

耐震診断・改修のためのシナリオづくりに関する研究

A study of scenarios on evaluation and retrofitting
for seismic safety

林 昌司* 福和 伸夫** 石田 栄介***

Shoji HAYASHI, Nobuo FUKUWA, Eisuke ISHIDA

It is a long-range problem to reinforce buildings lacking in seismic safety. Therefore scenarios are necessary for efficient planning of retrofitting such buildings. In this paper, the database for disaster prevention, reinforced concrete public facilities in Aichi prefecture, Japan, is constructed and analyzed based on the result of checking for seismic safety in Shizuoka prefecture, Japan. Also, some scenarios of retrofitting are presented and compared each other.

Keywords : seismic index of structure, scenarios, checking for seismic safety, reinforcing for seismic safety, cost evaluation, percentage of damage
 I_S 値, シナリオ, 耐震診断, 耐震改修, コスト評価, 被害率

1 序論

阪神・淡路大震災では、建築物の倒壊によって甚大な被害を受けたが、新耐震設計法による建築物の被害は比較的軽微であったことから、今後地震時の被害を小さくするには、耐震性の低い建物を改修し、特に地震後の応急活動や復旧活動などをすべき防災拠点となる建築物の耐震性を確保して、災害時に迅速に対処できるようなシステムを早急に構築していかなければならないといえる。

しかし、ある統計によれば既存建物でその性能を見直す必要のある建物は全国に1000万棟のオーダーで残っているといわれている¹⁾。また、建築物の耐震診断には多くの費用と時間がかかり、一級建築士は全国に平成6年度末で26万人いるが²⁾、これらすべての人が1年に1件診断したとして約40年を要する。このように、耐震性の低い建物を改修することは極めて長期的な問題であるので、建築物の耐震診断・改修を進めていくうえで、最も効率よく早期に耐震性を向上させ得る計画を立てるためのシ

ナリオづくりが必要である。

本論では、防災の拠点となる公共建物、具体的には愛知県の保有するRC造公共建築物について静岡県におけるRC造公共建築物の耐震診断結果をもとに分析し、耐震診断・改修のシナリオづくりを試みる。本論における、シナリオ作成までの流れを以下に示す。

- 愛知県の保有建物計9166棟の耐震性に関わるデータベースを作成する。
- 建設年度、層数について分析された静岡県内のRC造公共建築物の耐震診断の分析結果³⁾に基づき耐震性が I_S 値に対して独立要因であると仮定した上で、愛知県の公共建物の耐震性を評価する。
- 耐震性の評価法は、十勝沖地震、宮城県沖地震程度の地震(入力地動加速度0.23G)に対して、ある建設年度、ある層数の建物群が被害を受ける割合で評価する。

* 名古屋大学大学院工学研究科 大学院生

** 名古屋大学建築学科 助教授・工博

*** 名古屋大学建築学科 助手・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Nagoya University

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Nagoya University, Dr.Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Nagoya University, Dr.Eng.

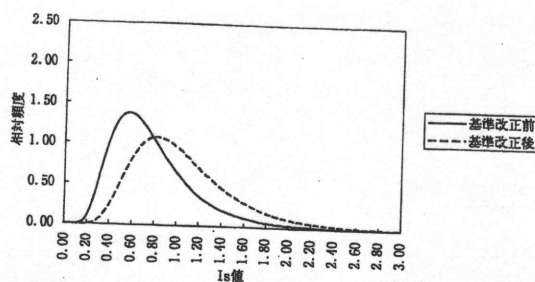


図 1: 静岡県の RC 造公共建築物の建設年度別 I_S 値分布

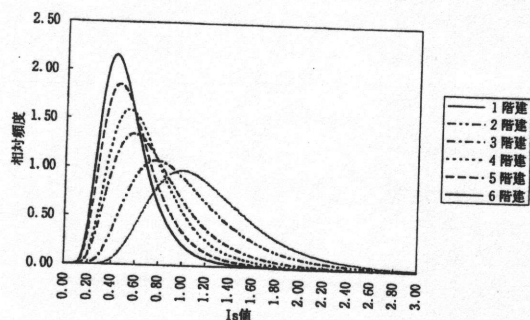


図 2: 静岡県の RC 造公共建築物の層数別の 1 階 I_S 値の分布

- 静岡県の分析結果の補強後の I_S 分布から、補強後の耐震性を評価する。
- 以上の結果を拡張して、地震動の大きさや補強率をかえてみて、延べ床面積から改修コストなどを推定し、耐震診断・改修のシナリオの相互比較を行う。

2 建物の耐震性を設計年度・層数から推定する方法

静岡県では、東海地震を想定した防災対策のために、既存 RC 造公共建物の耐震診断を実施し、耐震性の低い建物の補強を行ってきている。本節では、静岡県での統計結果を愛知県の公共建物の耐震性の分析に活用する方法を具体的に考察する。

2.1 建物の耐震性評価に利用するデータ

静岡県における RC 造公共建物の診断結果の解析結果^{3)~6)}のうち、愛知県のデータベースに適應できるものを示す。 I_S 値分布として、建設年度別 (建設年度が昭和 46 年以前・昭和 47 年以後の 2 種類)・層数別 (1 階建~6 階建) の分布、補強建物の補強前後の分布、十勝沖地震・宮城県沖地震で中破以上の被害を受けた RC 造建物の分布を利用する^{3), 4), 5)}。ただし、静岡県の I_S 値の資料は、2 次診断の 1 階の値である。統計的解析方法としては、ある地震動加速度に対して被害分布を求める方法、ある補強率での補強後の I_S 値分布を求める方法を参考にする^{3), 6)}。静岡県における RC 造公共建物の診断結果について I_S 値の頻度分布を対数正規分布に当てはめた結果を、図 1~図 3^{3), 4), 5)}に図示する。

