

1. はじめに

免震構造は過去の地震被害から見て、地震に対して有効な構造形式と考えられる。しかし、免震構造の歴史は30余年とまだ浅く、免震構造に関するデータも十分であるとは言いがたい。実際に想定以上の地震力を受けた場合、その構造的安全性を正確に予測し難いと考えられる。

構造物が地震力を受ける場合、構造物に作用する荷重は、発生場所、継続時間、大きさなどが不規則であり、構造物の部材の性能は材料の製造精度、施工精度、温度依存などの変動をうける。また、モデル化の設定条件により解析上と現実の構造物の挙動には誤差が生じる。そのため、構造物の安全性を判定するにはこれらの不確定要因の影響をどう扱うかの検討が必要である。信頼性解析ではこれらの不確定要因を確率変数として扱い、定量的に評価することができる。

そこで、本研究では免震構造の地震に対する信頼性解析を行い、免震構造の有用性を検討することを目的とする。

2. 対象建物について

2.1 耐震構造と免震構造

耐震構造と免震構造の実構造物の地震に対する信頼性解析を行い、両構造物の破壊確率を比較することにより、免震構造の信頼性を定量的に評価する。本研究では、鉄筋コンクリート造7階建ての構造物を耐震構造とし、耐震構造に免震層を付加した構造物を免震構造とする。免震装置の性能が及ぼす構造物全体への影響を明確にし、両構造物の破壊確率を比較し易くするために、耐震構造と免震構造の上部構造を同一の構造物とした。

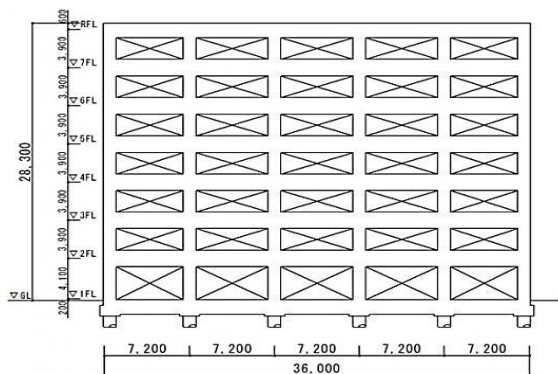


図1 耐震構造の軸組図

2.2 耐震構造について

耐震構造は7層の鉄筋コンクリート構造であり、桁行方向は7.2m・5スパン、梁間方向は9mの長方形形状の腰壁付きラーメン構造である。建物高さは27.7m、1次固有周期は0.55秒である。図1に耐震構造の軸組図を示す。対象建物は梁芯・柱芯の位置で線材にモデル化し、平面骨組モデルで解析する。復元力特性は柱及び梁をBi-Linearとした。

2.3 弾塑性解析

耐震構造に静的な非線形変位増分解析を行い、最終崩壊形及び保有水平耐力を算出した。外力分布はAiに対応した分布を用いた。弾塑性解析による層せん断力と層間変位の関係を図2に示す。また、弾塑性解析により形成された塑性ヒンジを図3に示す。これによると、3階の柱のほとんどに塑性ヒンジが形成され、構造物は不安定な状態になると考えられる。この後も力を加え続けると、間もなく2階の層間変形角が1/100を超えたため、2階の層間変形角が1/100を超えた時点を耐震構造の最終崩壊形とした。保有水平耐力は9521KN、層せん断力係数は0.765となり、耐震構造は十分な耐力を有していると考えられる。

