

土 木 研 究 所 資 料

大都市圏における震災波及構造に関する研究

～(その2) FSM法による都市機能損傷の
動的相互作用の解析～

Interaction of Functional Damage Due to An Earthquake in Urban Area
～ (Part 2) Analysis on the Interaction of Functional Damage
Due to An Earthquake with Use FSM Method ～

平成5年7月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

「Copyright © (1993) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

大都市圏における震災波及構造に関する研究

～(その2) FSM法による都市機能損傷の 動的相互作用の解析～

土木研究所地震防災部

耐震研究室	室長	川島	一彦
	研究員	杉田	秀樹
	研究員	中島	燈

要 旨

大都市圏に大規模な地震が発生した場合には、都市の機能が高度・複合化して構造的な損傷よりも機能的な損傷の重要性が増した結果、従来の震災とは大きく異なる都市型震災が生じると考えられる。本文は、都市の基盤施設の物的被害を原因とする震災波及構造モデルをFSM法により解析するとともに、道路施設及び河川施設を中心とした各種機能損傷の動的相互作用を検討した結果を報告するものである。

キーワード：都市型震災、波及構造、震災波及、機能損傷、震災対策、インフラストラクチャー

目 次

1. まえがき	1
2. 大都市域の基盤施設に生じ得る機能損傷	2
3. F S M法による震災波及構造モデルの解析手法	9
3.1 震災波及構造モデルの特徴	9
3.2 震災波及構造モデルの解析手法	9
4. 機能損傷相互の関連度合に係わるアンケート調査	15
4.1 アンケート調査の基本方針	15
4.2 アンケート調査の対象及び人数	16
4.3 アンケート調査票	16
5. 基盤施設ごとに見た震災波及構造	23
5.1 道路施設の震災波及構造モデル	23
5.2 鉄道施設の震災波及構造モデル	24
5.3 港湾施設の震災波及構造モデル	25
5.4 河川施設の震災波及構造モデル	25
5.5 空港施設の震災波及構造モデル	26
5.6 電力施設の震災波及構造モデル	26
5.7 ガス施設の震災波及構造モデル	27
5.8 水道施設の震災波及構造モデル	27
5.9 下水道施設の震災波及構造モデル	28
5.10 通信施設の震災波及構造モデル	28
5.11 商業関連施設の震災波及構造モデル	29
5.12 金融関連施設の震災波及構造モデル	30
5.13 サービス施設の震災波及構造モデル	30
5.14 医療施設の震災波及構造モデル	31
5.15 教育施設の震災波及構造モデル	31
5.16 行政施設の震災波及構造モデル	31
5.17 報道施設の震災波及構造モデル	32
5.18 生産関連施設の震災波及構造モデル	32
5.19 住宅施設の震災波及構造モデル	33

6. 基盤施設相互の震災波及構造	53
6.1 基盤施設相互の震災波及	53
6.2 震災波及から見た道路施設の震災対策	54
6.3 震災波及から見た河川施設の震災対策	55
7. まとめ	58
謝辞	59
参考文献	60

1. まえがき

近年、大都市圏に大規模な地震が発生した経験はないが、こうした地震が起こった場合には、戦後経験してきた震災とは大きく異なる都市型の震災が発生すると考えられる。これは、都市機能が高度化・複雑化し、構造的な損傷よりも機能的な損傷の重要度が増したこと、交通・ライフライン・経済・金融等非常に多種多様な機能が複雑に相互依存しあっており、特定の施設被害や機能損傷が次々に他の機能損傷を生み出すこと等によるものである。都市機能を構成する各種システムどうしの相互依存性が増したため、どの機能損傷がどの程度他の機能損傷に波及し、相互の影響度がどのようなものであるかを見通すことは一般に非常に困難である。

耐震研究室では、上記の観点から、従来の震災と異なる未経験の災害である都市型震災に対するインフラストラクチャーの震災対策の重要性を明らかにするために、ブレーションニング手法を用いて、震災波及構造の骨格を解析している¹⁾。この結果、都市の機能低下に最も影響を及ぼしやすいのは道路施設の被害であることが明らかにされた。

本文は、大都市域における震災波及プロセスをさらに詳細に検討することを目的として、都市の基盤施設の物的被害を原因とする震災波及構造モデルをFSM法により作成した結果を示すものである。さらに、震災波及構造モデルを用いることにより、道路施設及び河川施設を中心とした各種機能損傷の動的相互作用の解析を行った。

2. 大都市域の基盤施設に生じ得る機能損傷

大都市域における震災波及構造を解析するためには、まず、大規模地震により都市の基盤施設にどのような被害が生じるか、また、被害が波及することによりどのような機能損傷が生じるかを明らかにする必要がある。本検討では、都市の基盤施設に生じ得る被害及び機能損傷として、これまでに震災波及の骨格を解析した際に得られている被害及び機能損傷¹⁾をそのまま用いることとした。

大都市を構成する基盤施設の分類、及び、各種基盤施設に生じ得る被害及び機能損傷を示すと、それぞれ、表-2.1及び2.2の通りである。基盤施設の分類に際しての詳細は参考文献1)に示しているが、この基本的な考え方は以下の通りである。

- 1)産業連関分析に用いる産業大分類(14分類)を基本とした。
- 2)震災の影響が大きいと考えられる「運輸・通信業」、「電気・ガス・水道業」、「公務」は、基盤施設をさらに細分化した。
- 3)「農業」～「建設業」は物資を生産するという点では共通しているため、「生産関連施設」として集約した。
- 4)「金融業」と「不動産業」は資金を運用するという点では共通しているため、「金融関連施設」として集約した。
- 5)震災が都市生活者に及ぼす影響を反映できるように、「住宅施設」を分類に加えた。

都市の基盤施設に生じ得る被害及び機能損傷の抽出は、ブレインストーミングの結果を関係者との面談調査で補うことにより行った。ブレインストーミングに際しては、震災の影響を広範囲かつ時系列的に捉えるために、機能損傷を物的被害、直接機能損傷、1次波及による機能損傷、2次波及による機能損傷の4段階に区分した。これら機能損傷の定義は以下の通りである。

- 1)物的被害:地震による施設本体及び内部施設の被害
- 2)直接機能損傷:物的被害が生じることにより直ちに失われる当該施設の機能
- 3)1次波及による機能損傷:直接機能損傷が波及することにより直ちに失われる都市機能
- 4)2次波及による機能損傷:1次波及による機能損傷が波及することにより失われる都市機能

19種類の基盤施設に予想される物的被害、直接機能損傷、1次波及による機能損傷、2次波及による機能損傷は、それぞれ、53件、100件、133件、147件である。

表-2.1 都市を構成する基盤施設の分類

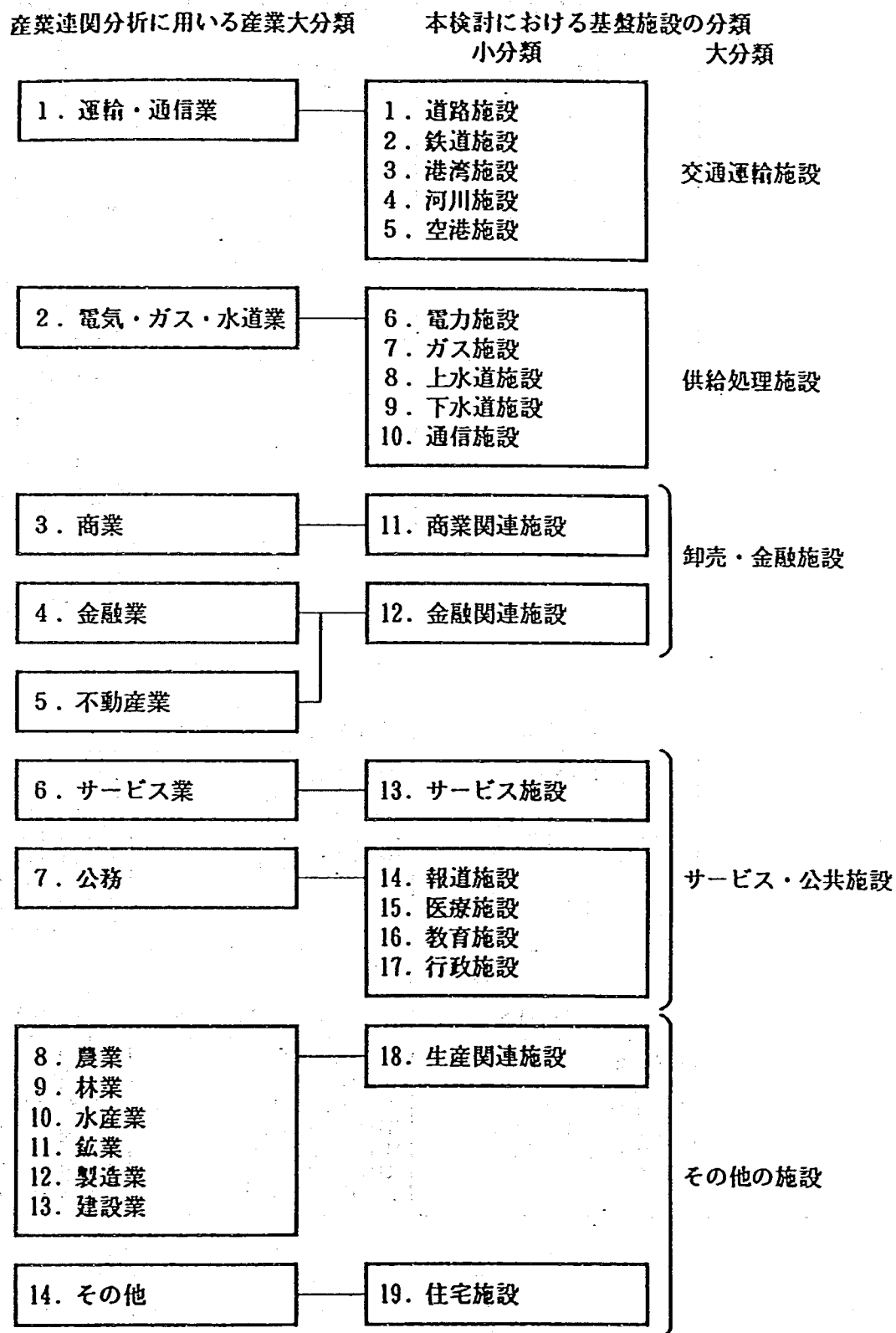


表-2.2 基盤施設に予想される機能損傷の分類

(a) 道路施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
道路路面陥没 斜面崩壊 橋梁損壊 道路信号機損壊	道路通行不能・制約 延焼遮断機能障害 交通制御機能障害 雨水流下機能障害 事故防止機能障害 駐停車機能障害 歩行路機能障害 休憩機能障害 集金機能障害	消防車通行障害 救急車通行障害 バトカー通行障害 トラック通行障害 自家用車通行障害 バス通行障害 タクシー通行障害 バイク通行障害 自転車通行障害 復旧作業車両通行障害 報道関係車両通行障害 行政車両通行障害 避難障害 帰宅歩行者通行障害 通勤通学者通行障害 レジャー帰宅者通行障害 乗降積卸し障害	火災延焼 死亡者・重体者増加 食料品不足 生活必需品日用品不足 救援物資不足 帰宅所要時間増加 通勤通学所要時間増加 路上放置車両増加 工業製品生産流通障害 加工食品生産流通障害 農産物生産流通障害 銀行窓口取引機能障害 銀行オンライン取引機能障害 証券取引機能障害 株価の大幅変動 保険取引機能障害 サービス機能障害 救急医療活動遅延 学校授業不能・制約 行政機能障害 行政組織情報伝達不足 災害復旧活動遅延 消防活動不能・制約 救急搬送活動不能・制約 治安の悪化 情報伝達所要時間増加 テレビ・ラジオ放送機能障害 新聞・郵便配達遅延

(b) 鉄道施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
鉄道軌道損壊 鉄道送電・変電設備損壊 列車制御装置損壊 踏切信号機損壊 駅施設損壊	軌道通行不能・制約 列車制御・停止機能障害 無線通信機能障害 送電・変電機能障害 駅機能障害 踏切機能障害 列車整備機能障害	旅客列車通行障害 貨物列車通行障害 保線作業列車通行障害 自動改札・券売機障害 予約システム使用障害	食料品不足 救援物資不足 帰宅所要時間 通勤・通学所要時間増加 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害

(c) 港湾施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
港湾防波堤損壊 港湾護岸損壊 船舶係留施設損壊	防波機能障害 護岸機能障害 船舶係留機能障害 旅客ターミナル機能障害 荷さばき保管機能障害 航路表示機能障害	船舶安全航行障害 客船出入港障害 フェリー出入港障害 貨物船出入港障害 出入国・税関・検疫障害 貨物輸出入障害 水産資源水揚げ障害	出入国者数減少 工業製品輸出入減少 農産物・水産物輸出入減少 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害

(d) 河川施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
河川堤体式堤防損壊 河川護岸式堤防損壊 船舶係留施設損壊	堤防機能障害 交通機能障害 流量制御機能障害 水波制御機能障害 取水機能障害 排水機能障害 流下促進機能障害 船舶係留機能障害 親水機能障害	住宅地の冠水 農地の冠水 商業施設の冠水 工業施設の冠水 道路冠水 鉄道冠水 水道水供給障害 工業用水供給障害 農業用水供給障害 下水道処理水排水障害 雨水・生活排水排水障害 船舶による輸送障害 河川敷での活動障害	外出阻害 帰宅所要時間増加 通勤・通学所要時間増加 食料品不足 生活必需品日用品不足 救援物資不足 衛生状態の悪化 下水道からの溢水 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害

(e) 空港施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
空港滑走路損壊 空港管制塔損壊 空港計器着陸装置損壊 空港ターミナル施設損壊	航空機離着陸不能・制約 航空機管制機能障害 旅客ターミナル機能障害 貨物ターミナル機能障害 駐機機能障害 航空機整備機能障害 燃料給油機能障害 ヘリコプター離着陸制約	旅客航空機運行障害 貨物航空機運行障害 搭乗手続き障害 出入国・税関・検疫障害 社会心理学的混乱	出入国者数減少 工業製品輸出入減少 農産物・水産物輸入減少 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害

(f) 電力施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
電力基幹送電設備損壊 電力配電設備損壊 発電所損壊	電力供給機能障害 配電機能障害	交通制御機能障害 列車運行障害 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 サービス機能障害 銀行窓口取引機能障害 銀行オンライン取引障害 証券窓口取引機能障害 証券オンライン取引障害 保険取引機能障害 救急医療活動遅延 行政機能障害 行政組織情報伝達不足 災害復旧活動遅延 消防活動不能・制約 治安の悪化 情報伝達所要時間増加 テレビ・ラジオ放送機能障害	

(g) ガス施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
中高圧ガス導管損壊 低圧ガス導管損壊 ガス製造工場損壊	都市ガス製造機能障害 都市ガス供給機能障害 プロパンガス封入機能障害 爆発・火災発生	ガスコンロ使用不能 ガス使用商業施設営業不能 ガス使用冷暖房機器使用不能 居住不能・制約 食料品不足 衛生状態の悪化 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害	

(h) 上水道施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
上水道送水管損壊 上水道配水管損壊 浄水場損壊	浄水機能障害 上水道供給機能障害	飲料水供給不能 断水 消防活動不能・制約 工業用水減少	日常生活用水の供給不足 外食産業営業障害 火災延焼 居住不能・制約 食料品不足 衛生状態の悪化 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害 行政機能障害 災害復旧活動遅延 経済の停滞

(i) 下水道施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
下水道管損壊 下水処理場損壊	下水流下機能障害 下水処理機能障害	家庭・一般排水停滞 工業排水処理障害 商業排水処理障害 河川への汚水流出	トイレ使用障害 河川水質汚染 悪臭 居住不能・制約 衛生状態の悪化 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害 行政機能障害 災害復旧活動遅延 経済の停滞

(j) 通信施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
基幹通信回線損壊 通信回線損壊 電話局損壊	電話通信機能障害 電話交換機能障害 設備回線数減少 電話施設支持物機能障害 公衆電話機能障害 FAX・テレックス通信障害	通話輻輳	安否確認不能 報道機能制約 パソコン通信不能 情報通信機能障害 銀行取引不能・制約 証券取引不能・制約 保険取引不能・制約 国際通信不能・制約 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害 救急医療活動遅延 行政機能障害 行政組織間情報伝達不足 災害復旧活動不能・制約 消防活動不能・制約 救急搬送活動不能・制約 治安の悪化 情報伝達所要時間増加

(k) 商業関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊	小売機能障害 商品機能障害 市場機能障害 情報通信機能障害	商品価値低下による販売制限 食料品不足 生活必需品日用品不足 在庫・入荷数管理不能 顧客・仕入れ先との連絡不能	加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 水産物流通機能障害 食料品価格高騰 農産物価格高騰 水産物価格高騰 サービス機能障害

(l) 金融関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊	銀行窓口取引機能障害 銀行オンライン取引機能障害 証券窓口取引機能障害 証券オンライン取引機能障害 保険取引機能障害	預金引出し不能・制約 引出しに係わる混乱 預金支払制限令発令 証券取引情報不足 株価の大幅変動 保険料支払増加	手形決済不能による連鎖倒産 顧客との連絡不能 食料品不足 生活必需品日用品不足 工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 サービス機能障害 経済の停滞

(m) サービス関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊	宿泊不能・制約 映画娯楽等の不能・制約 情報サービス機能障害 事業サービス機能障害 専門サービス機能障害 研究開発機能障害	工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 銀行取引機能障害 証券取引機能障害 保険取引機能障害 食料品不足 生活必需品日用品不足	経済の停滞

(n) 医療関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊	診療・治療機能障害 情報通信機能障害	患者との通話不能 地震による急患の増加	死亡者・重体者増加 予約業務の混乱 救急医療活動遅延

(o) 教育関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊	学校授業不能・制約 専門教育不能・制約 生徒保護機能障害	避難所の不足 学力の低下 専門技能の低下 死亡者・重体者増加	経済の停滞

(p) 行政関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 行政ネットワークシステム損壊	行政機能障害 行政通信機能障害 公衆通信機能障害 消防署機能障害 警察署機能障害	災害情報把握不能 役所間連絡不能 災害情報伝達不足 消防署間連絡不能 出火情報伝達不能 警察署間連絡不能 交通制御機能障害	災害復旧活動遅延 消防車の不足 救急車の不足 消防活動不能・制約 救急搬送活動遅延 火災延焼 死亡者・重体者増加 治安の悪化 避難障害

(q) 報道関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊 放送局損壊	テレビ放送機能障害 ケーブルテレビ放送機能障害 衛星放送機能障害 ラジオ放送機能障害 新聞発行機能障害 出版物発行機能障害	工業製品生産流通機能障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 銀行取引機能障害 証券取引機能障害 保険取引機能障害 サービス機能障害	災害情報提供不能 心理的不安 災害復旧活動遅延 治安の悪化 株価の大幅変動 経済の停滞

