

施工中構造物の地震危険度

THE SEISMIC RISK OF STRUCTURES UNDER CONSTRUCTION

石 井 清*

By Kiyoshi ISHII

1. はしがき

構造物の設計に際しては、その構造物が耐用年数中に遭遇するであろう地震力を算定し、構造物がその地震力に十分耐えられるように設計する。ここで、構造物の耐用年数中における地震危険度を計算したものととして著名な河角マップなどがある^{1)~11)}。また、後藤らは過去の地震記録に含まれている時代あるいは、地域の影響を除いた地震危険度を算出している^{6),7)}。

ところで、構造物は耐用年数中の地震危険度ばかりでなく、その施工期間中においても地震危険度を有する。

この地震危険度は施工期間が数か月から、1, 2年程度であることを考えれば、耐用年数中の地震危険度と比べればはるかに小さいものであろう。しかしながら、施工中の構造物は構造的にみればきわめて不安定であったり、また、部材の応力が一時的には降伏点近くで用いられることもある。このような場合には、中小の地震でも施工中の構造物にはかなりきつく、一部には工事に支障を出すようなことがあるかもしれない。

また、高速道路、鉄道などの重要構造物に隣接する構造物の施工は技術者が最も心をくたくもの一つであるが、このような場合、耐震安全性すなわち施工中の構造物に対しどの程度の地震動強さを考えておけばよいかということは重要な問題の一つとなろう。

上記の観点から、本研究では、施工中の構造物の安全性を検討する基礎的資料として、施工期間中の地震危険度を計算する。

施工中の構造物の地震危険度を検討した既往の研究としては栗林らの研究があり、完成時構造物の地震危険度の算定方法に基づき考察を試みているが、試算結果は施工期間を2年として60~100 gal程度と小さい¹²⁾。実際には施工中構造物の安全性チェックには最大加速度100~150 gal程度が用いられている。この数値を確率統計

的な見地から検討することが本研究の課題でもある。以下、本研究の内容を概説する。

本研究では例題として建設地点を東京とし、地震危険度の算定は、従来の静的信頼性解析法すなわち地震発生をポアソン過程と仮定し、さらに、施工期間を単位の間に分けてベルヌーイ試行列として解析を行う^{13),14)}。

その際、地震記録のデータとして、東京における過去72年間(1898~1970年)の震度Ⅲ以上の地震発生回数を使用する¹⁵⁾が、(1)これらすべての記録回数をを用いた場合および、(2)関東地震の起きた年とその余震の多い翌年、1923年、24年の2年間を除いた場合について地震危険度を算定する。

(2)は関東地震のような大地震に遭遇すれば現存の建物も多数破壊することから、施工中の構造物が破壊しても問題にはならないであろうという考えによる。

なお、上記解析では地震の生起に対してその周期性あるいは統発性といったものは考慮に入れられていない^{16)~18)}。

ここで、地震の統発性は大地震直後の都市復興などと関連して検討しておくべき課題であろう。このことから、地震の統発性を仮定した地震危険度を概算し、上記地震危険度と比較検討する。同様に地震の周期性についても検討する必要があるかも知れない。

しかし、本研究では以下の点から、地震の周期性については検討しなかった¹⁹⁾。

(1) 施工時の短期の地震危険度と比較して、完成、使用中の構造物の方が地震動の周期性とは関連が深い。しかし、施工期間 $T_u=75$ 年、100年といった地震危険度に対しても地震の周期性を考慮した研究はいまのところない。

(2) また、河角などの方法により実際に地震危険度を算定しようとしても、周期の存在自体の問題から、周期の起点の問題、また、ある周期の地震がその周期以上にわたって地震がない時の解釈の問題など問題点が多く、実用的な計算はまず不可能である¹⁶⁾。

* 正会員 工修 清水建設(株)研究所力学研究部

2. 地震危険度の算定方法^{13), 14)}

以下、地震危険度に対して定義を与え、静的信頼性解析法による定式化を示す。定式化の誘導は既往の研究にくわしいのでここでは省略する。また、統発性に関する式は 4. 「数値結果およびその考察」で示す。