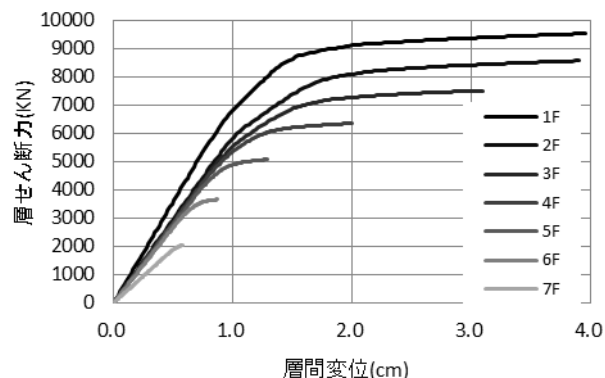


図2 弾塑性解析による層せん断力と層間変位

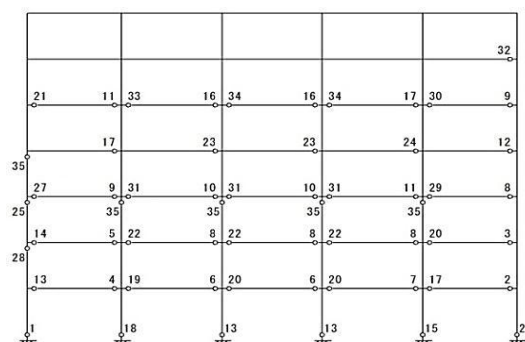


図3 塑性ヒンジ発生箇所

2.4 免震層について

免震層は告示¹⁾の計算法により、極稀な地震力を受ける際、免震層は破壊しない、上部構造は損傷を生じないという目標を満たすように設計した。表1に設計目標値を示す。免震部材は免震部材標準品リスト²⁾より性能が明らかにされている適切な部材を選択した。アイソレータに天然ゴム系積層ゴムと弾性すべり支承、ダンパーに履歴減衰型鋼棒ダンパーを用いた。図4に免震部材の配置図を示す。また、2次形状係数 S_2 が小さい積層ゴムではせん断歪の超過による破断が生じる前に座屈による破壊が生じてしまう⁴⁾。そこでせん断歪の超過による破断のみを検討するため積層ゴムの2次形状係数 S_2 を5以上とした。免震部材の性能を表2に示す。免震構造の質量は3140.41t(重量は30.78MN)、1次固有周期は3.44秒となった。

復元力特性はダンパー、すべり支承をBi-Linear、積層ゴムの弾性とした。図5に免震部材と免震層全体の復元力特性を示す。積層ゴムはせん断歪が250%程度を超えるとひずみ硬化により剛性が高くなるとされている⁴⁾。しかし、本研究では、計算の単純化のため積層ゴムの復元力特性を弾性とした。ひずみ硬化による剛性の増加により、免震層の最大応答変位が抑制されることが予想されるため、積層ゴムの復元力特性は今後、検討が必要であると考えられる。

3. 入力地震波

構造物に作用する地震波の特性の違いにより構造物の応答は異なるため、入力地震波の選択は重要である。一般には対象地の地盤特性や過去の地震活動の履歴などにより、ふさわしい地震波を選択するが、本研究では、できる限り異なった特性、かつ比較的規模の大きい地震波を選択した。

入力地震波には観測地震波15波と模擬地震波61波の計76波を用いた。観測地震波には近年で規模の大きかった地震及び解析上有用であるとされている地震波を用いた。解析に用いた観測地震波の概要を表3に示す。模擬地震波はM7、8規模の地震を近・中・遠距離ごとに大崎スペクトルに適合するように時刻歴加速度を作成した。さらに、作成した時刻歴加速度を表層地盤の影響を考慮し、増幅させたものを解析に用いた。表4に模擬地震波の概要を示す。

時刻歴応答解析を行う場合、構造物にできる限り一定の応答値が生じるように地震波のレベルを調整する。終局状態における破壊確率を検討するため、10秒振り子を用いた速度評価法により、最大応答速度が50kineとなるよう加速度を調整した。

表1 免震構造の設計目標値

上部構造	応力	極稀地震動
	層間変形角	短期許容応力度以内
免震層	層間変位	1/300以内
	面圧(圧縮)	設計限界変位以内
	面圧(引張)	短期許容面圧以内
		引張りが生じない

表2 免震部材リスト

部材名	昭和電線電纜式天然ゴム系積層ゴムアイソレータ	昭和電線式弾性すべり支承	住友金属鉱山製免震U型ダンパー
		R30-700-5.3×26	SC80-700S-5×4*※
直径D	700mm	700mm	□45×8
中心穴径d	35mm	20mm	
ゴム剛性G	0.29N/mm ²	0.78N/mm ²	
ゴム1層厚t	5.3mm	5.0mm	
ゴム層数n	26	4	
ゴム総厚Tr	137.8mm	20mm	
1次形状係数 S_1	31.4	35	
2次形状係数 S_2	5.1	35	
摩擦係数 μ	-	0.011	
水平1次剛性 K_1	0.82KN/mm	15KN/mm	15.2KN/mm
水平2次剛性 K_2	0.82KN/mm	0	0.256KN/mm
降伏荷重 Q_y	-	35.55KN	368KN
圧縮限界強度 σ_{cr}	48N/mm ²	57N/mm ²	-
限界変形 δ_m	551.2mm(400%)	100~800mm	650mm

