

### 1. はじめに

損傷を生じた建物の状態は、構造物に生じた残留変形の大きさによって判定されることが多い。また、被災度判定および修復の可否は、残留層間変形と部材および接合部の損傷程度によっている。鋼構造物の地震被害を減らすためには、建物全体の性能の向上、つまり、建物全体の性能指標としての変形の検討が必要である。さらに、設計において構造計画の検討や、部材および接合部における具体的対策が必要である。

本研究は部材の破壊と構造物の損傷状態の関係、および接合部の破壊と構造物の損傷状態のの違いに着目し、接合部信頼性が構造物に与える影響について検討する事を目的としている。

溶接による柱梁仕口の破壊確率を求めるにあたり、溶接部個々の耐力はわからないことが多いため、本研究ではBayes確率を用いて溶接部耐力を求め、接合部破壊確率の検討を行った。さらに、溶接部の破壊を考慮した解析を行うことにより、構造物の破壊形式および信頼性がどの様に変化するのか検討を行った。

### 2. 鋼構造の地震被害

日本建築学会の阪神淡路大震災調査報告<sup>1)</sup>によると、小破以上の被害があった鋼構造建築物は993棟で、うち小破以上の被害があった純ラーメン構造は436棟、筋違付き構造は169棟であった。文献1の被災度調査報告においては、被害レベルの判定をTable1のように残留変形とともに部材や接合部の損傷状態による基準で判定を行っている。多くの部材や接合部が破壊し、大破および倒壊の判定を受けたものは修復不可能である。

調査対象となった構造物は、その被害状況から構造形式がわからないものも存在する。文献1より、純ラーメン構造に限定し、さらに躯体損傷部位と建物被害レベルの関係により詳しく分類した結果はTable2のようになっている。同一構造物中に複数の損傷部位が存在するものもある。柱および柱梁仕口における損傷が多く、倒壊したもののうち柱に損傷があった割合は33%、柱梁仕口に損傷があったものは31%であった。柱梁仕口に損傷があったものに注目すると、柱梁仕口に損傷のあった116件のうち約7割の86件が大破および倒壊となっており、柱梁仕口の損傷が建物の被災度に与える影響が大きいことがわかる。

さらに柱梁仕口の損傷状態を観察した報告では、梁フランジに塑性変形の痕跡が認められるものの、柱梁仕口の破断面は脆性的破断面がほとんどであった。同様に被害の多かった柱の部材断面における損傷状態は、

Table1 Judgement of Structural Damage<sup>1)</sup>

被害レベル	判定基準
小破	外装材などの亀裂・剥落、丸鋼・平鋼など軽微なブレースの座屈などの損傷は認められるが、柱・梁など、常時荷重を支持する構造躯体に損傷が認められないもの。あるいは残留変形がほとんど認められないもの。
中破	ブレースの破断や座屈、柱や梁などの塑性化は認められるが、残留変形が小さく1/100程度以下で、修復後再使用可能と思えるもの。あるいは小破、大破に属さないもの。
大破	柱・梁・接合部などの多くの部位で破断を伴って修復が技術的に困難なもの。あるいは残留層間変形が1/100程度以上と大きいもの。
倒壊	全層あるいは一部の層が完全に倒壊したものの。

Table2 Damage Level with Respect to the Location of Damage<sup>1)</sup>

純ラーメン構造	小破	中破	大破	倒壊	合計
柱	1	30	90	32	153
梁	1	16	22	9	48
柱梁仕口	1	29	56	30	116
柱脚	13	30	45	25	113
合計	16	105	213	96	430

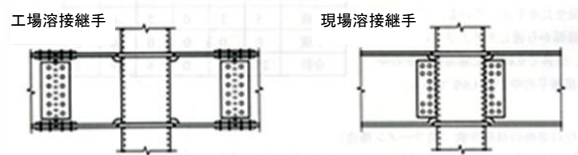


Fig.1 Beam-to-Column Connection Type<sup>1)</sup>

H形断面柱の過度の曲げ変形や、H形断面柱の局部座屈、継手における脆性破断に分類することができる。この結果から、柱の部材断面に損傷があった場合、その損傷は延性的な曲げ変形等であり、仕口および継手における損傷は脆性的であることが多いため、それらの構造物全体の損傷状態に対する影響には違いがあると考えられる。

文献1の被害調査報告よりさらに損傷割合を引用すると、純ラーメン構造の柱梁仕口の全溶接箇所に対する破断・割れの発生は局部的なものを含め7.5%、工場溶接で3.3%、現場溶接で8.5%となっており、梁の下フランジ近傍の被害が最も多かった。梁の下フランジが全幅で破断した比率は、工場溶接で1.5%、現場溶接で2.2%であった。これらの結果から、工場溶接による柱梁仕口と現場溶接による柱梁仕口には性能に違いがあり、比較的施工誤差等の変動が少ない工場溶接の損傷が少ない事がわかる。また、柱梁仕口における損傷は溶接部近傍におけるものが多く、溶接に起因する損傷が多いと考えられる。なお、ここで対象とした仕口の種類はFig.1に示す工場溶接と現場溶接である。

### 3. 溶接による柱梁仕口

今回、純ラーメン構造の被害状況のデータを参考に溶接による柱梁仕口の破壊の検討を行った。接合形式によりその耐力も耐力の検討方法も異なるため、Fig.1の工場溶接により作成された仕口に限定して検討を行うこととし、現場溶接で主に使用されているフランジは溶接、ウェブは高力ボルトによる形式の接合部は除外する。

