

兵庫県南部地震の被害調査に基づく建築設備の耐震性能評価

Seismic Performance Evaluation of Equipment based on Damage Investigation of HYOGO-KEN NANBU Earthquake

平成 12 年 2 月 10 日

February 10, 2000

名古屋大学大学院工学研究科 地圏環境工学専攻

Geotechnical & Environmental Engineerings, NAGOYA University

出口 嘉一

Yoshikazu DEGUCHI

要 旨

宮城県沖地震 (1978) で建築設備機器の地震被害に注目が集まり、「建築設備耐震設計・施工指針 1982 年版」が施行された。兵庫県南部地震 (1995) で再び建築設備被害が重大な問題として取り上げられた。その後、兵庫県南部地震の教訓を踏まえて「同 1997 年版」が施行されたが、その有効性は十分に検証されていない。本論文では建築設備機器の耐震性能評価を目標とした。まず、地震後に機能維持が期待される自家用発電設備に着目し、兵庫県南部地震での自家用発電設備の被害調査に基づいて地震被害関数を作成した。次に、被害関数に基づいて、性能明示型耐震設計法で使用される耐震等級を推定することで、自家用発電設備の耐震性能を評価した。最後に、自家用発電設備の耐震性能評価を応用した建築設備機器の耐震性能評価を試みた。

ABSTRACT

Many modern-design buildings suffered damages in their equipment as well as their structural elements in 1978 Miyagiken-oki earthquake, which stimulated the publication of the Seismic Design Guidance of Building Equipment and its Installations in 1982 by BCJ. New Revised Version of the Guidance was published in 1997 after the 1995 Hyogoken-nambu earthquake, yet the effectiveness of the Guidance has not been evaluated widely. Evaluation of the seismic performances of building equipment is the objective of this study. Performance of engine driven generators, which are expected to function shortly after an earthquake, was focussed and damage functions of the generators were derived based on damage survey data in the Hyogoken-nambu earthquake. The damage functions thus derived were then used for the performance-based design and evaluation procedures of generators. Finally, an extension of the procedures to other building equipment was proposed.

目次

第1章	はじめに	3
第2章	自家用発電設備とその被害	4
2.1	はじめに	4
2.2	自家用発電設備とは	4
2.3	自家用発電設備の構成要素	5
2.4	自家用発電設備の被害例	6
2.5	被害の定義	7
2.6	まとめ	7
第3章	自家用発電設備の被害調査	8
3.1	はじめに	8
3.2	調査概要	8
3.3	調査データ	8
3.4	まとめ	9
第4章	自家用発電設備設置階における最大床応答	10
4.1	はじめに	10
4.2	自家用発電設備の設置階	10
4.3	構造被害関数	10
4.4	地震応答スペクトルと最大床応答	13
4.5	まとめ	15
第5章	被害関数	16
5.1	はじめに	16
5.2	自家用発電設備の被害率	16
5.3	自家用発電設備の構成要素ごとの被害関数	17
5.4	被害発生メカニズム	20
5.5	考察	20
5.6	まとめ	22
第6章	建築設備機器の耐震性能評価	23
6.1	はじめに	23
6.2	性能明示型耐震設計法	23
6.3	自家用発電設備の耐震性能評価	25
6.4	指針の改訂	27
6.5	他の設備への応用	28
6.6	まとめ	30
第7章	まとめ	31

第1章 はじめに

1995年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震は、5000名を超える人命と阪神・淡路地域に甚大な損失をもたらした。この地震では老朽化した木造住宅の倒壊が大きな問題となったが、非構造部材・設備機器等の被害も無視できない。また、1978年の宮城県沖地震で設備の耐震処置についての関心が高まり、「建築設備耐震設計・施行指針 1982年版²¹⁾」が導入されたが、その有効性は十分に検証されていない。さらに、高度に情報化された現代社会において、比較的再現期間の短い地震動で設備機器等に被害が発生すると大問題につながる可能性が懸念される。それにも関わらず、非構造部材・設備機器等の耐震性能を評価する研究はあまりなされていない。

このような理由から、本論文では設備機器全般の耐震性能評価を目標とした。まず、設備機器等の中から地震直後に機能維持が要求される自家用発電設備に着目し、被害発生メカニズムを検証した。次に、兵庫県南部地震での自家用発電設備被害調査をもとに、推定地動最大速度を入力とし、自家用発電設備の設置階数を考慮した構造特性値に基づいた地震応答スペクトルから自家用発電設備の最大応答を求め、各構成要素ごとに被害率と応答の関係を調べることで被害関数を作成した。また、性能明示型耐震設計法の耐震メニューにおいて前述の指針がどの程度の耐震等級となるか推定することで自家用発電設備の耐震性能を評価した。最後に、この自家用発電設備の耐震性能評価を他の設備機器に応用する手法を提案した。

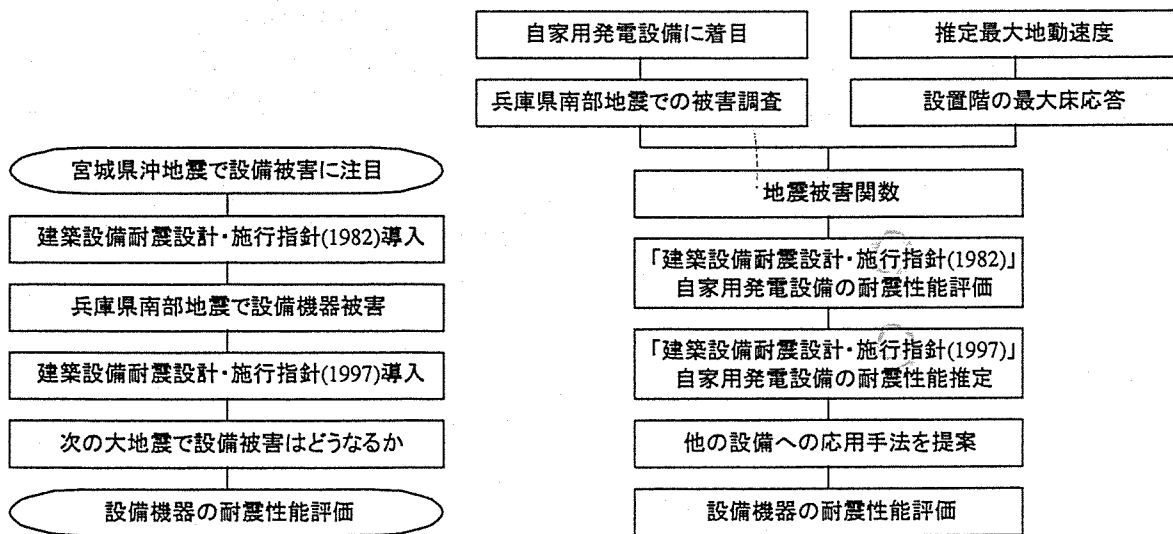


図 1.1: 研究のフロー

第2章 自家用発電設備とその被害

2.1 はじめに

本論文では、建築設備機器の耐震性能を評価するにあたり、地震直後に機能維持が必要とされる自家用発電設備に着目した。本章では、自家用発電設備の定義、法律上での扱い、設置台数の推移及び設置の重要性について述べる。また、自家用発電設備の構成要素を機能ごとに分類し、兵庫県南部地震での被害例から、被害発生メカニズムについて検証する。

2.2 自家用発電設備とは

自家用発電設備は、電気事業用以外の用に供する内燃機関又はガスタービンを原動機とする発電設備をいい、常用自家発電設備と非常用自家発電設備に分類できる。さらに、非常用自家発電設備は保安用自家発電設備と防災用自家発電設備に分類できる(図2.1)。日本国内における自家用発電設備は、ほとんどが防災用自家発電設備であり、1974年から1995年の間に約85000台の設置が確認されており、近年は年間約6000台のペースで新規に設置されている(図2.2)。これは、消防法において病院、学校、公共施設等の消防用設備の非常電源の設置が義務づけられており、建築基準法において防災設備の予備電源の設置が義務づけられているためである。

また、自家用発電設備は停電時の予備電源程度にしか考えられていないことがあるが、その防災的役割を考えると、電気を供給する設備によっては地震直後においても機能を維持していなければならない。そのため、1978年宮城県沖地震での設備被害を教訓に、1981年6月に(社)日本内燃力発電設備協会、耐震措置調査研究委員会により「自家用発電設備耐震設計のガイドライン²⁴⁾」の発行、日本建築センターにより「建築設備耐震設計・施工指針²¹⁾」が施行された。しかし、兵庫県南部地震で自家用発電設備に被害が全くなかったわけではなく、その有効性は十分に検証されていない。

仮に、自家用発電設備が作動しなかった場合、病院での停電は患者の人命の危険に直接つながる可能性があり、オフィスでの停電では重要な情報が損失するなどの経済的損失が考えられる。