(r) 生産関連施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
生産工場損壊 農地損壊・浸水 一般建築施設損壊 民間オンラインシステム損壊	研究開発機能障害 半導体生産機能障害 電気製品生産流通機能障害 化学製品生産流通機能障害 石油化学製品生産流通障害 加工食品生産流通機能障害 農産物生産流通機能障害 水産物生産流通機能障害 金融機能障害 サービス機能障害 爆発・火災発生 火災延焼 危険物爆発・流出阻止機能障害	食料品不足 生活必需品日用品不足 土壌・地下水汚染 大気・海洋汚染	死亡者・重体者増加 呼吸器系疾患・中毒症状の増加 経済の停滞

(s) 住宅施設

物的被害	直接機能損傷	1次波及による機能損傷	2次波及による機能損傷
一般住宅損壊	居住不能・制約 マンション等からの避難不能	仮設住宅によるストレス 衛生環境の悪化 労働力の低下 学力の低下 死亡者・重体者増加	経済の停滞

3. FSM 法による震災波及構造モデルの解析手法

3.1 震災波及構造モデルの特徴

FSM(Fuzzy Structural Modeling)法は、機能損傷間の関連度合を0(関係しない)～1(関係する)の連続数で評価することにより、グラフ理論を用いて、機能損傷間の相互関連を多階層の有向グラフで表現しようとする手法である。多階層有向グラフを同定するための代表的な手法であるISM(Interpretive Structural Modeling)法との相違は、機能損傷相互の関連にファジィ関係を導入し、演算にファジィ演算を用いる点である。FSM 法によって得られる震災波及構造モデルは、以下の特徴を有する。

- 1)震災が波及するようすを、構造モデルの下層から上層に向かって段階的に表現できる。
- 2)構造モデルの最下層に位置する機能損傷は、震災波及の根元的な原因を表わすことになる。
- 3)機能損傷間の関連度合を0～1の連続数として、構造モデル中に表現できる。
- 4)ISM 法に比べて、機能損傷間の関連度合の微妙な強弱を反映できる。

ただし、FSM 法を用いれば震災波及の全てが表現できるわけではない。FSM 法による震災波及構造モデルで考慮されない事象としては、以下のものが挙げられる。

- 1)機能損傷相互の波及形態には、図－3.1に示すように、順方向波及、同一レベル波及、逆方向波及がある。構造モデルでは、このうち順方向波及及び同一レベル波及は表現できるが、逆方向波及は表現できない。これは、逆方向波及を生じる機能損傷は全て同一階層に表現され、階層モデル化ができないためである。
- 2)震災の波及速度が考慮されない。このため、ある機能損傷が生じてから、これを原因とする機能損傷が生じるまでの時間は把握できない。また、地震発生からある一定時間が経過した段階で、どのような機能損傷が生じているかは表現されない。
- 3)機能損傷の量が考慮されない。震災波及により、どの機能損傷がどの範囲でどれだけ生じるかといった定量的な事象は表現されない。
- 4)ある機能損傷の原因となる機能損傷が複数存在する場合に、原因である機能損傷が全て生じないと結果である機能損傷が生じないのか、また、原因である機能損傷が一つでも生じれば結果である機能損傷が生じるのかといった、機能損傷の発生に係わる必要十分条件が表現されない。

3.2 震災波及構造モデルの解析手法

あるシステム S が n 個の要素の集合、すなわち次式で表される場合に、このシステムの有向グラフ化は以下の手順で行う。

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (3-1)$$

1) ファジィ従属行列 A の作成

n 個の要素を行と列に持つファジィ従属行列 A を作成する。ファジィ従属行列 A の定義は、次式の通りである。

$$A = [a_{ij}] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3-2)$$

ここに、 $A : n \times n$ の正方行列

a_{ij} : 要素 s_i が要素 s_j に従属する度合で、次式で定義される。

$$a_{ij} = f_r(s_i, s_j) \quad , \quad 0.0 \leq a_{ij} \leq 1.0 \quad (3-3)$$

ここに、 $f_r(s_i, s_j)$: メンバシップ関数

なお、要素 s_i が要素 s_j に直接関連している場合には、これを $s_i R s_j$ と表現することとする。 $s_i R s_j$ であれば、有向グラフは図-3.2に示すように、要素 s_i から要素 s_j に向かう矢印を描くことにより表現される。

2) ファジィ演算則の確認

ファジィ従属行列 A が、閾値 p ($0.0 \sim 1.0$) に対して、ファジィ非反射律及びファジィ非対称律を満足することを確認する。ここに、閾値 p は要素 s_i と要素 s_j の間の関連をモデル化するかどうかを判定するための値であり、任意に与える。例えば、 a_{ij} が p 以上であれば要素 s_i と要素 s_j は矢印を用いて連結されることになり、反対に a_{ij} が p を下回れば矢印は表現されない。一般に、閾値 p は 0.5 とされることが多い。

ファジィ非反射率は、式(3-4)で定義される。

$$f_r(s_i, s_i) < p \quad (\forall (s_i, s_j) \in S \times S) \quad (3-4)$$

ファジィ非対称律は、式(3-5)で定義される。

$$f_r(s_i, s_j) < p \quad \text{または} \quad f_r(s_j, s_i) < p \quad (\forall (s_i, s_j) \in S \times S) \quad (3-5)$$

ファジィ非反射率及びファジィ非対称律は、ファジィ演算を行う上での前提条件であり、これらがともに満足されていないと構造モデルを同定することができない。ファジィ従属行列 A がこれらの条件を満足しない場合には、要素間の関連パターンが大きく変化しない範囲で、要素間の関連度合 a_{ij} の値を増減する必要がある。

3) ファジィ半到達可能行列 A' の作成

ファジィ従属行列 A に単位行列 I を加え、式(3-6)を満足するまで行列の乗算を行うことにより、ファジィ半到達可能行列 A' を作成する。

$$(A+I)^{t-1} \neq (A+I)^t = (A+I)^{t+1} = A' \quad (3-6)$$

このようにして得られるファジィ半到達可能行列 A' には、ファジィ従属行列 A における全ての直接的

な関係とともに、関係 R の推移性によって得られる間接的な関係も示されることになる。すなわち、要素 s_i, s_j, s_k の間に $s_i R s_j$ かつ $s_j R s_k$ の関係が成り立つ場合、図-3.3に示すように、間接的な $s_i R s_k$ の関係も示されることになる。

なお、本計算により得られたファジィ半到達可能行列 A' は、式(3-7)に示すファジィ半推移律を満足しなければならない。ファジィ半推移律を満足しない場合には、上記2)と同じように、要素間の関連度合 a_{ij} の値を増減する必要がある。

$$M = \bigvee_{j=1}^n (f_r(s_i, s_j) \wedge f_r(s_j, s_k)) \geq p \quad \text{ならば、} \quad f_r(s_i, s_k) \geq M \quad (3-7)$$

ただし、 $V(s_i, s_j), (s_j, s_k), (s_k, s_i) \in S \times S (i \neq j \neq k)$

4) レベル集合の抽出

n 個の要素が階層モデルのどの階層に位置するかを、式(3-8)~(3-11)により判定する。

$$L_1(S) = \left\{ s_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < p \leq \bigvee_{n=1}^n a_{nk} \right\} \quad (\text{最上層レベル集合}) \quad (3-8)$$

$$L_2(S) = \left\{ s_k \mid p \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj}, \quad p \leq \bigvee_{n=1}^n a_{nk} \right\} \quad (\text{中間層レベル集合}) \quad (3-9)$$

$$L_3(S) = \left\{ s_k \mid \bigvee_{n=1}^n a_{nk} < p \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj} \right\} \quad (\text{最下層レベル集合}) \quad (3-10)$$

$$L_{1,3}(S) = \left\{ s_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < p, \quad \bigvee_{n=1}^n a_{nk} < p \right\} \quad (\text{独立レベル集合}) \quad (3-11)$$

ここに、図-3.4に示すように、最上層レベル集合とは原因にならない要素の集合、最下層レベル集合とは結果にならない要素の集合、中間層レベル集合とは原因にも結果にもなる要素の集合、独立レベル集合とは原因にも結果にもならない要素の集合である。

5) 階層モデルの作成

まず、ファジィ半到達可能行列 A' から、 $L_1(S)$ に属する要素の行、 $L_3(S)$ に属する要素の列、及び、 $L_{1,3}(S)$ に属する要素の行と列を削除する。この操作により、有効グラフに関与しない行と列が削除される。

次に、新たに得られたファジィ半到達可能行列について、 $L_1(S)$ 及び $L_3(S)$ に属する要素の中から独立な構造として表現できる部分を抽出する(以後、これをブロック化と呼ぶ)。さらに、同一ブロックに属する要素間の従属関係を示す小行列 $A^{(i)}$ (以後、これを単一ハイアラキー行列と呼ぶ)を作成する。

次に、それぞれのブロックの中で、ある要素に対する唯一の従属要素を抽出する。すなわち、単一ハイアラキー行列 $A^{(i)}$ からレギュラー行(またはレギュラー列)を見つけ、式(3-12)により第 j 列の列ベクトル $[a_{\cdot j}]$ を $[a^*_j]$ に置き換えた後、 $A^{(i)}$ からレギュラー行(またはレギュラー列)を削除する。

$$[a^*_j] = [a_{\cdot j}] \wedge [\overline{a_{\cdot 1}}] \wedge [\overline{a_{\cdot 2}}] \cdots \wedge [\overline{a_{\cdot n}}] \quad (3-12)$$

ここに、 $a_{ij} \geq p$ を満足する $j (=1, 2, \dots, n)$ が唯一存在する場合に、行 i をレギュラー行と呼ぶ。
また、 $a_{ij} \geq p$ を満足する $i (=1, 2, \dots, n)$ が唯一存在する場合に、列 j をレギュラー列と呼ぶ。

レギュラー行(またはレギュラー列)の削除を繰り返して行うことにより、階層モデルが同定できる。

6) 多階層有効モデルの作成

5) で得られた階層モデルの要素間を、矢印で連結する。個々の矢印には、要素間の連結度合 a_{ij} の値を記入する。

注1) $\forall \alpha p(\alpha)$: 全ての α に対して $p(\alpha)$ が成立する。

$\bigvee_{i=1}^n \alpha_i : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ の最大値

$\bigwedge_{i=1}^n \alpha_i : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ の最小値

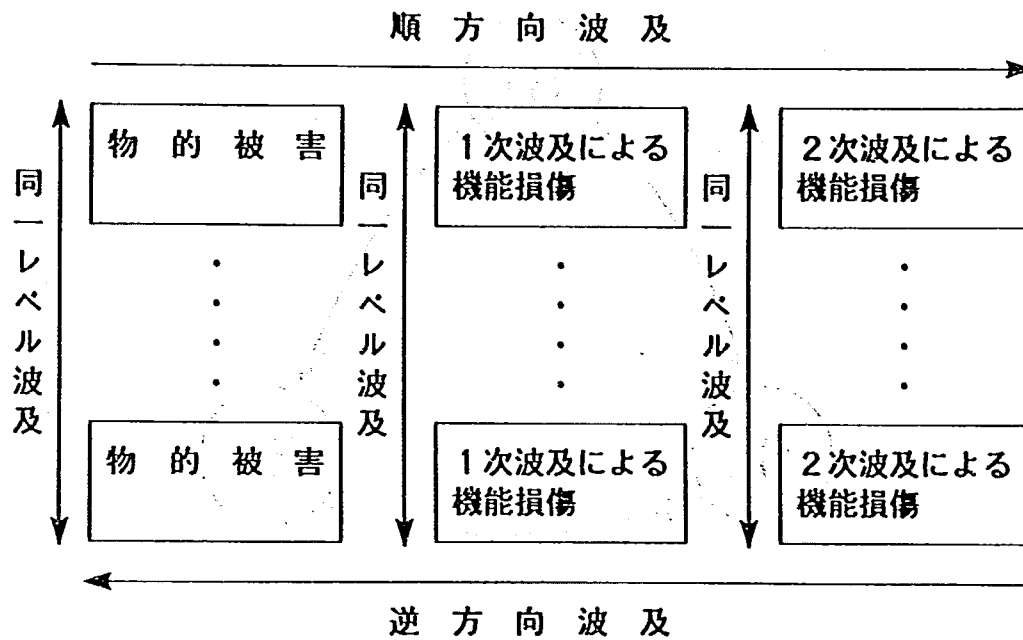


図-3.1 機能損傷の波及の形態

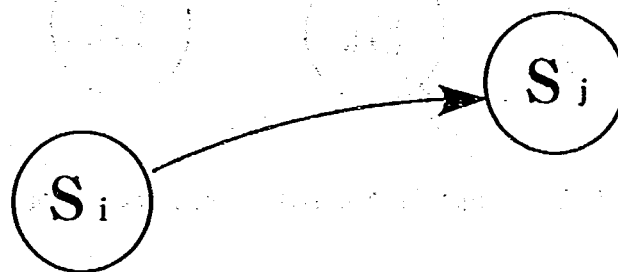


図-3.2 $s_i R_j$ の時の有向グラフ

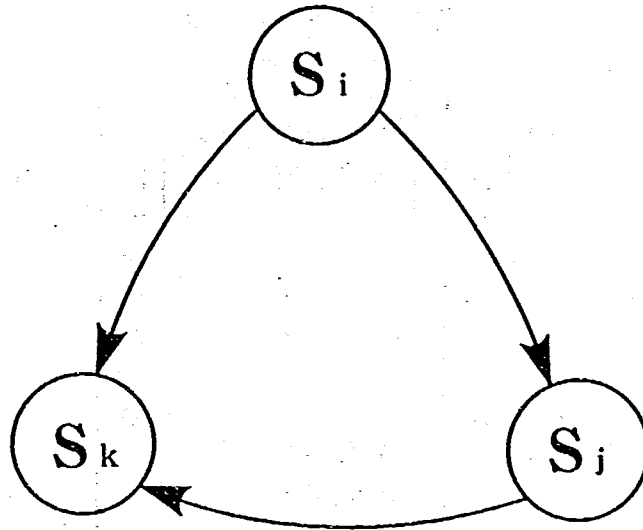


図-3.3 関係 R の推移性によって得られる間接的な関係

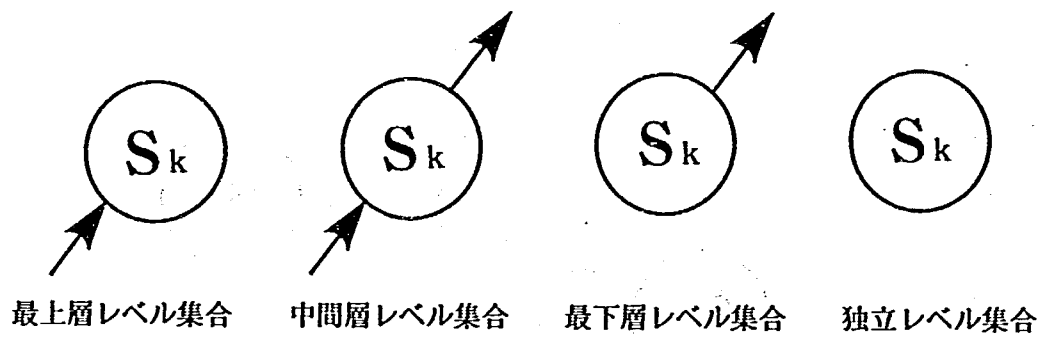


図-3.4 レベル集合の分類

4. 機能損傷相互の関連度合に係わるアンケート調査

4.1 アンケート調査の基本方針

FSM 法により震災波及構造モデルを同定するためには、第3章に示したように、機能損傷相互の関連度合を表わすメンバーシップ関数 f_i を定める必要がある。メンバーシップ関数 f_i の設定法としては、被災構造に基づいて定める方法、経験に基づいて定める方法等が挙げられるが、本解析に対しては、以下の理由により適切でないと考えられる。

1) 被災構造に基づいて定める方法は、構造解析やシミュレーション解析を行って、機能損傷間の関連を解析的に求めようとするものである。基盤施設の構造形状が与えられれば高い精度で機能損傷間の関連を推定することが可能であるが、推定できる機能損傷は物的被害に限られること、計算が煩雑になること等により、大量の機能損傷の間の関連を逐一推定することは一般に困難である。

2) 経験に基づいて定める方法は、既往の地震時における震災の波及過程を調査することにより、機能損傷間の関連度合を求めようとするものである。既往の地震としては、昭和53年伊豆大島近海地震、昭和53年宮城県沖地震、昭和58年日本海中部地震、平成5年釧路沖地震等が挙げられるが、これらはいずれも中規模都市に生じた M7 クラスの地震であり、首都圏に M8 クラスの地震が生じる場合とは状況が異なると考えられる。

以上の観点から、本解析では、機能損傷間の関連度合を専門家へのアンケート調査により定めることとした。アンケート調査に際しては、以下の基本方針を定めた。

1) 第2章に示す433件の機能損傷を全て含んだ震災波及構造モデルを作成するためには、次式で計算されるように、187,056組の機能損傷間の関連度合を定める必要がある。

$$433 \text{ 件} \times 433 \text{ 件} - 433 \text{ 件} = 187,056 \text{ 組}$$

アンケート調査で187,056項目の質問を行うのは現実的でない。また、433件の機能損傷間の関連を一つの震災波及構造モデルに表現すると煩雑になり、震災波及の大筋が不明確になる可能性もある。このため本解析では、大都市域における震災波及を区分して、基盤施設ごとの震災波及と基盤施設相互の震災波及を、それぞれ独立に解析する。

2) 基盤施設ごとの震災波及の解析では、19種類の基盤施設ごとに、直接機能損傷、1次波及による機能損傷及び2次波及による機能損傷を考慮する。また、基盤施設相互の震災波及の解析では、19種類の基盤施設の物的被害を考慮する。

3) 2種類の解析により得られる震災波及構造モデルと、大都市域における全体の震災波及構造モデルとの関係を模式的に示すと、図-4.1の通りである。図-4.1からわかるように、本解析により得られる震災波及

及構造モデルには、基盤施設ごとの直接機能損傷、1次波及による機能損傷及び2次波及による機能損傷が基盤施設間でどのような動的相互作用を持つのかは表現されない。これについては、別途検討が必要である。

4.2 アンケート調査の対象及び人数

アンケート調査の対象及びアンケート調査を実施した人数を示すと、表-4.1の通りである。なお、表-4.1には、アンケート調査票を回収できた人数も併せて示している。

アンケート調査の対象は、基盤施設ごとの震災波及を解析するためのアンケートと、基盤施設相互の震災波及を解析するためのアンケートについて、それぞれ定めた。すなわち、基盤施設ごとの震災波及を解析するためのアンケートでは、それぞれの基盤施設の構造形状や社会的な役割をアンケート結果に反映できるように、それぞれの基盤施設の設計・管理・運営に携わる実務者を対象とした。また、基盤施設相互の震災波及を解析するためのアンケートでは、基盤施設の物的被害に関して広い知見を有する耐震工学の専門家を対象とした。

アンケート調査の実施人数は、基盤施設ごとの震災波及を解析するためのアンケートでは、それぞれの基盤施設ごとに3名、合計57名とした。また、基盤施設相互の震災波及を解析するためのアンケートでは5名とした。合計62名に対してアンケート調査票を配布し、53名分を回収できた。したがって、アンケート調査票の回収率は約85%である。

4.3 アンケート調査票

一例として、基盤施設相互の震災波及を解析するためのアンケート調査票の一部を示すと図-4.2の通りである。基盤施設ごとの震災波及を解析するためのアンケート調査票も、質問項目が異なるだけで、質問形式は同じである。アンケート調査票のポイントは、以下の通りである。