柱梁仕口は保有耐力接合とする必要がある。

$$Mu \geq \alpha Mp \quad (1)$$

ここにMuは柱梁仕口の曲げ耐力、Mpは梁の全塑性モーメントであり、以下の式により求める。

$$Mp = Zp \cdot F \quad (2)$$

Zpは梁の塑性断面係数、Fは設計用基準強度である。

柱梁仕口は工場において作成される場合は、梁端部溶接による事が多く、原則として梁フランジは突き合わせ溶接、ウェブは両面すみ肉溶接である。

文献1の阪神淡路大震災調査報告において、損傷があった柱梁仕口の溶接種類のデータから、1970年以前の梁端部溶接にはすみ肉溶接が比較的多く用いられていたという報告があった。溶接部に損傷が見られたものでは、すみ肉溶接の脚長が小さいもの、溶け込み状況が不十分なものなどがあり、必ずしも原則通りの仕口ができていないとは限らない。

被害があった柱梁仕口において溶接種類が混在していることから、溶接部の断面係数を特定することは困難であり、断面性能と強度を別に扱うことはできない。また、部材は高い精度で製造されるが、溶接部は同様の精度で作成されるとは限らないため、溶接部耐力は部材より多くの不確実性が存在すると考えられる。さらに、実在する構造物個々の溶接部の耐力を調べることは不可能であることから、溶接部耐力についてBayes確率を用いて推定を行った。

### 4. 曲げ耐力推定のためのBayesの方法

確率変数の確率分布を推定するにあたり、推定による誤差をできるだけ少なくするには、一般的に大量のデータが必要である。しかし、データの量が不十分な場合、既知の情報に新たなデータを加えることで確率分布を更新することができるBayes確率が有用である。事前確率と実験データを考慮した事後分布は、次式のように求める。

$$f''(\theta) = \frac{P(\epsilon|\theta)f'(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\epsilon|\theta)f'(\theta)d\theta} \quad (3)$$

$\theta$ : 確率分布の母数

$\epsilon$ : 実験の観測データ

$P(\epsilon|\theta)$ : 母数を $\theta$ と仮定した場合に $\epsilon$ という実験結果が得られる条件付き確率

$f'(\theta)$ : 母数について $\theta$ となる事前確率

実験結果 $\epsilon$ が得られる前の母数に関する分布

$f''(\theta)$ : 母数について $\theta$ となる事後分布

実験結果 $\epsilon$ によって更新された母数に関する分布特に $P(\epsilon|\theta)$ は尤度関数と呼び $L(\theta)$ と表す。また $[\int_{-\infty}^{\infty} P(\epsilon|\theta)f'(\theta)d\theta]^{-1}$ は事後分布 $f''(\theta)$ に密度分布としての性質を持たせるための正規化係数であり $k$ と表す。

標本抽出理論を用いた場合、実験結果 $\epsilon$ が観測値 $x_1, x_2, \dots, x_n$ の組で与えられ、それらの観測値が密度分布 $f_X(x)$ なる母集団 $X$ からの無作為標本と仮定した場合、母数を $\theta$ としたときに標本値が観測される条件付き確率は次式のようになる。

$$P(\epsilon|\theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) \quad (4)$$

(4)式を(3)式に代入すると

$$f''(\theta) = \frac{[\prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) dx]f'(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} [\prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) dx]f'(\theta)d\theta} \quad (5)$$

ここに正規化係数 $k$ は次式で与えられる。

$$k = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) \right) f'(\theta) d\theta \right]^{-1} \quad (6)$$

また、ここでは尤度関数 $L(\theta)$ は変数値 $x_1, x_2, \dots, x_n$ における密度関数の積となっている。

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) \quad (7)$$

確率モデルを正規分布とすることで種々の統計処理が簡便となる。標準偏差 $\sigma$ 、確率変数の平均値 $\mu$ という分布パラメータを持つ正規分布は次の密度関数を有する。

$$N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (-\infty < x < \infty) \quad (8)$$

いまここに $m$ 個の正規密度関数があり、それぞれの平均値が $\mu_i$ 、標準偏差が $\sigma_i$ である場合、それらの積も正規密度関数になり、その平均値と分散は次式で表される。

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^m (\mu_i / \sigma_i^2)}{\sum_{i=1}^m (1 / \sigma_i^2)} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (1 / \sigma_i^2)} \quad (10)$$

さらに、標準偏差 $\sigma$ が既知の正規母集団がある。母数 $\mu$ に関して(7)式の尤度関数は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} L(\mu) &= \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \\ &= \prod_{i=1}^n N_{\mu}(x_i, \sigma) \end{aligned} \quad (11)$$

したがってこの尤度関数は式(9)、(10)により次式のようにになる。

$$\begin{aligned} L(\mu) &= N_{\mu} \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i / \sigma^2)}{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma^2)}, \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma^2)}} \right) \\ &= N_{\mu} \left( \frac{(1 / \sigma^2) \sum_{i=1}^n x_i}{n / \sigma^2}, \frac{1}{\sqrt{n / \sigma^2}} \right) \\ &= N_{\mu} \left( \bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$\bar{x}$ は抽出した標本の平均値である。

母集団 $X$ が既知の分散を持つ正規母集団に従う場合、正規事前分布を仮定することが数学的に便利である。事前分布 $f'(\mu)$ を正規分布 $N(\mu', \sigma')$ とする。これに(12)式の尤度関数を用いると $\mu$ の事後分布は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} f''(\mu) &= kL(\mu)f'(\mu) \\ &= kN_{\mu} \left( \bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) N_{\mu}(\mu', \sigma') \end{aligned} \quad (13)$$