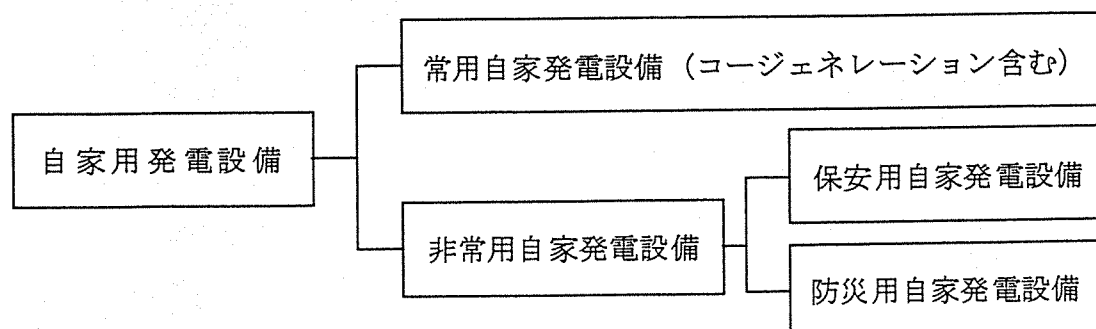


図 2.1: 自家用発電設備の分類²⁴⁾

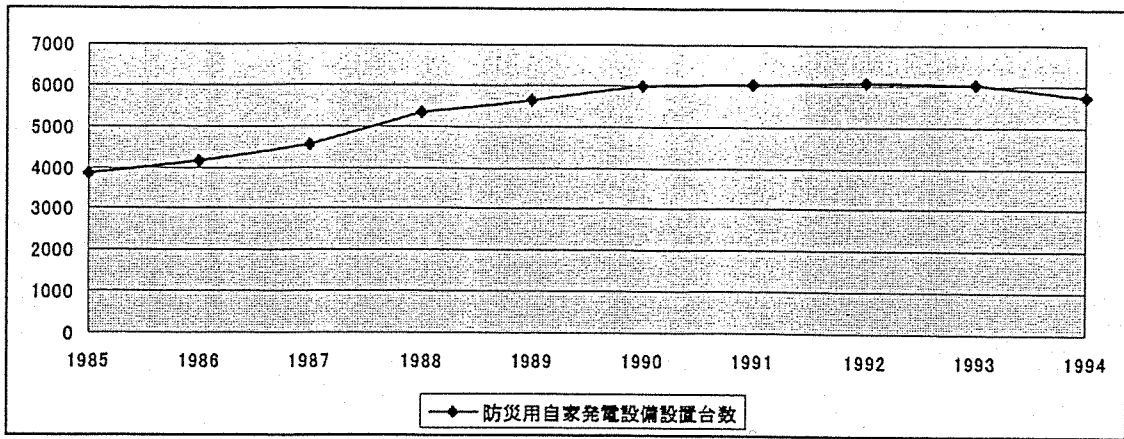


図 2.2: 防災用自家発電設備の各年新規設置台数 (全国) 24)

2.3 自家用発電設備の構成要素

自家用発電設備の基本構成は、原動機、発電機、制御装置、排気消音器、燃料タンク、冷却水槽等である。本論文では、これらの構成要素をシステム上の役割から以下の4種類に分類した。

- 装置機器 : 原動機、発電機、キュービクルなど
- 付属機器 : 制御装置、過給機、消音機、空気圧縮機、換気ダクト、潤滑油ポンプなど
- 燃料系機器 : 燃料槽、燃料移送ポンプ、燃料小出し槽など
- 冷却系機器 : 高架水槽、冷却水槽、冷却器など

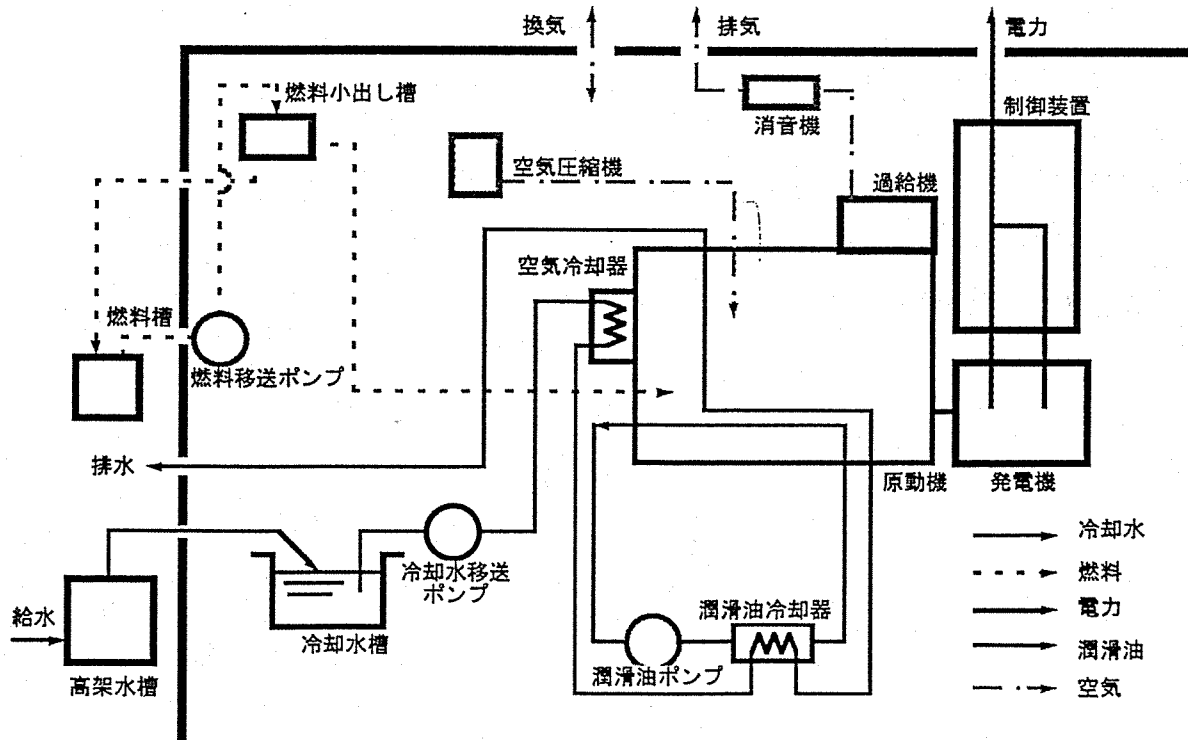


図 2.3: 自家用発電設備の構成要素 4)

2.4 自家用発電設備の被害例

兵庫県南部地震での建築設備機器の被害報告²⁰⁾²⁴⁾で実際に確認された主な被害例を2.3で分類した構成要素ごとに列挙する。

装置機器

- 施工不良が原因と考えられる基礎ボルト引抜けによる装置機器の移動・転倒
- 装置機器への浸水
- 地震の揺れによる装置機器の損傷
- 付属機器等の転倒による二次的損傷

付属機器（制御系・給排気系・潤滑油系）

- 固定金具等の支持不良による付属機器の落下・移動（転倒）
- 異なる構造物間での接合部の破断
- 地震の揺れによる付属機器の損傷

燃料系機器

- 燃料槽の損傷
- 配管の損傷
- 燃料フィルタのつまり

冷却水系機器

- 高架（冷却）水槽の損傷
- 配管の損傷
- 断水

2.5 被害の定義

第3章で後述する自家用発電設備の被害調査アンケート²⁴⁾において、自家用発電設備の被害として以下の項目の損傷の有無について質問している。

1. 倒壊した
2. 火災にあった
3. 浸水した
4. 装置機器自体の損傷
5. 付属機器・配管の損傷
6. 燃料系の損傷
7. 冷却水系の損傷
8. その他

本論文では、この被害調査アンケートおよび2.4の被害例を参考に、以下のように自家用発電設備の被害分類を定義する。

- 装置機器 : 原動機・発電機等の装置機器の転倒・損傷
- 付属機器 : 制御装置・消音機等の付属機器および付帯する配管の損傷
- 燃料系 : 燃料槽・燃料ポンプ等の燃料系機器の損傷
- 冷却水系 : 高架水槽・冷却水系配管等の冷却水系機器の損傷
- その他 : 火災・浸水およびその他の損傷

2.6 まとめ

本章では、まず自家用発電設備の概略についてふれ、自家用発電設備の構成要素を機能ごとに分類した。次に、各構成要素ごとに兵庫県南部地震での被害例を列挙し、アンケート調査に基づき本論文における自家用発電設備の被害を定義した。

第3章 自家用発電設備の被害調査

3.1 はじめに

本論文では、自家用発電設備の耐震性能を評価するにあたり、(社)日本内燃力発電設備協会による「阪神大震災における自家用発電設備調査報告書²⁴⁾」での被害調査アンケートを用いた。本論文では、この被害調査アンケートの中から、後述の耐震性能評価に必要な情報を含むものを利用した。本章では、利用した被害調査アンケートの諸データを記述する。

3.2 調査概要

「阪神大震災における自家用発電設備調査報告書²⁴⁾」は、(社)日本内燃力発電設備協会による設置者に対するアンケート調査である。アンケートは、神戸市、尼崎市、西宮市など比較的被害の大きかった地域に限定して行われた(表3.1)。配布したアンケート数962件中、回収数358件(回収率37%)であった。本論文では、一回答者に複数台の自家用発電設備が設置されているなどの重複を考慮した423の調査結果から、住所不明や地動速度不明のものなどを除いた202の調査結果を用いた。なお、神戸市消防局の調べによると1994年度神戸市内における防災用自家発電設備の設置台数は653台である。

	北区	須磨区	中央区	垂水区	灘区	東灘区	兵庫区	長田区	西区	明石市
調査数	27	16	89	8	6	23	15	12	41	2
分析数	0	9	56	0	3	11	11	7	0	0

芦屋市	尼崎市	伊丹市	川辺郡	三田市	宝塚市	西宮市	大阪市	豊中市	不明	計
8	59	17	1	2	19	62	1	3	12	423
6	38	11	0	0	12	38	0	0	0	202

表 3.1: 調査地域および調査数

3.3 調査データ

図3.1に被害調査における建物階数の分布、表3.2に主な建物用途を示す。また、建築設備の耐震安全性向上のため、1982年に日本建築センターにより「建築設備耐震設計・施工指針1982年版²¹⁾」が施行され、建築設備機器の耐震性が向上したと考えられる。そこで、表3.3に自家用発電設備の設置年度を1982年前後で分類したものを示す。

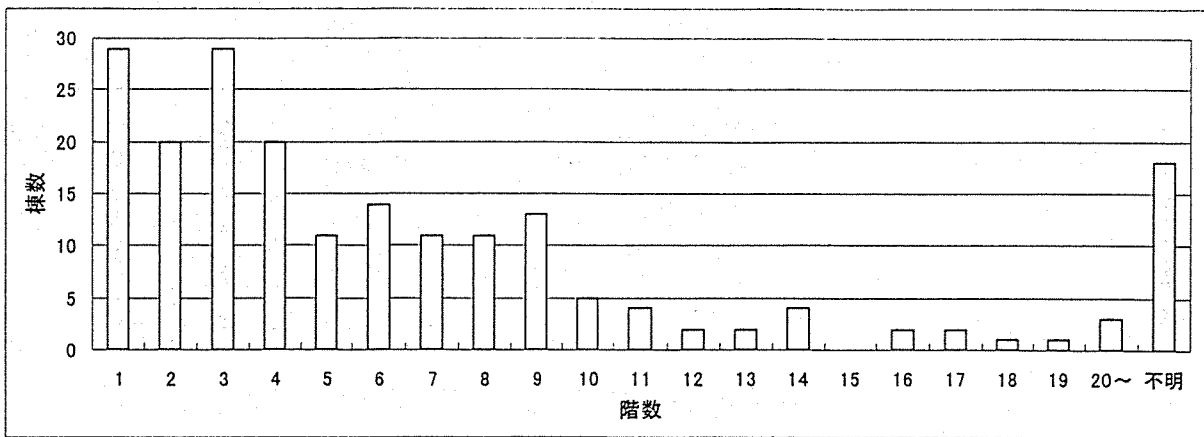


図 3.1: 被害調査における建物階数の分布

表 3.2: 被害調査における建物用途の分布

用途	棟数
病院	21
学校・福祉施設	13
商業施設	39
事務所ビル	25
旅館・ホテル	4
公会堂・集会場	10
上下水ポンプ場	32
その他	58
計	202