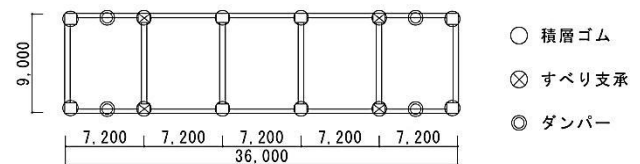


図4 免震部材の配置図

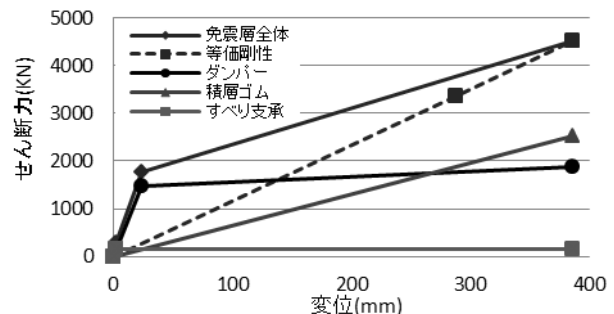


図5 免震層の復元力特性

表3 観測地震波の概要

番号	観測地点	地震名	発生年度	Mj(Mw)	方向	Δt (秒)	地震波数	最大加速度(cm/s ²)
1	ELCENTRO	Imperial Valley地震	1940年	(6.9)	NS	0.01	2960	545.57
2	八戸	十勝沖地震	1968年	7.9	NS	0.01	23400	541.38
EW					0.01	23400	381.00	
4	仙台	宮城県沖地震	1978年	7.4	NS	0.02	2000	473.43
5	神戸	兵庫県南部地震	1995年	7.3	NS	0.02	4000	723.49
6	新見	鳥取県西部地震	2000年	7.3	EW	0.01	30000	2718.55
7	西条	芸予地震	2001年	6.7	EW	0.01	30000	2777.00
8	幕別	十勝沖地震	2003年	8.0	EW	0.01	12000	1551.96
9	川口	新潟県中越地震	2004年	6.8	EW	0.01	18000	954.03
10	志賀	能登半島地震	2007年	6.9	EW	0.01	12000	735.74
11	出雲崎	新潟県中越沖地震	2007年	6.8	NS	0.01	12000	1170.88
12	栗原	岩手・宮城内陸地震	2008年	7.2	EW	0.01	12000	975.73
13	石巻				EW	0.01	36000	2079.69
14	いわき	東北地方太平洋沖地震	2011年	(9.0)	EW	0.01	36000	1152.33
15	千葉							292.71

表4 模擬地震波の概要

番号	マグニチュード	震央距離 R(km)	地震波数	減衰定数	刻み時間 DT(秒)
1~10	7	10	2048	0.05	0.012
11~20		45			
21~30		120			
31~40	8	25	2048	0.05	0.025
41~50		120			
51~60		350			
61	BCJ-L2	-	12000	-	0.01

4. 免震構造の破壊

想定を上回る過大な地震力を受けた時、免震構造の終局状態としては、アイソレータの破断、ダンパーの破断、上部構造の塑性化、擁壁への衝突などが考えられる。本研究では、免震層の破壊または上部構造の破壊のどちらかにより免震構造が終局状態になると仮定した。

免震層では支持能力が失われると、構造物を維持できないため、特に積層ゴムが重要であると考えられる。そこで、免震層の破壊は積層ゴムの破壊によって生じると仮定した。表5に積層ゴムの損傷モードを示す。積層ゴムでは、過大せん断変形によるゴム層の破断が免震構造へ与える影響度が最も高く、重要な損傷モードと考えられる。そこで、免震層は過大せん断変形による積層ゴムの破断を終局状態として検討する。

免震構造の破壊 F は上部構造の破壊 F_A と免震層の破壊 F_B の和事象で表すことができる。

$$F = F_A \cup F_B \quad (1)$$

よって、免震構造の破壊確率 P_f は次式で与えられる。

$$P_f = P(F_A \cup F_B) \quad (2)$$

表5 積層ゴムの損傷モード

要因	損傷モード	影響度	免震構造への影響
過大変形	ゴム層の破断	◎	支持能力喪失
	接着層の破断	△	
	座屈	×	
過大圧縮荷重	ゴム層の破断	○	建屋の応答せん断力増加
	水平剛性の急低下	×	
過大引張荷重	ゴム層の破断	○	床応答スペクトルの増加
低温、経年劣化	ゴム層の破断	○	
	接着層の破断	△	
経年劣化	被覆ゴム層の破断	△	

◎ ○ △ × (大→小)