この事後分布は2つの正規密度関数の積であるから、 $f''(\mu)$ もまた正規分布となり、式(9)、(10)より平均値 $\mu''$ のBayes推定量は、事前平均値 $\mu'$ と標本平均 $\bar{x}$ について、それぞれの分散の逆数を重みとする重みつき平均を求めることによって得られる。すなわち

$$\begin{aligned} \mu'' &= \frac{\left[ \bar{x} / (\sigma / \sqrt{n}) \right]^2 + [\mu' / (\sigma')^2]}{\left[ 1 / (\sigma / \sqrt{n}) \right]^2 + [1 / (\sigma')^2]} \\ &= \frac{\bar{x}(\sigma')^2 + \mu'(\sigma^2/n)}{(\sigma')^2 + (\sigma^2/n)} \end{aligned} \quad (14)$$

$\mu''$ の標準偏差 $\sigma''$ は

$$\sigma'' = \sqrt{\frac{(\sigma')^2(\sigma^2/n)}{(\sigma')^2 + (\sigma^2/n)}} \quad (15)$$

となる。平均値 $\mu$ の事後分布は式(14)を平均とし、式(15)を標準偏差とする正規分布となる。

## 5. 溶接部耐力が正規分布に従う場合における柱梁仕口の破壊確率

柱梁仕口の破壊は、構造物の損傷状態に多大な影響を与えると考えられる。ここでは溶接部耐力が正規分布に従うものとし、Bayes推定により柱梁仕口の曲げ耐力の事後分布、さらに柱梁仕口の破壊確率を求める。

### 5-1 破壊確率推定のための性能関数

柱梁仕口の破壊確率は、次の性能関数を基に算定する。

$$Y = Mu - Mp \quad (16)$$

Y : 性能関数

Mu : 柱梁仕口の曲げ耐力

Mp : 梁断面の全塑性モーメント

Y<0となる場合、仕口では溶接部が曲げ耐力に達し破壊すると考え、その確率 $P(Y < 0)$ を求める。

### 5-2 梁断面全塑性モーメントの統計データ

梁の全塑性モーメントは次式により求める。

$$Mp = Zp \cdot \sigma_y \quad (17)$$

Zpは梁の断面係数、 $\sigma_y$ は梁の降伏応力度である。ここで梁の断面寸法におけるばらつきは強度のばらつきと比較して小さいと考え、断面係数Zpは定数と仮定する。降伏強度は文献2を参考にTable3の統計データを用いる。

Zpを定数としたことから、全塑性モーメントMpの変動係数は、降伏強度 $\sigma_y$ の変動係数となる。鋼材により強度が異なることから鋼材別に破壊確率を求めるが、実際に用いられている鋼材の種類を特定することは不可能であるため、使用されている割合を仮定する。文献2における鋼材のデータはミルシート値であり、そのデータの数が実際に使用された鋼材の実数であると考え。市場で使用された鋼材の種類はSS400とSM490の2種類であるとすると、SS400のデータ数5606とSM490のデータ数3773の比をとり、市場で用いられた鋼材はSS400が60%、SM490が40%とする。

### 5-3 柱梁仕口曲げ耐力の統計データ

柱梁仕口については様々な形式が考えられるが、ここではFig.1の工場溶接によるものとする。溶接の種類によって柱梁仕口における溶接断面の断面係数が異なるが、被害データとの対応のため溶接の種類は特定せず、柱梁仕口部曲げによる溶接部耐力とする。

溶接金属の強度は母材の強度を上回るようにつくられるため、設計では母材の強度と同等として扱われる。実際には、鋼材と製造過程が異なり、様々な環境で溶接が行われるため、母材を下回る強度となる可能性がある。

本研究では、溶接金属の強度および溶接形式の違いを含めた接合部耐力の統計値をBayes推定により求め、それを用いて柱梁仕口の溶接部の破壊確率を求める。

#### 5-4 柱梁仕口の曲げ耐力の実験値

文献3より、Table4に示す溶接による柱梁仕口試験体の曲げ耐力をBayes推定の実験データとして用いる。柱梁仕口溶接部における損傷はスカラップ近傍から発生することから、スカラップの形状を変化させ、仕口部の曲げ耐力を求めた実験結果である。破壊形式は様々であるが、今回破壊形式を特定できない地震被害データと比較を行うため、破壊形式に関係なく仕口部破壊時の曲げ耐力データとしてTable4のデータを用いることとする。表中Mmaxは仕口部曲げ耐力であり、Mpは梁の全塑性モーメントである。

Table4下段にBayesにより推定した柱梁仕口溶接部曲げ耐力と全塑性モーメントの比の統計値を示す。溶接部曲げ耐力を計算の便宜上Mpの平均値との比で表すと、実験データの平均値は1.238Mp、標準偏差は0.095Mpであり、正規分布に従うとする。

データが大量に存在すれば、より厳密な推定を行うことができると考えられるが、Bayes推定を用いて事前分布を考慮することにより、少ないデータであっても統計値を推定することができる。

#### 5-5 柱梁仕口耐力の事前分布

柱梁仕口の溶接部曲げ耐力を求めるにあたり、溶接部の耐力が設計どおりにでき、すべてが突き合わせ溶接でつくられたとすると

$$Mu = Zp \cdot \sigma u \quad (18)$$

Muは柱梁仕口の曲げ耐力、Zpは梁断面の塑性断面係数、σuは梁の引張強さである。

この設計式が示すように、溶接部がTable3のσuに示す部材と同等の耐力を保持していると仮定した場

Table3 Data for Yield and Ultimate Strength<sup>2)</sup> (kN/cm<sup>2</sup>)