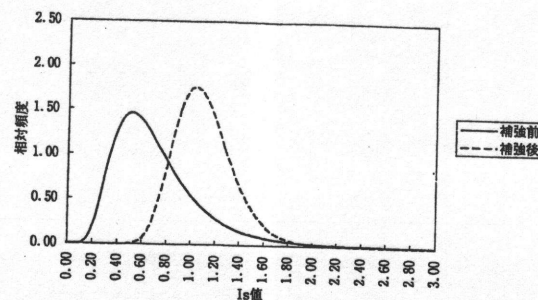


図 3: 静岡県の RC 造公共建築物の補強建物の補強前後の I_S 値分布

表 1: 静岡県の公共建物の I_S 値の平均値と標準偏差³⁾

	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6階建
棟数	155	839	1352	716	78	12
平均値	1.24	1.03	0.796	0.703	0.598	0.535
標準偏差	0.49	0.472	0.388	0.315	0.272	0.228

	改正前	改正後	全建物
棟数	2215	842	3154
平均値	0.779	1.06	0.853
標準偏差	0.374	0.456	0.43

2.2 建設年度・層数をパラメータとした I_S 値分布の推定

耐震性を推定するために参照するデータは、静岡県内の RC 造公共建物の耐震診断により得られた建設年度別 I_S 値分布 (図 1) と、層数別の I_S 値分布 (図 2)、耐震補強建物の補強前後の I_S 値分布 (図 3) である。(いずれの I_S 値分布も桁行・梁間両方向の I_S 値の統計をとったもの。)

建設年度別・層数別、それぞれの棟数と I_S 値の平均値・標準偏差を表 1 に示す。愛知県の公共建物のデータベースのパラメータのうち、延べ床面積及び構造種別を用いてある規模以上の RC 造建物を抽出し、建設年度及び層数を用いて耐震性を評価する。

今、建設年度・層数を同時にパラメータとして解析するためには、静岡県の事例における建設年度・層数別の I_S 値分布を利用して建設年度・層数ごとの I_S 値分布を求めなければならない。そこで、ある仮定をすることにより、建設年度・層数を与えて既存のデータから I_S 値分布を得ることを考える。

ここで、静岡県での調査結果から得られる既知の値、及び求めたい値は次のとおりである。

● 既知の値

建物の件数について

N : 合計件数

N_i : 建設年度ごとの件数

N_j : 層数ごとの件数

I_S 値の平均値について

$\bar{x}$: 全体の I_S 値の平均値

$\bar{x}_i$: 建設年度ごとの I_S 値の平均値

$\bar{x}_j$: 層数ごとの I_S 値の平均値

表 2: 建設年度・層数ごとの I_S 値分布の平均値と標準偏差

		1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6階建
改正前	I_S 平均値	1.128	0.937	0.724	0.639	0.544	0.487
	I_S 標準偏差	0.437	0.423	0.348	0.282	0.244	0.204
改正後	I_S 平均値	1.535	1.275	0.985	0.870	0.740	0.662
	I_S 標準偏差	0.503	0.508	0.424	0.337	0.292	0.240

I_S 値の標準偏差について

σ : 全体の I_S 値の標準偏差

σ_i : 建設年度ごとの I_S 値の標準偏差

σ_j : 層数ごとの I_S 値の標準偏差

● 求める値

N_{ij} : 建設年度・層数ごとの件数

$\bar{x}_{ij}$: 建設年度・層数ごとの I_S 値の平均

σ_{ij} : 建設年度・層数ごとの I_S 値の標準偏差

(i = 昭和46年以前, 昭和47年以降, j = 1~6階)

まず, 建設年度・層数ごとの平均値と標準偏差を求めるために, 層数ごとの件数それぞれについての建設年度別の件数の比が等しいと仮定する。すなわち*1,

$$N_{ij} = \frac{N_i}{\sum N_i} \frac{N_j}{\sum N_j} N. \quad (1)$$

次に, 建設年度・層数ごとの I_S 値の平均値 $\bar{x}_{ij}$ を求めるために I_S 値の合計を考え, 件数の場合と同じようにして建設年度・層数ごとの I_S 値の合計 S_{ij} を計算する。そして, それを N_{ij} で除すことによって $\bar{x}_{ij}$ を求める。

$$\bar{x}_{ij} = \frac{S_{ij}}{N_{ij}} \quad (2)$$

次に, 建設年度・層数ごとの I_S 値分布の標準偏差 σ_{ij} を求めるために I_S 値の2乗の合計を考え, 件数の場合と同じようにして建設年度・層数ごとの I_S 値の2乗の合計 I_{ij}^2 を計算する。そして, 建設年度・層数ごとの標準偏差 σ_{ij} は, 平均値と標準偏差の関係から求める。

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{N_{ij}} I_{ij}^2 - \bar{x}_{ij}^2 \quad (3)$$

上述の計算により得られた建設年度・層数ごとの件数, 平均値, 標準偏差を表2に示す。また, 建物の I_S 値分布を対数正規分布として, 建設年度・層数ごとの I_S 値分布を図4, 図5に示す。

2.3 建物補強後の I_S 値分布と被害建物の I_S 値分布の推定方法

ある I_S 値分布の建物群の補強による, I_S 値分布の変化を推定する方法^{3), 6)} について述べる。静岡県内公共建物のうち, 建物補強が行われた建物の診断結果より得られた補強前後の I_S 値分布は図3のようになる。式で表せば,

*1ここでは, $\sum_i N_i$ を $\sum N_i$ のように表記する。

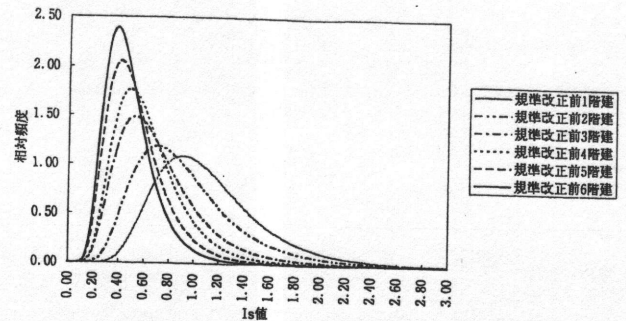


図 4: 基準改正前の層数別 I_S 値分布

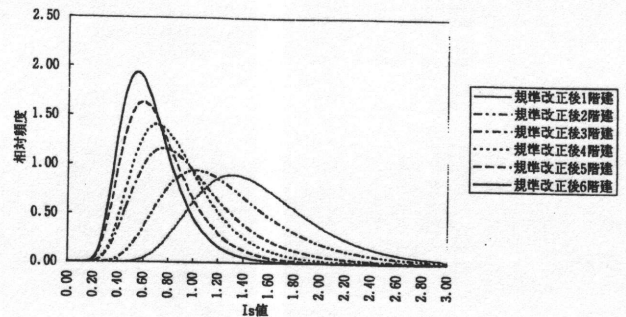


図 5: 基準改正後の層数別 I_S 値分布

[補強前]