- 1)ある機能損傷が生じた場合に他の機能損傷が生じると思うかどうかを、0.0(全くそうは思わない)～1.0(絶対そう思う)の連続数で回答する。
- 2)東京等の大都市域に、大正12年関東地震クラスの大規模地震が生じた状況を想定する。
- 3)機能損傷を正確にイメージできるように、表現がわかりにくいと思われる機能損傷に係わる用語の説明を添付する。

ここに、アンケート調査票で考慮する機能損傷の件数を整理すると、表-4.2の通りである。表-4.2によれば、基盤施設相互の震災波及を解析するためのアンケートでは53件、また、基盤施設ごとの震災波及を解析するためのアンケートでは7～54件の機能損傷を考慮することになる。本解析では、アンケート調査票の質問項目数がそれぞれ2,000項目よりも多くなるのを避けるため、質問項目数が2,000項目を超える基盤施設相互及び道路施設のアンケート調査票については、以下の方針に従って質問項目数を削減した。

1)関連が自明である機能損傷は質問を省略する。例えば、物的被害の「道路信号機損壊」と物的被害の「港湾防波堤損壊」は明らかに関連しないと判断して、質問を省略する。また、物的被害の「河川堤体式堤防損壊」は物的被害「農地損壊・浸水」に明らかに関連すると判断して、質問を省略する。

2)1次波及による機能損傷は、1次波及による機能損傷及び2次波及による機能損傷との関連度合を質問する。すなわち、1次波及による機能損傷から直接機能損傷への逆方向波及は生じないものと考え、質問を省略する。

3)2次波及による機能損傷は、2次波及による機能損傷との関連度合を質問する。すなわち、2次波及による機能損傷から直接機能損傷や1次波及による機能損傷は生じないものと考え、質問を省略する。

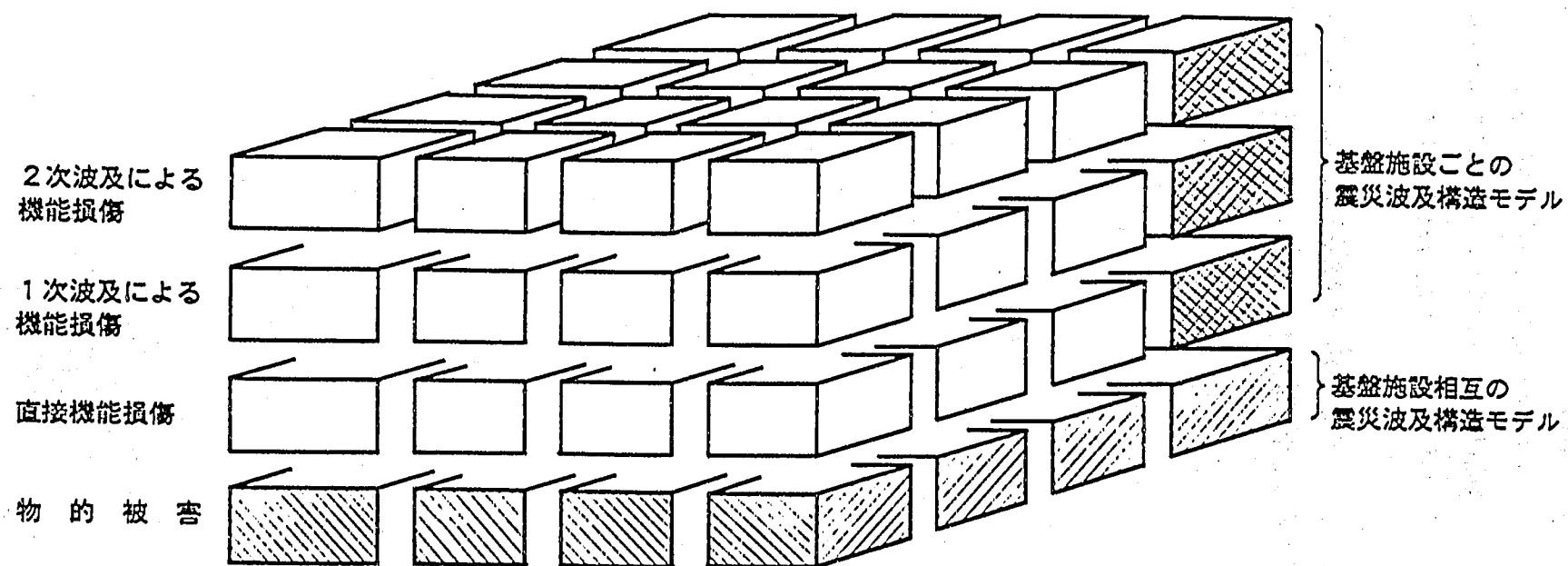


図-4.1 基盤施設ごとの震災波及構造モデル及び基盤施設相互の震災波及構造モデルと、全体の震災波及構造モデルの関係

表-4.1 アンケート調査の対象及び人数

アンケートの種類		調査対象	調査人数	回答数
基盤施設ごとの震災波及を解析するためのアンケート	道路施設	建設省関東地方建設局、首都高速道路公団、日本道路公団	3	3
	鉄道施設	(財)鉄道総合技術研究所	3	3
	港湾施設	運輸省港湾技術研究所、同港湾局	3	3
	河川施設	建設省関東地方建設局、同中部地方建設局、同近畿地方建設局	3	2
	空港施設	新東京国際空港公団、日本空港ビルディング㈱、関西国際空港ビルディング㈱	3	2
	電力施設	東京電力㈱、(財)電力中央研究所	3	3
	ガス施設	東京ガス㈱	3	3
	上水道施設	東京都水道局、日本水道協会、横浜市水道局	3	2
	下水道施設	東京都下水道局、千葉県、神奈川県	3	2
	通信施設	NTT㈱	3	3
	商業関連施設	東京魚市場卸共同組合、日本出版販売㈱、㈱ファミリーマート	3	3
	金融関連施設	(社)証券広報センター、三菱信託銀行㈱、(社)日本損害保険協会	3	3
	サービス関連施設	三菱電気ビルテクノサービス㈱、㈱帝国ホテル、三菱総合研究所	3	2
	医療関連施設	JR東京総合病院、同愛会記念病院、東京共済病院	3	3
	教育関連施設	お茶の水スクールオブビジネス、東京工科専門学校、明大付属中野高校	3	3
	行政関連施設	横浜市、自治省消防庁、警視庁	3	3
	報道関連施設	NHK広報室、文化放送、日本経済新聞社	3	2
	生産関連施設	東芝㈱、石油化学工業協会、日本化学工業協会	3	2
	住宅施設	清水建設㈱、木下工務店、ミサワホーム	3	2
基盤施設相互の震災波及を解析するためのアンケート		建設省土木研究所、京都大学防災研究所、(財)道路新産業開発機構、武蔵工業大学、東京都都市計画局	5	4
合 計			62	53

【アンケート回答要領】

アンケート回答の際に以下のことに注意して回答して頂ければと思います。

1. 質問の前提

本アンケートは、東京等の大都市域に大正12年関東地震クラスの大規模地震が発生した状況を想定してご記入下さい。地震の強さと被害程度はおおむね震度6（下表参照）位を想定して頂ければと考えております。但し、震度6にあまりこだわらず、「もし（万が一）・・・の機能が損なわれたら・・・の機能被害が発生するか」といったような考え方で回答頂ければと考えております。

震度6の地震の強さと被害程度

人への影響	・まわりの景色がぐるぐるまわるように見える。 ・足もとがさらわれ、立っていることができない。 ・床が波打ったようになり、遠ってしか動けない。
建築物など	・戸、障子が吹き飛ぶ。 ・かなり多くの天井等が破損する。 ・風根の重い家などかなり多くが破損する。 ・鉄筋の少ないブロック塀等は、ほとんど倒れる。
部屋の中など	・ほとんどの物が倒れたり、大きくずれ動く。 ・吊下げ物は、ほとんど落下する。 ・石油ストーブは、ほとんどのものが移動し、倒れる。
その他	・停止している自動車が踊り出す。 ・広範囲に停電する場合がある。 ・広範囲に断水や、ガスの供給停止を生ずる。 ・地面に無数の亀裂を生ずる。

（「地震に備えて」東京都杉並区より）

2. 記入要領

質問、例えば「道路が通行不能・制約となった時、以下の機能障害が生じると思いますか。」に対し、

「全くそうは思わない」と思われる場合に 0.0

「半分くらいそう思う」 " 0.5

「絶対そう思う」 " 1.0

というのを目安にして、表内の機能被害が生じると思われる度合の所に○を記入をお願いします（下表参照）。ちなみに、アンケートの表中の用語に対しては次頁の用語の説明を参照願います。

0.0:全くそうは思わない 0.5:半分くらい思う 1.0:絶対そう思う	0.0					0.5						1.0
延焼遮断機能障害												
交通制御機能被害												

図-4.2 アンケート調査票(道路施設の一部)

1. 道路が通行不能・制約となった時、以下の機能障害が生じると思いますか。

0.0: 全くそうは思わない 0.5: 半分くらい思う 1.0: 絶対そう思う	0.0	0.5	1.0
延焼遮断機能障害			
交通制御機能障害			
雨水流下機能障害			
事故防止機能障害			
駐停車機能障害			
歩行路機能障害			
休憩機能（サビ・スリ等）障害			
集金機能（ハート・ソング・メーター等）障害			
消防車の通行障害			
救急車の通行障害			
バトカーの通行障害			
トラックの通行障害			
自家用車の通行障害			
バスの通行障害			
タクシーの通行障害			
バイクの通行障害			
自転車の通行障害			
災害復旧作業車両通行障害			
報道関係車両通行障害			
行政車両通行障害			

0.0: 全くそうは思わない 0.5: 半分くらい思う 1.0: 絶対そう思う	0.0	0.5	1.0
避難障害			
帰宅歩行者通行障害			
通勤・通学者通行障害			
レジャー帰宅者通行障害			
乗り降り・積み下ろし障害			
火災延焼			
死亡者・重体者増加			
食料品不足			
生活必需日用品不足			
救援物資不足			
帰宅所要時間増加			
通勤・通学所要時間増加			
路上放置車両増加			
工業製品生産流通機能障害 （電気・機械・鉄鋼・石油化学等）			
加工食品生産流通機能障害			
農産物生産流通機能障害			
銀行窓口取引機能障害			
銀行オンライン取引機能障害			
証券取引機能障害			
株価の大幅変動			

表-4.2 アンケート調査票で考慮する機能損傷の件数

基盤施設	基盤施設相互の 震災波及の解析	基盤施設ごとの震災波及の解析
	物的被害 (件)	直接機能損傷+ 一次波及による機能損傷+ 二次波及による機能損傷 (件)
道路施設	4	54
鉄道施設	5	20
港湾施設	3	20
河川施設	3	34
空港施設	4	20
電力施設	3	20
ガス施設	3	14
上水道施設	3	19
下水道施設	2	18
通信施設	3	27
商業関連施設	2	16
金融関連施設	2	20
サービス関連施設	2	15
医療関連施設	2	7
教育関連施設	2	8
行政関連施設	2	21
報道関連施設	3	19
生産関連施設	4	20
住宅施設	1	8
件数	53	

5. 基盤施設ごとに見た震災波及構造

5.1 道路施設の震災波及構造モデル

道路施設の震災波及構造モデルを図-5.1に示す。閾値 p は0.71としている。ここに、閾値の値を標準の0.5から0.71に引き上げたのは、全ての機能損傷間の関連度合 a_{ij} が比較的大きく、閾値 p を0.5とすると同一階層に多くの機能損傷が集中する結果、十分な階層化ができないためである。したがって、以後に示す震災波及構造モデルでも、閾値を0.5を中心に上下させることにより、震災波及の骨格が最も明確になるような閾値を探し出し、この閾値に対する震災波及構造モデルを示すこととする。なお、図-5.1において、「道路通行不能・制約」から「歩行路機能障害」への矢印、及び、「救急搬送活動不能・制約」から「治安の悪化」への矢印を破線で示している。閾値 p を0.71とした場合には、本来、関連度合 a_{ij} が0.71を下回る機能損傷間の矢印は表現されない。しかし、関連度合 a_{ij} が0.71を下回る場合でも、震災波及の骨格を把握する上で重要と考えられる機能損傷間については、破線の矢印を加えることとしたためである。

図-5.1によれば、道路施設の震災波及構造モデルは10階層から構成される。構造モデルの形状は、上層に向かうほど機能損傷が多くなる逆三角形型である。これは、震災波及の原因となる機能損傷は少ないが、一度この機能損傷が生じると広い範囲に震災が波及することを意味している。

最下層レベル集合 $L_1(S)$ に属する機能損傷(以後、これを最下層要因と呼ぶ)は、震災波及の原因であることを意味する。道路施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「事故防止機能障害」「延焼遮断機能障害」「パトカー通行障害」の3つであることから、地震時にこれら3つの機能損傷が生じないようにすることが、道路施設の震災対策の基本となる。「事故防止機能障害」は「道路通行不能・制約」を引き起こし、さらに「自家用車通行障害」「バス通行障害」「救急車通行障害」「トラック通行障害」など各種車両の通行障害を引き起こすことにより、最終的には物流、住民生活、復旧活動など広範囲にわたり都市の機能低下に影響を及ぼす。「延焼遮断機能障害」は「消防活動不能・制約」「交通制御機能障害」等を引き起こし、さらに「救急搬送活動不能・制約」を引き起こすことにより、最終的には「治安の悪化」等住民生活に影響を及ぼす。「パトカー通行障害」は、警察の活動を停滞させることにより、「治安の悪化」を引き起こす。

「事故防止機能障害」「延焼遮断機能障害」「パトカー通行障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、41件、12件、1件である。これは、「事故防止機能障害」「延焼遮断機能障害」「パトカー通行障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。「事故防止機能障害」の発生を防止するためには、橋梁、切土・斜面、盛土の損壊や路面の陥没を防止することが重要である。また、「延焼遮断機能障害」の発生を防止するためには、可燃物の路上への散乱や、ガス及び電気の漏出による路上での火災を防止することが重要である。

道路施設の直接機能損傷のうち、「雨水流下機能障害」「休憩機能障害」「集金機能障害」は構造モデルの中で独立している。これらの機能損傷は他の機能損傷に波及しないため、都市の機能低下に及ぼす影響は

小さい。

5.2 鉄道施設の震災波及構造モデル

鉄道施設の震災波及構造モデルを図-5.2に示す。閾値 p は0.75としている。

図-5.2によれば、鉄道施設の震災波及構造モデルは7階層から構成される。「変電送電機能障害」と「工業製品生産流通機能障害」をそれぞれ最下層とする2つの構造モデルに分かれている点の特徴である。「工業製品流通機能障害」を最下層とする構造モデルの形状は逆三角形型であるのに対して、「変電送電機能障害」を最下層とする構造モデルの形状は長方形型である。構造モデルの形状が長方形型であることは、震災波及の原因となる機能損傷は複数存在するが、震災の波及範囲は限定されており、急激に広い範囲に震災が波及することにはなりにくいことを意味している。

鉄道施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「変電送電機能障害」「無線通信機能障害」「予約システム使用障害」「踏切機能障害」「工業製品生産流通機能障害」の5つである。地震時にこれら5つの機能障害が生じないようにすることが、鉄道施設の震災対策の基本となる。「変電送電機能障害」は「列車制御停止機能障害」を引き起こし、さらに「軌道通行不能・制約」を引き起こすことにより、最終的に「旅客列車通行障害」「貨物列車通行障害」「保線作業列車通行障害」等各種列車の運行に影響を及ぼす。「無線通信機能障害」は、直接各種列車の運行に影響を及ぼす。「予約システム使用障害」は「駅機能障害」を引き起こし、「帰宅所要時間増加」「通勤通学所要時間増加」等の住民生活に影響を及ぼす。「踏切機能障害」は、軌道を自由に横断できないことにより、住民生活に影響を及ぼす。

「工業製品生産流通機能障害」は「加工食品生産流通機能障害」及び「農産物生産流通機能障害」に結びついている。これらの機能損傷は独立した事象と考えられるが、このように結びついているのは、「工業製品生産流通機能障害」が生じるような状況下では「加工食品生産流通機能障害」や「農産物生産流通機能障害」も生じるだろうと、アンケートの主旨を取り違えた回答がなされたためであると想像される。ただし、ここで興味深いのは、「工業製品生産流通機能障害」を最下層とする構造モデルが、「変電送電機能障害」を最下層とする構造モデルから独立している点である。これは、列車の運行可否は物流の可否に何等影響を及ぼさないことを意味するものである。

「変電送電機能障害」「無線通信機能障害」「予約システム使用障害」「踏切機能障害」「工業製品生産流通機能障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、7件、6件、3件、2件、4件である。これは、「変電送電機能障害」「無線通信機能障害」「工業製品生産流通機能障害」「予約システム使用障害」「踏切機能障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。「変電送電機能障害」及び「無線通信機能障害」の発生を防止するためには、送電変電設備及び無線通信設備の損壊を防止するとともに、バックアップ電源を確保することが重要である。

鉄道施設の直接機能損傷のうち、「列車整備機能障害」は構造モデルの中で独立している。「列車整備機能障害」は他の機能損傷に波及しないため、都市の機能低下に及ぼす影響は小さい。

5.3 港湾施設の震災波及構造モデル

鉄道施設の震災波及構造モデルを図－5.3に示す。閾値は0.80としている。

図－5.3によれば、港湾施設の震災波及構造モデルは7階層から構成される。構造モデルの形状は、複数の最下層要因から上方に向けて機能損傷が多くなる逆台形型である。逆三角形型に比べると最下層要因が多く、長方形型に比べると震災波及の範囲が広い点が特徴である。

港湾施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「防波機能障害」「護岸機能障害」「出入国・税関・検疫障害」の3つである。地震時にこれら3つの機能損傷が生じないようにすることが、港湾施設の震災対策の基本となる。「防波機能障害」は「船舶安全航行障害」を引き起こし、さらに「客船出入港障害」「フェリー出入港障害」「貨物船出入港障害」といった各種船舶の出入港障害を引き起こすことにより、「サービス機能障害」「工業製品生産流通機能障害」「加工食品生産流通機能障害」といった利用客の行動や物流に対して影響を及ぼす。「護岸機能障害」は「船舶係留機能障害」を引き起こし、さらに「旅客ターミナル機能障害」「貨物輸出入障害」を引き起こす。「出入国・税関・検疫障害」は「水産資源水揚げ障害」「出入国者数減少」等を引き起こすことにより、「農産物生産流通機能障害」「サービス機能障害」など、主に農産物に係わる物流と利用客の行動に影響を及ぼす。

「防波機能障害」「護岸機能障害」「出入国・税関・検疫障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、11件、7件、10件である。これは、「防波機能障害」「出入国・税関・検疫障害」「護岸機能障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。

5.4 河川施設の震災波及構造モデル

河川施設の震災波及構造モデルを図－5.4に示す。閾値は0.88としている。

図－5.4によれば、河川施設の震災波及構造モデルは9階層から構成される。構造モデルの形状は、道路施設と同じで、上方に向かうほど機能損傷が多くなる逆三角形型である。