鋼材種類	強度	平均	標準偏差	変動係数
SS400 (6mm<t≤40mm)	降伏点σ <sub>y</sub>	30.65	3.15	0.103
	引張強さσ <sub>u</sub>	44.87	1.85	0.041
SM490 (t≤40mm)	降伏点σ <sub>y</sub>	38.44	3.46	0.090
	引張強さσ <sub>u</sub>	53.91	2.01	0.037

Table4 Maximum Moment of Welded joint<sup>3)</sup>

試験体番号	Mmax (KN・m)	Mp (KN・m)	Mmax/Mp	破壊形式
1	573.3	575.3	1.00	脆性破断
2	650.7	575.3	1.13	亀裂、局部座屈
3	736.0	575.3	1.28	局部座屈
4	660.5	529.2	1.25	亀裂
5	654.6	529.2	1.24	脆性破断
6	681.1	529.2	1.29	脆性破断
7	752.6	529.2	1.42	局部座屈
8	688.0	529.2	1.30	亀裂
平均 μ			1.238	
標準偏差 σ			0.118	
変動係数 δ			0.095	
σ / √n			0.042	

合をCase1とする。一方、溶接部が部材と同等の強度を必ずしも保持している訳ではなく、事前に溶接部耐力を判断するための情報が全くない場合は事前分布がわからないものとして、耐力はTable4の実験データを用いる。この場合をCase2とする。

#### 5-6 柱梁仕口耐力及び破壊確率のBayes推定

Bayes推定の結果をTable5に示す。溶接部耐力はMpの平均値との比で表している。なお、溶接部の破断確率はSS400、SM490それぞれの推定破壊確率を市場で用いられている鋼材の割合で按分して求めており、Table5最右列に示す。

Case1の事前分布で溶接部の破壊確率を求めると5.14x10<sup>-5</sup>となり、設計時にはこの値に近い値を破壊確率と想定していると考えられる。部材信頼性と比較すると溶接部での破壊はほぼ起こらないと考えられる。

Case2の実験データによる耐力分布で溶接部の破壊確率を求めると4.07x10<sup>-2</sup>となった。事前情報がなく、わずかなデータで推定した場合の破壊確率となる。

設計で用いられるCase1の溶接部耐力をもとに、実

Table5 Fracture Probability of joint welded in laboratory

SS400 (60%)	溶接部耐力		溶接部破壊		SM490 (40%)	溶接部耐力		溶接部破壊		溶接部の破壊確率	
	平均	標準偏差	β	Pf		平均	標準偏差	β	Pf		
全塑性M	1.000 Mp	0.103 Mp	-	-	全塑性M	1.000 Mp	0.090 Mp	-	-	-	-
事前分布	1.464 Mp	0.060 Mp	3.895	4.91E-05	事前分布	1.403 Mp	0.052 Mp	3.868	5.48E-05	Case1	5.14E-05
実験データ	1.238 Mp	0.095 Mp	1.699	4.47E-02	実験データ	1.238 Mp	0.095 Mp	1.815	3.48E-02	Case2	4.07E-02
事後分布	1.291 Mp	0.095 Mp	2.081	1.87E-02	事後分布	1.286 Mp	0.095 Mp	2.184	1.45E-02	Bayes推定	1.70E-02

Table6 Prediction for Fracture Probability of Site Welded

接合部の 変動係数	実験データ 溶接部のσ	SS400溶接部耐力 平均	溶接部破壊		実験データ 溶接部のσ	SM490溶接部耐力 平均	溶接部破壊		溶接部の 破断確率
			β	Pf			β	Pf	
0.077	0.095	1.291 Mp	2.081	1.87E-02	0.095	1.286 Mp	2.184	1.45E-02	1.70E-02
0.080	0.099	1.295 Mp	2.065	1.94E-02	0.099	1.289 Mp	2.158	1.55E-02	1.78E-02
0.090	0.111	1.305 Mp	2.015	2.20E-02	0.111	1.297 Mp	2.077	1.89E-02	2.07E-02
0.094	0.116	1.309 Mp	1.994	2.31E-02	0.116	1.301 Mp	2.045	2.04E-02	2.20E-02
0.100	0.124	1.316 Mp	1.962	2.49E-02	0.124	1.306 Mp	1.997	2.29E-02	2.41E-02
0.110	0.136	1.326 Mp	1.909	2.81E-02	0.136	1.313 Mp	1.920	2.74E-02	2.78E-02

際の溶接部は鋼材より耐力のばらつきが大きいと考え、実験データの変動係数を用いて、事後分布の設定を行う。事前分布としてCase1の値を用い、尤度としてCase2の実験データを考慮し事後分布を推定した結果、溶接部の破壊確率は $1.68 \times 10^{-2}$ となった。

推定結果と地震被害データを比較する。部分的被害ではなく溶接部断面の被害データとして、下側梁フランジ全断面が破断した割合1.5%を用いる。溶接部の重要な部分が破断した場合これにより曲げの性能は低下し、仕口部の破壊と判断されているためである。求められた事後分布による溶接部の破壊確率は被害データに近い値であると考えられる。

### 5-7 現場溶接による接合部耐力分布の推定

被害データによれば、現場溶接による溶接部の被害割合が比較的大きいことから、現場溶接は工場溶接に比べ施工誤差等による耐力の変動が大きいと考えられる。そこでBayes推定事後分布の変動係数として実験データより大きい値を設定し、溶接部の破壊確率が実際の被害データと整合のとれる値を探すことで現場溶接による溶接部の耐力分布を推定した。結果はTable6の通りであり、Table5に示す事後分布を変動係数を段階的に増やしながらかし計算し直している。現場溶接による接合部の破断確率2.2%に近い値になることから、工場溶接による実験データの変動係数は0.077程度に対して、現場溶接の実験データの変動係数は0.094程度と推定される。