施工期間 (T_u) 中に地震が起こり、その地震の最大加速度 x が最大加速度 x_0 を越す確率すなわち地震危険度 P_f は次式によって与えられる。

$$P_f = P_f(x > x_0 | T_u) \dots \dots \dots (1)$$

また、

$$P_s = 1 - P_f = P_s(x < x_0 | T_u) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 P_s は式 (2) で示されるように、施工期間 (T_u) 中に起こる地震の最大加速度 x が最大加速度 x_0 を越さない確率すなわち安全度を示す。

式 (1) は地震の生起過程をポアソン過程と仮定し、さらに施工期間 T_u を N_T 期間に分割し 1 期間には地震が 1 回以上は起きないという仮定すなわちベルヌーイ試行列として定式化する。結果として、式 (3) により P_f は与えられる。

$$P_f = \sum_{n=1}^{N_T} [N_T C_n (p')^n (1.0 - p')^{N_T - n} \cdot \{1.0 - (1.0 - p)^n\}] \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 p' は 1 期間中に地震の起こる確率、 p は 1 回の地震で $x > x_0$ の事象が起きる確率である。また、 $N_T C_n$ は順列組合せであり、次式で与えられる。

$$N_T C_n = \frac{N_T!}{n! (N_T - n)!}$$

生起過程をポアソン過程でモデル化することは定式化を簡単にするばかりでなく、本論のように比較的小さい地震動も含めて扱う場合にはその精度は比較的高い^{16), 19)}。

p' および p は以下のようにして求められる。

1 期間中に地震の起こる確率 p' は過去の地震総数をその期間で割る。すなわち、1 期間中に起きる地震の期待 (平均) 回数 (<1.0) で与えられる。

また、1 回の地震でその最大加速度 x が最大加速度 x_0 を越す確率 p は 1 回の地震における最大加速度の確率密度関数 $P_x(x)$ が過去の地震データより推定できれば次式により与えられる。

$$P = \int_{x_0}^{\infty} P_x(x) dx \dots \dots \dots (4)$$

3. 使用した地震データとパラメーターの算定

地震危険度の算定には前章で示したように、1 期間中に地震の起こる確率 p' と 1 回の地震における最大加速度 x の確率密度関数 $P_x(x)$ を推定しなければならない

表一 東京における過去 72 年間の有感地震回数 (1898~1970)

年 数	震 度 階							合計
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
72 年 間 (1898~1970)	3650	800	249	37	10	1	0	4747
70 年 間 (1923, 24年 を除く)	2314	614	207	29	5	0	0	3169

い。

本章では過去における有感地震の回数から p および p' を推定しよう。

使用するデータは東京における過去 72 年間 (1898~1970) の有感地震回数である¹⁵⁾。内訳を表一に示す。表一では有感地震を震度階に分けて示している。この表からは、東京では震度 I 以上のものが年 66 回近くあり、震度 III 以上のものが年平均 4.1 回程度あることがわかる。したがって、施工期間を数か月とすれば、震度 II の地震は必ずといっていいほど起こり、施工中の構造物といえども震度 III には必ず耐えられねばならない。

上記の考察から、地震危険度を算定するには震度 III 以上のものを対象とすればよいことになる。

震度 III 以上のものから 1 か月間の地震の起こる期待 (平均) 回数を求めると、0.344 回/1 か月となり、 p' は決定できる。

$$\text{ケース 1 } p' = 0.344 \text{ 回/1 か月} \dots \dots \dots (5)$$

なお、表一の下段には、関東大震災の年およびその余震の多い翌年の記録を除いたものを示す。

両者を比較すると、震度 VI の関東地震に伴って、震度 V 5 回、震度 IV 8 回、震度 III 42 回と関東地震を含むものは大幅に多くなっている。

関東地震級の地震が起きた場合には既存の多くの建物が破壊あるいは崩壊してしまうのであるから、不安定な施工中の構造物は破壊をまぬがれないであろう。また、きわめてまれにしか起きない破壊的な地震のために、施工中の安全性を上げることは経済的にもゆるされない。

したがって、関東地震のときのデータははじめから抜いて地震危険度を計算することも考えられる。この考え方に従って、本研究では、ケース 1 として関東地震を含めた全データを、ケース 2 として関東地震の年およびその翌年の記録を除いたデータを用いて解析を行う。

ケース 2 の p' は以下となる。

$$\text{ケース 2, } p' = 0.287 \text{ 回/1 か月} \dots \dots \dots (6)$$

さて、次に、1 回の地震における最大加速度の確率密度関数を推定しよう。ここで、ケース 1 とケース 2 とも同じ手順で推定されるので、ケース 2 については結果のみを記す。