河川施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「流量制御機能障害」「住宅地の冠水」の2つである。地震時にこれら2つの機能損傷が生じないようにすることが、河川施設の震災対策の基本となる。「流量制御機能障害」は「堤防機能障害」を引き起こした後、大きく2つの方向に分かれて波及する。一方は「取水機能障害」であり、これが「水道水供給障害」「農業用水供給障害」「工業用水供給障害」など、物資の生産や住民生活に必要な水の供給に影響を及ぼす。もう一方は「農地の冠水」「親水機能障害」「交通機能障害」であり、これらが「食料品不足」「河川敷での活動障害」「船舶による輸送障害」など、住民生活や物流に影響を及ぼす。「住宅地の冠水」も大きく2つの方向に波及する。一方は「工業施設冠水」であり、これが「道路冠水」「鉄道冠水」を引き起こす結果、「工業製品生産流通機能障害」「農産物生産流通障害」「加工食品生産流通障害」など、物流に影響を及ぼす。もう一方は、住民生活に影響を及ぼすものであり、「生活必需日用品不足」「救援物資不足」「食料品不足」「下水道からの溢水」「衛生状態の悪化」等を引き起こす。

「流量制御機能障害」及び「住宅地の冠水」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、14件及び19件である。これは、「住宅地の冠水」「流量制御機能障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。「住宅地の冠水」の発生を防止するためには、堤体式堤防や護岸式堤防の損壊を防止することが重要である。また、「流量制御機能障害」の発生を防止するためには、ダムの機能確保を図るとともに、河道への障害物の流入を防ぐことが重要である。

5.5 空港施設の震災波及構造モデル

空港施設の震災波及構造モデルを図-5.5に示す。閾値は0.72としている。

図-5.5によれば、空港施設の震災波及構造モデルは6階層から構成される。構造モデルの形状は、「燃料供給機能障害」及び「航空機管制機能障害」の2つを最下層にもつ逆台形型である。

空港施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「燃料供給機能障害」「航空機管制機能障害」「農産物生産流通機能障害」の3つである。これら3つの機能損傷が生じないようにすることが、空港施設の震災対策の基本となる。「燃料供給機能障害」は「航空機離着陸不能・制約」を引き起こし、さらに「旅客ターミナル機能障害」「貨物ターミナル機能障害」「駐機機能障害」を引き起こすことにより、最終的に「社会心理学的混乱」「航空旅客機運行障害」「貨物旅客機運行障害」「出入国者数減少」など、利用者の行動や旅客機の運行に影響を及ぼす。「航空機管制機能障害」は、大きく2つの方向に波及する。一方は「燃料供給機能障害」と同じ波及経路である。もう一方は「ヘリコプター離着陸制約」を引き起こす。「農産物生産流通機能障害」は「貨物ターミナル機能障害」を引き起こし、最終的に「貨物航空機運行障害」を引き起こす。

「燃料供給機能障害」「航空機管制機能障害」「農産物生産流通機能障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、11件、12件、2件である。これは、「航空機管制機能障害」「燃料供給機能障害」「農産物生産流通機能障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。

5.6 電力施設の震災波及構造モデル

電力施設の震災波及構造モデルを図-5.6に示す。閾値は0.51としている。

図-5.6によれば、電力施設の震災波及構造モデルは6階層から構成される。「電力供給機能障害」を最下層とする構造モデルと、「救急医療活動遅延」及び「行政機能障害」を最下層とする構造モデルの2つに分かれている点が特徴である。「電力供給機能障害」を最下層とする構造モデルの形状が逆三角形型であるのに対して、「救急医療活動遅延」及び「行政機能障害」を最下層とする構造モデルの形状は長方形型である。

電力施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「電力供給機能障害」「救急医療活動遅延」「行政機能障害」の3つである。地震時にこれら3つの機能損傷が生じないようにすることが、電力施設の震災対策の基本となる。「電力供給機能障害」は「配電機能障害」「工業製品生産流通機能障害」「加工食品生産流通機能障害」「銀行窓口取引機能障害」等、主に生産業及び金融業の活動に影響を及ぼす。中でも「配電機能

障害」は、「交通制御機能障害」「列車運行障害」等の交通機関にに対して影響を及ぼす。

「救急医療活動遅延」及び「行政機能障害」は、「災害復旧活動遅延」や「消防活動不能・制約」等の機能損傷に結びついている。ここで興味深いのは、「救急医療活動遅延」及び「行政機能障害」を最下層とする構造モデルが、「電力供給機能障害」を最下層とする構造モデルから独立している点である。これは、行政機関ごとにバックアップ電源が整備されていることにより、行政活動は停電の影響を受けにくいと、アンケートの回答者が考えたためであると想像される。

「電力供給機能障害」「救急医療活動遅延」「行政機能障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、11件、2件、4件である。これは、「電力供給機能障害」「行政機能障害」「救急医療活動遅延」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。

「テレビ・ラジオ放送機能障害」及び「治安の悪化」は、構造モデルの中で独立している。「テレビ・ラジオ放送機能障害」が独立しているのは、行政機関と同様に、テレビ局及びラジオ局にバックアップ電源が整備されているとアンケート回答者が考えたためである。また、「治安の悪化」が独立しているのは、電力の供給が停止しても、犯罪等により住民生活が脅かされることにはつながらないと、アンケート回答者が考えたためであると想像される。

5.7 ガス施設の震災波及構造モデル

ガス施設の震災波及構造モデルを図－5.7に示す。閾値は0.58としている。

図－5.7によれば、ガス施設の震災波及構造モデルは5階層から構成される。構造モデルの形状は、「衛生状態の悪化」及び「爆発・火災発生」を最下層とする長方形型である。

ガス施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「衛生状態の悪化」「爆発・火災発生」「食料品不足」の3つである。これらの機能損傷のうち「衛生状態の悪化」及び「食料品不足」は、表－2.2では1次波及による機能損傷に属する機能損傷であり、何故これらが最下層要因となったのかはよくわからない。ガス施設の震災対策に際しては、直接機能損傷である「爆発・火災発生」を防止することが基本となる。「爆発・火災発生」は「農産物生産流通機能障害」「工業製品生産流通機能障害」「加工食品生産流通機能障害」等の生産活動に影響を及ぼすと同時に、「住居不能・制約」「サービス機能障害」等の住民生活にも影響を及ぼす。中でも「工業製品生産流通機能障害」は、「都市ガス製造機能障害」「都市ガス供給機能障害」を経て、「ガスコンロ使用不能」及び「ガス使用商業施設営業不能」等、都市の商業活動に影響を及ぼす。

ガス施設の直接機能損傷のうち、「プロパンガス封入機能障害」は構造モデルの中で独立している。この機能損傷は他の機能損傷に波及しないため、都市の機能低下に及ぼす影響は小さい。

5.8 水道施設の震災波及構造モデル

水道施設の震災波及構造モデルを図－5.8に示す。閾値は0.77としている。

図－5.8によれば、水道施設の震災波及構造モデルは6階層から構成される。構造モデルの形状は、道

路施設と同じで、逆三角形型である。

水道施設の震災波及構造モデルの最下層要因は「浄水機能障害」である。したがって、「浄水機能障害」の発生を防止することが、水道施設の震災対策の基本となる。「浄水機能障害」は「飲料水供給不能」を経て「断水」を引き起こし、さらにこれが波及して「上水道供給機能障害」及び「居住不能・制約」を引き起こす。「上水道供給機能障害」は「消防活動不能・制約」「日常生活用水の供給不足」を引き起こし、最終的に「火災延焼」「災害復旧活動遅延」「外食産業の営業障害」を引き起こす。

水道施設の震災波及で興味深いのは、「上水道供給機能障害」が最下層要因ではなく、「浄水機能障害」の結果として生じると考えられている点である。これは、上水を供給できなくなるのは、送水管や配水管が被災するためよりも、浄水施設が被災するためであると、アンケートの回答者が考えているためであると想像される。

5.9 下水道施設の震災波及構造モデル

下水道施設の震災波及構造モデルを図－5.9に示す。閾値は0.72としている。

図－5.9によれば、下水道施設の震災波及構造モデルは5階層から構成される。構造モデルの形状は逆三角形型であるが、「下水処理機能障害」、「工業排水処理障害」、「行政機能障害」及び「居住不能・制約」を最下層レベル集合とする3つのブロックに分かれている点が特徴である。

下水道施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「下水処理機能障害」「工業排水処理障害」「行政機能障害」「居住不能・制約」の4つである。これらのうち「工業排水処理障害」「行政機能障害」「居住不能・制約」は、表－2.2に示した下水道施設の機能損傷のうち、1次波及による機能損傷または2次波及による機能損傷に属するものであり、なぜこれらの機能損傷が最下層要因になったのかはよくわからない。いずれにしても、構造モデルの最下層に位置する「下水処理機能障害」の発生を防止することが、下水施設の震災対策の基本となる。

「下水処理機能障害」は「河川への汚水流出」を経て、大きく4つの方向に波及する。1つめは「下水流下機能障害」であり、「家庭・一般排水停滞」「トイレ使用障害」など住民生活に影響を及ぼす。2つめ及び3つめは、それぞれ、「河川水質汚染」及び「衛生状態の悪化」である。4つめは「農産物生産流通障害」及び「加工食品生産流通機能障害」であり、最終的に「経済の停滞」へと波及する。

「商業排水処理障害」は構造モデルの中で独立している。工業排水に比べて商業排水の処理障害は、震災波及に及ぼす影響が小さいと考えられる。

5.10 通信施設の震災波及構造モデル

通信施設の震災波及構造モデルを図－5.10に示す。閾値は0.65としている。

図－5.10によれば、通信施設の震災波及構造モデルは7階層から構成される。構造モデルの形状は、道路施設と同じで、逆三角形型である。

通信施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「電話交換機能障害」及び「行政組織間の情報伝達不足」の2つである。「行政組織間の情報伝達不足」は2次波及による機能損傷であり、本来、「電話交換機能障害」が波及することにより生じる機能損傷と考えられるが、構造モデルでは最下層要因となっている点が興味深い。これは、行政機関には無線設備が整備されており、災害時に電話が果たす役割は無線に比較して小さいと、アンケート回答者が考えたためであると想像される。

「電話交換機能障害」は「電話通信機能障害」を引き起こし、さらに2つの方向に波及する。一方は、「報道機能制約」「FAX・テレックス通信障害」など、主にマスコミの活動に影響を及ぼす。もう一方は「通話輻輳」を経て、「情報伝達所要時間増加」「パソコン通信不能」「安否確認不能」「国際通信不能・制約」「情報通信機能障害／オンライン等」を引き起こす。中でも「情報通信機能障害／オンライン等」は、「銀行取引不能・制約」「証券取引不能・制約」「保険取引不能・制約」など、金融活動に影響を及ぼす。

「行政組織間の情報伝達不足」は「行政機能障害」を引き起こし、「消防活動不能・制約」を経て、「治安の悪化」及び「災害復旧活動遅延」を引き起こす。「災害復旧活動遅延」はさらに波及して、「救急搬送活動不能・制約」「救急医療活動遅延」など、救急活動に影響を及ぼす。

通信施設の直接機能損傷のうち、「電話施設支持物機能障害」及び「公衆電話機能障害」は、構造モデルの中で独立している。これらの機能損傷は他の機能損傷に結びつかないため、都市の機能低下に及ぼす影響は小さい。

5.11 商業関連施設の震災波及構造モデル

商業関連施設の震災波及構造モデルを図－5.11に示す。閾値は0.95としている。閾値の値が非常に大きいのは、どの機能損傷間に対しても、アンケート回答者が大きな関連度合いを記入しているためである。

図－5.11によれば、商業関連施設の震災波及構造モデルは7階層から構成される。構造モデルの形状は、鉄道施設と同じで、長方形型である。

商業関連施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「商品機能障害」「情報通信機能障害」「顧客・仕入れ先との通話不能」の3つである。これら3つの機能損傷の発生を防止することが、商業関連施設の震災対策の基本となる。ただし、これらの機能損傷の中で「顧客・仕入れ先との通話不能」は、本来、「情報通信機能障害」の結果として生じると考えられるが、最下層要因となっているのはよくわからない。「商品機能障害」は「商品価値低下による販売制限」を引き起こし、これが「小売機能障害」を引き起こす。「小売機能障害」からの波及経路は、大きく2つに分類できる。一方は、「農産物生産流通機能障害」「水産物流通機能障害」を引き起こす経路であり、これが「食料品不足」を引き起こす結果、「食料品価格高騰」及び「生活必需日用品不足」など、住民生活に影響を及ぼす。もう一方は、「在庫・入荷数管理不能」「加工食品生産流通機能障害」「市場機能障害」を引き起こす経路である。

「情報通信機能障害」及び「顧客・仕入れ先との通話不能」は、「小売機能障害」を引き起こした後、「商品機能障害」からの波及と全く同じ経路で機能損傷を引き起こす。

5.12 金融関連施設の震災波及構造モデル

金融関連施設の震災波及構造モデルを図－5.12に示す。閾値は0.78としている。

図－5.12によれば、金融施設の震災波及構造モデルは6階層から構成される。構造モデルの形状は、鉄道施設と同じで、長方形型である。ただし、同じ金融関連施設であっても、銀行及び証券に係わる構造モデルと、保険に係わる構造モデルが互いに独立している点が興味深い。

金融関連施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「銀行オンライン取引障害」「預金引出し不能・制約」「手形決裁不能による連鎖倒産」「証券オンライン取引障害」「保険料支払増加」の5つである。これら5つの機能損傷の発生を防止することが、金融関連施設の震災対策の基本となる。ただし、5つの機能損傷のうち「預金引出し不能・制約」「手形決裁不能による連鎖倒産」「保険料支払増加」の3つは、1次波及による機能損傷または2次波及による機能損傷であり、なぜ最下層要因となったかはよくわからない。

「銀行オンライン機能障害」は「引き出しに関わる混乱」を引き起こし、これが原因となって「預金支払制限令発令」がなされる。「預金支払制限令発令」は「銀行窓口取引機能障害」を引き起こし、最終的に「株価の大幅変動」を引き起こす。「証券オンライン取引障害」は「株価の大幅変動」を引き起こし、さらに「証券取引情報不足」を引き起こす。

「銀行オンライン機能障害」及び「証券オンライン取引障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、5件及び2件である。これは、「銀行オンライン機能障害」「証券オンライン取引障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを示している。

金融関連施設の直接機能損傷のうち、「証券窓口取引機能障害」は構造モデルの中で独立している。「証券窓口取引機能障害」は他の機能損傷に波及しないため、都市の機能低下に及ぼす影響は小さい。

5.13 サービス施設の震災波及構造モデル

サービス施設の震災波及構造モデルを図－5.13に示す。閾値は0.80としている。

図－5.13によれば、サービス施設の震災波及構造モデルは4階層から構成される。構造モデルの形状は、道路施設と同じで、逆三角形型である。

サービス施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「農産物生産流通機能障害」「生活必需日用品不足」「銀行取引機能障害」の3つである。これら3つの機能損傷の発生を防止することが、サービス施設の震災対策の基本となる。

「農産物生産流通機能障害」は、「加工食品生産流通機能障害」を経て「食料品不足」を引き起こし、最終的に「宿泊不能・制約」を引き起こす。「生活必需日用品不足」は「経済の停滞」を引き起こす。「銀行取引機能障害」は「証券取引機能障害」「保険取引機能障害」など金融活動に影響するとともに、「経済の停滞」を引き起こす。

サービス施設の直接機能損傷である「情報サービス機能障害」「事業サービス機能障害」「専門サービス機能障害」「研究開発機能障害」は、全て構造モデルの中で独立している。これについては、用語の意味が

正しくアンケート回答者に伝わらなかった可能性があり、さらに検討が必要である。

5.14 医療施設の震災波及構造モデル

医療施設の震災波及構造モデルを図－5.14に示す。閾値は0.61としている。

図－5.14によれば、医療施設の震災波及構造モデルは5階層から構成される。構造モデルの形状は、鉄道施設と同じで、長方形型である。

医療施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「情報通信機能障害」及び「死亡者・重体者増加」の2つである。これら2つの機能損傷が生じないようにすることが、医療施設の震災対策の基本となるただし、「死亡者・重体者増加」は2次波及による機能損傷であり、本来「診察・治療機能障害」の結果として生じるものと考えられることから、最下層要因となった理由はよくわからない。

「情報通信機能障害」は「患者との通話不能」を経て「診察・治療機能障害」を引き起こし、「地震による急患の増加」とあいまって「救急医療活動遅延」を引き起こす。

5.15 教育施設の震災波及構造モデル

教育施設の震災波及構造モデルを図－5.15に示す。閾値は0.71としている。

図－5.15によれば、教育施設の震災波及構造モデルは5階層から構成される。構造モデルの形状は、鉄道施設と同じで、長方形型である。

教育施設の震災波及構造の最下層要因は「生徒保護機能障害」である。これが生じないようにすることが、教育施設の震災対策の基本となる。

「生徒保護機能障害」は、「死亡者・重体者増加」を経て「専門教育不能・制約」「学校授業不能・制約」を引き起こし、最終的には「専門技能の低下」及び「学力の低下」を引き起こす。

5.16 行政施設の震災波及構造モデル

行政施設の震災波及構造モデルを図－5.16に示す。閾値は0.83としている。

図－5.16によれば、行政施設の震災波及構造モデルは7階層から構成される。「治安の悪化」「警察署間連絡不能」「行政通信機能障害」を最下層レベル集合とする構造モデル、「災害情報把握不能」「消防車の不足」「出火情報伝達不能」「消防署間連絡不能」を最下層レベル集合とする構造モデル、及び、「役所間連絡不能」を最下層レベル集合とする構造モデルに分かれている点が特徴である。構造モデルの形状は、上記のいずれも三角形型である。これは、最下層レベル集合に属する機能損傷はおおいが、これが波及するにつれて波及範囲が狭くなり、ある特定の機能損傷に集中することを意味している。

一つめの構造モデルの最下層要因は、「治安の悪化」「警察署間連絡不能」「行政通信機能障害」である。これらが波及することにより、「警察署間連絡障害」を経て、「交通制御機能障害」など、警察活動に対す

る障害が引き起こされる。

二つめの構造モデルの最下層要因は、「災害情報把握不能」「消防車の不足」「出火情報伝達不能」「消防署間連絡不能」である。これらが波及することにより、「消防活動不能・制約」を経て、「火災延焼」「避難障害」等が引き起こされ、最終的に「死亡者・重体者増加」「救急搬送活動遅延・制約」など、消防活動に関わる障害が引き起こされる。

三つめの構造モデルの最下層要因は「役所間連絡不能」である。これが波及することにより、「行政機能障害」が引き起こされる。

行政施設の直接機能損傷のうち、「公衆通信機能障害」は構造モデルの中で独立している。これは、広報車や同報無線など地域住民に情報連絡するための施設の被害は、都市の機能低下に及ぼす影響が小さいことを意味する。