### 5-8 保有耐力設計係数 $\alpha$ の検討

(1)式の $\alpha$ は接合部設計に関係する様々な要因による影響を考慮して、安全性や余裕度を確保するために定める係数である。地震時に梁部材が十分塑性化するまで柱梁接合部が破壊しないよう、設計者は $\alpha$ を適切に定めて接合部を設計し、梁端接合部に十分な塑性変形能力を確保する必要がある。鋼構造限界状態設計指針<sup>7)</sup>においては、柱梁仕口における接合部係数 $\alpha$ は降伏比の(平均値+標準偏差)の公称値に対する比が用いられている。(1)式で用いている $\alpha$ と同様の形でその値はSS400で1.25、SM490で1.15である。

Table7 Data for Yield and Ultimate Strength<sup>2)</sup>

鋼材種類	強度	平均 $\lambda$	標準偏差 $\zeta$
SS400 (6mm<t $\leq$ 40mm)	降伏点 $\sigma_y$	3.418	0.102
	引張強さ $\sigma_u$	3.803	0.041
SM490 (t $\leq$ 40mm)	降伏点 $\sigma_y$	3.645	0.090
	引張強さ $\sigma_u$	3.987	0.037

Table8 Maximum Moment of Welded joint<sup>3)</sup>

試験体番号	ln(Mmax)	ln(Mp)	$\frac{\ln(Mmax)}{\ln(Mp)}$	破壊形式
1	6.3514	6.3548	0.9995	脆性破断
2	6.4781	6.3548	1.0194	亀裂、局部座屈
3	6.6012	6.3548	1.0388	局部座屈
4	6.4930	6.2714	1.0353	亀裂
5	6.4841	6.2714	1.0339	脆性破断
6	6.5237	6.2714	1.0402	脆性破断
7	6.6236	6.2714	1.0562	局部座屈
8	6.5337	6.2714	1.0418	亀裂
平均 $\lambda$			1.0331	
標準偏差 $\zeta$			0.0159	
$\zeta / \sqrt{n}$			0.0056	

保有耐力接合により接合部における破壊が起こらないように設計が行われているが、今回の検討で保有耐力接合された接合部において、部材が全塑性モーメントに達する前に溶接接合部の破壊が起こる確率が1.68%と求められた。

## 6. 溶接部耐力が対数正規分布に従う場合における柱梁仕口の破壊確率

鋼材を製造する過程から、鋼材強度は対数正規分布に従うと考えられており、鋼材強度の確率分布は対数正規分布を用いることが多い。5章では計算の簡便さに期待し正規確率分布を用いたが、本章では溶接部耐力は対数正規分布に従うものとし、Bayes確率により柱梁仕口の曲げ耐力の事後分布、さらに柱梁仕口の破壊確率を求める。

### 6-1 曲げ耐力推定のためのベイズの方法

母集団 X が既知の $\zeta$ を持つ対数正規母集団に従う場合について以下に示す。事前分布 $f'(\lambda)$ を対数正規分布 $LN(\lambda', \zeta')$ とする。実験データの対数を取り、その平均及び標本標準偏差を用いて尤度関数 $LN(\ln x, \zeta/\sqrt{n})$ とすると、 $\lambda$ の事後分布は次式のよう

Table9 Fracture Probability of joint welded in laboratory

SS400 (60%)	溶接部耐力		溶接部破壊		SM490 (40%)	溶接部耐力		溶接部破壊		溶接部の破壊確率			
	$\lambda$	$\zeta$	$\beta$	Pf		$\lambda$	$\zeta$	$\beta$	Pf				
全塑性M	-0.005	+lnMp	0.102	-	-	全塑性M	-0.004	+lnMp	0.090	-	-	-	-
事前分布	0.380	+lnMp	0.041	3.493	2.39E-04	事前分布	0.338	+lnMp	0.037	3.514	2.21E-04	Case1	2.32E-04
実験データ	0.210	+lnMp	0.077	1.685	4.60E-02	実験データ	0.210	+lnMp	0.077	1.814	3.48E-02	Case2	4.15E-02
事後分布	0.262	+lnMp	0.077	2.086	1.85E-02	事後分布	0.254	+lnMp	0.077	2.188	1.43E-02	Bayes推定	1.68E-02

Table10 Prediction for Fracture Probability of Site Welded Joint

実験データ 溶接部の $\zeta$	SS400溶接部耐力 $\lambda$	溶接部破断		実験データ 溶接部の $\zeta$	SM490溶接部耐力 $\lambda$	溶接部破断		溶接部の破断確率		
		$\beta$	Pf			$\beta$	Pf			
0.077	0.262	+lnMp	2.086	1.85E-02	0.077	0.254	+lnMp	2.188	1.43E-02	1.68E-02
0.084	0.268	+lnMp	2.066	1.94E-02	0.084	0.260	+lnMp	2.144	1.60E-02	1.81E-02
0.095	0.278	+lnMp	2.030	2.12E-02	0.095	0.267	+lnMp	2.078	1.88E-02	2.02E-02
0.102	0.284	+lnMp	2.003	2.26E-02	0.102	0.272	+lnMp	2.033	2.10E-02	2.20E-02
0.105	0.286	+lnMp	1.988	2.34E-02	0.105	0.274	+lnMp	2.009	2.23E-02	2.30E-02
0.116	0.295	+lnMp	1.941	2.61E-02	0.116	0.280	+lnMp	1.939	2.63E-02	2.62E-02

になる。

$$f''(\lambda) = kL(\lambda)f'(\lambda) \\ = kLN\left(\frac{\zeta}{\sqrt{n}}, \frac{\zeta}{\sqrt{n}}\right) LN(\lambda', \zeta'') \quad (19)$$