$$P_{BS}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y \cdot x} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{(y - \bar{y})^2}{\sigma_y^2} \right] \quad (4)$$

x : I_S 値 y : $\ln(x)$ $\bar{y}$: -0.514 σ_y : 0.470

[補強後]

$$P_{AS}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y \cdot x} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{(y - \bar{y})^2}{\sigma_y^2} \right] \quad (5)$$

x : I_S 値 y : $\ln(x)$ $\bar{y}$: 0.068 σ_y : 0.189

このとき, 補強後の建物を含む全建物の I_S 値分布を次式により求める。

$$P_{Rs}(x) = P_{Is}(x) - R_S \cdot P_{BS}(x) + R_S \cdot P_{AS}(x) \quad (6)$$

$P_{Rs}(x)$: 補強後の建物を含む全建物の I_S 値分布

$P_{Is}(x)$: 未補強時の全建物の I_S 値分布

$P_{BS}(x)$: 補強建物の補強前の I_S 値分布式(4)

$P_{AS}(x)$: 補強建物の補強後の I_S 値分布式(5)

R_S : 補強率(補強建物数の全建物数に対する割合)
 x : I_S 値

今, I_S 値分布の異なる複数の建物群の耐震診断・改修をするとき, それぞれの建物群の補強対象建物の I_S 値分布 $P_{BS}(x)$ もまた, 異なった分布になる。本論では, 解析対

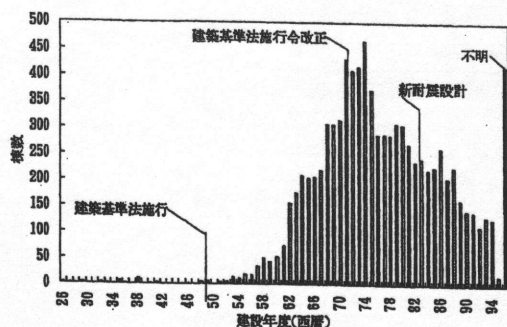


図 6: 建設年度別の棟数分布

象建物を層数・設計年度で12種類に分け、それぞれの I_S 値分布を使って分析を行うので、補強対象建物の I_S 値分布 $P_{BS}(x)$ を層数・設計年度ごとの I_S 値分布に応じたものにする必要があるが、具体的に $P_{BS}(x)$ を選定する方法は後述する。

次に、ある I_S 値分布の建物群が、ある入力地動加速度の地震動を受けたときの被害分布を推定する方法を示す。この方法は、文献3)、6)によるものである。

建物群の確率密度関数を $P_{I_S}(x)$ 、 E_T 値の確率密度関数を $P_{E_T}(x)$ とする。被害建物の I_S 値分布 $v(x)$ は、次式によって求める。

$$v(x) = P_{I_S}(x) \cdot \left[1 - \int_0^x P_{E_T}(r) dr \right] \quad (7)$$

E_T 値分布は十勝沖地震、宮城県沖地震の被害分布をもとに逆算する。

$$P_{E_T}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x - \bar{x})^2}{\sigma_x^2} \right] \quad (8)$$

$$x: E_T \text{ 値} \quad \bar{x}: 0.399 \quad \sigma_x: 0.085$$

式(8)は入力地動加速度が0.23Gの地震を想定したものであるが、ある入力地動加速度 α の E_T 値分布は、式(8)において変動係数一定で平均値のみを $\alpha/0.23G$ 倍することにより求める。求めた E_T 値分布を式(7)に適用すれば、ある I_S 値分布の建物群が、ある入力地動加速度の地震動を受けたときの被害分布が推定できる。

3 シナリオ解析の対象建物群

現在、愛知県が保有する公共建築物のうち9166棟について耐震性に関わる情報をデータベース化した。作成したデータベースには、建物の構造概要のほかに、電気、ガスや防火設備などのデータが建物1棟ごとにそれぞれ存在する。ここではシナリオ作成に関係するデータに関する分析結果を示す。

データベース化された全建物についての建設年度別の棟数分布を図6に、建物規模別・構造種別の棟数分布を図7に示す。図7から、ある規模以上の公共建築物は、ほとんどRC造であることがわかる。

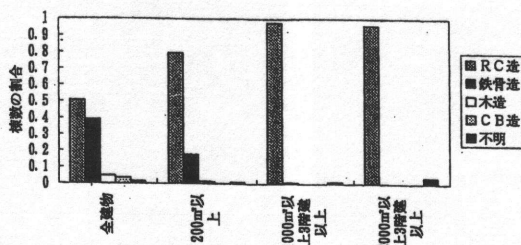


図 7: 建物規模別・構造種別の棟数分布

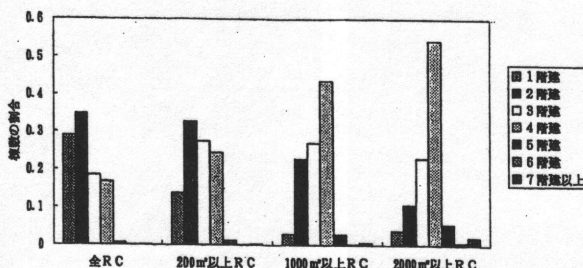


図 8: 規模別・層数別の棟数分布

本論では、RC造の公共建築物の耐震診断・改修のシナリオを考えているので、データベース化した建物のうちRC造のものを対象とする。RC造建物の規模別・層数別の棟数分布を図8に示す。図8から、ある規模以上の公共建築物には4階建の建物が多いことが分かるが、これは、4階建の学校の校舎が多く含まれているためである。