図一に表一を図示したものを示す。この図からは震度が大きくなるにつれて指数的に減少することがわか

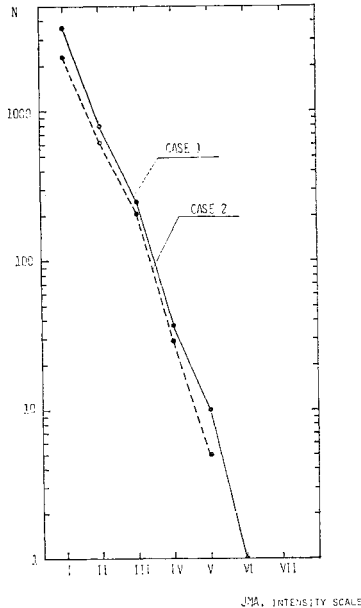


図-1 地震の生起回数 (東京, 1898~1970)

表-2 震度階と加速度との関係

震度階	相当する加速度 (gal)	平均加速度 (gal)
III	8.0~ 25.0	16.5
IV	25.0~ 80.0	52.5
V	80.0~250.0	165.0
VI	250.0~400.0	325.0

る。

推定すべきものは1回の地震における最大加速度の分布であることから表-1の震度階を加速度に変換する。

震度階に対する加速度の関係を表-2に示す²⁰⁾。ここで、対応する加速度はかなりの幅をもっているがその震度階は平均加速度により対応づける。

震度階に平均加速度を対応づけることはかなり乱暴に見えるが、同じ震度階においてもその大きさは図-1に示すように小さいものが多く、また、大きいものは少なくなるのであるから対応する加速度は安全側である。

図-2に震度階とその確率分布を示す。おのおのの確率分布は震度III以上の地震総数297とおのおのの震度階の回数の比として与えられる。したがって、この図は震度III以上の震度の地震が起こる割合を示している。また、震度IIIおよびIVのものが全体の96%を占めることがわかる。

図-2のままでは、計算に不便なため、指数的に減少する関数で近似する²¹⁾(図-3参照)。

図-3では、震度階から加速度に表-2に従い変換している。震度IIIは8galから20galに均等に分布しているものとして、幅をもった柱で表現されている。この柱の面積が図-2の震度IIIの確率分布の値に等しくな

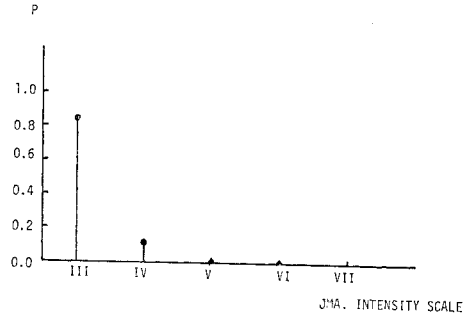


図-2 震度の確率分布 (東京, ケース1)

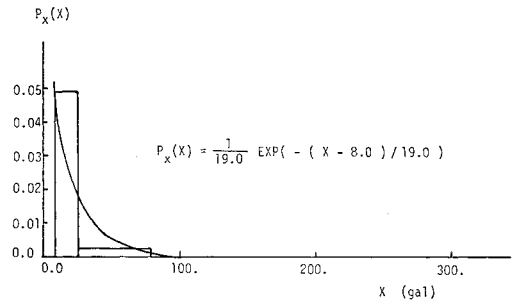


図-3 地震の最大加速度の確率密度関数 (東京, ケース1)

る。P_x(x)は25gal以上では十分安全側の値となっている。

近似した関数が求める最大加速度の確率密度関数P_x(x)であり、1回地震が起きたときの最大加速度の分布を示す。

$$\text{ケース 1, } P_x(x) = \frac{1}{19.0} e^{-(x-8.0)/19.0} \dots\dots (7)$$

$$x \geq 8 \text{ gal}$$

したがって、1回の地震でその最大加速度xが規定された最大加速度x₀を越える確率pはP_x(x)をx₀から∞まで積分することにより求まる。すなわち、

$$p = P(x > x_0) = \int_{x_0}^{\infty} \frac{1}{19.0} e^{-(x-8.0)/19.0} dx = e^{-(x_0-8.0)/19.0} \dots\dots\dots (8)$$