表 3.3: 自家用発電設備の設置年度

設置年度	棟数
～1981	68
1982～	131
不明	3
計	202

3.4 まとめ

本章では、(社)日本内燃力発電設備協会による「阪神大震災における自家用発電設備調査報告書²⁴⁾」の本論文でのデータ処理について述べた。総データ数423から住所、推定最大地動速度など後述の耐震性能評価に必要なデータが揃っている202のデータについて、建物階数、建物用途、設置年度についてまとめた。

第4章 自家用発電設備設置階における最大床応答

4.1 はじめに

本章では、兵庫県南部地震での自家用発電設備の被害調査アンケートをもとに、地震応答スペクトルから自家用発電設備設置階の最大床応答を求めた。地震応答スペクトルは、1質点系建物モデルを仮定し、林、宮腰ら²³⁾による兵庫県南部地震の推定最大地動速度に基準化した地震動を考慮した。

4.2 自家用発電設備の設置階

表 4.1 に被害調査アンケートの自家用発電設備設置階の分布を示す。約3分の1の建物において、自家用発電設備は建物上層部に設置されている。そのため、自家用発電設備の被害を考えるにあたり、設置階の最大床応答を考慮する必要があると考えられる。

表 4.1: 自家用発電設備設置階

設置階	棟数	割合
地下および1階	137	67.8%
中間階、屋上および塔屋	65	32.2%
計	202	100%

4.3 構造被害関数

(社)日本内燃力発電設備協会による被害調査アンケートでは、自家用発電設備の他に以下の定義で構造体の被害についても質問している。

- 全壊 : 建物の損壊が50%以上のもの
- 半壊 : 建物の損壊が25%以上50%未満のもの
- 一部損壊 : 建物の損壊が25%未満のもの

被害調査アンケートの自家用発電設備の設置年度をもとに、構造体が新耐震設計法(1981)に基づいて設計されたと推定されるものとそうでないものとに分類し、構造罹災率と推定最大地動速度の関係を調べた(表 4.2、4.3)。新耐震設計法に基づいて設計されたと推定される建物の罹災率の方が全体を通して低いことがわかる。また、半壊以上の被害を受けた割合も同様に低いことがわかる。

表 4.2: 新耐震設計法に基づかない構造体の罹災率

PGV(kine)	分析数	全壊	半壊	部損	総数	罹災率
-50	15	0	1	6	7	46.7%
50-70	5	0	0	1	1	20.0%
70-90	11	0	2	5	7	63.6%
90-110	10	0	1	8	9	90.0%
110-130	11	1	3	6	10	90.9%
130-	4	0	0	4	4	100%
計	56	1	7	30	38	67.9%

表 4.3: 新耐震設計法に基づいた構造体の罹災率

PGV(kine)	分析数	全壊	半壊	部損	総数	罹災率
-50	52	0	0	15	15	28.8%
50-70	28	0	0	9	9	32.1%
70-90	17	0	1	9	10	58.8%
90-110	14	1	2	7	10	71.4%
110-130	14	0	4	7	11	78.6%
130-	16	0	3	7	10	62.5%
計	141	1	10	54	65	46.1%

表 4.4 に本論文で利用した全被害調査アンケートの構造罹災率を示す。また、図 4.1 に表 4.4 の罹災率を (4.1) 式で示される対数正規分布関数で回帰した被害関数および宮腰、林ら²⁶⁾による兵庫県南部地震での中高層建物および低層建物の罹災率による被害関数を示す。図 4.1 から判断すると、被害調査アンケートの対象となった構造体は最大地動速度が小さい範囲では罹災率が高めであるが、全体的には中高層建物と低層建物の被害関数の間に位置しており、極端に耐力のかけ離れたものではないといえる。

$$P(V_{\max}) = \Phi(\ln V_{\max} - \lambda/\xi) \quad (4.1)$$

ここで

- V_{\max} : 最大応答速度
- λ : $\ln V_{\max}$ の平均
- ξ : $\ln V_{\max}$ の標準偏差

表 4.4: 推定最大地動速度による構造罹災率

PGV(kine)	分析数	全壊	半壊	部損	総数	罹災率
-50	67	0	1	21	22	32.8%
50-70	33	0	0	10	10	30.3%
70-90	28	0	3	14	17	60.7%
90-110	24	1	3	15	19	79.2%
110-130	25	1	7	13	21	84.0%
130-	20	0	3	11	14	70.0%
計	202	2	17	84	103	51.0%

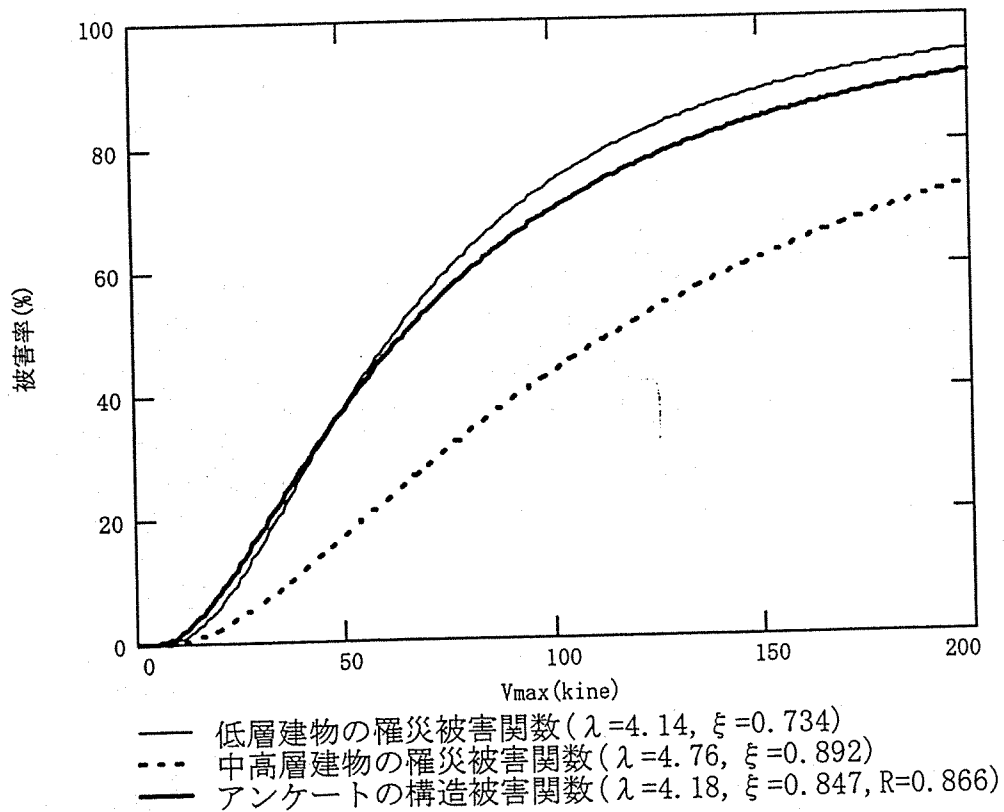


図 4.1: 推定最大地動速度による構造被害関数

4.4 地震応答スペクトルと最大床応答

自家用発電設備の被害率は設置階の最大床応答に依存する。4.3 から、アンケートの対象となった構造体の応答は標準的であると考えられる。そこで、(4.2)(4.3)式で定義した固有周期および減衰を有する1質点系建物モデルを仮定し、神戸海洋気象台波(NS成分)の地震応答スペクトル法により最大床応答を求めた。なお、最大床応答には最大応答加速度、最大床応答速度および最大層間変形角を考慮した。建物の固有周期および減衰は、建築基準法施行令88条を参考に仮定し、被害調査アンケートから構造種別(S、RC、SRC)の判断が難しいため、構造種別による固有周期の差異はないものとした。建物の階高(5.0 m)に階数を乗じることで建物高さとする。

地下および1階に設置されているものは、入力地震動をもって最大床応答とする。なお、入力地震動は林、宮腰ら²³⁾による兵庫県南部地震の推定最大地動速度を用いた。

屋上および塔屋に設置されているものは、前述の地震応答スペクトル法により最大床応答を求めた。

中間階に設置されているものは、図4.2に示すように、1質点系建物モデルの応答の線形性を利用して最大床応答を求めた。例えば、10階建ての建物の5階に自家用発電設備が設置されており、入力加速度が200 galの場合を考える。地震応答スペクトルにより10階の最大床応答加速度が2000 galと計算されたとすると、応答の線形性から5階の最大床応答加速度は1100 galとなる。