以後の分析では、耐震改修促進法を参考にして、シナリオ解析の対象建物を延床面積200㎡以上のRC造公共建築物とした。シナリオ作成には、静岡県内の保有するRC公共建築物の耐震性に関する分析結果を利用するが、静岡県で耐震診断された建物には、建築基準法施行前の建物(1950年以前)、新耐震設計法による建物および7階建以上の建物は含まれておらず、シナリオ解析の対象外とする。

結果として、本論におけるシナリオ解析の対象建物群は、延床面積200㎡以上、6階建以下で1951年～1981年に建設されたRC造公共建築物1762棟ということになる。シナリオ解析の対象建物群の棟数・延床面積についての集計結果を表3に示す。図9～11に、延床面積、建築年度、

表 3: シナリオ解析対象建物群の棟数・延床面積に関する集計結果

昭和46年以前(棟数)	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6階建
200～1000㎡RC	89	210	218	57	0	0
1000～2000㎡RC	7	67	113	82	1	0
2000㎡以上RC	0	5	99	25	2	1
昭和47年以後(棟数)	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6階建
200～1000㎡RC	110	188	136	50	1	0
1000～2000㎡RC	5	61	45	100	4	0
2000㎡以上RC	7	15	11	96	6	1
昭和46年以前(延床面積㎡)	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6階建
200～1000㎡RC	41139	111901	127418	36869	0	0
1000～2000㎡RC	8283	96087	160461	119890	1095	0
2000㎡以上RC	0	23504	114990	84872	6898	26390
昭和47年以後(延床面積㎡)	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6階建
200～1000㎡RC	51082	94759	74621	80988	520	0
1000～2000㎡RC	6121	60115	60873	142306	5824	0
2000㎡以上RC	106511	38667	27416	306551	22528	2458

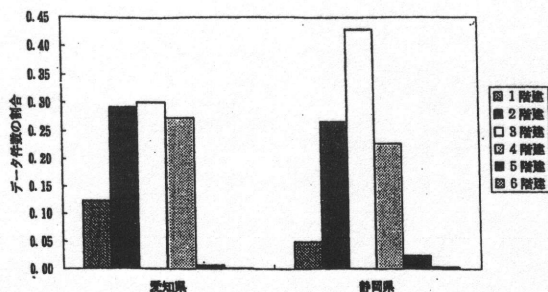


図 9: 層数別分布の比較

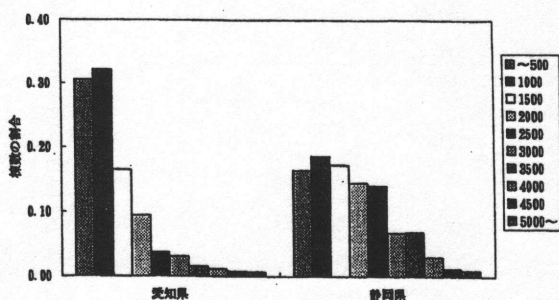


図 10: 延床面積別分布の比較

層数, I_S 値の分布を, シナリオ解析の対象建物群と静岡県で耐震診断された建物群を比較して示す。

静岡県で耐震診断された建物群は, シナリオ解析の対象建物群に比べて, 1階建の建物の割合が若干小さくなっており, 延床面積の小さい建物が多く, また, 建設年度については基準改正前の建物の割合が大きい。

4 耐震診断・改修のためのシナリオづくり

ここでは, 耐震診断率, 補強率, 被害率, 年間コストなどを変数として様々な観点からシナリオの比較を行い, その改修効率を考察する。

4.1 シナリオ作成に利用するデータ

以下に, シナリオ作成に利用するデータをまとめて列挙する。

層数・建設年度ごとの建物群データ

- I_S 値分布 → 図 4, 図 5
- 棟数 → 表 3
- 総延床面積 → 表 3

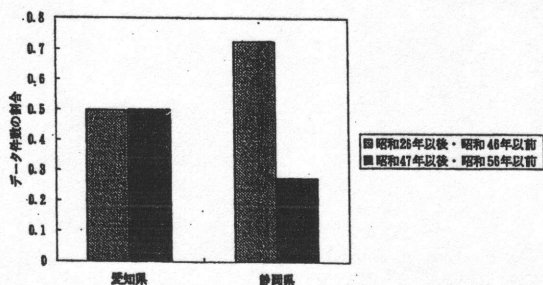


図 11: 建設年度別分布の比較

被害率を推定するために使うデータ

- 入力地動加速度0.23Gのときの E_T 値の分布
→ 式 (13)

補強後の I_S 値分布を推定するために使うデータ

- 静岡県の補強建物の I_S 値分布 (補強前後) → 図 3

耐震診断・改修に必要なコストを推定するために使うデータ

- 単位面積・単位 I_S 値あげるのにかかるコスト^{*)}
→ $58500 \text{ 円}/I_S \cdot \text{m}^2$ *2
- 建物1棟の耐震診断をするのにかかるコスト
→ 愛知県建築住宅センターの耐震診断料金表 *3

4.2 シナリオの分析に際し使用する変数

変数として, 耐震診断率, 補強率, 被害率, コストを使ってシナリオの分析をしていくが, 変数それぞれの定義と算出方法について以下に述べる。

耐震診断率 (図 12 参照)

建物を耐震診断・改修していく際に無作為に層数・建設年度ごとの建物群から抽出して耐震診断していくとして, 単純に I_S 値分布の相対頻度を R_{ri} 倍することで耐震診断済みの建物の I_S 値分布と考え, $R_{ri} \times 100(\%)$ を層数・建設年度ごとの建物群の耐震診断率と定義する。層数・建設年度ごとの建物群の建物の延床面積はすべてその建物群の延床面積の平均値であると仮定し, シナリオ解析対象建物全体の耐震診断率を次式のように定義する。

$$R_r = \frac{\sum (R_{ri} \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (9)$$

$R_{ri} \times 100$: 耐震診断率 (%)

$R_{ri} \times 100$: 層数・建設年度ごとの耐震診断率 (%)

A_i : 層数・建設年度ごとの延床面積の合計 (m^2)

i : 12種の建物群を表す添字 ($i = 1 \sim 12$)