最大加速度x₀をパラメーターとしたときの値pを表-3に示す。表-3からはx₀を50galとすれば1回の地震でその最大加速度xがx₀を越える確率pは0.110とかなり大きい。しかし、150galでは0.00057

表-3 1回の地震において(x>x₀)なる確率p

最大加速度 x ₀ (gal)	p	
	ケース 1	ケース 2
50	0.110	0.0713
75	0.0294	0.0148
100	0.00789	0.00307
125	0.00212	0.000637
150	0.000568	0.000132

と小さくなる。

また、同様の手順で求めたケース 2 に対する $P_x(x)$ は次式で与えられる。

$$\text{ケース 2, } P_x(x) = \frac{1}{15.9} e^{-(x-8.0)/15.9} \dots\dots (9)$$

$$x \geq 8.0 \text{ gal}$$

また、ケースの p は式 (9) より、 $x_0=50 \text{ gal}$ で 0.00713, 150 gal で 0.000132 となり、 x_0 が大きくなるとケース 1 と比べ大幅に小さくなる (表-3 参照)。

4. 計算結果

施工期間 T_u を 2 か月, 4 か月, 6 か月および 1 年として、最大加速度 x_0 をパラメーターとして施工中の地震危険度を計算する。

計算では、式 (13) において単位の期間を 2 か月とする。したがって、1 期間に地震の起こる確率 p' はケース 1 では $p'=0.688$, ケース 2 では $p'=0.574$ である。また、地震が 1 回起きたときに、その最大加速度 x が最大加速度 x_0 を越える確率 p は表-3 に示すとおりである。

上記の数値を用い式 (3) より計算した地震危険度を表-4(a), (b) および 図-4 に示す。表-4(a), (b) はそれぞれケース 1, ケース 2 の結果である。図-4 において実線はケース 1, 破線がケース 2 である。表-4 あるいは 図-4 より地震危険度について考察しよう。

(1) 定性的な傾向をみると、施工期間 T_u を一定とすれば、規定される最大加速度 x_0 に対して地震危険度 P_f は指数関数的に減少する。また、施工期間 T_u を短くすれば地震危険度は比例的に減少する。

次に、地震危険度 P_f について具体的な数値をあげて説明しよう。

表-4 施工中の地震危険度 P_f

(a) ケース 1

x_0	T_u	P_f			
		2 か月	4 か月	6 か月	12 か月
50 gal		0.0757	0.146	0.210	0.376
75		0.0202	0.0400	0.0595	0.115
100		0.00543	0.0108	0.0162	0.0321
125		0.00146	0.00292	0.00437	0.00873
150		0.000391	0.000783	0.00117	0.00234

(b) ケース 2

x_0	T_u	P_f			
		2 か月	4 か月	6 か月	12 か月
50 gal		0.0409	0.0803	0.118	0.222
75		0.00850	0.0169	0.0252	0.0499
100		0.00176	0.00352	0.00527	0.0105
125		0.000366	0.000729	0.00109	0.00219
150		0.0000758	0.000151	0.000227	0.000454

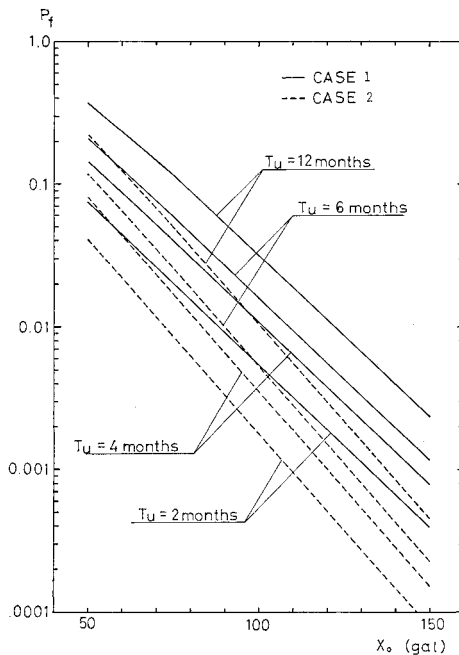


図-4 施工中の地震危険度 (東京)