ここに  $k$  は正規化係数であり  $k=1$  となる。この事後分布  $f''(\lambda)$  もまた対数正規分布となり、 $\lambda$  の平均値及び標準偏差は次式のようになる。

$$\lambda'' = \frac{\overline{\ln x}(\zeta')^2 + \lambda'(\zeta'^2/n)}{(\zeta')^2 + (\zeta'^2/n)} \quad (20)$$

$$\zeta'' = \sqrt{\frac{(\zeta')^2(\zeta'^2/n)}{(\zeta')^2 + (\zeta'^2/n)}} \quad (21)$$

$\lambda$  の事後分布は(20)式の  $\lambda''$ 、(21)式の  $\zeta''$  をパラメータとする対数正規分布となる。

## 6-2 破壊確率の算定

柱梁仕口の破壊確率は、次の性能関数に基づき求める。

$$Y = Mu/Mp \quad (22)$$

$$Y' = \ln Y = \ln Mu - \ln Mp \quad (22')$$

$Y$ 、 $Y'$ ：性能関数

$Mu$ ：柱梁仕口の曲げ耐力

$Mp$ ：梁断面の全塑性モーメント

$Y' < 0$  となる場合、仕口では溶接部で曲げ耐力に達し破壊すると考え、その確率  $P(Y' < 0)$  を求める。

## 6-3 梁の全塑性モーメント及び接合部の統計データ

梁の全塑性モーメントは次式により求める。

$$Mp = Zp \cdot \sigma_y \quad (23)$$

$Zp$  は梁の断面係数、 $\sigma_y$  は梁の降伏応力度である。ここで断面係数  $Zp$  は前章と同様に定数と仮定する。また、降伏強度は文献 2 を参考に統計データより、対数正規分布のパラメータを用いる。パラメータの値を Table 7 に示す。

文献 3 より、実験による溶接部の統計データの対数をとって、尤度関数のデータとした。Table 8 に実験データより求めた対数正規分布のパラメータを示す。

## 6-4 柱梁仕口の破壊確率

Bayes 推定の結果を Table 9 に示す。5 章と同様の手順により、Case 1 の設計時に想定している接合部の破壊確率を求めると  $2.32 \times 10^{-4}$  となった。部材信頼性と比較すると、強度を対数正規分布として扱った場合も溶接部での破壊はほぼ起こらないと考えられる。また、Case 2 の事前情報が全くなく実験データにより事後分布を求め溶接部の破壊確率を求めると  $4.15 \times 10^{-2}$  となった。

事前分布として設計時の値を用い、実験データを考慮して溶接部耐力の事後分布を求め、さらに既知

の標準偏差を実験データの値として溶接部の破壊確率を推定すると  $1.68 \times 10^{-2}$  となった。

接合部耐力の事後分布のばらつきは設計時に想定している部材耐力のばらつきより大きく、破壊確率も大きい値となった。破壊確率と地震被害データによる下側梁フランジ全断面が破断した割合 1.5% とを比較すると、その確率は被害データと近い値であることが分かった。また、溶接部耐力が正規分布に従うものとした 5 章の結果とその差は小さいことが分かった。

## 6-5 現場溶接による接合部耐力分布の推定

被害データによれば、現場溶接による溶接部の被害割合が比較的大きいことから、現場溶接は工場溶接に比べ耐力の変動が大きいと考えられる。そこで 5 章と同様、事後分布の変動係数として実験データより大きい値を設定し、溶接部の破壊確率が被害データと整合のとれる値を探ることで現場溶接による溶接部の耐力分布を推定した。Table 10 はその結果である。現場溶接による接合部の破断確率 2.2% に近い値になることから、実験データの標準偏差  $\zeta$  は 0.102 であったと考えられる。ちなみに工場溶接による接合部の  $\zeta$  は 0.077 と推定されている。

## 7. 脆性的破壊を含む鋼構造建築物の信頼性解析

5 章および 6 章では、部材耐力と溶接部の実験データを基に、Bayes 確率を用いて柱梁仕口溶接部の耐力を推定し、さらにその破壊確率を信頼性理論により導いた。これらの結果を基に、本章では  $\beta$ -unzipping 法を用いて 2 層 2 スパンの鋼構造ラーメンモデルの信頼性解析を行う。

鋼構造においては一般的に、脆性的破壊は起こらないとして設計が行われている。しかし、実際の地震被害などでは接合部の破断などが起こった報告もあり、脆性的破壊が起こる可能性がある。部材の破壊により構造物の応力状態が著しく変化する場合、その部材が破壊した後の構造物の状態を考慮して設計を行う必要がある。本章では、溶接部の脆性的破壊を考慮した解析を行い、構造物の破壊形式および信頼性がどの様に変化するかの検討を行う。さらに、脆性的破壊の可能性の検討および脆性的破壊が起こった場合の構造物の信頼性について検討を行った。

### 7-1 脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析

ここでは部材の破壊モデルとして Fig. 2 に示す延性的破壊モデルと脆性的破壊モデルを設定する。延性的破壊モデルでは部材は弾性域を越えてもその耐力を保持するが、脆性的破壊モデルでは部材が弾性域を越えると応力の負担ができないとする。

延性材のみからなる構造物では最終崩壊型を対象に信頼性解析を用いることができるのに対し、脆性的破壊をする構造部材を含む構造物の場合、信頼性

解析の手順が複雑になる。脆性的破壊モデルの場合、部材が破壊するごとに構造物の応力状態が変化するため、変化後の応力状態を考慮して信頼性を求める必要がある。脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析は、その破壊に伴う応力状態の変化を逐次追跡し、各応力状態において部材ごとに設定される性能関数の組み合わせの解析が必要となる。