層数・建設年度ごとの耐震診断済みの建物の I_S 値分布 $P_{Rr}^{(i)}(x)$ は,

$$P_{Rr}^{(i)}(x) = R_{ri} \cdot P_{Is}^{(i)}(x) \quad (10)$$

*2 文献 7) では補強工事が行われた年度を昭和 55-57 年度, 昭和 58-60 年度, 昭和 61-63 年度の 3 期に分けて補強コストを集計しているが, ここでは昭和 61-63 年度に補強された建物のコストの平均値を使用した。

*3 層数・建設年度ごとの建物群ごとに算定する。

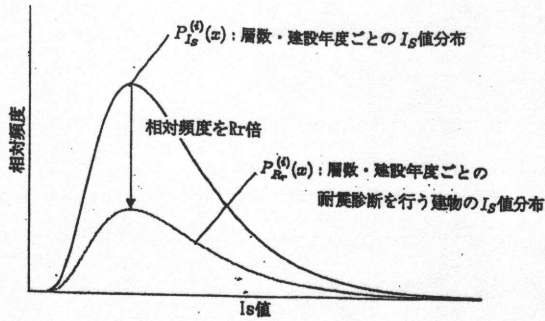


図 12: 耐震診断率

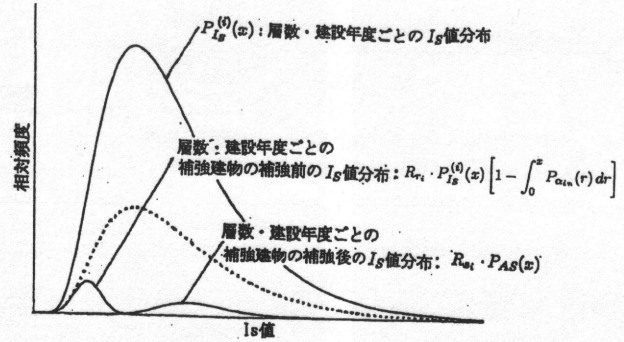


図 13: 補強率

$P_{Rr}^{(i)}(x)$: 層数・建設年度ごとの耐震診断済みの建物の I_S 値分布

$P_{Is}^{(i)}(x)$: 層数・建設年度ごとの I_S 値分布
 x : I_S 値

補強率 (図 13 参照)

補強の対象となる建物の I_S 値分布は、層数・建設年度ごとの耐震診断済みの建物の I_S 値分布の入力地動加速度 α_{in} に対する被害分布とし、この入力地動加速度 α_{in} を目標の入力地動加速度と呼ぶ。補強後の分布は、補強建物の総面積と等しくなるように、静岡県補強建物の補強後の分布の相対頻度を定数倍したものとす。ここで、耐震診断率を定義したときと同様に、シナリオ解析対象建物全体の補強率を次式のように定義する。

$$R_s = \frac{\sum (R_{si} \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (11)$$

$R_s \times 100$: 補強率 (%)

$R_{si} \times 100$: 層数・建設年度ごとの補強率 (%)

ただし、

$$R_{si} = \int_0^\infty R_{ri} \cdot P_{Is}^{(i)}(x) \left[1 - \int_0^x P_{\alpha_{in}}(r) dr \right] dx \quad (12)$$

$P_{\alpha_{in}}(x)$: 目標の入力地動加速度 α_{in} に対する E_T 値の分布

被害率 (図 14 参照)

地震による被害指標は死者の数や被害建物の数など様々であり、被害率の定義はどんな被害について考えるかによって結果が異なるが、本論では、被害を

受けた建物の総床面積に対する割合としており、この被害率をより迅速に、あるいはより低コストで減少することができれば効率が良いと考える。耐震診断・改修後の層数・建設年度ごとの I_S 値分布から、任意入力地動加速度 α_o に対し、2 節で述べた方法により耐震診断・改修後の層数・建設年度ごとの被害分布を求めることができる。この地動加速度 α_o を実際の入力地動加速度と呼ぶ。シナリオ解析対象建物全体の被害率を次式のように定義する。

$$R_d = \frac{\sum A_i (R_{di} \cdot A_i)}{A_i} \quad (13)$$

$R_d \times 100$: 被害率 (%)

$R_{di} \times 100$: 層数・建設年度ごとの被害率 (%)

ただし、

$$R_{di} = \int_0^\infty \left[\overbrace{P_{Is}^{(i)}(x) - R_{ri} \cdot P_{Is}^{(i)}(x) \left[1 - \int_0^x P_{\alpha_{in}}(r) dr \right]}^{\text{補強建物の補強前の } I_S \text{ 分布}} + \overbrace{R_{si} \cdot P_{AS}(x)}^{\text{補強建物の補強後の } I_S \text{ 分布}} \right] \times \left[1 - \int_0^x P_{\alpha_o}(r) dr \right] dx \quad (14)$$

$P_{\alpha_o}(x)$: 実際の入力地動加速度 α_o に対する E_T 値の分布

コスト 建物の耐震診断・改修にかかるコストは、耐震診断コスト C_r と補強コスト C_s の和として求める。建物 1 棟あたりの耐震診断コストは、層数・建設年度ごとの建物群の延床面積の平均値の建物 1 棟を耐震診断するのにかかるコストとする。したがって、耐震診断コストは、

$$C_r = \sum (c_i \cdot R_{ri} \cdot N_i) \quad (15)$$

C_r : 耐震診断にかかるコスト (円)

c_i : 層数・建設年度ごとの 1 棟にかかる診断コスト

N_i : 層数・建設年度ごとの棟数

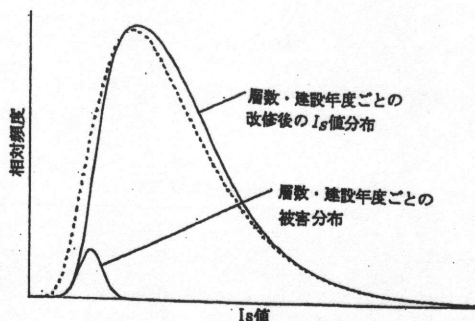


図 14: 被害率

また建物の補強コストは、単位面積・単位 I_s 値あげるのにかかるコスト $58500 \text{ 円}/I_s \cdot \text{m}^2$ を使って算定する。補強コストは、次式で求める。

$$C_s = \sum \{58500 \cdot R_{si} \cdot A_i (m_{Bi} - m_A)\} \quad (16)$$

C_s : 建物を補強するのにかかるコスト (円)
 m_{Bi} : 層数・建設年度ごとの補強建物の
 補強前の I_s 値の平均値
 m_A : 補強建物の補強後の I_s 値の平均値

