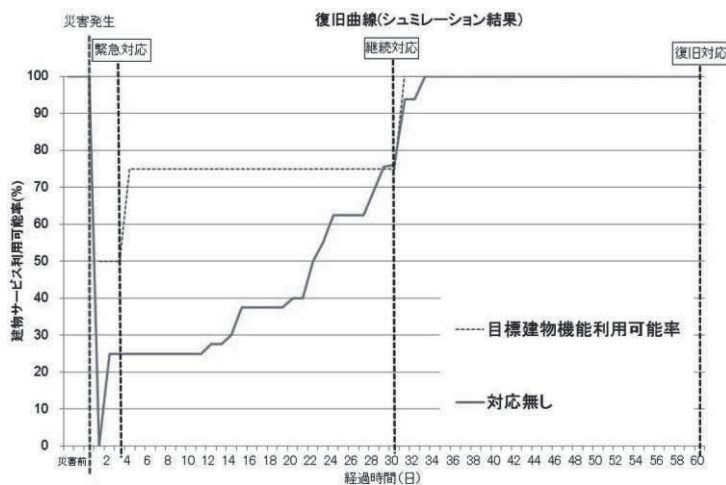


図-11 復旧曲線(対応無し)

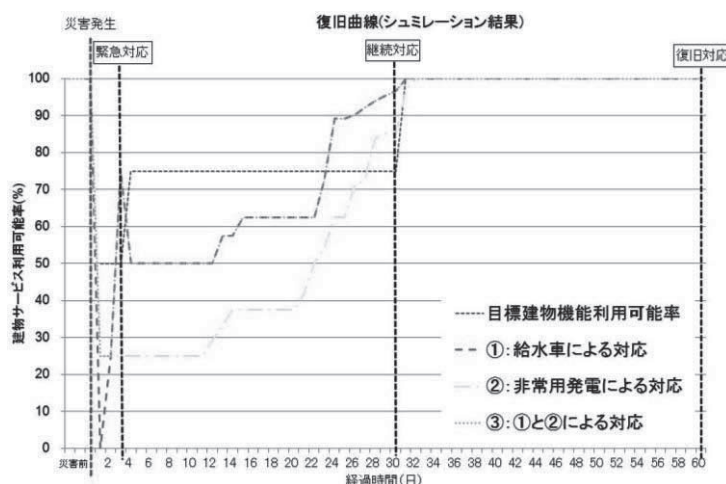


図-12 復旧曲線(対応有り)

4. まとめ

本研究では、建物機能早期復旧支援システムの基本仕様を開発することで、災害時に建物の継続利用の可否を判断するだけでなく、機能不全の原因となっている箇所の特定を可能とするプロセスを示した。また、被害指数、初期利用可能指数、利用可能指数、復旧指数、目標サービス利用可能率、建物サービス利用可能率の考え方を示し、建物サービス利用可能率の復旧曲線を描くことで、対応の違いによる復旧日数の違いや建物サービス利用可能率の変化を示し、災害後の事後評価を可能とする評価の枠組みを提示した。

参考文献

- 1) 「事業継続ガイドライン 第二版 一わが国企業の減災と災害対応の向上のために」事業継続計画策定促進方策に関する検討会/内閣府 防災担当 2009年
- 2) 「阪神・淡路大震災調査報告 建築編7 建築設備・建築環境」阪神・淡路大震災調査報告編集

委員会/日本建築学会 地盤工学会 土木学会 日本機械学会 日本地震学会 1999年
3) 「大震災を体験した市民病院からの報告」神戸市立中央市民病院1996年