構造物の応力状態を逐次追跡しながらシステム信頼性を検討する方法としてβ-unzipping法がある。部材の破壊あるいは部分的破壊に伴う構造物の状態変化ごとに応力解析を行うとともに、次に破壊する可能性のある部材について検討し、構造物が破壊に至るまで一連の計算を繰り返し行う解析方法である。β-unzipping法では、破壊確率の高いところから順に破壊し、破壊確率の低いところは除外する分岐限定法を適用し、組み合わせが増大することを制御する。

### 7-2 柱梁仕口の破壊

一般的に、保有耐力設計では梁崩壊型による全体崩壊型を目標に設計される。このように設計された柱梁接合部では、梁部材に十分な塑性変形能力を持たせることで、地震時に梁端部に生じる塑性ヒンジがエネルギーを吸収することを見込んでいる。しかし、梁端におけるエネルギー吸収を見込んで設計された接合部で想定していない破壊が起きた場合、つまり柱梁仕口溶接部が脆性的破壊した場合などは、応力に偏りが生じ構造的に不利な状態に陥ることが予想される。実際の地震被害などでは接合部の破断などが起こった報告も多く、脆性的破壊が起こる可能性があることを検討する必要がある。

### 7-3 解析モデル

Bayes推定により導いた溶接部耐力を用いて、構造物の破壊確率を求める。モデルはFig.3に示す2層2スパンのラーメン構造を対象とする。モデルに用いられている鋼材はSS400とした。

梁端部の破壊は部材の延性的破壊と溶接部の脆性的破壊が考えられる。最終崩壊型に至るまで梁端部ごとに部材の延性的破壊と溶接部の脆性的破壊のどちらかの形式で破壊し、最終崩壊型はこれらの組み合わせによる事象で表される。一般的に、最終崩壊型は部材の延性的破壊と溶接部の脆性的破壊が混在する組み合わせで形成されると考えられるが、すべての組み合わせ事象を考えた場合、考慮しなければならない事象の数が膨大となるため、本論ではFig.4に示す梁端部がすべて部材で延性的破壊した場合と、溶接部で脆性的破壊した場合との2つの組み合わせ事象を考える。なお、一般的に想定される延性的破壊と脆性的破壊とが混在する組み合わせによる崩壊型の確率は、本論で検討対象とする2つの組み合わせ事象の間で推移すると考える。

構造物全体の破壊確率P<sub>fsys</sub>は、全確率の定理によ

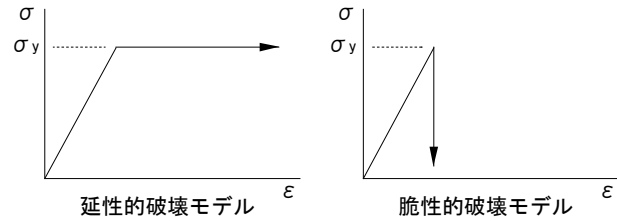


Fig.2 Element Failure Model

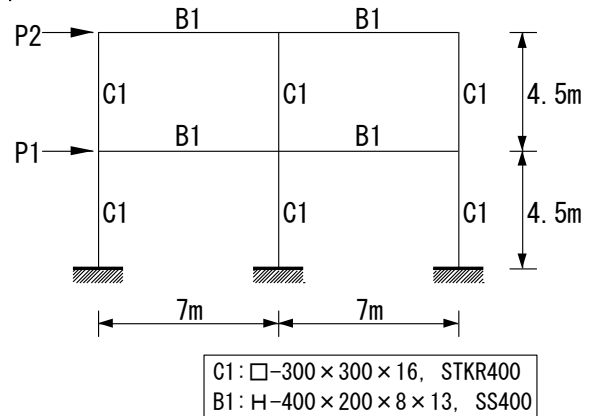


Fig.3 Analysis Model

り以下のように求めることができる。

$$P_{fsys} = P(F_1 | Mu < Mp)P(Mu < Mp) + P(F_2 | Mu > Mp)P(Mu > Mp) \quad (24)$$

F1：溶接部の破壊による構造物の破壊

F2：梁部材の破壊による構造物の破壊

Mu：溶接部耐力

Mp：梁部材耐力

### 7-4 解析結果及び考察

延性的破壊モデルにおける最終崩壊型による破壊を表す性能関数は、以下のように定義される。

$$Y = \sum M_p - \sum Pl \quad (25)$$

M<sub>p</sub>は最終崩壊型における塑性ヒンジが形成された部材の全塑性モーメント、Pは各階に作用する水平荷重、lは各荷重の作用点の地面からの高さを表す。与条件として、寸法に関するZ<sub>p</sub>、lは定数とし、σ<sub>y</sub>、Pは正規分布に従う確率変数とする。また、部材耐力間の相関は、同じ部材間では完全相関、別の部材間は独立とする。さらに、Pは終局状態における地震荷重で、D<sub>s</sub>=0.25として求め、変動係数は0.7とした。

梁端部が溶接部で脆性的破壊した場合を考える。Fig.2に示すように脆性的破壊モデルでは、部材が弾性域を越えると応力の負担ができなくなる。脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析は、β-unzipping法を用いて部材の脆性的破壊のたびに变化する応力状態を变化のつど確認し、各状態において部材ごとに設定される性能関数の組み合わせの解析を行う。

Fig.4に示す通り、溶接部破壊により進行する脆性的破壊モデルの最終崩壊型は1層の層崩壊型となっ

た。溶接部の脆性的破壊により、柱の応力負担が変化し、1層の層崩壊という望ましくない崩壊型となったと考えられる。

溶接の破断が先行する場合の構造物の破壊確率は

$$\begin{aligned} P_{f_{sys}} &= P(F_1 | M_u < M_p) P(M_u < M_p) \\ &= \Phi(-3.485) \Phi(-2.081) \\ &= 4.60 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