ただし、コストについては、層数も大きなファクターであり、ある層数の建物についての各階での I_s 値分布の統計データが必要となるが、本論では、適切な資料が入手できずすべての層数に対して同じ値を使った。

4.3 耐震診断・改修順序の異なるシナリオ

4.3.1 シナリオ 1.1, シナリオ 1.2 の概要

ここでは、以下に示す耐震診断・改修順序の異なる 2 つのシナリオを比較して、耐震診断・改修順序による、毎年の被害率・年間コストの違いを調べる。

シナリオ 1.1: 耐震性の低い建物から耐震診断・改修する
 シナリオ 1.1 は、他のシナリオとの比較に際し、基本となるシナリオである。このシナリオでは、1 年間に全建物の延床面積の合計の 10% ずつ 1997 年から耐震診断・改修していき、10 年間で耐震診断・改修を全建物に対して完了することとする。また、入力地動加速度 $0.23G$ のときの被害率が大きい建物から耐震診断・改修をしていく。基準改正前・3 階建の建物を、例えば「前 3」のように表すとして、改修順序を以下に示す。

前 6 → 前 5 → 前 4 → 前 3
 → 後 6 → 後 5 → 前 2 → 後 4
 → 後 3 → 前 1 → 後 2 → 後 1

シナリオ 1.2: 無作為に建物を耐震診断・改修する このシナリオでは、1 年間に全建物の延床面積の合計の 10% ずつ 1997 年から耐震診断・改修していき、10 年間で耐震診断・改修を全建物に対して完了することとする。耐震診断・改修の順序については、層数・建設年度ごとの 12 種類の建物を毎年それぞれ 10% ずつ耐震診断・改修していくので、毎年同じ建物群を耐震診断・改修することになる。

4.3.2 シナリオ 1.1, シナリオ 1.2 の解析結果

年度と被害率、年度と年間コストの関係を表すグラフを、それぞれ図 15, 図 16 に示す。被害率の減少の早いシナリオ 1.1 のほうが、シナリオ 1.2 より有利であると考えられるが、その分、被害率の減少量が大きい年には年間コストが大きくなっている。

年度と補強率の関係を表すグラフを、図 17 に示す。このグラフの形状は、年度の被害率の関係と表すもの (図 15) とよく対応している。

耐震診断・改修に投資できる毎年の予算が限られているので、具体的に、シナリオ 1.1 のような改修を実践していくのは不可能である。したがって、コストと被害率の関係を調べることは重要である。コストと被害率の関係を表すグラフを図 18 に示す。図から、耐震診断・改修順序によらず、投資したコストにほぼ比例して被害率が減少することがわかるが、シナリオ 1.1 のほうが、同じ投資コストに対する被害率の初期段階での減少量が若干大きい^{*4}。

ここで、コストと被害率に着目した効率について、もう少し詳しく考察してみる。

シナリオ 1.1 において、耐震診断にかかるコストを除く、建物の補強だけにかかる年間コストと被害率の減少量の関係を表すグラフを図 19 に示す。このグラフから、耐震性の高い建物より、低い建物を補強するほうが効率が良いといえる。耐震診断と補強にかかる年間コストと、被害率の減少量の関係を表すグラフを図 20 に示す。耐震診断費を考慮すると、耐震性の高い建物群を耐震診断・改修する場合、耐震診断をしても補強をほとんどしないので、被害率の減少量は小さく、一方、年間コストの耐震診断費の占める割合が大きくなるので前述の性質がより顕著なものとなる。以上のことから、図 18 の軌跡の違いは、耐震性が低い建物群を補強するほどコストに関する効率がよくなることと、耐震性が低い建物群を耐震診断するほど耐震性の不足する建物を多く特定できることの 2 つの相乗効果によるものであると考えることができる。しかしながら、建物の補強にかかるコストに比べ、耐震診断にかかるコストは非常に少なく、図 18 のように 2 つの

^{*4}最終的には、シナリオ 1.1 とシナリオ 1.2 の投資したコストに対する被害率の減少量は同じになる。

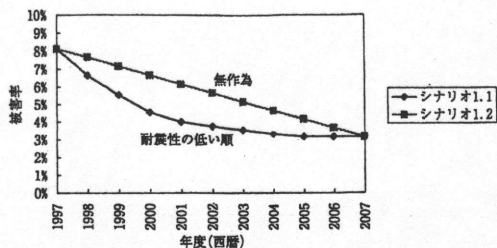


図 15: 耐震診断・改修順序の異なるシナリオ：年度と被害率

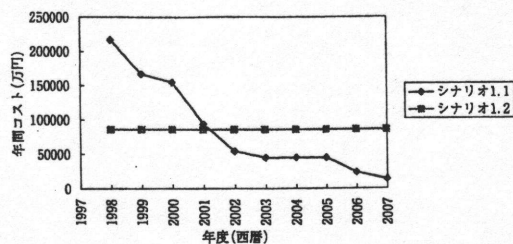


図 16: 耐震診断・改修順序の異なるシナリオ：年度と年間コスト

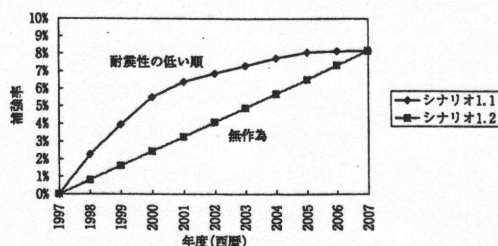


図 17: 耐震診断・改修順序の異なるシナリオ：補強率

シナリオのコストに関する効率には大きな差はみられない*5。

4.4 目標の入力地動加速度の異なるシナリオ

目標の入力地動加速度の異なるシナリオとして、シナリオ2.1、シナリオ2.2を考える。

シナリオ2.1 目標の入力地動加速度を0.36Gとし、他はシナリオ1.1と同じ条件で耐震診断・改修する。

シナリオ2.2 目標の入力地動加速度を0.45Gとし、他はシナリオ1.1と同じ条件で耐震診断・改修する。

4.4.1 シナリオ2.1、シナリオ2.2の解析結果

年度と被害率の関係を表すグラフを図21に示す。目標の入力地動加速度が小さいほど、被害率の減少量が少なくなる。また、地震の規模が大きくなるほど顕著になる。

実際の入力地動加速度0.23G、0.36G、0.45Gに対する被害率とコストの関係を表すグラフを同一グラフ上にプロットして、図22に示す。実際の入力地動加速度が0.23G、