5.17 報道施設の震災波及構造モデル

報道施設の震災波及構造モデルを図-5.17に示す。閾値は0.55としている。

図-5.17によれば、報道施設の震災波及構造モデルは6階層から構成される。構造モデルの形状は、道路施設と同じで、逆三角形型である。

報道施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「テレビ放送機能障害」「新聞発行機能障害」「保険取引機能障害」「銀行取引機能障害」「サービス機能障害」「農産物生産流通機能障害」の6つである。これら6つの機能損傷が生じないようにすることが報道施設の震災対策の基本となる。ただし、「保険取引機能障害」「銀行取引機能障害」「サービス機能障害」「農産物生産流通機能障害」の4つは、1次波及による機能損傷に位置づけられるものであり、これらの機能損傷が最下層要因となった理由はよくわからない。

「テレビ放送機能障害」は大きく2つの方向に波及する。一方は、「ラジオ放送機能障害」を経て「災害情報提供不能」を引き起こす波及である。「災害情報提供不能」は、「災害復旧活動遅延」「治安の悪化」を引き起こし、最終的に「株価の大幅変動」「経済の停滞」「心理的不安」を引き起こす。もう一方は、「ケーブルテレビ放送機能障害」「衛星放送機能障害」を引き起こす波及である。

「新聞発行機能障害」は「治安の悪化」を引き起こす。「治安の悪化」以後の波及経路は、「テレビ放送機能障害」の場合と同じである。

「テレビ放送機能障害」及び「新聞発行機能障害」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、9件及び4件である。これは、「テレビ放送機能障害」「新聞発行機能障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを示している。

報道施設の直接機能損傷のうち、「出版物発行機能障害」は構造モデルの中で独立している。これは、テレビ、ラジオ、新聞に比べると出版物の制約が都市の機能低下に及ぼす影響は小さいことを意味するものである。

5.18 生産関連施設の震災波及構造モデル

生産関連施設の震災波及構造モデルを図－5.18に示す。閾値は0.65としている。

図－5.18によれば、生産関連施設の震災波及構造モデルは7階層から構成される。構造モデルの形状は、道路施設と同じで、逆三角形型である。「半導体生産機能障害」及び「石油化学製品生産流通機能障害」を最下層レベル集合とする構造モデルは、「爆発・火災発生」を最下層レベル集合とする構造モデルからは独立している。

生産関連施設の震災波及構造モデルの最下層要因は、「爆発・火災発生」「金融機能障害」「半導体生産機能障害」「石油化学製品生産流通障害」の4つである。これら4つの機能損傷が生じないようにすることが、生産関連施設の震災対策の基本となる。

「半導体生産機能障害」は「電気製品生産流通機能障害」を引き起こす。「石油化学製品生産流通機能障害」は「化学製品生産流通機能障害」を引き起こす。「爆発・火災発生」は、大きく2つの方向に波及する。一方は「土壌・地下水汚染」であり、「農産物生産流通機能障害」を経て「加工食品生産流通機能障害」を引き起こす。もう一方は「火災延焼」「大気・海洋汚染」であり、「水産物水揚げ流通機能障害」を経て、「加工食品生産流通障害」を引き起こす。「加工食品生産流通機能障害」は、「サービス機能障害」「食料品不足」「死亡者・重体者増加」など住民生活や、「経済の停滞」など経済活動に影響を及ぼす。

「金融機能障害」は「加工食品生産流通機能障害」を引き起こした後、「爆発・火災発生」と同じ波及経路で機能損傷を引き起こす。

「半導体生産機能障害」「石油化学製品生産流通機能障害」「金融機能障害」「爆発・火災発生」が引き起こす機能損傷の件数は、それぞれ、1件、1件、5件、12件である。これは、「爆発・火災発生」「金融機能障害」「半導体生産機能障害」「石油化学製品生産流通機能障害」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを意味する。

生産関連施設の直接機能損傷のうち、「研究開発機能障害」は構造モデルの中で独立している。「研究開発機能障害」は他の機能損傷に結びつかないため、都市の機能低下に及ぼす影響は小さいと考えることができる。

5.19 住宅施設の震災波及構造モデル

住宅施設の震災波及構造モデルを図－5.19に示す。閾値は0.72としている。

図－5.19によれば、住宅施設の震災波及構造モデルは6階層から構成される。構造モデルの形状は、震災波及の原因となる機能損傷が少なく、かつ、震災波及の範囲が広がらない線状型となっている。

住宅施設の震災波及構造モデルの最下層要因は「マンション等から避難不能」である。高層建築物が密集する大都市域においては、建築物からの避難設備を充実することが、住宅施設の震災対策の基本となる。

「マンション等から避難不能」は、「居住不能・制約」を引き起こし、「仮設住宅によるストレス」を生み、「死亡者・重体者増加」「衛生環境の悪化」「経済の停滞」へと波及する。「学力の低下」及び「労働力の低下」は、長期的に見れば都市の生産機能に影響を及ぼすと考えられるが、構造モデルの中では独立し