ケース 1 についてみると、

(2) 施工期間 T_u を 1 年、規定される最大加速度 x_0 を 50 gal とすれば、地震危険度 P_f は 0.376 となっている。これは施工期間 1 年のうちに地震があり、その最大加速度 x が $x_0=50 \text{ gal}$ を越す確率すなわち危険度が 0.376 であり、同じ施工を $1/0.376 \approx 2.7$ 回繰り返せば 1 回程度経験するであろうことを意味する。

(3) また、施工期間 T_u を 1 年、 x_0 を 150 gal とすればその確率 $P_f=1-P_s$ は 0.0023 となり、確率 $P_s=0.998$ で安全、すなわち、同じ施工を 435 回程度繰り返して 1 回経験するかしなないか程度の安全性を有していることがわかる。

(4) なお、施工法によっては、 x_0 を十分大きくとれないことがあるかもしれない。この場合、施工期間を短くおさえることができれば、同じ地震危険度にする事ができる。たとえば、施工期間 T_u を 1 年、 x_0 を 150 gal として、地震危険度を 0.0023 とすれば、施工がもっとも危険な期間を 6 か月, 4 か月あるいは 2 か月におさえることができれば、安全性チェックに使用する最大加速度 x_0 は 138 gal, 128 gal あるいは 116 gal とすることができる。

次に、ケース 2 についてみると、

(5) 施工期 T_u を 1 年、 x_0 を 50 gal とすれば地震危険度 P_f は 0.222 であり、 x_0 を 150 gal とすれば、0.000454 となる。これらの値はケース 1 と比べると、 x_0 が 50 gal では 4 割程度しか小さくならないが、 x_0

か 150 gal では 5 分の 1 以下になる。

ケース 1 とケース 2 を比較すると、

(6) x_0 を 50 gal としたときは、ケース 2 はケース 1 より 4 割方小さくなるが、 x_0 が大きくなると、差はひらき 150 gal では 1/5 程度にまでなる。

(7) ケース 1 とケース 2 において地震危険度を同じにとれば、ケース 1 で $x_0=150$ gal, 125 gal のものはケース 2 にはそれぞれ $x_0=125$ gal, 100 gal 程度に低減できる。

5. 地震危険度への地震の続発性の影響^{16)~18)}

いま、ケース 2 から地震危険度を算定し、地震危険度 P_f を 1% すなわち 0.01, 施工期間 T_u を 1 年とすれば、施工中の構造物の安全性チェックには $x_0=120$ gal 程度を考えればよいことになる。 $x_0=120$ gal は表-2 に示すように震度階では震度 V に相当する。また、震度 V は 80 gal~250 gal の広い範囲をカバーしており、施工中に想定される地震の最大加速度はまずこの範囲で決定されよう。また、関東地震級の地震すなわち震度 VI の地震の余震としても震度 V 程度が問題となる。

上記の考察から、震度 V 以上の地震の生起データより地震の続発性を仮定した場合の地震危険度を算定する。

なお、本章では隣り合う地震間隔 τ を対数正規分布と仮定し危険度を算定する。このモデルは前出のポアソンモデルすなわち τ が指数分布に従うという仮定とはあいれない。しかし、強震の続発性はみとめられるところであり¹⁹⁾、ここではポアソンモデルと比較するためにあえて取り上げる。ここで、宇佐見は小河原の方法により地震の続発性を考慮した東京が震度 V 以上の地震に襲われる確率を求めている¹⁹⁾。

この研究を参考として、1592 年から 1931 年の震度 V 以上の地震から隣り合う 2 つの地震間隔 τ の確率密度関数を推定する。確率密度関数として対数正規分布を仮定すれば以下のように推定される。

$$f_{\tau}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\tau\sigma} e^{-\frac{(\log\tau - \mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(10)$$

$\mu = 0.587$
 $\sigma = 0.567$

時間間隔 τ の対数正規分布による近似は参考文献 16) において精度が確認されている。参考文献 16) では同時に結果が仮定した分布形によりかなり左右されることも指摘している。

この確率密度関数より、最後の地震後すでに τ_0 年たち、この間地震が起こらなかったという条件のもとにこれから先 τ' 年以内に地震の起こる確率、すなわち、続発性を考慮した地震危険度 $G(\tau_0, \tau')$ は、