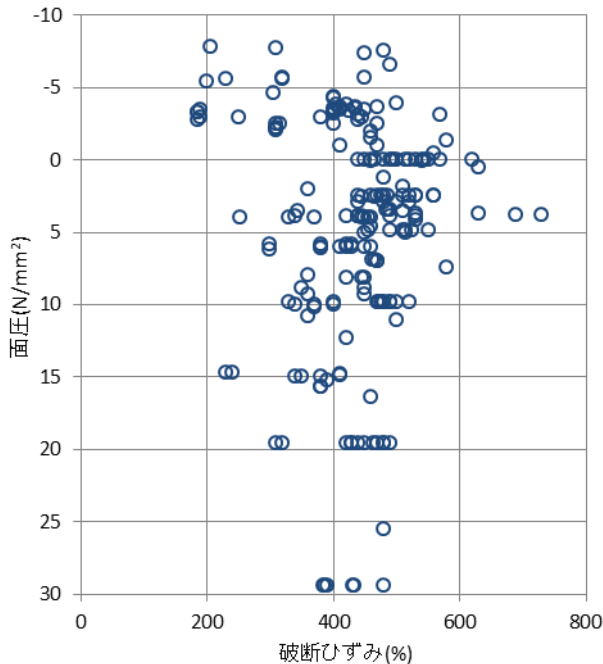


図6 圧縮せん断破断試験の破断歪と面圧

5. 免震層の信頼性解析

5.1 免震層の破壊

免震層の応答変位が積層ゴムの限界変位を超えた時、積層ゴムは破断し、構造物は不安定な状態になると考えられる。そこで、免震層の応答変位が積層ゴムの限界変位を超えた時を免震層の終局状態とすると、免震層の破壊確率 P_{fB} は次式で与えられる。

$$P_{fB} = P(Z \leq 0) \quad (3)$$

Z は性能関数であり、限界変位 R 及び応答変位 S が対数正規分布に従うとすると、性能関数 Z は次式で与えられる。

$$Z = \ln R - \ln S \quad (4)$$

R は限界変位、 S は応答変位であり、 Z が0を下回る場合、免震層は破壊すると考えられ、破壊確率 P_{fB} は次式で与えられる。

$$P_{fB} = 1 - \Phi(\beta) \quad (5)$$

Φ は標準正規確率分布関数、 β は信頼性指標であり、信頼性指標 β は次式で与えられる。

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{(\zeta_R)^2 + (\zeta_S)^2}} \quad (6)$$

λ_R, λ_S は $\ln R, \ln S$ の平均値、 ζ_R, ζ_S は $\ln R, \ln S$ の標準偏差である。

5.2 積層ゴムの破壊

積層ゴムは一般的にせん断歪400%に至ると破断するとされている³⁾。しかし、積層ゴムの限界変形能力についてはデータも少なく、不明確な点もある⁴⁾。そこで、天然ゴム系積層ゴムの圧縮せん断破断試験のデータを収集し^{4)~14)}、積層ゴムの破断変位を推定した。その破断歪と面圧の関係を図6示す。圧縮せん断破断試験は全部で202のデータを収集したが、免震構造では積層ゴムに引張が生じないように設計されるため、本研究では面圧が圧縮または0となる150のデータについて検討する。

免震構造の信頼性解析を行うため、積層ゴムの破断歪を確率分布により表す。積層ゴムの圧縮せん断試験による破断歪を図7のヒストグラムに示す。これらのデータを確率紙にプロットし、適当な分布形を決定した。積層ゴムの圧縮せん断試験による破断歪をプロットした対数正規確率紙を図8に示す。対数正規確率紙上の破断歪のデータは尻尾と頭の部分にばらつきがあるが、直線上に分布しており、対数正規分布は適当な分布であると考えられる。これらのデータを対数正規分布に従うとし、確率密度関数に表したものを図7の曲線に示す。分布の平均値は453.04%、標準偏差は78.15%、変動係数は0.173となった。