$$T = 0.02H \quad (4.2)$$

$$h = 0.02 \quad (4.3)$$

ここで

T : 固有周期

h : 減衰定数

H : 建物高さ

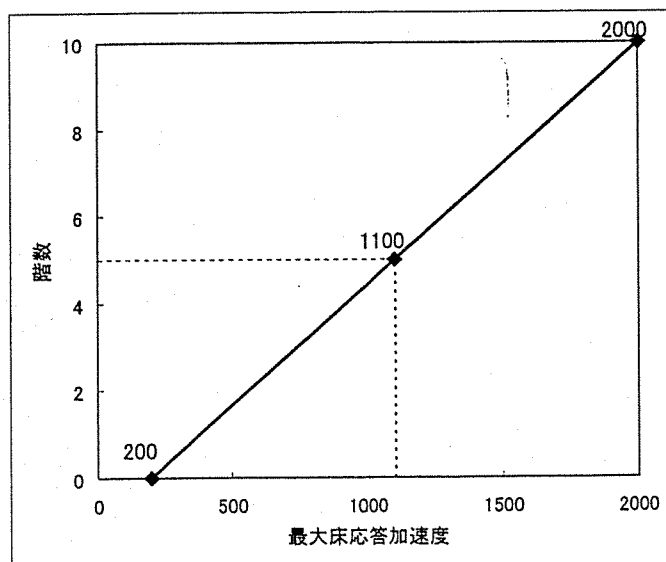


図 4.2: 中間階に設置された場合の最大応答値の計算法

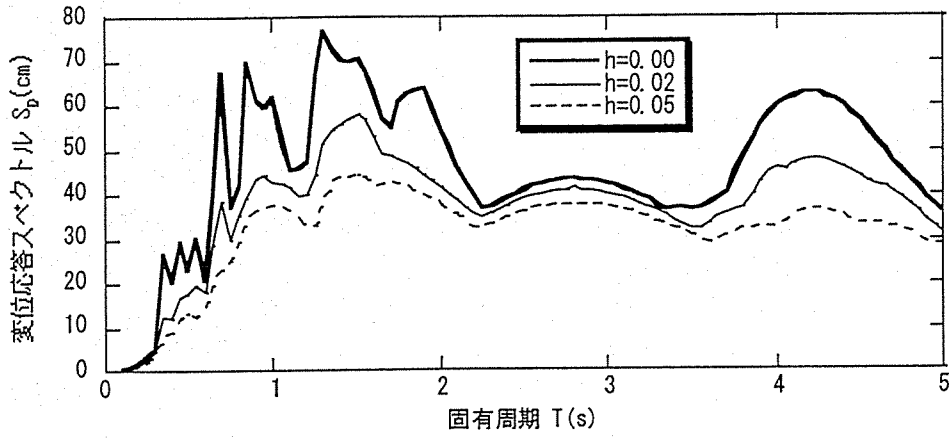


図 4.3: 変位応答スペクトル

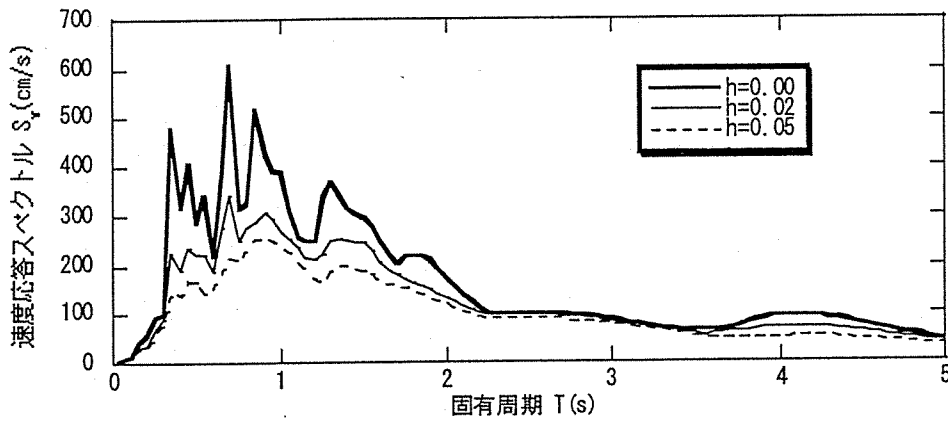


図 4.4: 速度応答スペクトル

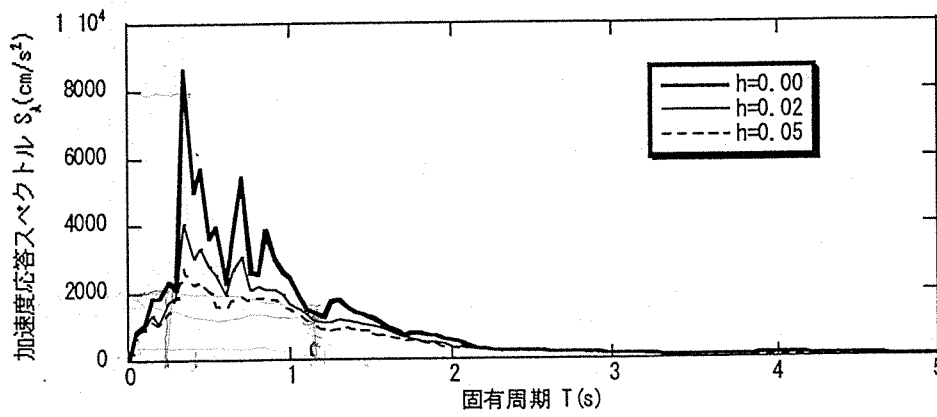


図 4.5: 加速度応答スペクトル

4.5 まとめ

本章では、自家用発電設備の被害を検証するにあたり、自家用発電設備設置階の最大床応答の考慮が必要であることを述べた。次に被害調査アンケートから構造体の強さを調べ、それらが標準的な耐力であることを確認した。最後に地震応答スペクトルから、自家用発電設備設置階の最大床応答を求めた。

第5章 被害関数

5.1 はじめに

本章では、前章で求めた最大床応答をもとに、自家用発電設備設置階の応答と被害率の関係から自家用発電設備の地震被害関数を作成する。また、第2章で定義した被害ごとに被害関数を作成することで、自家用発電設備のシステムとしての弱点について検証した。被害関数は最大床応答加速度、最大床応答速度および最大層間変形角を考慮した。

5.2 自家用発電設備の被害率

前章で求めた最大床応答から自家用発電設備の応答と被害率の関係を求めた。表5.1に最大応答加速度、表5.2に最大応答速度、表5.3に最大層間変形角と被害率の関係をそれぞれ示す。なお、第2章で定義した被害の内1つ以上が発生した場合を被害数にカウントする。

表 5.1: 応答加速度による自家用発電設備の被害率

最大床応答加速度 (gal)	分析数	被害数	被害率
-250	25	2	8.0%
250-500	60	18	30.0%
500-750	47	13	27.7%
750-1000	28	5	17.9%
1000-1250	9	2	22.2%
1250-	33	11	33.3%
計	202	51	25.2%

表 5.2: 最大床応答速度による自家用発電設備の被害率

最大床応答速度 (kine)	分析数	被害数	被害率
-50	59	6	10.2%
50-75	26	11	42.3%
75-100	43	11	25.6%
100-125	24	7	29.1%
125-150	22	94	18.2%
150-	28	12	42.9%
計	202	51	25.2%

表 5.3: 最大層間変形角による自家用発電設備の被害率

最大層間変形角	分析数	被害数	被害率
-0.001	56	18	32.1%
0.001-0.003	49	4	8.2%
0.003-0.005	41	6	14.6%
0.005-0.007	18	4	22.2%
0.007-0.009	13	3	23.0%
0.009-	25	16	64.0%
計	202	51	25.2%

5.3 自家用発電設備の構成要素ごとの被害関数

表 5.1~5.3 からは応答と被害率の明確な関係は見当らない。また、応答加速度、応答速度、層間変形角の違いによる被害率の特徴も不明瞭である。そこで、表 5.4 に第 2 章で定義した被害ごとに最大応答速度を代表させて被害数 (被害率) を再検討した。

表 5.4 から、被害数には比較的応答の小さい時点で被害が発生しやすいものと比較的大きな応答にならないと被害が表われないものとに分類できることがわかる。ここでは、燃料系、冷却水系の被害が前者にあたり、それ以外の被害は後者にあたりと考えられる。

しかし、最大床応答が大きくなるに従い被害率が大きく低下することは矛盾である。この原因の 1 つにアンケートの方法が考えられる。2.5 に示したアンケートのように、あらかじめ定められた被害項目に対して損傷の有無を記入するため、専門家でない建築主の判断では、地震後に自家用発電設備が作動せず装置機器が転倒していた場合には、機器の転倒が不作動の原因であると考え、他の原因としている事項については被害を受けたかどうかを確認しないと推測できる。実際に、装置機器が転倒しているにもかかわらず、それに付随して必ず起こると考えられるそれ以外の被害が報告されていないものがあつた。

表 5.4: 構成要素ごとの被害数と被害率

最大床応答速度 (kine)	総数	装置系	付属系	燃料系	冷却系	その他
-50	59	2(3.4%)	2(3.4%)	1(1.7%)	3(5.1%)	0(0.0%)
50-75	26	2(7.7%)	1(3.8%)	3(11.5%)	6(23.1%)	0(0.0%)
75-100	43	1(2.3%)	4(9.3%)	2(4.7%)	6(14.0%)	0(0.0%)
100-125	24	1(4.2%)	3(12.5%)	2(8.3%)	2(8.3%)	2(8.3%)
125-150	22	1(4.5%)	0(0.0%)	3(13.6%)	3(13.6%)	0(0.0%)
150-	28	4(14.3%)	7(25.0%)	1(3.6%)	1(3.6%)	3(10.7%)
計	202	11(5.4%)	17(8.4%)	12(5.9%)	21(10.4%)	5(2.5%)

自家用発電設備は構成要素の中で 1ヶ所でも損傷を受けるとその機能を果たすことができない。そこで、表 5.4 や被害写真 (図 5.1~5.3) から被害種類ごとに損傷を受けやすいものを順に以下のように仮定した。

装置機器 → 付属機器 → その他機器 → 燃料系機器 → 冷却水系機器

また、ある機器の被害数を考えるにあたり、より損傷を受けにくい機器の被害数を含むように以下のA～Eを定義する。こうすることで、ある機器に損傷が見受けられた場合、自動的により損傷を受けやすい機器が損傷を受けたものとして考慮されるため、前述の最大床応答が大きくなるにつれて被害率が低下するという矛盾が軽減される。また、各被害関数の差をとることで、最大応答速度値に対する自家用発電設備の各構成要素の被害率がわかる。表5.5、図5.4にA～Eの被害率および被害関数を示す。

- A : 装置機器の被害数
- B : A ∩ 付属機器の被害数
- C : B ∩ その他機器の被害数
- D : C ∩ 燃料系機器の被害数
- E : D ∩ 冷却水系機器の被害数