となり、設計時に想定している次の値より大きい値となった。

$$\begin{aligned} P_{f_{sys}} &= P(F_1 | M_u < M_p) P(M_u < M_p) \\ &= \Phi(-4.13) \Phi(-3.895) \\ &= 8.84 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

部材がすべて曲げ破壊する組み合わせ事象では、最初の部材が破壊する場合の信頼性指標が2.016であるのに対し、構造物が破壊する場合の信頼性指標3.152と比べ大きく変化した。これは、部材の破壊が延性的であることにより構造物の破壊に余裕が生じている事を表している。

また、溶接部が脆性的破壊する組み合わせ事象では、最初の部材が破壊する場合の信頼性指標3.228に対し、構造物が破壊する場合の信頼性指標は3.485と変化が少なく、脆性的破壊による最初の部材の破壊から構造物が破壊するまでの余裕が少ない事を表している。

(24)式の構造物全体の破壊確率は、

$$\begin{aligned} P_{f_{sys}} &= P(F_1 | M_u < M_p) P(M_u < M_p) \\ &\quad + P(F_2 | M_u > M_p) P(M_u > M_p) \\ &= \Phi(-3.485) \Phi(-2.081) \\ &\quad + \Phi(-3.152) \{1 - \Phi(2.081)\} \\ &= 8.003 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

となり、全体の破壊確率に対して溶接部破断による破壊確率の割合は約0.6%を占める。

## 8. まとめ

接合部の耐力は部材耐力より大きくなるように設計され、十分な安全が見込まれていれば接合部における破壊は起こらず、鋼構造部材は地震時にその変形能力を発揮することができると考えられる。溶接による接合部は、設計時に十分な耐力や変形能力を期待されているが、実際には部材に用いられている鋼材から予測される値よりも性能のばらつきが大きい可能性がある。また、実際の溶接接合部の耐力は個々に確認できないため、本論ではBayes確率を用いて工場溶接による溶接部耐力の推定を行った。結果として、設計で期待している破壊確率は非常に小さい値であるのに対し、溶接部の破壊確率は比較的大きい値であることが分かった。また、柱梁仕口の地震被害データと比較すると推定値は妥当な値であると考えられる。さらに、現場溶接部耐力の推定を行った結果、その耐力の分布は工場溶接よりも大きい

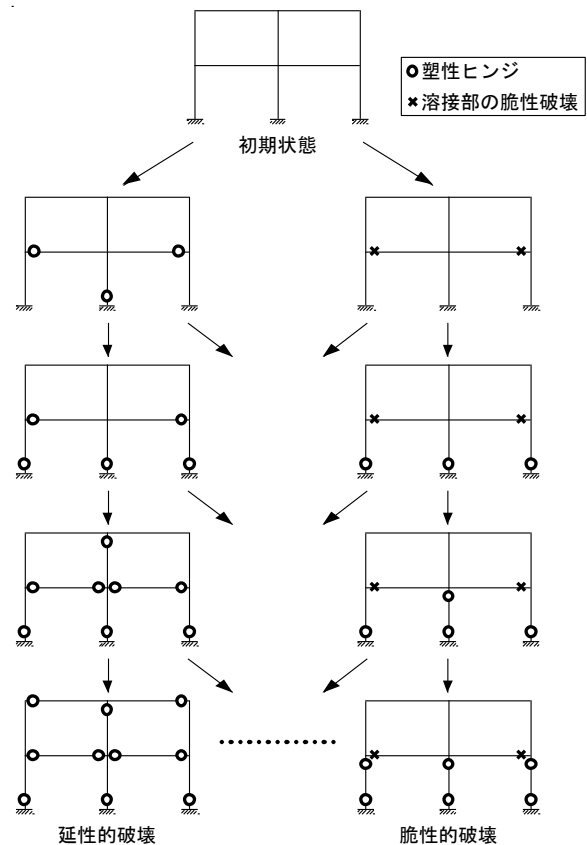


Fig.4 Structural Failure Models

ばらつきを持つ確率分布であることが分かった。

溶接部の破断を考慮した2層2スパン鋼構造モデルの信頼性解析の結果では、設計時には溶接部の破壊を考慮せず全体崩壊型になることを想定しているのに対し、推定値は溶接部破壊を含む崩壊型も無視できない値になることを示した。また、脆性的破壊が起こった場合には設計時には想定していない層崩壊が起こる可能性があることを示した。

溶接部耐力に関して、実験値を考慮した値を導入することで、設計時には想定していない破壊を考慮した、より正確な構造物の状態予測を行うことができると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会 他, 阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3 鉄骨構造物 シェル・空間構造物 容器構造, 丸善
- 2) 青木, 村田, 日本建築学会論文報告集 No.335, p.157, (1984)
- 3) 日本建築学会鋼構造運営委員会, 鋼構造接合部の力学的性能と設計法, 5.梁端溶接接合部の破壊とその対策(1996)
- 4) 伊藤, 亀田, 土木建築のための確率統計の基礎, 第8章, 丸善
- 5) 日本建築学会, 兵庫県南部地震における鋼構造の被害と教訓, 2.鋼構造建築物の被害の概要, (1996)
- 6) 日本建築学会, 鋼構造建築物構造計算標準同解説
- 7) 日本建築学会, 鋼構造限界状態設計指針・同解説, P146, (1998)
- 8) P.T-Christensen, Murotsu, Application of Structural Systems Reliability Theory, Springer-Verlag