*5シナリオ1.1、シナリオ1.2において、最終的に耐震診断にかかるコストは、補強費用も含めた全体のコストの15%程度である。

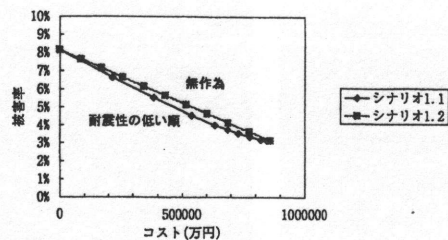


図 18: 耐震診断・改修順序の異なるシナリオ：コストと被害率

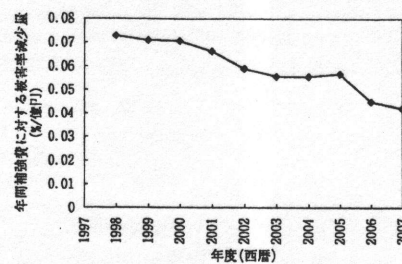


図 19: シナリオ1.1：年度と効率(建物補強にかかるコストに対する被害率減少量)

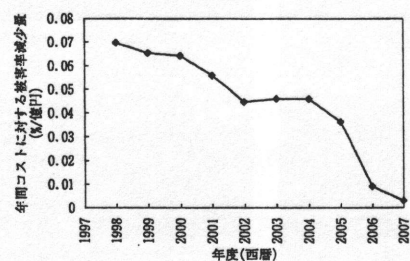


図 20: シナリオ1.1：年度と効率(耐震診断・改修にかかるコストに対する被害率減少量)

0.36G、0.45Gのどの場合も、被害率とコストはほぼ比例している。少ないコストでより多く被害率を減少させることができれば効率がよいとするならば、実際の入力地動加速度が同じ場合の3つのシナリオを比較してみると、目標の入力地動加速度と実際の入力地動加速度が等しいときにコストに関する効率が最もよくなることが分かる。しかしながら、目標とする地動レベルを低く設定してしまうと最終的な被害率の低下は小さくなってしまいますので、目標とする地動レベルの決定の際には十分注意する必要があります。

4.5 補強対象建物の異なるシナリオ

これまでのシナリオの補強対象建物の I_S 値分布の選定方法に対し、ここでは補強対象建物の I_S 値分布を静岡県において補強された建物の補強前の分布としたときのシナリオ(シナリオ3.1)を考える。

また、被害の可能性のある建物について補強が行われ、

かつ補強された建物には被害が生じないとした場合のシナリオをシナリオ 3.2 とする。シナリオ 3.2 の被害率の計算方法^{3), 6)} を以下に示す。

$$V = \int_0^{\infty} [v(x) - R_s \cdot P_{BS}(x)] dx \quad (17)$$

ただし,

$$[v(x) - R_s \cdot P_{BS}(x)] \geq 0$$

$$v(x) = P_{IS}(x) \cdot \left[1 - \int_0^{\infty} P_{ET}(r) dr \right] \quad (18)$$

$R_s \times 100(\%)$: 補強率

$P_{BS}(x)$: 静岡県 の補強対象建物の
補強前の I_S 値分布

$P_{IS}(x)$: 層数・建設年度ごとの I_S 値分布を
棟数の比で合成した分布

$P_{ET}(x)$: E_T 値の分布

x : I_S 値

4.5.1 他のシナリオとの比較の方法

具体的には、以下に示す方法でシナリオ 3.1, 3.2 と他のシナリオを比較する。

1. 層数・建設年度ごとの I_S 値分布を棟数の比で合成することによってシナリオ解析対象建物群全体の I_S 値分布を求める。
2. 補強対象建物を、静岡県における補強建物の補強前の I_S 値分布とする。
3. シナリオ 3.1, 3.2 による解析方法では、補強率と被害率は棟数の比で表される^{*6}。シナリオ 3.1, 3.2 の、棟数についての補強率と、棟数についての被害率の関係を調べる。また、他のシナリオと比較するために、棟数についての補強率、棟数についての被害率を求めておく。シナリオ 3.1, 3.2 以外の棟数についての補強率及び棟数についての被害率は、次式によって算出することができる。(算出方法は、文献 3), 6) による。)

$$R'_s = \frac{\sum (R_s \cdot N_i)}{\sum N_i} \quad (19)$$

$$R'_d = \frac{\sum (R_d \cdot N_i)}{\sum N_i} \quad (20)$$

$R'_s \times (\%)$: 棟数についての補強率

$R'_d \times (\%)$: 棟数についての被害率

^{*6} I_S 値分布が、棟数についての分布であるため。

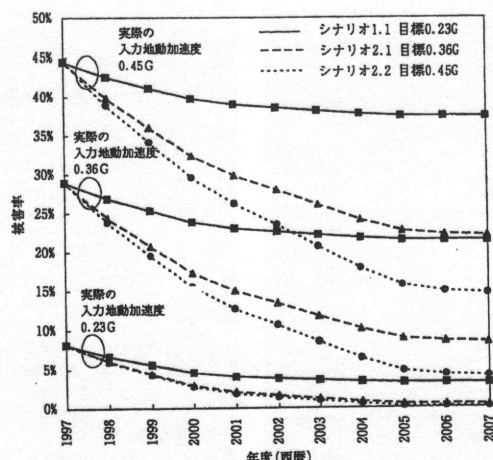


図 21: 目標の地動加速度が異なるシナリオ : 年度と被害率

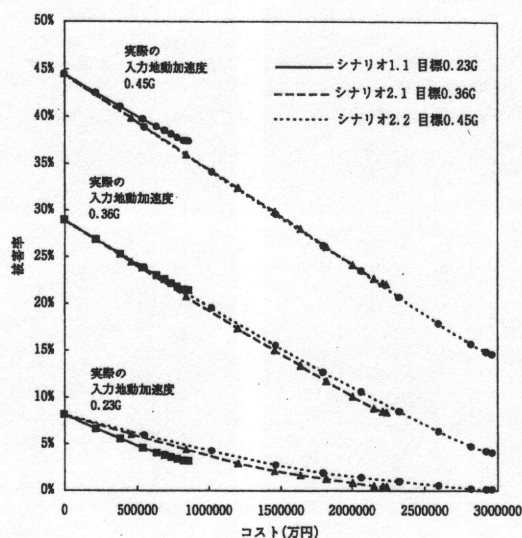


図 22: 目標の地動加速度が異なるシナリオ : コストと被害率 (実際の入力地動加速度 0.23G, 0.36G, 0.45G)