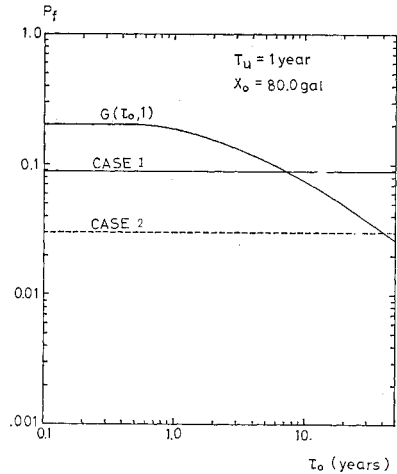


図-5 続発性を考慮した地震危険度 $G(\tau_0, 1)$ (東京)

$$G(\tau_0, \tau') = \frac{\int_{\tau_0}^{\tau_0+\tau'} f(\tau) d\tau}{\int_{\tau_0}^{\infty} f(\tau) d\tau} = \frac{F(\tau_0+\tau') - F(\tau_0)}{1 - F(\tau_0)} \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 $F(\tau)$ は $f(\tau)$ の確率分布関数である。
いま、式 (10), (11) より、施工期間 T_u を 1 年すなわち、 $\tau'=1.0$ として、 $G(\tau_0, 1.0)$ を求めてみよう。

結果を図-5 に示す。続発性を考慮した地震危険度には震度の違いは考慮されていないことから、震度 V 以上すなわち、 $x_0=80$ gal の地震危険度を示すことになる。図-5 には $x_0=80$ gal, 施工期間 $T_u=1$ 年のケース 1, ケース 2 の地震危険度を示す。これらの値は過去に震度 V 以上の地震がいつあったかということにはまったく無関係であることから τ_0 による経年変化はない。

図-5 からは以下のことが考察できる。

(1) 震度 V 以上の地震があってから、7 年以内の地震危険度はケース 1 の地震危険度より大きく、1 年以内では 2 倍程度とかなりの差がある。

(2) $G(\tau_0, 1)$ すなわち、続発性を考慮した地震危険度は、最後の地震後の経年数 τ_0 に対して指数関数的に減少し、 $\tau_0 > 40$ 年後にしてケース 2 の地震危険度より小さくなる。

上記の考察よりケース 1 あるいはケース 2 の値を用いて安全性のチェックを行う場合にも強震後 1 年以内では危険側となりうる可能性が高いことがわかる。また、地震の生起過程を近似するモデルにより結果がかなり違うことから、ある程度安全側の値をとる必要があると言える。

6. ま と め

本研究は施工中の構造物の安全性を検討する基礎的資

料として、施工期間 $T_u=2$ か月～1 年間の地震危険度を算定し、検討を加えたものである。

本研究のみから、施工中に想定すべき最大加速度をどの程度にすればよいのかはわからない。実際に数値を決定するには現場に働いている人達の安全、経済性などさらに多くのことが考慮され、社会的合意が得られねばならない。また、これは保険料率とも関連するかも知れない。

本研究はそのための基礎的な資料となるものである。

以下に本研究をまとめておこう。

(1) 地震危険度は式 (1) により定義され、定式化には従来の静的信頼性解析法を用いて、具体的には式 (3) で与えられる。式 (3) は 1 期間 ΔT_u (本研究では 2 か月) に地震の起こる確率 p' 、1 回地震が起きたときにその最大加速度 x が規定される最大加速度 x_0 を超過する確率 p および施工期間 $T_u=N_T \times \Delta T_u$ により決定できる。

(2) 本研究では、建設地点を東京とし、過去 72 年間の震度階別地震の発生回数より、上記 p' および p を推定した。結果は図-4 に示される。図-4 は、施工期間 T_u 、規定される最大加速度 x_0 をパラメーターとして、その地震危険度 P_f を示している。また、ケース 1 は過去 72 年間の震度階別地震の発生回数の全データを用いたもの、ケース 2 は関東地震のあった 1923 年、24 年のデータを除いたものである。ケース 2 は、関東地震級の大地震が起これば既存建物の多くが破壊することから、より不安定な施工中の構造物が破壊してもやむをえないという考えによる。

(3) 図-4 からは、地震危険度が施工期間 T_u に比例して大きくなること、また、 x_0 を大きくすると指数関数的に減少することがわかる。

(4) また、ケース 1 とケース 2 を比較すると、 x_0 が 50 gal 程度ではケース 2 が 2, 3 割小さい程度であるが、 $x_0=150$ gal では、半分以下となり差がはっきりとする。ケース 1 で $x_0=125$ gal, 150 gal の地震危険度はケース 2 の $x_0=100$ gal, 125 gal の地震危険度にほぼ等しい。ケース 2 の考えに従えば、施工中の構造物の耐震安全性のチェックには、 $x_0=100$ gal～150 gal の範囲ではケース 1 の 2 割 5 分程度低減した最大加速度を用ればよいことになる。