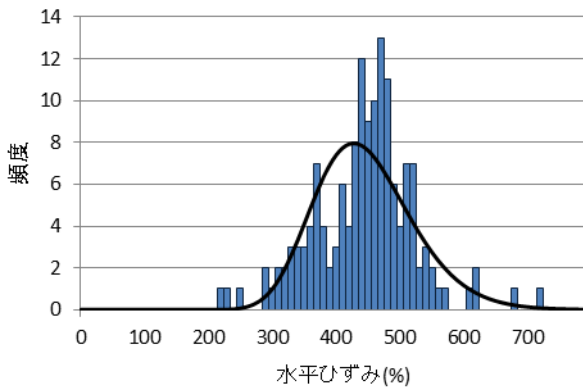


図7 破断歪のヒストグラムと確率密度関数

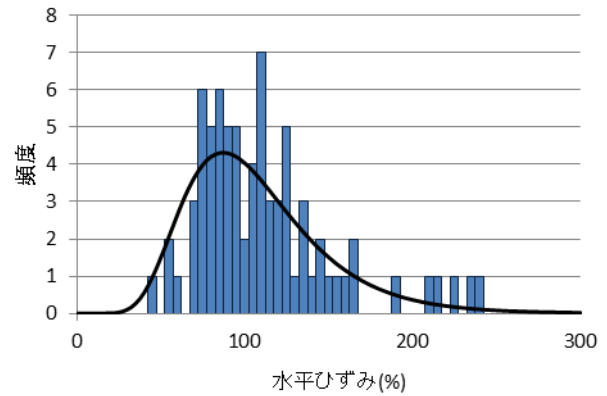


図9 応答変位のヒストグラムと確率密度関数

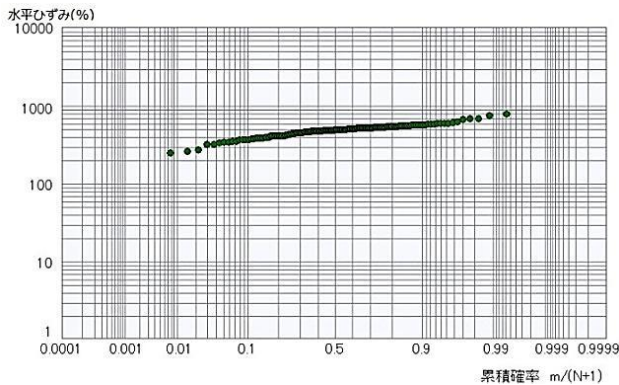


図8 対数正規確率紙上の破断歪

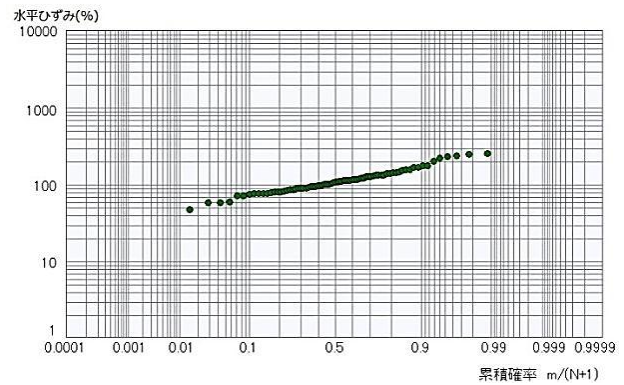


図10 対数正規確率紙上の応答変位

積層ゴムの破断は一般的に400%で生じるとされている。この情報を考慮するため、ベイズ推定法により、破断の確率分布を400%で破断することを主観確率として、実験データの情報を加味した確率分布へと更新した。更新後の平均値は451.47%、標準偏差は77.88%、変動係数は0.173となった。積層ゴムの圧縮せん断試験のデータ数が十分であったため、ベイズによる効果は少なく、確率分布には僅かな変化が見られる程度となった。

5.3 免震部材の性能のばらつき

免震部材は製品の製造精度の誤差や温度依存などにより、その性能にばらつきが生じる。性能がばらつくと、当然免震層の応答変位も異なるため、ばらつきを定量的に評価し解析する必要がある。免震部材リストから製品の性能の代表的なばらつきを表6に示す。本研究では製品の製造精度のばらつきのみを考慮した。積層ゴムの剛性は目標値となる0.82N/mm²となる確率が最も高く、遠くなるほどその確率は低くなると考えられる。つまり製品の性能は目標値に収束すると推測し、正規分布に従う乱数を用いてばらつきを評価した。時刻歴応答解析において積層ゴムの剛性のばらつきを15%、ダンパーの剛性、降伏耐力のばらつきを10%とし、信頼度90%としてばらつきを評価した。

表6 製品の性能のばらつき

部材名	昭和電線電機式天然ゴム系 積層ゴムアイソレータ		昭和電線式 弾性すべり支承	住友金属鉱山製 免震U型ダンパー	
	R30-700-5.3×26	SC80-700S-5×4*	SSUD45×8		
製造ばらつき	K1のばらつき	±15%以内	±20%	±10%	
	K2のばらつき	-	-	±0	
	Qyのばらつき	-	-	±10%	
	摩擦係数のばらつき	-	±20%	-	
水平剛性の変化率	経年劣化率 60年相当	+10%以下	+20%以下	±0	
		-10°C	+10%以下	+20%以下	±0
	温度依存性 (20°C基準)	0°C	+5%以下	+15%以下	-
		30°C	-5%以下	-5%以下	-
		40°C	-5%以下	-5%以下	±0
クリープひずみの変化率	20°C×60年	5%以下	+5%以下	-	