ている。

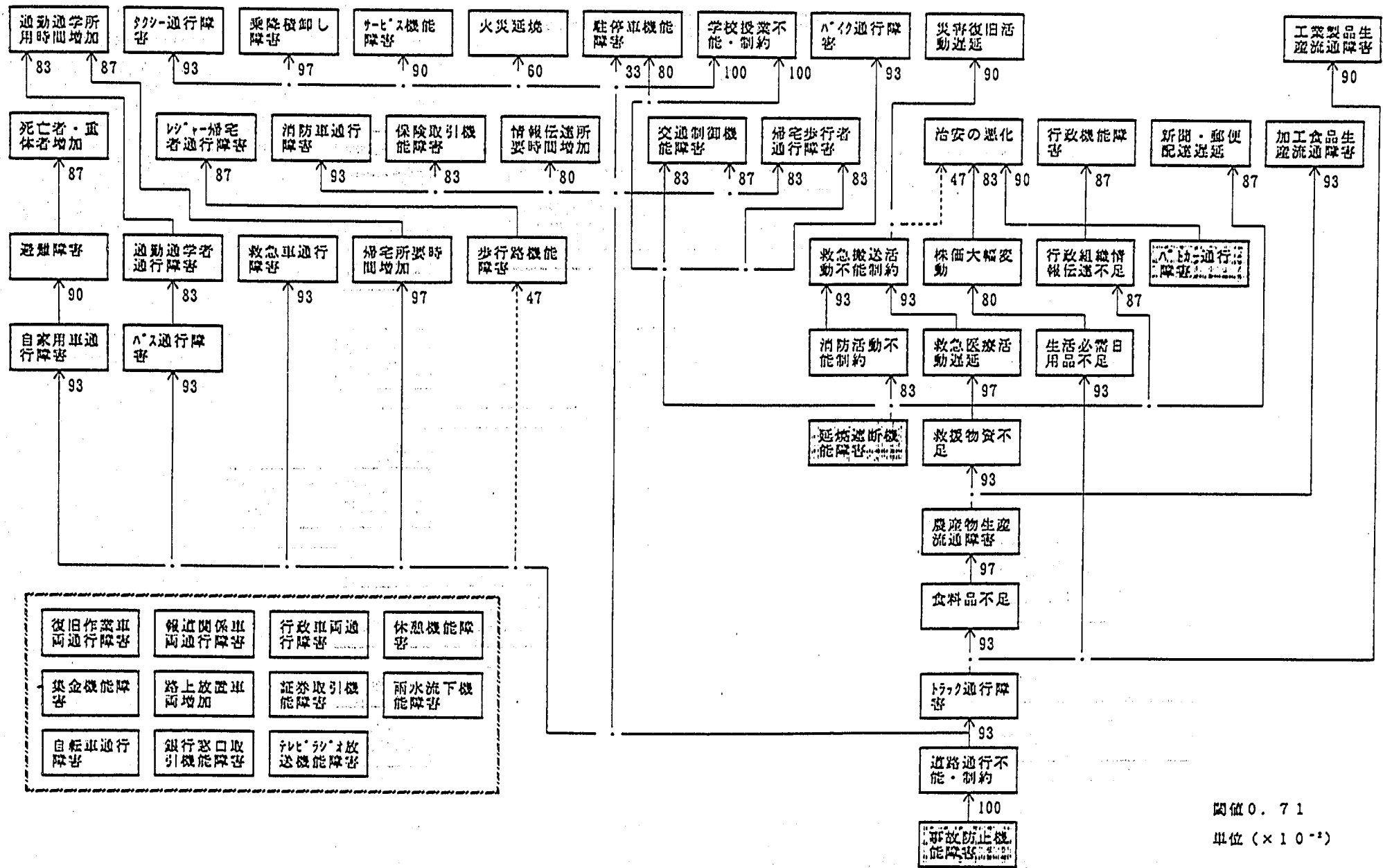


図-5.1 道路施設の震災波及構造モデル

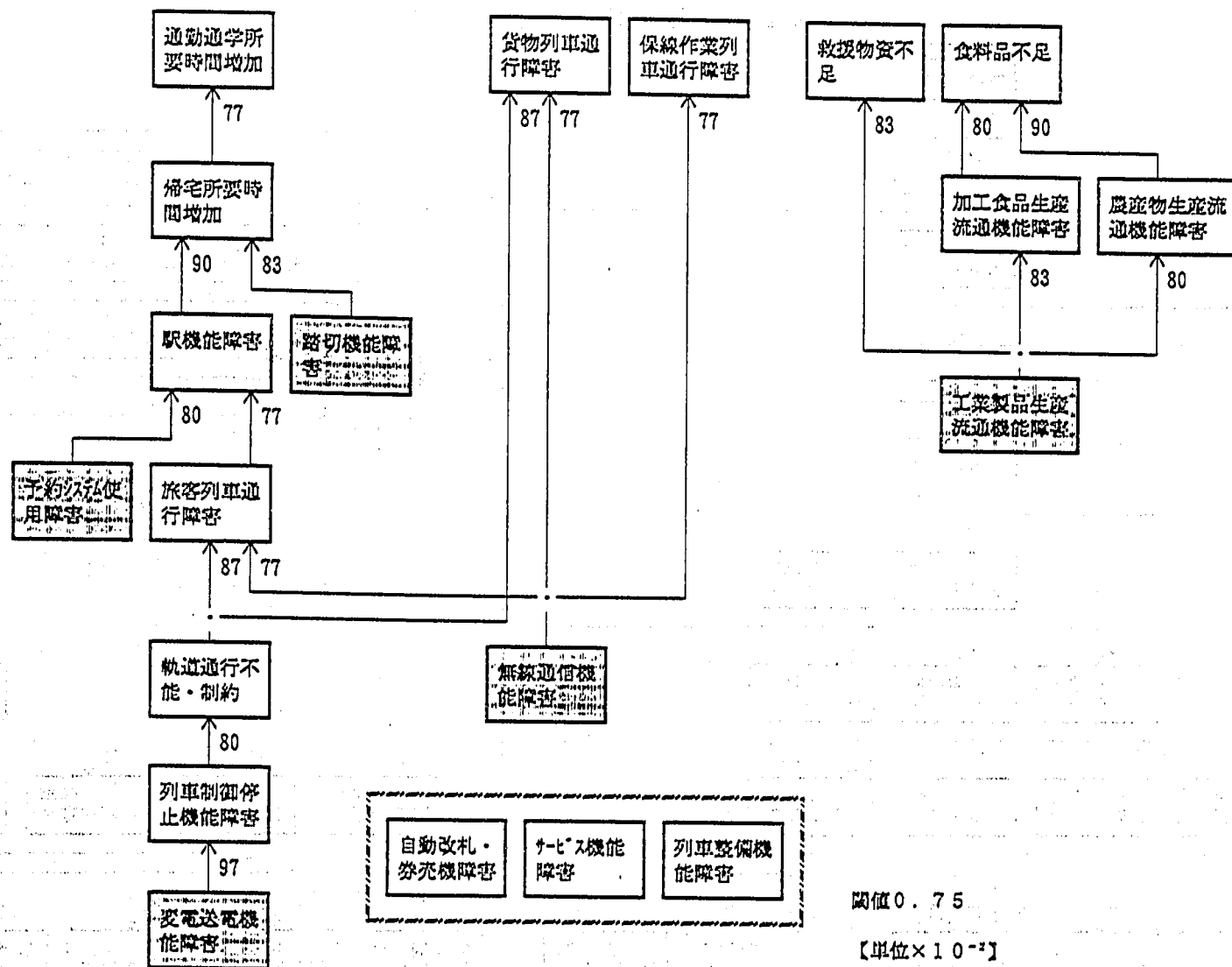


図-5.2 鉄道施設の震災波及構造モデル

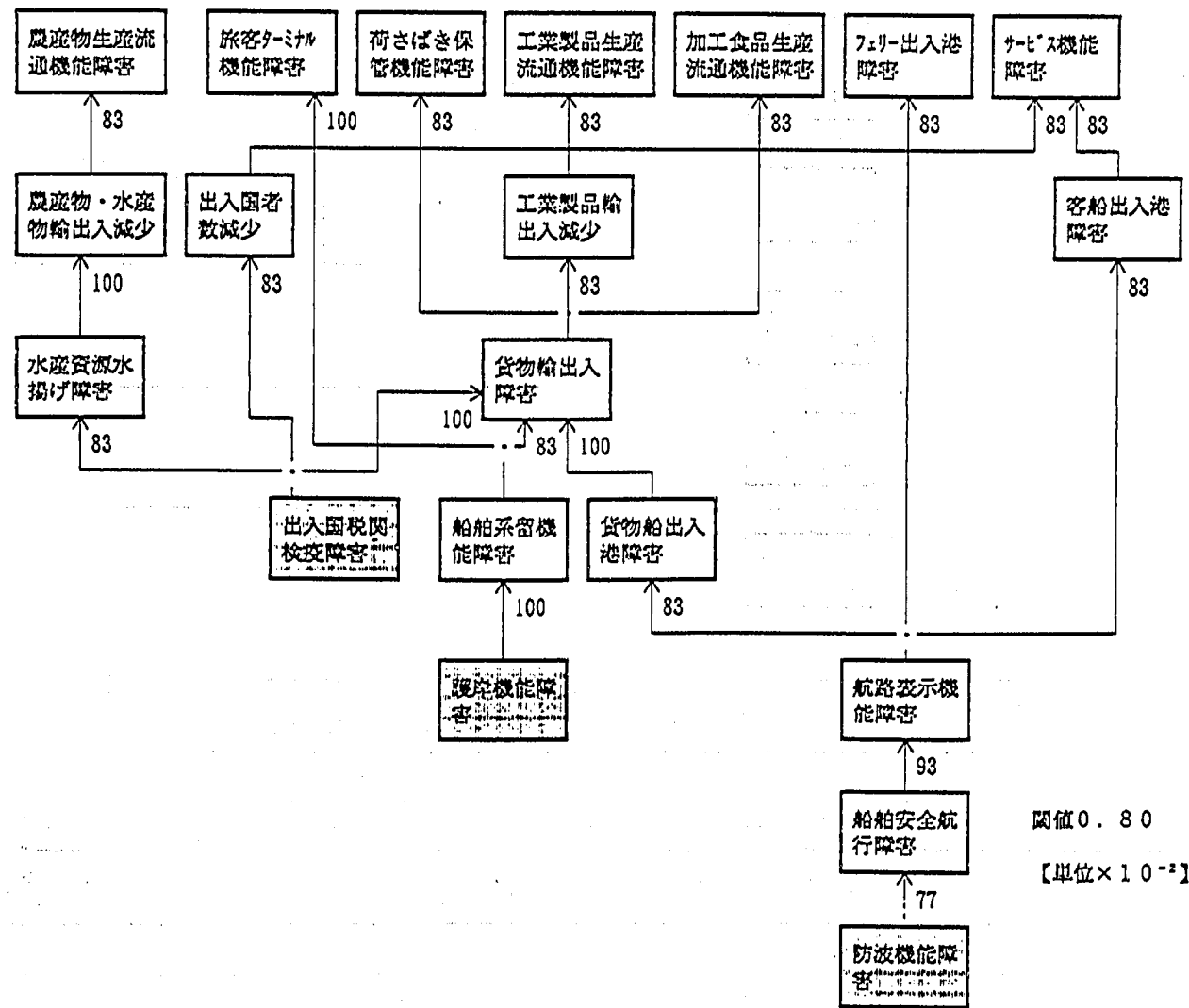


図-5.3 港湾施設の震災波及構造モデル

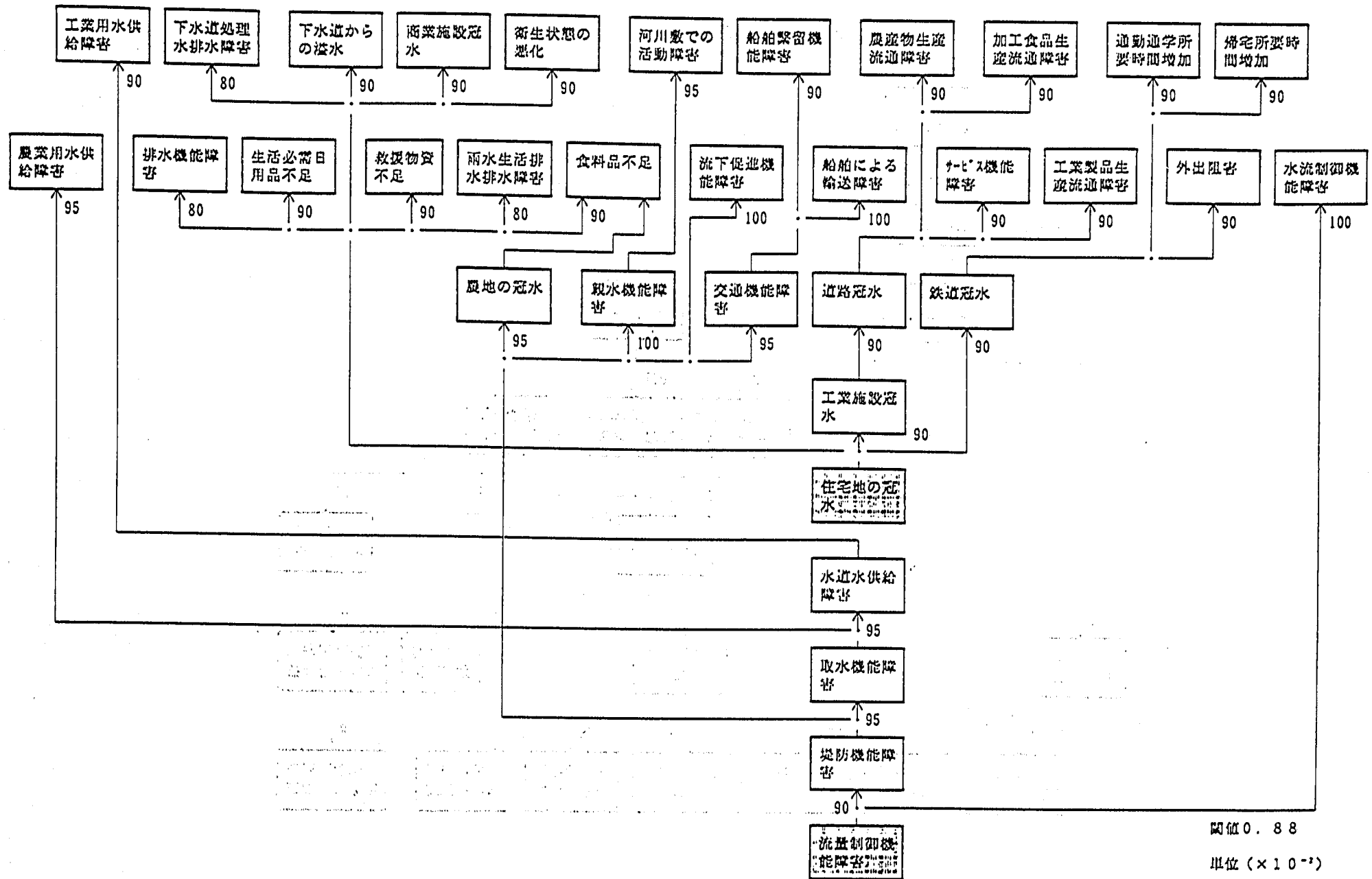


図-5.4 河川施設の震災波及構造モデル

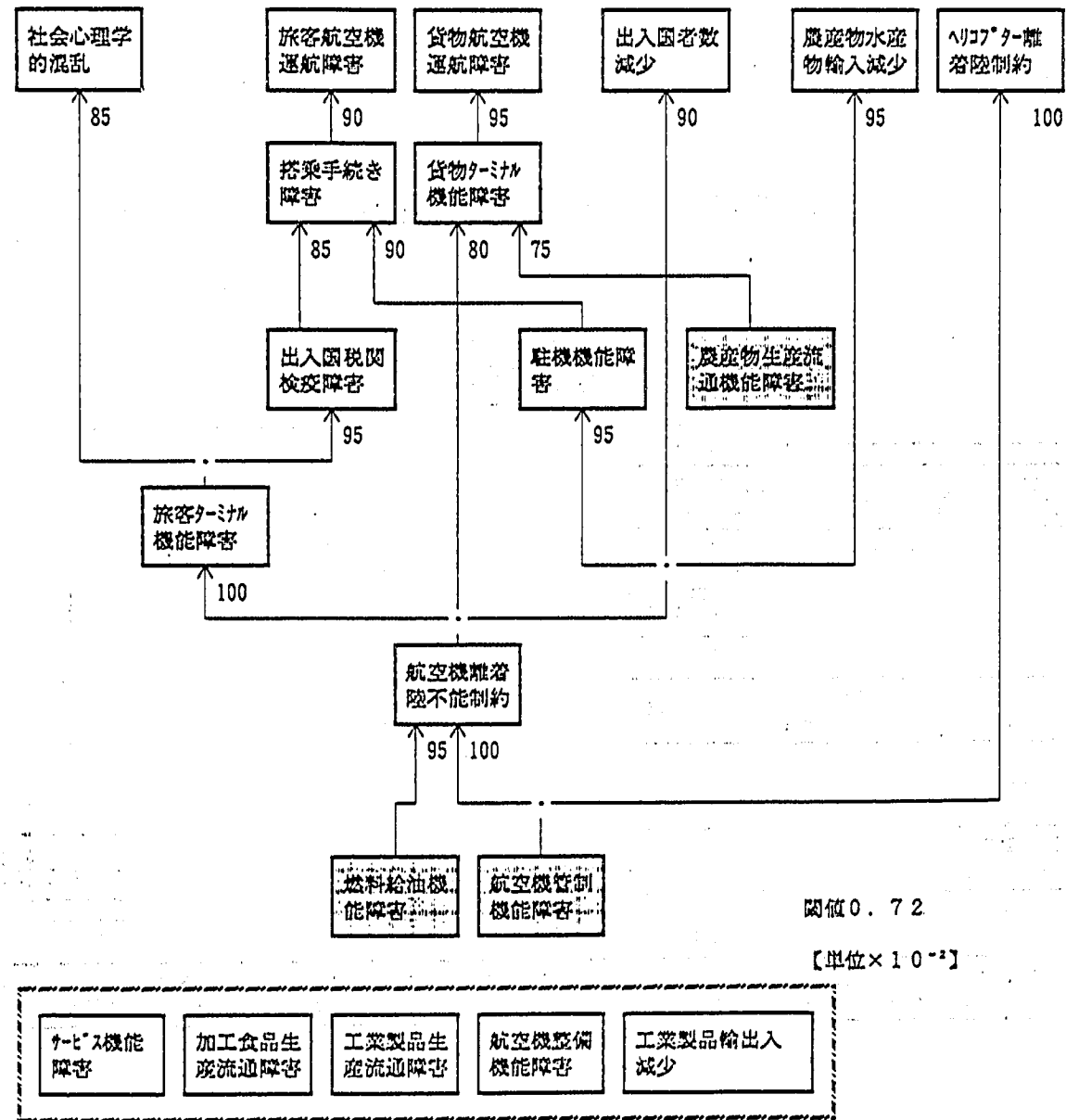


図-5.5 空港施設の震災波及構造モデル

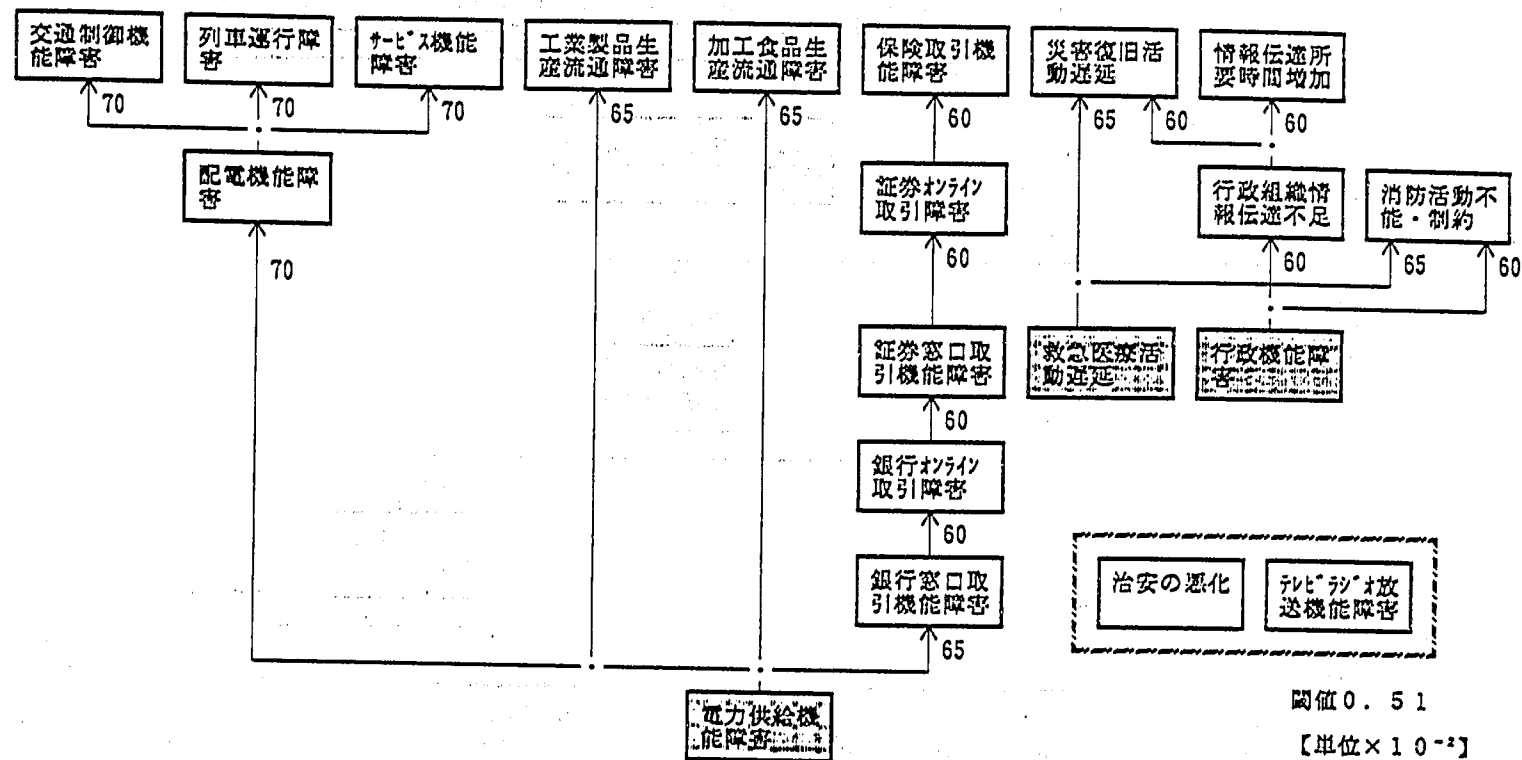


図-5.6 電力施設の震災波及構造モデル

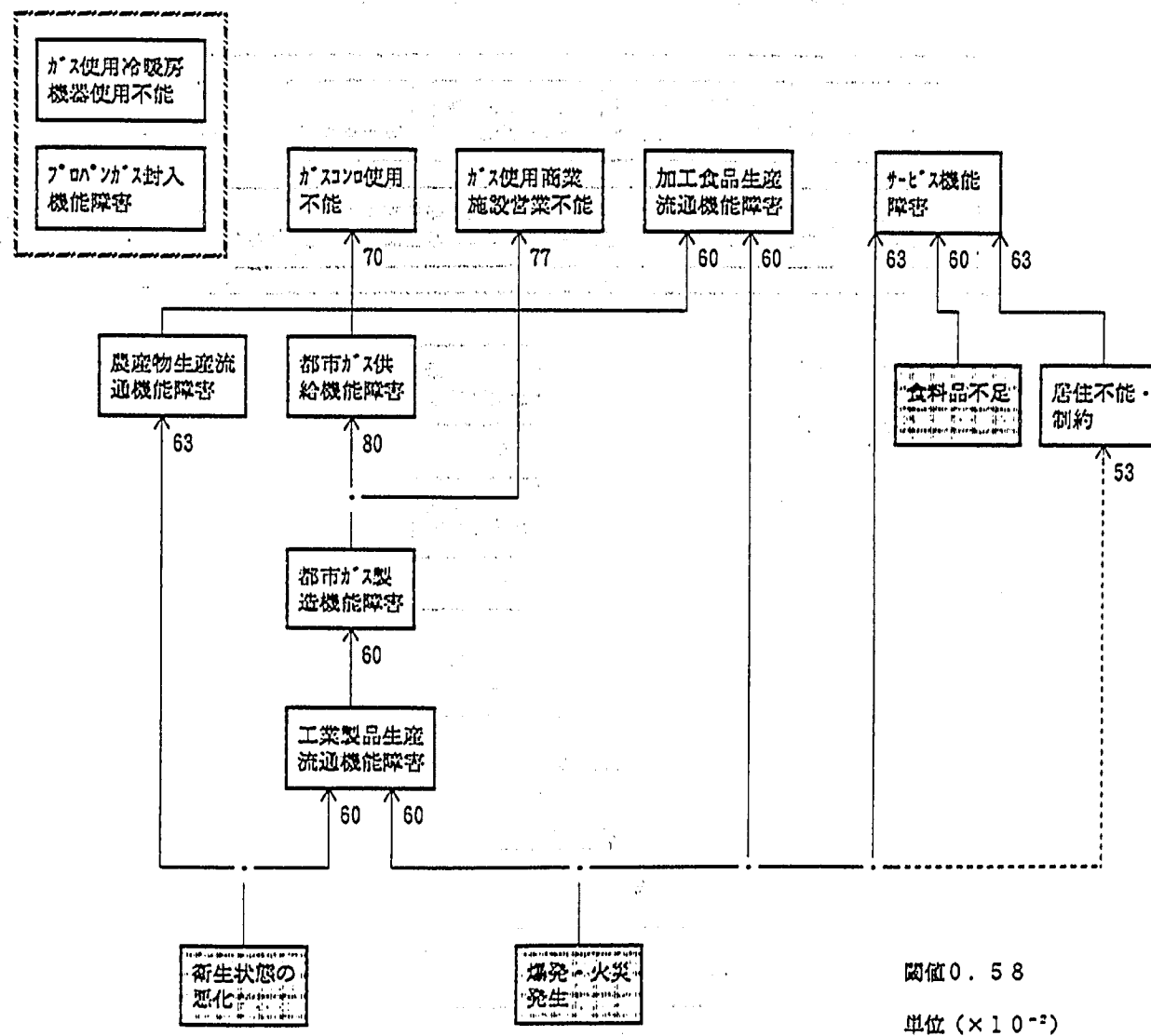
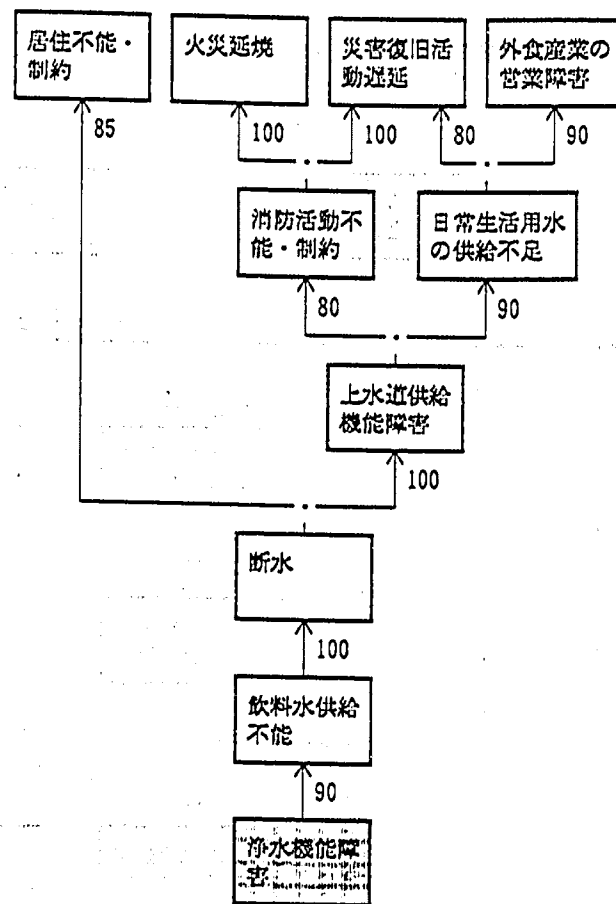