$R_s \times (\%)$: 層数・建設年度ごとの
床面積についての補強率

$R_d \times (\%)$: 層数・建設年度ごとの
床面積についての被害率

N_i : 層数・建設年度ごとの棟数

4. シナリオの、棟数についての補強率・被害率の関係を比較する。

4.5.2 解析結果

解析結果をみる前に、棟数についての被害率と床面積についての被害率、累積コストとの関係を、シナリオ 1.1 を例として調べる。棟数・床面積についての補強率と累積コストの関係を表すグラフを、図 24 に示す。棟数・床面積についての補強率は、コストにほぼ比例している。したがって、図 23 のグラフは、棟数についての被害率とコ

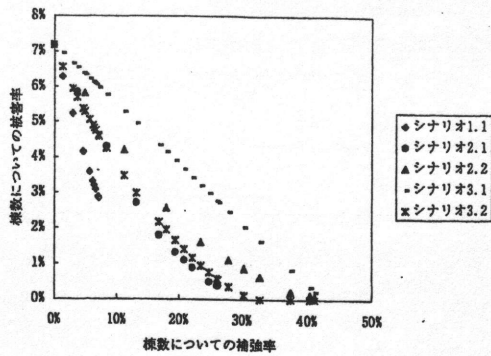


図 23: 棟数についての、補強率と被害率

ストの関係を表すグラフと同じ形状をしていると考えられる。

以上のことを考慮して、解析結果をグラフにしてみる(図23)。前節まで、シナリオ1.1~2.2の結果に対して被害率とコストの関係を調べてきたが、図23から、効率(コストに対する被害率の減少量)を決めるのは、各シナリオにおける補強建物の選定方法であることが確認できる。本論で解析したシナリオのうちで、効率(コストに対する被害率の減少量)が最もよいものは、目標の入力地動加速度が実際の入力地動加速度と一致した場合である。建物の重要度や立地条件を考慮すると、実際の補強建物の分布は被害分布にはならないと思われる。しかし、実際に補強建物を選定するとき、建物の I_S 値が分かっているとすれば、補強建物の I_S 値分布が被害分布になるように補強建物を選べば、建物だけに関しては効率(コストに対する被害率の減少量)がよくなるということは参考にできる。

5 結論

4.3節の考察では、耐震性の低い建物から耐震診断・改修すると効率が良いことを示し、また4.5.2節では、補強建物の I_S 値分布が、実際の入力地動加速度に対する被害分布と等しくなるように補強建物を選定すると効率がよいということを示した。以上の考察から、実際に耐震診断・改修を行う場合、建物を耐震診断し、必要であれば逐次的に補強するのではなく、耐震改修の対象となると思われる建物の耐震診断を優先し、それから補強建物を総合的に選定していくことが重要であるといえる。

補強建物を選定する場合、その補強建物の I_S 値分布が、想定した地震の入力地動加速度に対する被害分布と等しくなるように選ぶと、効率がよい。したがって、補強対象建物の I_S 値分布が、被害分布と同じ形状になるように補強を行うとすれば、図22のような結果を参考にして、どの程度の規模の地震に対して、各自治体の地域防災計画の策定の基本となっている地震動予想結果をふまえて、予算や時間とあわせて総合的に建物の改修計画を立てるとよい。しかしながら、本論のシナリオ解析では、建物の

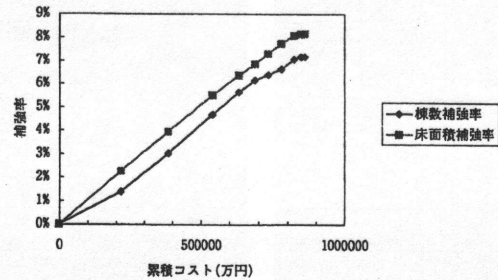


図 24: シナリオ1: コストと補強率

重要度や立地条件は考慮されておらず、実際には、補強建物の I_S 値分布の形状は被害分布のものとは同じにはならないこと、また、補強後の I_S 値分布として静岡県の事例を用いているが、用いた補強後の I_S 値分布が愛知県のもの異なるということが考えられ、被害率の低減に関して異なる結果になる可能性があることに注意する必要がある。

今後は、愛知県内で実施中の耐震診断結果のデータベース化を進めると共に、個々の建物に着目し、地盤特性も考慮して、耐震診断・改修のためのシナリオを作成し、耐震診断・改修の効果と効率について考察し、より具体的な耐震診断・改修の最適な順序を決める方法について研究を進める。

謝辞

本論をまとめるにあたり、名古屋大学大学院生・小出栄治氏に協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 中笠良昭, 建物の耐震診断・改修に関する動向について, KOBEnet通信 No.8, 1995.10.
- 2) 建設省編, 建設白書—平成7年版, 1995.8.
- 3) 中笠良昭, 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 博士論文, 1988.12.
- 4) 中笠良昭・岡田恒男, 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能の分析, 日本建築学会関東支部研究報告会, pp.13-16, 1985.
- 5) 山口寛久・中笠良昭・村上雅也・岡田恒男, 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能—年代別、用途別、層数別の構造耐震指標の分布の検討—, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.157-160, 1988.
- 6) 中笠良昭・岡田恒男, 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集第406号, pp.37-43, 1989.12.
- 7) 日本建築防災協会, 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震補強事例集