表 5.5: 定義した構成要素ごとの被害数と被害率

最大応答速度 (kine)	総数	A	B	C	D	E
-50	59	2(3.4%)	2(3.4%)	2(3.4%)	3(5.1%)	6(10.2%)
50-75	26	2(7.7%)	3(11.5%)	3(11.5%)	6(23.1%)	11(42.3%)
75-100	43	1(2.3%)	5(11.6%)	5(11.6%)	7(16.3%)	11(25.6%)
100-125	24	1(4.2%)	3(12.5%)	4(16.7%)	6(25.0%)	7(29.2%)
125-150	22	1(4.5%)	1(4.5%)	1(4.5%)	3(13.6%)	4(18.2%)
150-	28	4(14.3%)	8(28.6%)	11(39.3%)	11(39.3%)	11(39.3%)
計	202	11(5.4%)	22(10.9%)	26(12.9%)	36(17.8%)	50(24.8%)

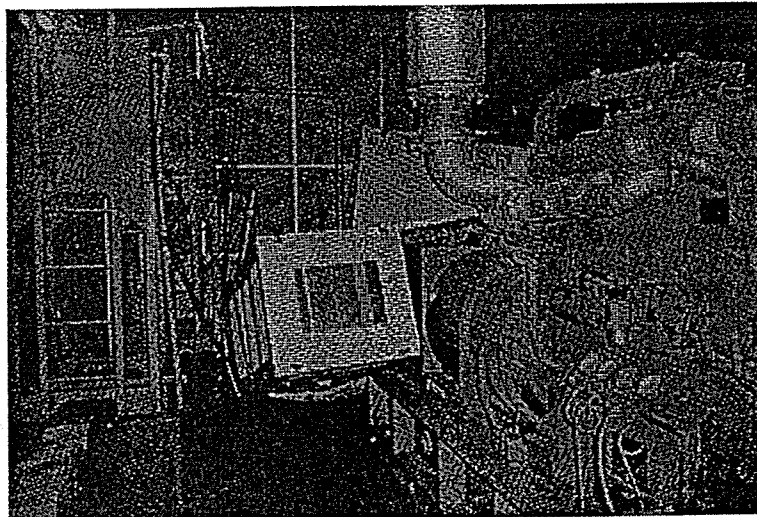


図 5.1: 付属機器の転倒²⁰⁾



図 5.2: 配管の破断²⁰⁾



図 5.3: 動力盤の転倒²⁰⁾

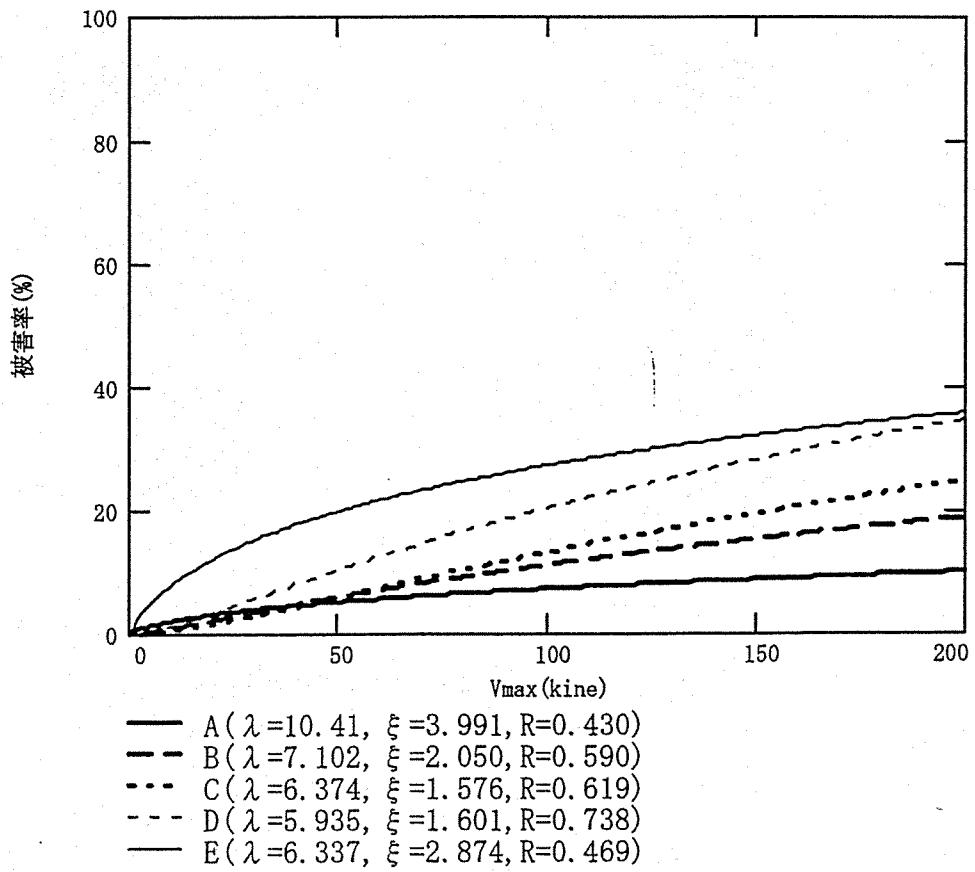


図 5.4: 定義した構成要素ごとの被害関数

5.4 被害発生メカニズム

冷却水系機器や燃料系機器の被害は比較的小さな地震動で被害率が高くなるのに対して、それ以外の機器では比較的大きな地震動になるまで被害率が低いままである。このような応答と被害率の関係は、構成要素の被害発生メカニズムに依存すると考えられる。現在、非構造部材・設備機器等の被害発生メカニズムについて多くの研究¹⁴⁾¹⁸⁾がなされている。一般に、それらの被害発生メカニズムは構造体との接合形態(取付方法)により大きく分類できる。例えば、床固定機器のように構造体と点で接合されるものは、機器に作用した慣性力により被害が発生すると考えられる。それに対して、天上取付機器や壁取付機器は慣性力以外に構造体の層間変形角による影響が大きいと考えられる。

例えば、配管の被害は大きく分けて次の2通りのメカニズムが考えられる。1つは、構造体に固定された配管が構造体に生じる層間変形角に追随しきれなくなり破断に至る場合(図5.5)である。もう1つは、配管と配管、配管と付属機器の接合部等で振動により接合部に損傷を受ける場合である。そのため、配管等が複雑に交錯する冷却水系機器や燃料系機器は比較的小さな地震動でも被害が発生すると考えられる。実際に、兵庫県南部地震の設備機器の被害報告においても、配管の損傷が最も多く報告されている。冷却水系機器や燃料系機器の被害の大半は機器に付属する配管の被害である。

それに対して、装置機器や付属機器の被害は振動による装置機器自体の損傷や転倒が考えられる。装置機器に作用する慣性力により、固定していたアンカーボルトの破断や引抜けが発生する(図5.6)。

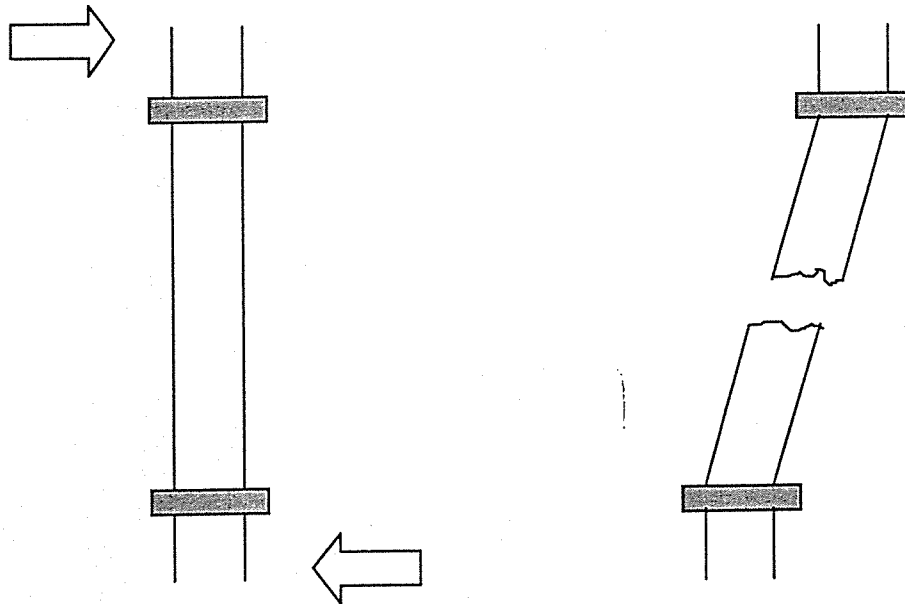


図 5.5: 層間変位による縦配管の破断

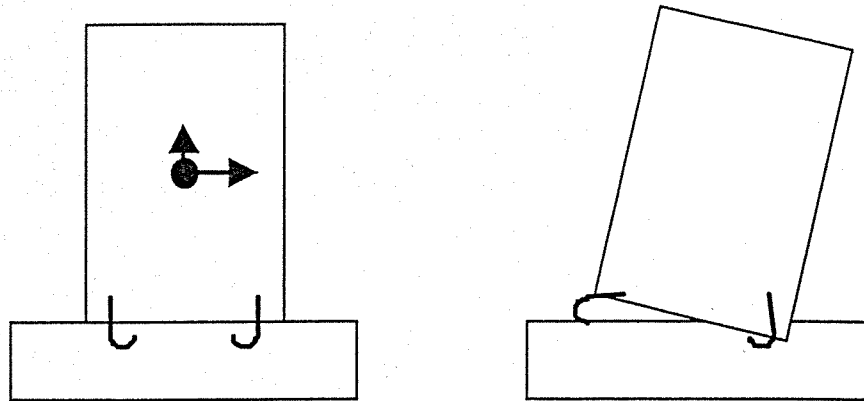


図 5.6: 慣性力によるアンカーボルトの引抜け

5.5 考察

自家用発電設備の耐震性は、構造体の耐震性と比較して考える必要がある。例えば、地震直後に構造体が全壊しているにもかかわらず、自家用発電設備に全く損傷がなくてもあまり意味がない。その意味では、自家用発電設備が最も必要であると考えられるのは、構造体が全半壊の状態の時である。そこで、図 5.7 に宮腰、林ら²⁶⁾による低・中高層の構造体の全半壊被害関数と図 5.4 の自家用発電設備の被害関数 (D,E) を示す。ここで、低層とは 1,2 階の構造体であり、中高層は 3 階以上の階数の構造体を指す。