5.4 免震層の応答

免震部材の性能にばらつきがある構造物に地震波76波を入力し、時刻歴応答解析を行った。時刻歴応答解析による免震層の最大応答変位を図9のヒストグラムに示す。これらのデータを確率紙にプロットし、適当な分布形を決定した。時刻歴応答解析による免震層の応答変位をプロットした対数正規確率紙を図10に示す。対数正規確率紙上の応答変位のデータは、直線上に分布しているため、対数正規分布は適当な分布であると考えられる。これらのデータを対数正規分布に従うとし、確率密度関数に表したものを図9の曲線に示す。分布の平均値は109.59%、標準偏差は41.45%、変動係数は0.378となった。

積層ゴムのひずみ硬化による影響は250%程度を超えると現れ始めると考えられている。分布によると、免震層の応答は大きくて250%程度とされるため、ひずみ硬化による影響は少ないと考えられる。

5.5 免震層の破壊確率

積層ゴムの破断データから算出した積層ゴムの限界変位と、時刻歴応答解析から算出した免震層の最大応答変位の確率密度関数を図 11 に示す。2つの分布が重なりあう箇所では免震層の応答変位が積層ゴムの限界変位を超え、積層ゴムの破断が生じると考えられる。積層ゴムの破断は 400%とされているが、それよりも低い 250%付近から破断が生じる可能性があると考えられる。免震層の信頼性指標は 3.64、破壊確率は 1.37×10^{-4} となった。

6. 耐震構造の信頼性解析

6.1 耐震構造の破壊

構造物に作用する荷重が構造物の耐力を超えた時、耐震構造の破壊は生じると考えられる。耐震構造の破壊確率 P_f は次式のように与えられる。

$$P_f = P(Z \leq 0) \quad (7)$$

Z は性能関数であり、構造物は曲げにより破壊が生じると仮定し、曲げ耐力 M_u 及び荷重 P が正規分布に従うとすると、性能関数 Z は次式で求められる。

$$Z = \Sigma M_u - \Sigma Ph \quad (8)$$

ここで、 M_u は部材の曲げ耐力、 P は構造物に作用する荷重、 h は各層の高さであり、 Z が 0 を下回る場合、耐震構造は破壊すると考えられ、破壊確率 P_f は次式で与えられる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (9)$$

Φ は標準正規確率分布関数、 β は信頼性指標である。部材耐力間及び部材耐力 M_u と荷重 P をそれぞれ独立とすると、信頼性指標 β は次式で与えられる。

$$\beta = \frac{\Sigma \mu_{M_u} - \Sigma \mu_P h}{\sqrt{\Sigma (\sigma_{M_u})^2 + \Sigma (\sigma_P h)^2}} \quad (10)$$

μ_{M_u}, μ_P は M_u, P の平均値、 σ_{M_u}, σ_P は M_u, P の標準偏差である。

6.2 耐力と荷重のばらつき

構造物の部材の耐力及び構造物に作用する荷重は、その大きさにばらつきがあり、ばらつきによって破壊確率も変化するため、ばらつきを考慮し解析を行う必要がある。耐震構造の曲げ耐力の変動係数は 0.1 とした。耐震構造に作用する荷重の変動係数はその数値を一概に決定することができない。そこで、0.4 から 0.8 まで 0.1 刻みの 5 通り検討した¹⁵⁾。また、想定される荷重の大きさは構造特性係数 D_s によっても変化する。対象構造物は腰壁を有する RC のラーメン構造であり、 D_s は 0.35~0.45 程度と考えられる。ここでは D_s を 0.35 から 0.45 まで 0.05 刻みで 3 通り検討した。

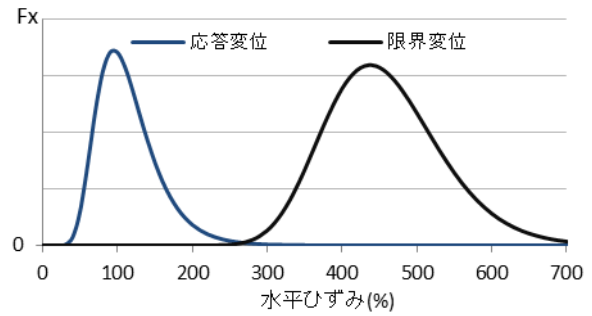


図 11 応答変位と限界変位の確率密度関数

表 7 耐震構造の信頼性指標

変動係数 δ	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
構造特性係数 D_s	信頼性指標 β				
0.35	2.81	2.25	1.88	1.61	1.41
0.40	1.83	1.47	1.22	1.05	0.92
0.45	1.07	0.86	0.71	0.61	0.54