図-5.7 ガス施設の震災波及構造モデル



閾値0.77

【単位×10⁻²】

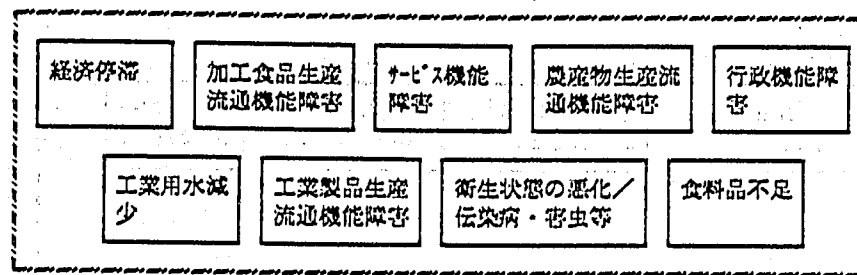


図-5.8 上水道施設の震災波及構造モデル

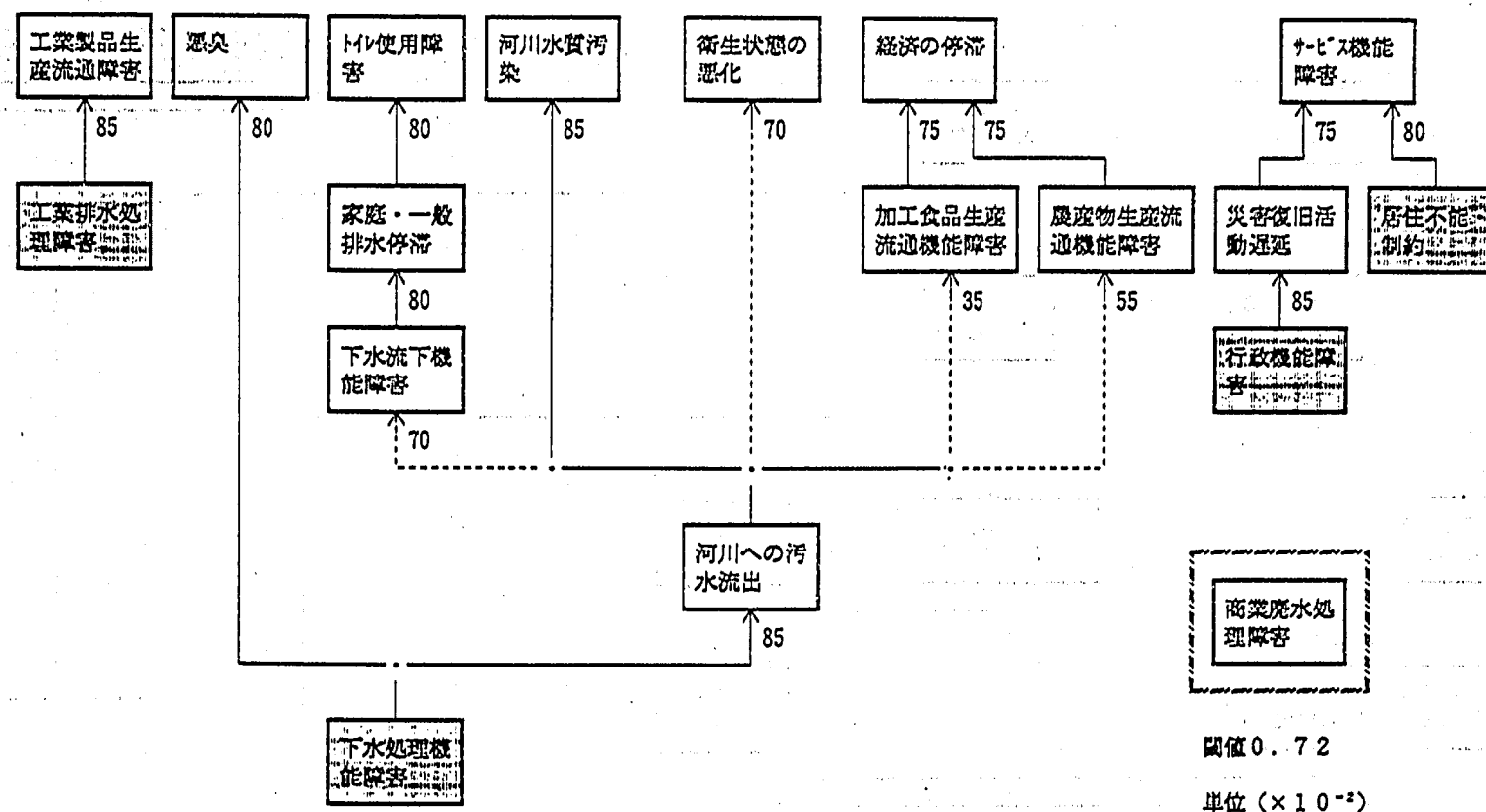


図-5.9 下水道施設の震災波及構造モデル

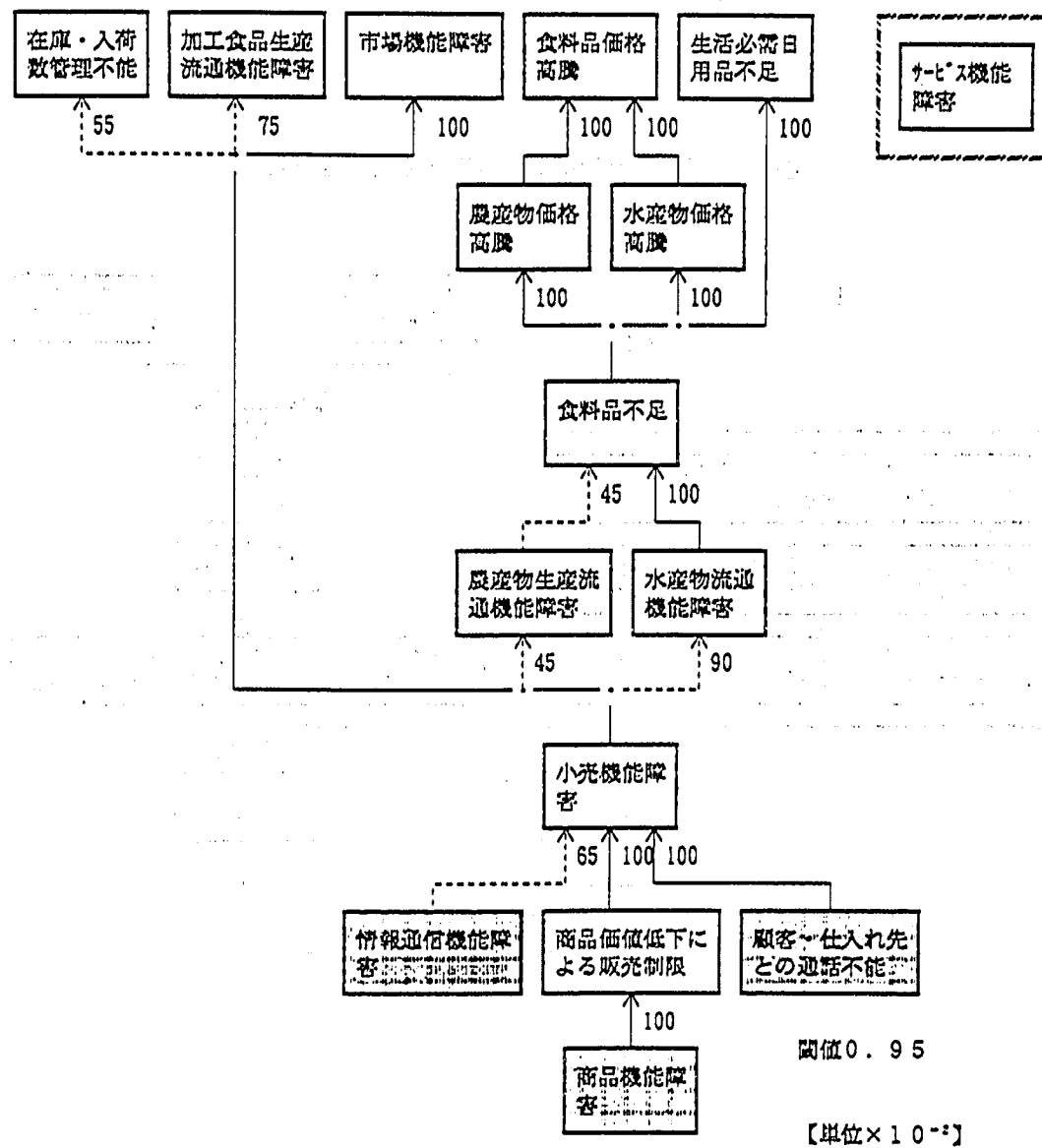


図-5.11 商業関連施設の震災波及構造モデル

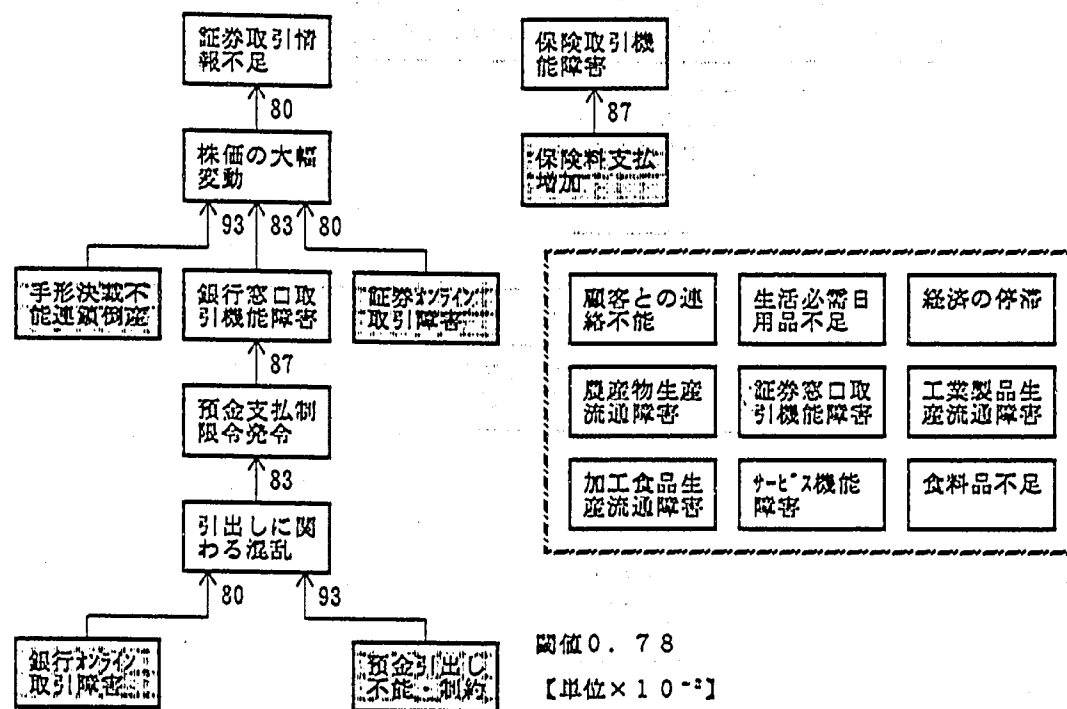


図-5.12 金融関連施設の震災波及構造モデル

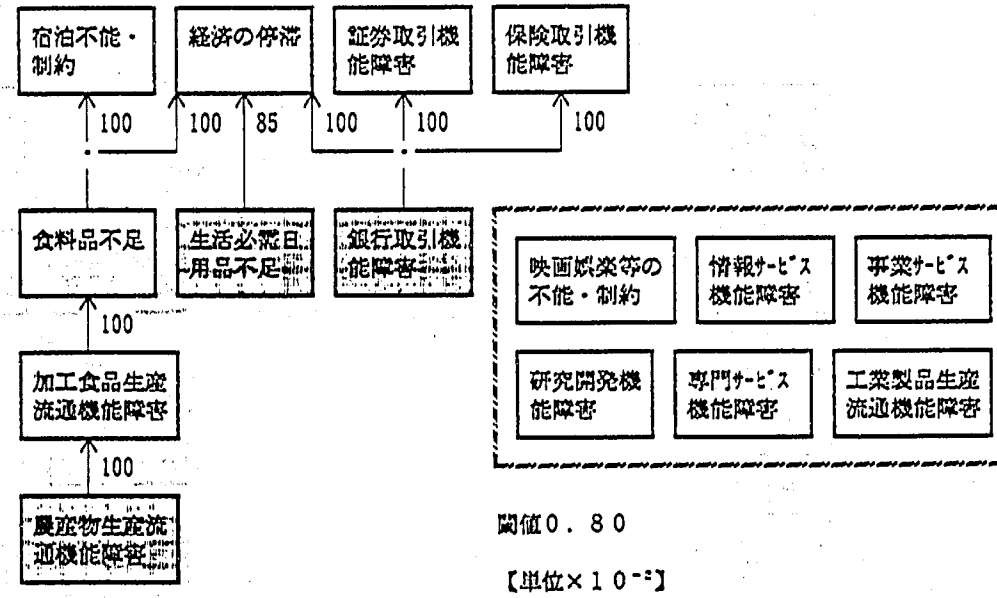


図-5.13 サービス関連施設の震災波及構造モデル

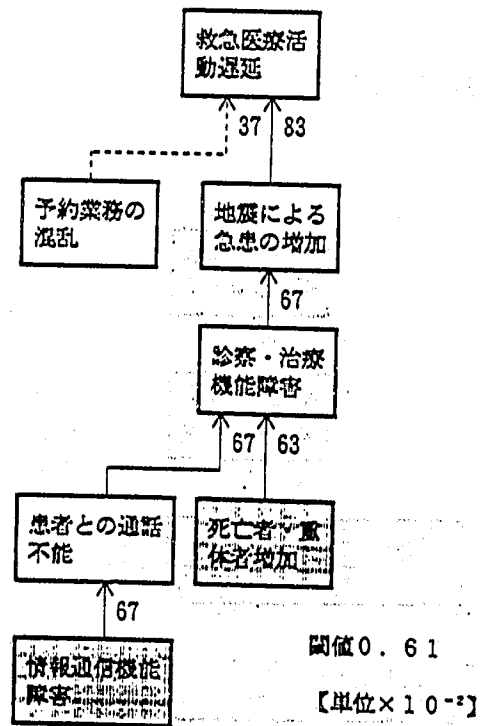


図-5.14 医療関連施設の震災波及構造モデル

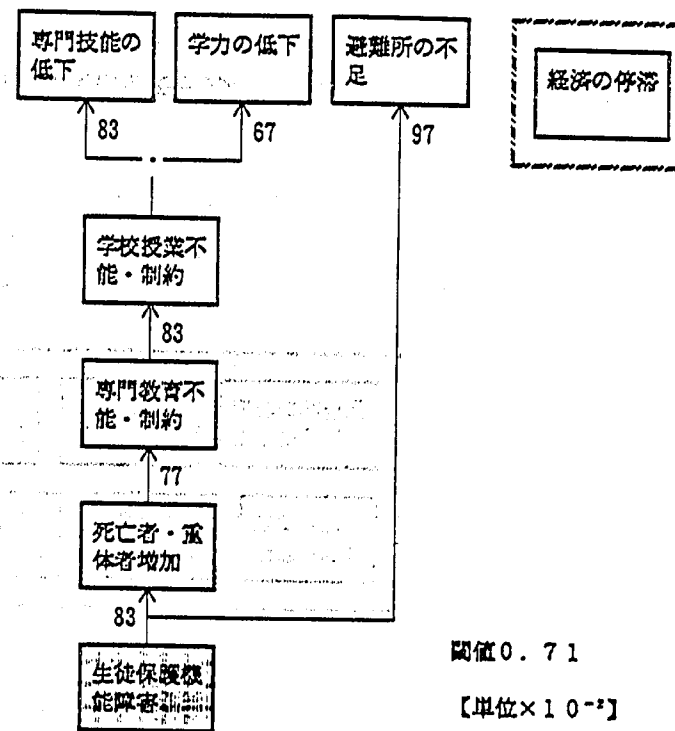


図-5.15 教育関連施設の震災波及構造モデル

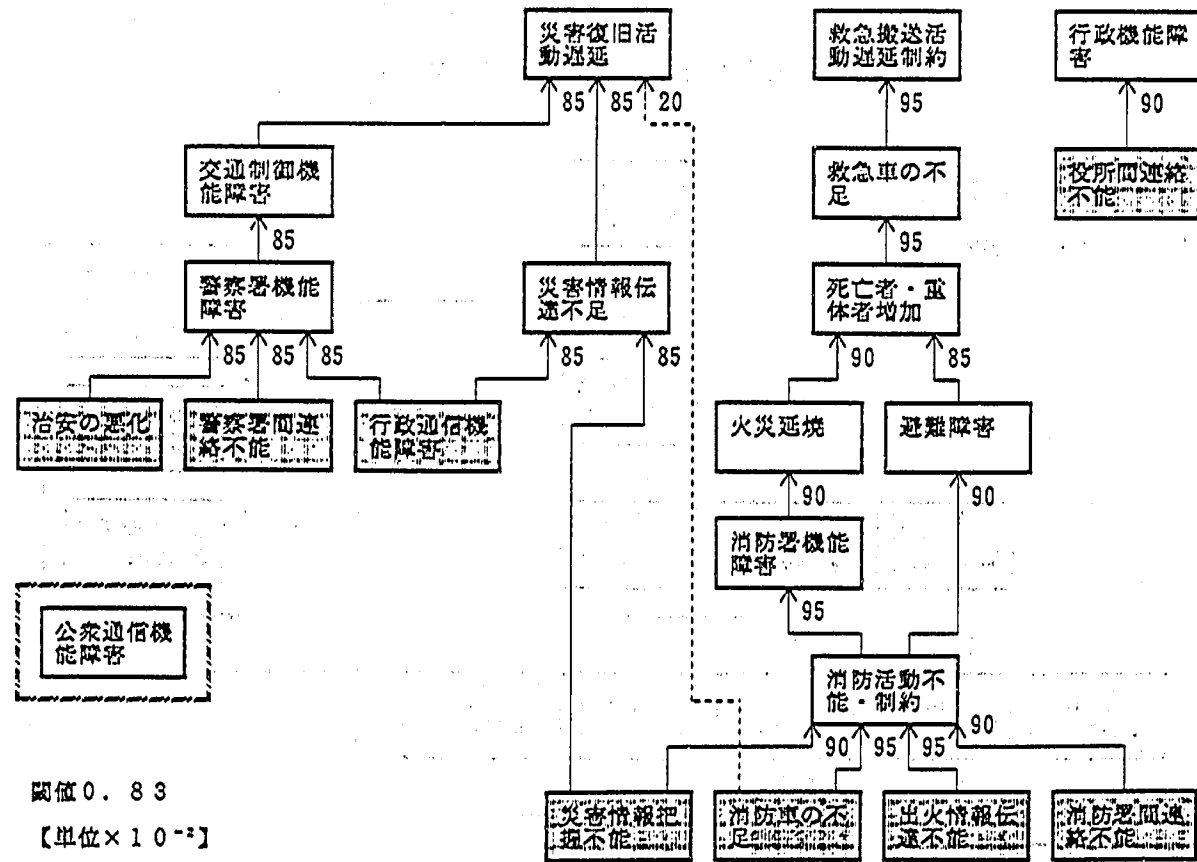


図-5.16 行政関連施設の震災波及構造モデル

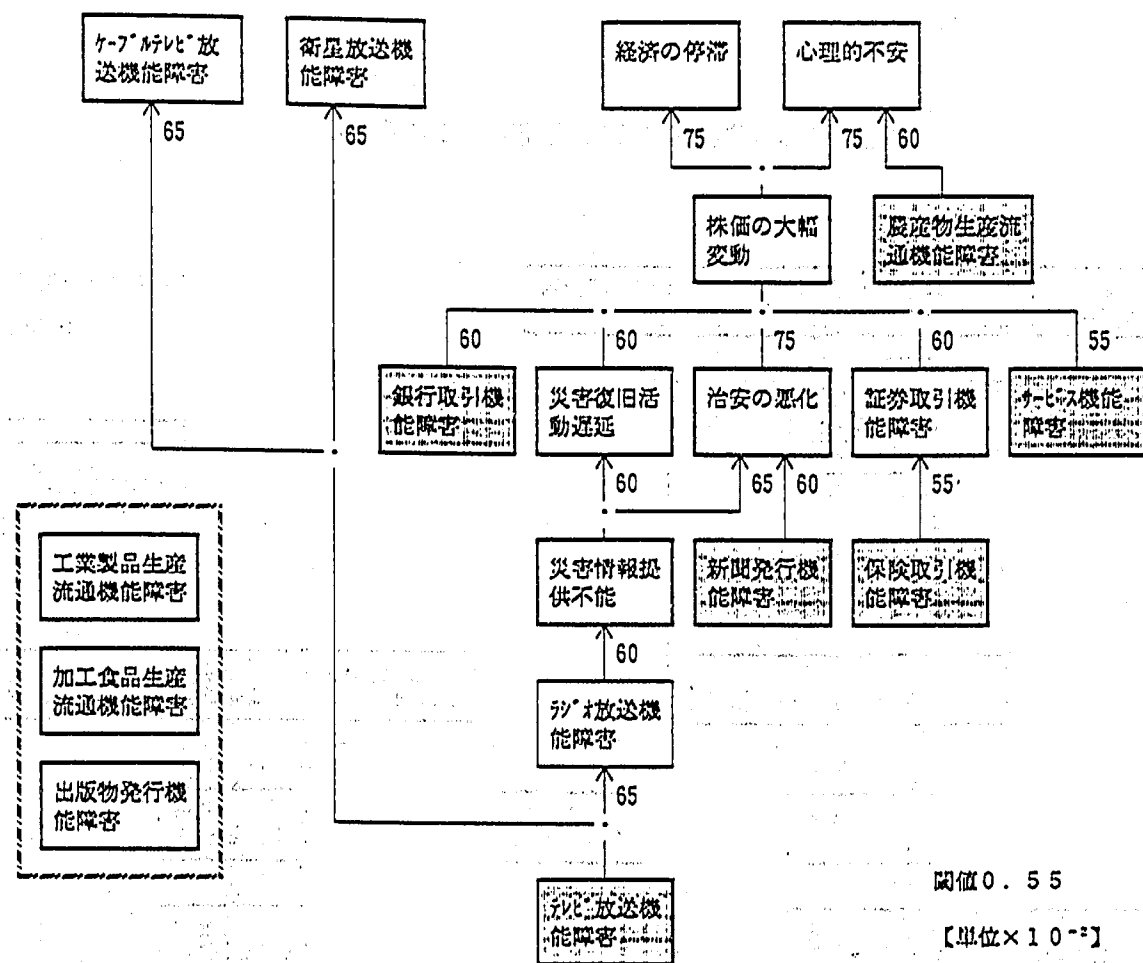


図-5.17 報道関連施設の震災波及構造モデル

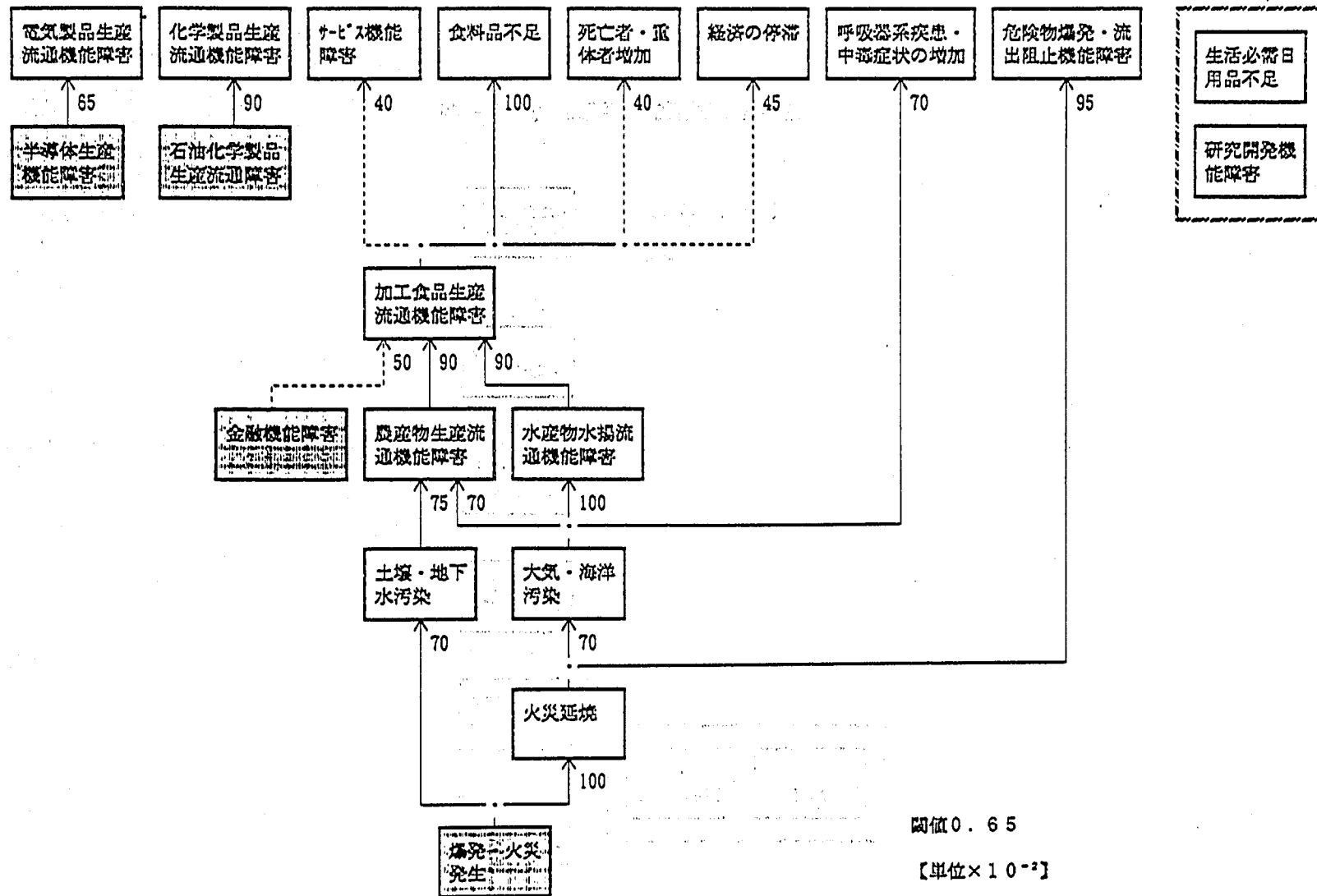


図-5.18 生産関連施設の震災波及構造モデル

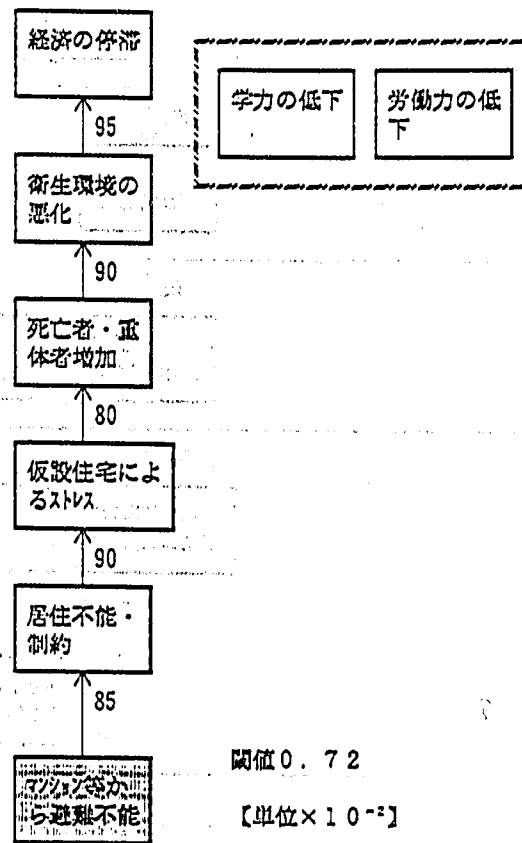


図-5.19 住宅施設の震災波及構造モデル

6. 基盤施設相互の震災波及構造

6.1 基盤施設相互の震災波及

19種類の基盤施設に生じ得る物的被害相互の震災波及構造モデルを図-6.1に示す。閾値は0.41としている。閾値の値が、基盤施設ごとの震災波及構造モデルに比較して小さいのは、物的被害相互の関連度合 α_{ij} の値が全体に小さく、閾値を小さく設定しないと物的被害相互の震災波及の骨格が明確にならないためである。

なお、図-6.1を見ると、「発電所損壊」から「浄水場損壊」や、「上水道配水管損壊」から「一般建築施設損壊」への波及が認められる。発電所が壊れることによって浄水場が物的被害を受けたり、上水道配水管が壊れることによって一般建築施設が物的被害を受けたりすることは、一般的に見て考えにくい。このような構造モデルとなったのは、アンケート回答者が物的被害相互の関連度合を考える際に、機能的な影響まで考慮してしまったためと想像される。すなわち、「発電所損壊」によって電力供給機能の損傷が生じると考え、これが浄水場の浄水機能に影響を及ぼすと考えたのである。また、「上水道配水管損壊」によって上水道供給機能の損傷が生じると考え、これが一般建築施設における生活機能や生産機能に影響を及ぼすと考えたのである。

このように、図-6.1に示す震災波及構造モデルは、純粋に基盤施設相互の物的な関連を表したのではなく、機能的な関連も一部含んだものである。純粋に物的な関連を表わす震災波及構造モデルは別途検討する必要がある。しかし、発電所が損壊して電力を供給できなくなれば浄水場に影響を及ぼすことは事実であり、上水道配水管が損壊して上水を供給できなくなれば一般建築施設における活動に影響を及ぼすこともまた事実である。このため、本検討においては、アンケート調査の主旨とは異なるが、図-6.1を基盤施設相互の震災波及構造モデルと見なすこととする。

図-6.1によれば、基盤施設の物的被害相互の震災波及に関して、以下の点が指摘される。

- 1) 構造モデルは8階層から構成されており、大きく、「発電所損壊」を最下層に持つ構造モデルと、「港湾護岸損壊」を最下層に持つ構造モデルに分類できる。震災波及の主体は「発電所損壊」を最下層に持つ構造モデルであり、その形状は上層に向かうほど機能損傷が多くなる逆三角形型である。
- 2) 震災波及構造モデルの最下層要因は、「発電所損壊」「鉄道軌道損壊」「ガス製造工場損壊」「道路路面陥没」「空港滑走路損壊」「港湾護岸損壊」の6つである。これら6つの物的被害の発生を防止することが、大都市域の震災対策の基本となる。
- 3) 6つの最下層要因のうち、「鉄道軌道損壊」「空港滑走路損壊」「港湾護岸損壊」は、それぞれ鉄道施設、空港施設、港湾施設に関わる他の物的被害を引き起こすだけであり、基盤施設相互の震災波及は生じない。大都市域における震災波及を遮断し、都市の機能低下を防止するためには、基盤施設相互に震災波及を生じる「発電所損壊」「道路路面陥没」「ガス製造工場損壊」を防止することが重要である。

4)「発電所損壊」は、鉄道施設の「鉄道変電送電設備損壊」「踏切信号機損壊」「列車制御装置損壊」「駅施設損壊」、道路施設の「道路信号機損壊」、空港施設の「空港ターミナル損壊」、下水道施設の「下水処理場損壊」、上水道施設の「浄水場損壊」、通信施設の「基幹通信回線損壊」「通信回線損壊」、行政関連施設の「行政ネットワークシステム損壊」など、電力を必要とする基盤施設の物的被害に波及する。

5)「道路路面陥没」は、上水道施設の「上水道送水管損壊」「上水道配水管損壊」、ガス施設の「低圧ガス導管損壊」、下水道施設の「下水道管損壊」、電力施設の「電力配電設備損壊」など、道路下に埋設されるライフライン施設の物的被害に波及する。

6)「ガス製造工場損壊」は、空港施設の「空港ターミナル施設損壊」、生産関連施設の「生産工場損壊」、住宅施設の「一般住宅損壊」、商業関連施設・金融関連施設・サービス関連施設・医療関連施設・教育関連施設・行政関連施設・報道関連施設・生産関連施設の「一般建築施設損壊」に波及する。

7)「発電所損壊」「道路路面陥没」「ガス製造工場損壊」が引き起こす物的被害の件数は、それぞれ、14件、9件、4件である。これは、「発電所損壊」「道路路面陥没」「ガス製造工場損壊」の順番で、震災波及に及ぼす影響が大きいことを示している。

6.2 震災波及から見た道路施設の震災対策

図－6.1に示す道路施設の震災波及構造モデルと、図－5.1に示す基盤施設相互の震災波及構造モデルを併せることにより、道路施設を中心とした大都市域の震災波及構造を明らかにすることができる。ただし、図－6.1は物的被害を、また、図－5.1は直接機能損傷、1次波及による機能損傷及び2次波及による機能損傷を用いて作成したものであるため、両者を併せるためには、物的被害と直接機能損傷との関連を整理する必要がある。

道路施設の物的被害と直接機能損傷の関連を整理した結果を、表－6.1に示す。図－5.1、図－6.1及び表－6.1によれば、大都市域における道路施設の震災対策に関して、以下の点が指摘される。