図 5.7 から、50 kine 以下の地震動において自家用発電設備の被害率が構造体の全半壊率と比較して非常に高いことがわかる。特に冷却水系機器の被害を考慮した被害関数 (E) においてそのことが如実に表われている。逆に言えば、冷却水系機器の被害率を抑えることで、自家用発電設備のシステム全体としての被害率を被害関数 (D) 程度に低減することができれば、構造体の全半壊率と比較するとやや小さい地震動において被害率が高いが、自家用発電設備の被害率としては妥当なものと考えられないこともない。

文献²⁰⁾によれば、冷却水系機器の被害の大半が冷却水配管の損傷であることが報告されている。また、燃料系の損傷についても配管の損傷が多くをしめており、自家用発電設備の耐震性は配管の耐震性能を向上させることで、システム全体としての耐震性能を大きくあげることができる。

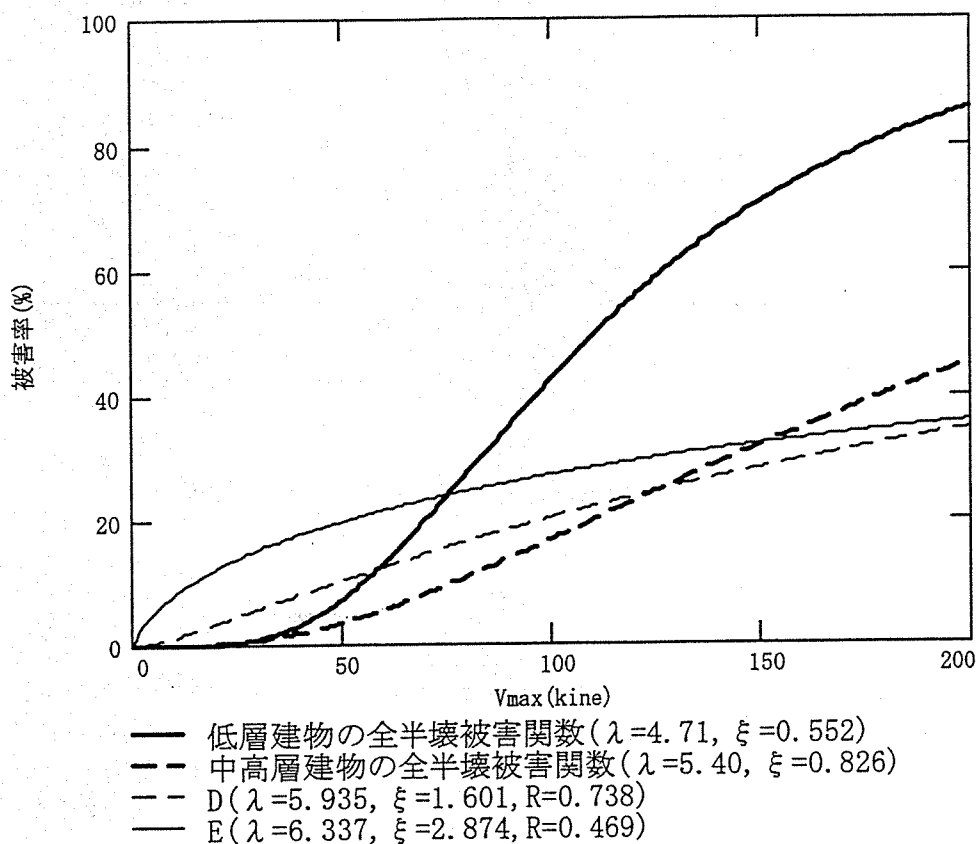


図 5.7: 低・中高層建物の全半壊被害関数

5.6 まとめ

本章では、自家用発電設備の被害関数を作成した。応答は最大床応答加速度、最大床応答速度、最大層間変形角について考慮した。調査数が少ないという要因が考えられるが、これら応答による明確な被害率の変化は見当たらなかった。次に、第2章で定義した被害ごとに被害率を求め、構成要素ごとに被害発生率が極端に高くなる応答値が異なるという特徴を示した。このことから、構成要素を損傷の受けやすい順に考慮した被害関数を再作成した。被害関数から、冷却水系機器の被害率が他の機器と比較して、比較的小さな地震動において高い値を示し無視できないことを示し、被害発生メカニズムから配管は損傷を受けやすいことを裏付けた。最後に構造体の全半壊率と自家用発電設備の被害関数を比較することにより、冷却水系機器の耐震性をあげることで自家用発電設備全体の耐震性が大きく向上することを示した。

第6章 建築設備機器の耐震性能評価

6.1 はじめに

本章では、自家用発電設備の被害関数をもとに建築設備機器の耐震性能を評価する。性能明示型耐震設計法で目標安全性の決定に用いられる耐震等級メニューにおいて耐震何等級にあたるかを推定することで耐震性能を評価する。まず、被害調査アンケートの内、「建築設備耐震設計・施工指針 1982年版²¹⁾」(以後前指針とする)に基づいて設計されたと考えられる機器について、前章と同様の手法で被害関数を作成し、耐震等級を推定することで、前指針で目標とした自家用発電設備の耐震性能を評価する。次に、兵庫県南部地震の被害を教訓に前指針を改訂して作成された「同 1997年版²²⁾」(以後現指針とする)について、改定された事項を考慮することで新指針に基づいて設計された自家用発電設備の被害関数を作成し、同様に耐震性能を評価する。最後に、自家用発電設備の被害関数および耐震性能評価を利用して他の設備機器の耐震性能評価を試みる。

6.2 性能明示型耐震設計法

日本建築学会は、兵庫県南部地震を教訓に1998年1月に「建築および都市の防災性向上に関する提言」の中で、主として次の2点について提言した。1つは、兵庫県南部地震では建物の耐震性が建物主(社会一般)に正しく理解されていなかったこと。もう1つは、安全性の確保には建物の主要構造の崩壊防止だけでなく、非構造部材や設備機器も含めた総合的な耐震対策が必要であることである。

同学会は、性能明示型耐震設計法において以下に示す耐震メニューを取り入れることでこの2つの問題の解決を試みた。耐震メニューでは、まず建築主に「無被害、軽損、中損、大破・崩壊」の被害イメージを理解してもらい、次に耐震等級メニューを示し、用途・重要性等に応じて当該建物が地震の際にどの程度の被害にとどめる必要があるかを選択してもらい、ここで、建物全体の耐震等級だけでなく、非構造部材や設備も含めた建物の部分的な耐震等級も決定する。表 6.1 に耐震等級メニュー、表 6.2 に自家用発電設備の被害イメージの例を示す。なお、地震動強さ「S、A、B、C、D」の区分は、対象となる地域における地震の再現期間によって定められる。本論文では、神戸市における以下の定義を満たす再現期間を仮定した。(6.1)式および表 6.3、図 6.1 から、地震動強さと再現期間、加速度および速度の関係を表 6.4 に示す。計算にあたり、 $G_a = 1.0$ 、 $A_0 = 160$ とした。

- D : 建物の供用期間中に遭遇する可能性が数回である地震動
- C : B と D の中間の地震動
- B : 建物の供用期間中に遭遇する可能性が1回程度である地震動
- A : 建物の供用期間中に遭遇する可能性がまれである地震動
- S : 建物の供用期間中に遭遇する可能性が極めてまれである地震動

表 6.1: 耐震等級メニュー⁸⁾

	D	C	B	A	S
耐震5級	無被害	軽損	中損		大破・崩壊
耐震4級	無被害		軽損	中損	大破・崩壊
耐震3級	無被害		軽損		中損 大破・崩壊
耐震2級	無被害			軽損	中損 大破・崩壊
耐震1級	無被害				軽損 中損

表 6.2: 自家用発電設備の被害イメージ⁸⁾

被害程度	被害イメージ
無被害	供給可能
軽損	機器・盤類に損傷なく、継続使用可
中損	機器・盤類に損傷なく、継続使用可
大破・崩壊	供給不可能

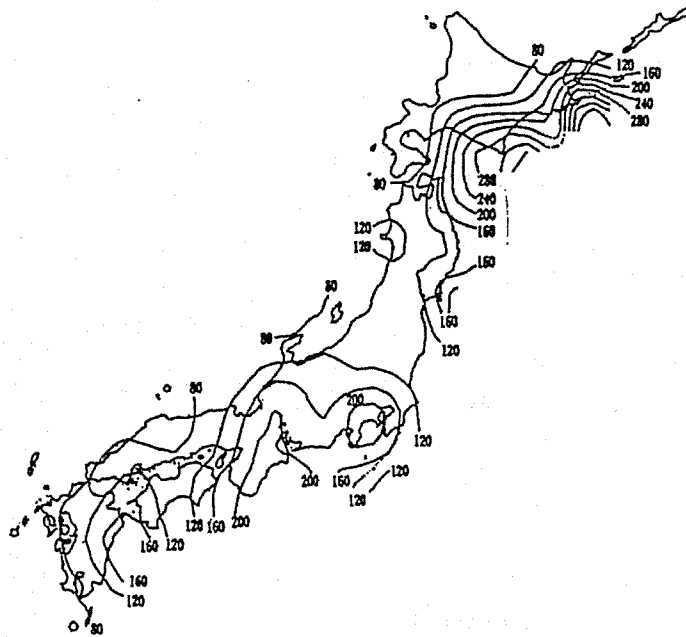


図 6.1: 基本加速度 (A_0) の分布¹⁹⁾

表 6.3: 地盤種別ごとの地盤係数¹⁹⁾

地盤種別		G_a
第 I 種	標準地盤 (堅固な地盤)	1.0
第 II 種	緩い洪積地盤または締った沖積地盤	1.2
第 III 種	軟弱地盤	1.2

$$A = A_0 \cdot G_a \cdot (\gamma/100)^{0.54} \quad (6.1)$$

ここで

- A : 加速度
- A_0 : 基本加速度
- G_a : 地盤係数
- γ : 再現期間 (年)