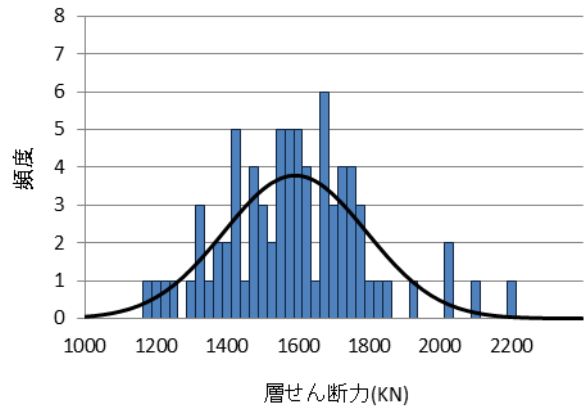


図 12 層せん断力のヒストグラムと確率密度関数

6.3 耐震構造の破壊確率

耐震構造の保有水平耐力と構造物に作用する荷重から破壊確率を算出した。表 7 に耐震構造の信頼性指標を示す。これらの D_s と荷重の変動係数がとり得る値の中で、耐震構造の信頼性が最も高くなるのは、 D_s を 0.35、変動係数を 0.4 とした時で、信頼性指標は 2.81、破壊確率は 2.51×10^{-3} となった。

7. 免震構造の信頼性解析

7.1 上部構造の応答

地震波 76 波の時刻歴応答解析により上部構造の 1 階に入力した最大層せん断力を図 12 のヒストグラムに示す。これらのデータを確率紙にプロットし、適当な分布形を決定した。時刻歴応答解析による上部構造の 1 階の層せん断力をプロットした正規確率紙を図 13 に示す。正規確率紙上の層せん断力のデータは、直線上に分布しており、正規分布は適当な分布であると考えられる。これらのデータを正規分布に従うとし、確率密度関数に表したものを図 12 の曲線に示す。分布の平均値は 1579KN、標準偏差は 200.15KN となった。

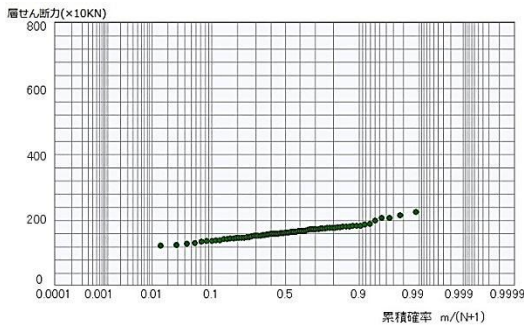


図 13 正規確率紙上の層せん断力

表 8 上部構造の信頼性指標と破壊確率

変動係数 δ	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
信頼性指標 β	20.09	16.48	13.93	12.04	10.60

7.2 上部構造の破壊確率

上部構造に作用する荷重が構造物の耐力を超えた時、上部構造の破壊 F_A は生じると考えられ、上部構造の破壊確率 P_{fA} は耐震構造と同様の方法により算出する。

免震構造の時刻歴応答解析より上部構造の1階の層せん断力が得られた。そこで、上部構造に作用する荷重を求めるため、免震構造の層せん断力係数を用いて、1階の層せん断力が76波の時刻歴応答解析の層せん断力の平均値となる時の各層の荷重を算出した。また、上部構造は耐震構造と同一の構造物であるため、上部構造の耐力は耐震構造の耐力と同一にした。上部構造の各層に作用する荷重と上部構造の曲げ耐力から上部構造の信頼性指標と破壊確率を算出した。表8に上部構造の信頼性指標を示す。上部構造には免震層の効果により応力があまり作用しないため、破壊確率は極端に低く、ほぼ0となった。

7.3 免震構造の破壊確率

免震構造の破壊確率は免震層の破壊と上部構造の破壊の和事象の破壊確率で表される。免震構造の信頼性指標は3.64、破壊確率は 1.37×10^{-4} となった。免震構造の破壊確率は上部構造の破壊確率が極端に低いため、免震層の破壊確率とほぼ同じ値となった。