1)道路施設の震災波及構造モデルの最下層要因である「事故防止機能」及び「延焼遮断機能」は、「道路路面陥没」「斜面崩壊」「橋梁損壊」「道路信号機損壊」によってもたらされる。このうち、「道路路面陥没」は基盤施設相互の震災波及構造モデルの最下層要因である。したがって、「道路路面陥没」は、道路施設の震災波及と基盤施設相互の震災波及の両方に影響を及ぼすことになり、「道路路面陥没」の発生を防止することが道路施設の震災対策で最も重要となる。

2)道路施設の物的被害のうち「道路路面陥没」「斜面崩壊」「橋梁損壊」は、他の基盤施設の物的被害の影響を受けない。したがって、これら道路施設の物的被害を防止するためには、施設自体の耐震性を高めることが基本となる。

3)道路施設の物的被害のうち「道路信号機損壊」だけは、電力施設の物的被害である「発電所損壊」の影響を受ける。このため、「道路信号機損壊」の発生を防止するためには、施設自体の耐震性を高めるとともに、バックアップ電源の整備等により、「発電所損壊」からの波及を遮断することが重要である。

6.3 震災波及から見た河川施設の震災対策

道路施設と同じように、河川施設の物的被害と直接機能損傷を整理した結果を表－6.2に示す。図－5.4、図－6.1及び表－6.2によれば、大都市域における河川施設の震災対策に関して、以下の点が指摘される。

- 1)河川施設の物的被害である「河川堤体式堤防損壊」「河川護岸式堤防損壊」「河川船舶係留施設損壊」は、基盤施設相互の震災波及構造モデルの中で独立している。したがって、河川施設の物的被害は、他の基盤施設の物的被害に影響せず、また、他の基盤施設の物的被害に影響しない。
- 2)河川施設の震災波及構造モデルの最下層要因である「流量制御機能障害」は、「河川堤体式堤防損壊」及び「河川護岸式堤防損壊」によってもたらされる。したがって、これら2つの物的被害の発生を防止することが、河川施設の震災対策で最も重要となる。

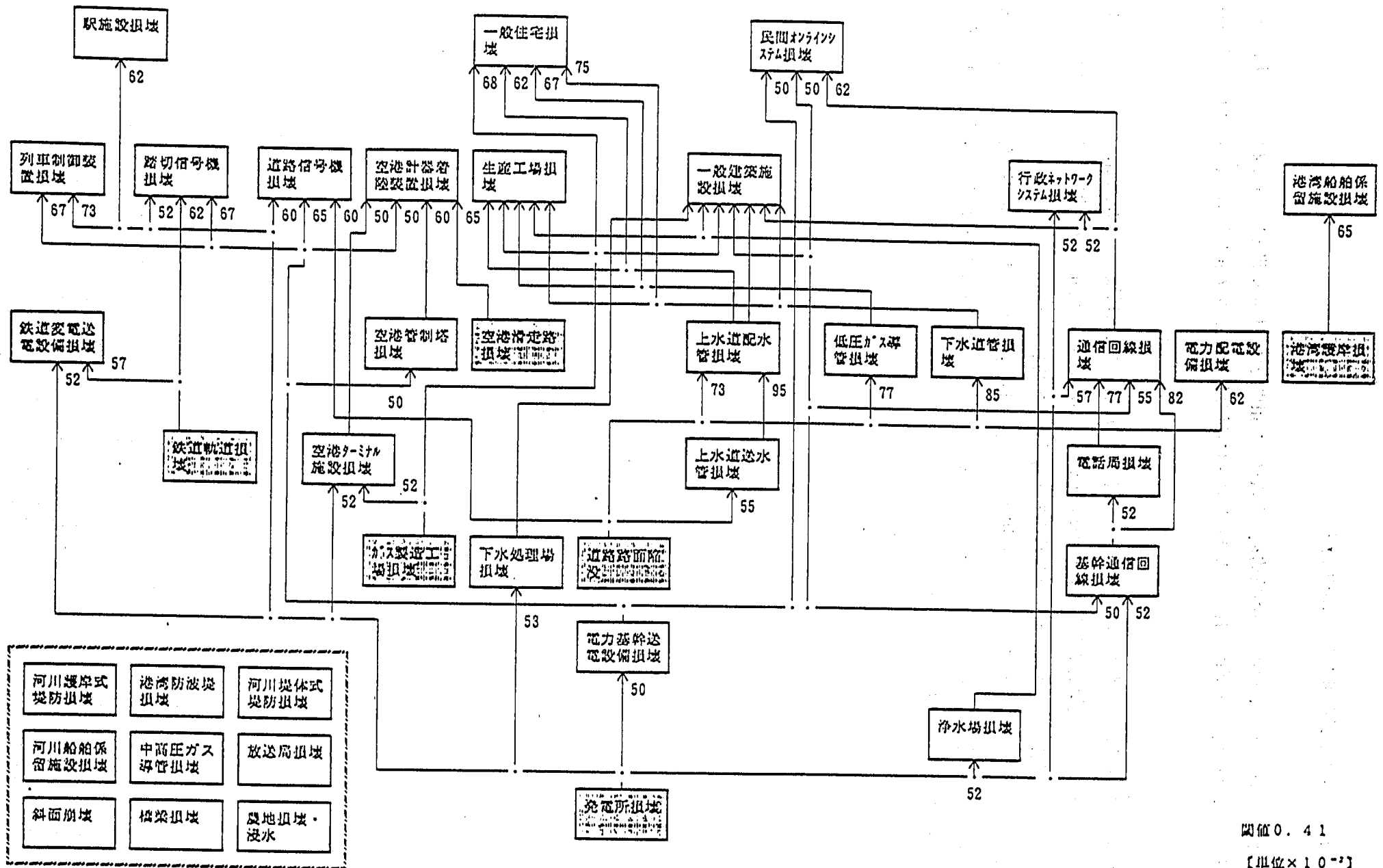


図-6.1 基盤施設相互の震災波及構造モデル

閾値0.41

【単位×10⁻²】

表－6.1 道路施設の物的被害と直接機能損傷の関係

物的被害	波及先	直接機能損傷
道路路面陥没 斜面崩壊 橋梁損壊 道路信号機損傷	(1)(4)(5)(6)(7) (1)(2)(4)(5)(6)(7) (1)(5)(7) (1)(3)(5)	(1)道路通行不能制約 (2)延焼遮断機能障害 (3)交通制御機能障害 (4)雨水流下機能障害 (5)事故防止機能障害 (6)駐停車機能障害 (7)歩行路機能障害 (8)休憩機能障害 (9)集金機能障害

表－6.2 河川施設の物的被害と直接機能損傷の関係

物的被害	波及先	直接機能損傷
河川堤体式堤防損壊 河川護岸式堤防損壊 河川船舶係留施設損壊	(1)(2)(3)(4) (1)(2)(3)(4)(9) (2)(8)	(1)堤防機能障害 (2)交通機能障害 (3)流量制御機能障害 (4)水流制御機能障害 (5)取水機能障害 (6)排水機能障害 (7)流下促進機能障害 (8)船舶係留機能障害 (9)親水機能障害

7. まとめ

大都市域に大規模地震が生じた場合の震災波及構造を明らかにすることを目的として、FSM法を用いることにより、震災波及構造モデルを作成した。また、震災波及構造モデルを用いることにより、震災波及の観点からみた道路施設及び河川施設の震災対策を検討した。本検討の結論をまとめると、以下の通りである。

(1)19種類の基盤施設に生じ得る機能損傷を、物的被害・直接機能損傷・1次波及による機能損傷・2次波及による機能損傷の4段階に分けた上で、基盤施設相互の物的被害の関連、及び、基盤施設ごとの直接機能損傷・1次波及による機能損傷・2次波及による機能損傷の関連を解析した。これにより、図-6.1に示す基盤施設相互の震災波及構造モデル、及び、図-5.1～5.19に示す基盤施設ごとの震災波及構造モデルを提案した。

(2)基盤施設ごとの震災波及構造モデルを解析することにより、19種類の基盤施設のそれぞれについて震災波及の原因となる直接機能損傷を抽出し、震災対策の基本方針を明らかにした。

(3)基盤施設相互の震災波及構造モデルを解析することにより、基盤施設相互の震災波及の原因となる物的被害は、電力施設の「発電所損壊」、道路施設の「道路路面陥没」及びガス施設の「ガス製造工場損壊」であることを明らかにした。

(4)道路施設の震災対策に関して、「道路路面陥没」の発生を防止することが、道路施設の震災波及を防止し、かつ、基盤施設相互の震災波及を防止する上で最も重要であることを明らかにした。

(5)河川施設の震災対策に関して、河川施設の物的被害は、他の基盤施設の物的被害の影響を受けにくく、かつ、他の基盤施設の物的被害に影響を及ぼしにくいことを明らかにした。

謝 辞

アンケート調査に際しては、関係機関の多大な協力を賜った。ここに記して、厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1)川島一彦、杉田秀樹、中島燈:大都市圏における震災波及構造に関する研究～(その1)震災波及構造モデルの解析～、土研資料第3199号、平成5年7月
- 2)河喜多二郎:KJ法、中央公論新書、1972
- 3)田村坦之:構造モデリング～理論とアルゴリズムを中心にして～、計測と制御、Vol.18、No.2、昭和54年2月
- 4)田崎栄一郎:あいまい理論による社会システムの構造化、数理科学、No.191、昭和54年5月

大都市圏における震災波及構造
に関する研究
～(その2) FSM法による都市
機能損傷の動的相互作用の解析～

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3206号
平成5年7月 (1993)

川島一彦、杉田秀樹、中島 燈

要 旨

大都市圏に大規模な地震が発生した場合には、都市の機能が高度・複合化して構造的な損傷よりも機能的な損傷の重要性が増した結果、従来の震災とは大きく異なる都市型震災が生じると考えられる。本文は、都市の基盤施設の物的被害を原因とする震災波及構造モデルをFSM法により解析するとともに、道路施設及び河川施設を中心とした各種機能損傷の動的相互作用を検討した結果を報告するものである。

キーワード：都市型震災、波及構造、震災波及、機能損傷、震災対策、インフラストラクチャー

郵便はがき

41円切手
はって
下手を
い

3 0 5 -

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室 行

No 205

No 205

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 3 2 0 6 号

部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印