表 6.4: 神戸の再現期間と加速度、速度の関係

	再現期間 (年)	加速度 (gal)	速度 (kine)
D	20	67.1	7.6
C	50	110.0	12.4
B	100	160.0	18.0
A	500	381.6	42.9
S	1000	554.8	62.4

6.3 自家用発電設備の耐震性能評価

6.2 で仮定した再現期間に対応する地震動強さと被害関数から前指針に基づいて設計された自家用発電設備が耐震何等級にあたるかを検証する。そこで、被害調査アンケートから、前指針に基づいて設計されたと考えられる 131 の自家用発電設備について、前章と同様に被害関数を作成した。表 6.5 に各構成要素ごとの被害数および被害率を図 6.2 に被害関数および地震動強さを示す。

被害関数 (E) はシステムとして自家用発電設備の機能維持を考えた場合の被害率をあらわすが、S クラスの地震動強さ (62.4 kine) で約 20% の被害率となる。この内、半数以上が冷却水系機器以外の損傷であることから、自家用発電設備は S クラスの地震動強さにおいて大破である可能性が高い。また、D クラスの地震動強さ (7.6 kine) においてほとんどの被害が冷却水系機器であるとはいえ、10% 近い被害率になることから完全に無被害であるとはいいきれない。つまり、前指針を規範として耐震対策を施された自家用発電設備の耐震等級は耐震 5 級かそれ以下程度のものであったと考えることができる。

表 6.5: 構成要素ごとの被害数と被害率 (前指針)

最大応答速度 (kine)	総数	A	B	C	D	E
-50	42	1(2.4%)	1(2.4%)	1(2.4%)	2(4.8%)	5(11.9%)
50-75	16	1(6.3%)	1(6.3%)	1(6.3%)	3(18.8%)	6(37.5%)
75-100	23	0(0.0%)	1(4.3%)	1(4.3%)	3(13.0%)	3(13.0%)
100-125	12	0(0.0%)	1(8.3%)	1(8.3%)	3(25.0%)	4(33.3%)
125-150	17	1(5.9%)	1(5.9%)	1(5.9%)	2(11.8%)	3(17.6%)
150-	21	2(9.5%)	4(19.0%)	6(28.6%)	6(28.6%)	6(28.6%)
計	131	5(3.8%)	9(6.9%)	11(8.4%)	19(14.5%)	26(19.8%)

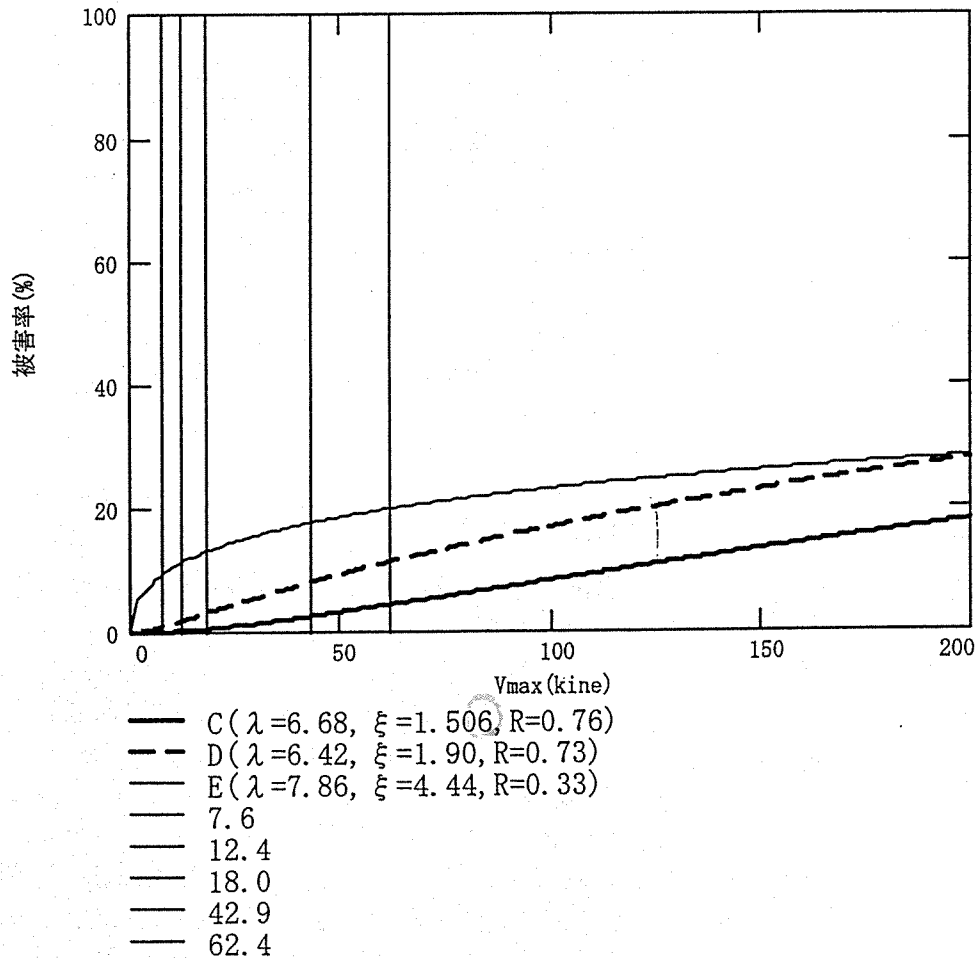


図 6.2: 自家用発電設備の被害関数

6.4 指針の改訂

前指針では、基本事項として中小地震においては機器に損傷を与えず、大地震においては機器が建物から脱落、転倒および移動することなく、設備としての機能を確保あるいは早急な機能回復が可能であることとなっている。具体的な耐震設計として、表 6.6 から設計用標準震度 (K_S) を求め、設備機器の設計用水平地震力を (6.2)(6.3) 式で算出する局部震度法による地震入力をもって耐震安全性を確認している。その後、兵庫県南部地震で様々な設備機器の被害が報告されたこともあり、日本建築センターは兵庫県南部地震の教訓を生かすよう、現指針において表 6.7 に示される標準震度の改訂および水槽や配管の耐震性の向上を目指す耐震設計を導入した。

表 6.6 と表 6.7 を比較すると、 K_S の値自体はほとんど変わらないが、配管等の耐震安全性が見直されたため自家用発電設備が大破に至る確率はあまり変わらないが、軽損に至る確率が低下することが予想される。具体的に横引配管について、支持材に加わる水平荷重を耐震支持材間の配管重量の 0.6 倍としていた A 種 (前指針) に対して、1.0 倍とする S_A 種の考え方を導入し、設計者が状況に合わせてどちらかを選択をするようにしている。これは前指針に対して約 1.5 倍の耐力を考えていることになる。このことから現指針に基づいた設計では、冷却水系機器の被害の大半を占める配管類の損傷が抑えられるため、図 6.2 において冷却水系機器の被害率を除いた被害関数 (D) に近い被害関数になることが予想され、耐震 4 級程度を目標としていると考えられる。

以上から、仕様規定から性能明示型耐震設計に移行するにあたり、施工不良等の発生を抑えれば現指針による設計は最低基準として妥当である。また、設備機器に耐震 3 級以上の高い耐震性能をもたせるためには、単に設計用地震力を高めるだけではなく、免震等の技術を利用する必要がある。

$$K_H = Z \cdot K_S \quad (6.2)$$

$$F_H = K_H \cdot W \quad (6.3)$$

ここで

- K_S : 設計用標準震度 (表 6.6 の値)
- K_H : 設計用水平震度
- Z : 地域係数
- F_H : 設計用水平地震力
- W : 機器の重量

表 6.6: 1982 年版設計用標準震度 (K_S)

	重要性の高い建築設備機器の標準震度	通常の建築設備機器の標準震度
最上階、屋上及び塔屋	1.5(2.0)	1.0
2 階床以上	1.0(1.3)	0.6
地階及び 1 階	0.6	0.4

* () 内の数値は重要性の高い防振設置機器の場合の震度を示す。

表 6.7: 1997 年版設計用標準震度 (K_S)

	耐震クラス S	耐震クラス A	耐震クラス B
上層階、屋上及び塔屋	2.0	1.5	1.0
中間階	1.5	1.0	0.6
地階及び1階	1.0(1.5)	0.6(1.0)	0.4(0.6)

*() 内の値は地階及び1階 (地表) に設置する水槽の場合に適用する。

6.5 他の設備への応用

新指針に基づいた自家用発電設備の耐震等級が耐震4級程度であるという仮定のもとに他の設備機器の耐震性能を推定する。

神戸市消防局による兵庫県南部地震での主な消防設備の被害調査⁹⁾を表6.8に示す。他の設備機器と比較して、自家用発電設備の被害率が比較的低いことがわかる。これは、自家用発電設備の防災上の機能を考えると、前指針での設計用標準震度の選択において「重要性の高い設備」と「通常の設備」とでは「重要性の高い設備」として設計された可能性が高いためだと考えられる。

表 6.8: 神戸市消防局による消防設備の被害調査

機器名	総数	被害数	被害率
屋内消火設備	451	107	23.7%
スプリンクラー	544	222	40.8%
自動火災報知設備	542	109	20.1%
放送設備	478	61	12.8%
自家用発電設備	444	71	16.0%

次に、「重要性の高い設備」と「通常の設備」の被害率の関係を検証する。文献¹⁶⁾において電気設備の被害調査が報告されている。文献によると、「重要性の高い設備」として設計された電気設備は約10.2%であるのに対して、大半の電気設備は「通常の設備」として設計されていたと考えられる(表6.9)。また、同文献では、仮に「通常の設備」として設計された機器が「重要性の高い設備」として設計されていれば、設備機器の総被害数で約60%程度が防止できたと推測している。単純に考えると、「重要性の高い設備」として設計された設備機器の被害率は「通常の設備」として設計された設備機器の被害率の約2/5倍となる。

以上から、現指針で「重要性の高い設備」として設計された設備機器の被害関数を自家用発電設備の被害関数(D)とし、「通常の設備」として設計された設備機器の被害率が「重要性の高い設備」として設計された設備機器の2/5倍になると仮定すると、設備機器の被害関数は図6.3で示される。