8. 考察

積層ゴムの破断による免震構造の破壊について信頼性解析を行った。免震構造の信頼性指標は3.64、破壊確率は 1.37×10^{-4} と十分小さく、極稀に起きるM7、8規模の巨大地震に対しても、免震構造は十分な安全性を有していると考えられる。また、Dsを0.35、荷重の変動係数を0.4とした耐震構造の信頼性指標は2.81、破壊確率は 2.51×10^{-3} であり、それと比較しても、破壊確率は約1/18倍となり、十分な安全性を高めているといえる。耐震構造と上部構造は同一の構造物であるが、上部構造の破壊確率はほぼ0であり、免震層を付加す

ることで、その破壊確率は格段に低下した。

免震構造の破壊を上部構造の破壊と免震層の破壊の和事象で表したが、上部構造の破壊の危険性は低いため、免震構造の破壊は免震層が主な破壊といえる。免震層に十分な安全性が確保されれば、免震構造は大方安全であるとも言え、免震層の性能が非常に重要になることがわかった。免震構造の安全性レベルは免震層でコントロールすることができると思われる。

一方、製造精度のばらつきを考慮し、積層ゴムの破断歪を確率分布に表すと、一般的に言われている積層ゴムの破断歪400%に満たない変位でも破断が生じる可能性がある。さらに、製造精度だけでなく、温度依存、経年劣化などからも積層ゴムの性能は変化し、免震層の破壊につながる危険性があると考えられる。免震層の性能が重要であり破壊させてはならないことから、不確定要因の影響を適切に考慮し、その安全性を判断することが望ましいと考えられる。

9. まとめ

本研究では、構造物の性能及び荷重のばらつきを確率で評価することで、不確定要因を定量的に考慮した免震構造の信頼性を算出できたと考えられる。

免震構造は耐震構造と比べて、地震に対して十分高い信頼性を有しており、特に免震層の安全性が確保されれば免震構造は大方安全であると言える。また、免震層が破壊しないよう、不確定要因の影響を考慮し、安全性を十分に確保する設計が必要と考えられる。

『参考文献』

- 建設省告示第2009号『免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件』(2000)
- 日本免震構造協会：『免震部材標準品リスト』(2005)
- 清水建設免振研究会：『耐震・免震・制振のわかる本』(1999)p64,彰国社
- 日本建築学会：『免震構造設計指針』(1993,2001)
- 開発美雪,柳勝幸,等：『中間鋼板厚が異なる積層ゴムアイソレータの圧縮せん断実験(その2)』日本建築学会大会学術講演梗概集(2010年9月)pp.393-394
- 瓜生満,中山一彦,高山峯夫：『高面圧下における積層ゴムアイソレータの実大実験(その5)』日本建築学会大会学術講演梗概集(1996年9月)pp.705-706
- 鈴木政美,瓜生満,等：『高面圧下における積層ゴムアイソレータの実大実験 その2』日本建築学会大会学術講演梗概集(1995年8月)pp.599-600
- 安井健治,矢花修一,等：『積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討(その2)』日本建築学会大会学術講演梗概集 (1996年9月)pp.693-694
- 正木信男,三宅辰哉,等：『積層ゴムによる低層鉄骨免震住宅の開発 その2』日本建築学会大会学術講演梗概集(1998年9月)pp.659-660
- 神保雅一,山本知史,等：『次世代軽水炉の免震技術の開発(その7)』日本建築学会大会学術講演梗概集(2010年9月)pp.1143-1144
- 村松佳孝,井上清孝,等：『建築免震用積層ゴムの限界性能試験結果』日本建築学会技術報告集 No.20(2004年12月)pp.67-70
- 中澤俊幸,吉敷祥一,等：『免震構造物における耐震安全性の確率論的評価に関する基本検討』日本建築学会構造系論文集 No.662(2011)pp.745-754
- 瓜生満,西川孝夫：『免震用積層ゴムの剛性、変形及び限界特性に関する研究』日本建築学会構造系論文集 No.479(1996年1月)pp.119-128
- 藤田隆史,藤田聡,等：『建築免震用積層ゴムに関する実験的研究(第3報)』日本機械学会論文集 No.507(1988年11月)pp.2618-2623
- 日本建築学会：『建築物荷重指針・同解説』(2004)
- 日本建築学会：『鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説』(2010)
- 大崎順彦：『新・地震動のスペクトル解析入門』(1994)鹿島出版会
- 伊藤學,亀田弘行：『土木建築のための確率統計の基礎』(1977)丸善
- 星谷勝,石井清：『構造物の信頼性設計法』(1986)鹿島出版会