(5) なお、地震危険度の具体的な数値としては、東京では、ケース 2 の考え方によると施工期間 $T_u=1$ 年、最大加速度 x_0 を 120 gal として、地震危険度が約 0.01 となる。また、この最大加速度は東京で将来 75 年間に期待される最大加速度の 2 分の 1 弱である⁶⁾。

(6) 震度 V 以上のデータから地震の続発性を仮定して地震危険度を算定した。施工期間 T_u を 1 年、 x_0 を

震度 V 以上、すなわち 80 gal とすると、地震の続発性を考慮した地震危険度は、最後に震度 V 以上の地震が起きてからの経過年数が 7 年以内ではケース 1 よりも大きく、1 年以内では 2 倍とかなり差がある。このことから、強震後 1 年以内では地震危険度の算定に強震の続発性を考慮する必要がある。また、地震の生起過程のモデルにより結果がかなりのばらつきを有することも留意する必要がある。

参考文献

- 1) Kawasumi, H. : Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity through Japan as Inferred from the Seismic Activity in Historical Times., Bull. Earthq. Res. Inst., 21 pp. 469～481, 1951.
- 2) 河角 広：わが国における地震危険度の分布，建築雑誌，No. 773, pp. 3～8, 1951.
- 3) 金井 清・鈴木富三郎：Expectancy of Maximum Velocity Amplitude of Earthquake Motions at Bedrock., Bull. Earthq. Res. Inst., 46, pp. 663～666, 1968.
- 4) 金井 清・吉沢静代：日本における建物に震害をうけた度数の分布，Bull. Earthq. Res. Inst., 28, pp. 167～173, 1950.
- 5) 村松郁榮：Expectation of Maximum Velocity of Earthquake Motion within 50 years through Japan.
- 6) 後藤尚男・亀田弘行：地震時における最大地動の確率論的研究，土木学会論文報告集，159, pp. 1～12, 1968.
- 7) Goto, H. and Kameda, H. : Statistical Inference of the Future Earthquake Ground Motion, WCEE IV. A 1, pp. 39～54, 1969.
- 8) 高橋浩一郎：地震の危険度，災害科学研究会気象部会，1974.
- 9) 表俊一郎・松村和雄：新しい資料により求められる日本の加速度期待値。総プロ「新耐震設計法の開発」報告書，49-1-2(2)，1975.
- 10) Hattori, S. and Kitagawa, Y. : On the Regional Distribution of the Earthquake Danger in Japan, Bull. Int. Inst. Seis. Earthq. Eng. Vol. 12, pp. 83～102, 1974.
- 11) 日本建築学会編：地震荷重と建築構造の耐震性，第 2 章，日本建築学会，1977.
- 12) 栗林栄一・岩崎敏夫：施工時の地震荷重の決め方についての一提案，橋梁と基礎，pp. 1～4, 1973.5.
- 13) 星谷 勝・石井 清：非定常周波数特性を有する最悪人工地震波，土木学会論文報告集，第 245 号，1975.
- 14) 石井 清：地震外力に対する構造物応答の非超過確率，土木学会論文報告集，第 267 号，1977.
- 15) 気象庁観測部地震課：東京有感地震資料，1885 年～1970 年，1971.
- 16) 宇佐見龍夫・久本壮一：東京が震度 V 以上の地震に襲われる確率，Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 48, pp. 331～340, 1970.
- 17) 小河原正己：東京における次の有感地震の確率，験震時報，Vol. 20, pp. 81～92, 1955.
- 18) 岡田正実：東京における続発性と周期性，地震，第 2 輯，第 30 巻，第 2 号，pp. 187～200, 1977.
- 19) 土木学会編：構造物の安全性・信頼性，5.2.3. 地震発生 の定常性と過去の資料の信頼性，pp. 105～107, 1976.
- 20) 河角 広編：地震災害，オーム社，p. 10, 1973.
- 21) 岡本舜三：耐震工学，6.2.1. 地震動の振幅，オーム社，pp. 126～128, 1970.