表 6.9: 設計用震度の適用状況¹⁶⁾

設計用標準震度の選定	件数	割合
重要性の高い設備として扱った	10	10.2%
通常設備として扱った	40	40.8%
不明の内通常設備として扱ったと推測される	31	31.6%
不明	17	17.4%
合計	98	100%

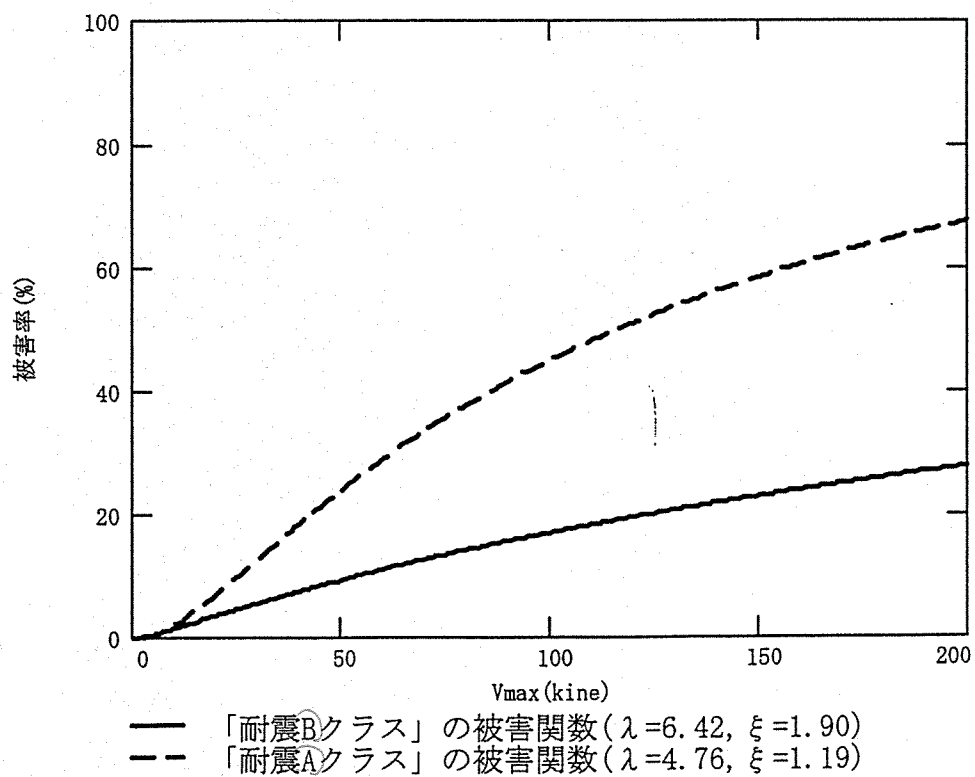


図 6.3: 設備機器の被害関数

6.6 まとめ

本章では、兵庫県南部地震で被害を受けた自家用発電設備の耐震等級を被害関数をもとに推定した。それにより、「建築設備耐震設計・施工指針 1984 年版」に基づいた自家用発電設備の耐震性能は耐震 5 級程度であり、兵庫県南部地震後に改訂された「建築設備耐震設計・施工指針 1997 年版」に基づいた自家用発電設備の耐震性能は耐震 4 級程度であることを示した。次に、これまで求めた自家用発電設備の被害関数および耐震性能評価手法を利用して、指針での標準震度の適用状況から他の設備機器の耐震性能評価手法を試みた。

第7章 まとめ

第1章では、宮城県沖地震で建築設備機器の地震被害に注目が集まり「建築設備耐震設計・施行指針 1982年版²¹⁾」等の指針が施行され、建築設備機器の地震被害の低減が望まれたが兵庫県南部地震においても建築設備の被害が多く報告されたこと。また、その後兵庫県南部地震での教訓を生かすよう「建築設備耐震設計・施行指針 1997年版²²⁾」として改訂されたが、その効果は十分に検証されておらず建築設備の耐震性能を評価する研究はあまりなされていないことを示した。

第2章では、自家用発電設備の概略について述べた。次に、自家用発電設備を構成要素ごとに分類し、各構成要素ごとに兵庫県南部地震での被害例を列挙した。また、その被害例および被害調査アンケートを参考にして本論文での自家用発電設備の被害を定義した。

第3章では、本論文で使用した兵庫県南部地震での自家用発電設備被害報告のデータの扱い方について説明した。使用データ数、建物階数、建物用途および設置年度を示した。

第4章では、被害調査アンケートの約3分の1の自家用発電設備が建物の中間階または屋上・塔屋に設置されており、自家用発電設備の被害率と応答の関係を調べるには自家用発電設備設置階の最大床応答を知る必要があることを示した。1質点系の建物モデルを仮定し、地震応答スペクトル法により最大床応答(最大床応答加速度、最大床応答速度および最大層間変形角)を求めた。また、被害調査アンケートの対象となった建物の構造被害関数を既往の研究による構造罹災率と比較することで、被害調査でアンケートの対象となった建物が標準的なものであることを示した。

第5章では、第4章で求めた最大床応答と自家用発電設備の被害率の関係から被害関数を作成した。自家用発電設備のシステムとしての被害率は加速度、速度および層間変形角といった応答の違いによる明確な特徴は見られなかった。各構成要素ごとに被害率を求めることで、要素により比較的小さな地震動で被害率が高くなるものとそうでないものがあることを示した。冷却水系機器や燃料系機器といった配管が多い要素が比較的小さな地震動で被害率が高くなることを被害発生メカニズムから検証した。次に、構成要素を損傷を受けやすいものから順に仮定し、ある機器の被害数を考えるにあたり、より損傷を受けにくい機器の被害数を含むことで自家用発電設備の被害関数を作成した。最後に、構造体の全半壊率と自家用発電設備の被害関数を比較することで、自家用発電設備の防災上の機能を考えると50 kine以下の地震動で被害率が高く問題があることを示した。また、その原因は冷却水系機器の被害率が高いためであり、その被害を抑えることができれば自家用発電設備の耐震性能は構造体の全半壊率と比較した上で妥当なものとなることを示した。

第6章では、性能明示型耐震設計法の耐震等級において、「建築設備耐震設計・施工指針 1982年版」による耐震設計がどの程度の耐震等級になるかを検証することで、自家用発電設備の耐震性能評価を試みた。結果として、「建築設備耐震設計・施工指針 1982年版」による耐震設計は耐震5級程度であり、「建築設備耐震設計・施工指針 1997年版」は耐震4級程度であることがわかった。最後に自家用発電設備の耐震性能評価手法を他の設備機器に応用する手法を提案することで、建築設備機器の耐震性能評価の可能性を示した。

謝辞

大学院生活および本論文の作成に当たって、御忙しいなか多大な御指導、御援助をいただいた辻本誠教授、河野守助教授および地圏環境工学専攻・建築学専攻の諸先生方に厚く御礼申し上げます。また、(社)日本内燃力発電設備協会には、自家用発電設備被害アンケート調査結果の利用を、横浜国立大学村上處直教授、防災都市計画研究所岡西靖さんにはこの調査結果のデータベース利用を、また、清水建設の宮腰淳一さんには推定最大地動速度データの利用を快諾して頂いたことを深く感謝します。

参考文献

- 1) 伊藤弘(1995)：非構造部材の耐震性、公共建築、37-3 #145
- 2) 岡野均(1995)：阪神大震災における電気設備の被害概況、建築設備 536号、33-38
- 3) 神田順(1999)：阪神・淡路大震災における建物の被災度と修復コスト、Re No.120、29-37
- 4) 空気調和・衛生工学会(1975)：空気調和・衛生工学便覧Ⅰ巻 改訂第9版
- 5) 建築省建築研究所、(社)日本建築構造技術者協会(1996)：大地震時の建築物の機能維持のための設計に関する技術資料の収集 報告書
- 6) 建築省住宅局建築指導課(1995)：建築設備設計・施工上の指導指針、日本建築設備・昇降機センター
- 7) 建築省住宅局建築指導課(1996)：建築設備・昇降機耐震診断基準及び改修指針-1996年版-、日本建築設備・昇降機センター
- 8) 建築耐震設計者連合(1999)：総合的耐震改修技術指針
- 9) 神戸市消防局(1995)：兵庫県南部地震による消防用設備等の損傷に関する実態調査結果
- 10) 小波佐和子、岩田衛、田村和夫、和田章(1997)：建築物が寿命中に受ける総地震被害に注目した耐震設計に関する一考察、日本建築学会構造系論文集 第502号、165-171
- 11) 佐伯琢磨、宮崎浩徳、山本晃司、翠川三郎(1999)：地震時の家財被害予測に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第517号、45-51
- 12) 柴田明徳(1981)：最新耐震構造解析、森北出版
- 13) (株)竹中工務店(1995)：「阪神大震災(兵庫県南部地震)」調査報告-第3報-
- 14) (株)竹中工務店(1997)：非構造部材耐震設計・施工指針
- 15) 出口嘉一(1998)：地震応答解析による非構造部材の被害予測、名古屋大学卒業論文
- 16) (社)電気設備学会(1997)：建築電気設備の耐震対策、建築設備 552号、46-50
- 17) 東京消防庁予防部予防課(1995)：阪神淡路大震災における消防用設備の被害と当庁の耐震措置基準について、電気設備学会誌、1003-1007
- 18) 日本建築学会(1985)：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領
- 19) (社)日本建築学会(1993)：「建築物荷重指針同解説」
- 20) (社)日本建築学会(1999)：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-7 建築設備・建築環境

- 21) 日本建築センター (1982) : 建築設備耐震設計・施工指針 1982 年版
- 22) 日本建築センター (1997) : 建築設備耐震設計・施工指針 1997 年版
- 23) 林康裕、宮腰淳一、田村和夫 (1997) : 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察、日本建築学会構造系論文集 第 502 号、61-68
- 24) 阪神大震災における自家用発電設備調査委員会 (1996) : 阪神大震災における自家用発電設備調査報告書、(社) 日本内燃力発電設備協会
- 25) 兵庫県南部地震特別研究委員会 (1997) : 「性能明示型耐震設計に向けて」-建築主との対話ツールとしての耐震メニュー-、日本建築学会
- 26) 宮腰淳一、林康裕、渡辺宏一、田村和夫 (1997) : 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価、構造工学論文集 vol.43B、269-276