

構造要素の破壊分布状態に関する確率論的分析[†]

本間紀子* 高橋利恵**

A Probabilistic Study

On Structural Element Failures Distribution

by

Noriko Honma* and Toshie Takahashi**

During the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, many gas-pressure welded joints were ruptured existed in the RC structure and SRC structures. As the gas-pressure welded joint is easier to joint the reinforced bar at construction, then many RC structures have the gas-pressure welded joints. We have to control the rupture numbers and rupture elements distribution of joints for existing structure. In this study, the probability distribution function for strength of gas-pressure welded joints is proposed using the strength data in existing RC structures. And an example for element rupture distribution of joints in RC structures is presented by using Monte Carlo simulation.

Keywords: Gas-pressure welded joint, Probability distribution function, Monte Carlo simulation

1. 目的

兵庫県南部地震では、神戸市を中心に鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造のコンクリート系構造物が多大な被害を受けた。既存のコンクリート系構造物には、ガス圧接継手が多数使用されており、建築ならびに土木構造物で使用されていた鉄筋のガス圧接継手の被害も報告されている。継手部分の破断が起これば、将来発生する大地震に対して、既存建築物は本来保持していると期待された耐震性を発揮することができず、損傷を受ける可能性があると考えられる。

本研究は、まず現場における抜き取り調査によるデータより、ガス圧接継手破断強度の確率密度関数を提案する。次に提案した強度の分布を用いて、既存鉄筋コンクリート構造物に対するガス圧接継手部破断の発生および部材における継手破断集中の度合についてシミュレーションを行い、構造要素破壊の建築物内における分布状態の検討を行う。

2. ガス圧接継手の破断

ガス圧接継手は、鉄筋端面どうしを突き合わせ、その周囲に酸素アセチレン炎で加熱し、鉄筋端部を熔融させずに赤熱状態にし、同時に軸方向に圧縮力を加えながら接合する継手工法である。図1に継手部を示す。鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造の鉄筋工事では、鉄筋を定尺物として現場に搬入するため、鉄筋継手が不

可欠であり、ガス圧接継手はその簡便さから現在最も多く使用されている継手工法である。

鉄筋のガス圧接継手の多くは、日本圧接協会「鉄筋のガス圧接工事標準仕様書」¹⁾ (以下、「NAK仕様書」) に従って施工されている。「NAK仕様書」のガス圧接継手の検査基準では継手破断は許容するが、母材のJIS規格引張強さ以上の物を合格としており、継手破断するときの強度は母材強度とほぼ同等の性能を有することを条件としている。ガス圧接継手部の破断では、ガス圧接接合面においてフラット破断面となることがあり、鉄筋が引張強さに達する前のガス圧接継手部での破断は、脆的な破壊となるためさげなければならない。

兵庫県南部地震で被害を受けた建築物の外観調査により、ガス圧接継手の破断の発生状況についての報告がある²⁾。表1は外観調査によるガス圧接継手の箇所数と継手破断していた箇所数である。外観調査よりガス圧接継手が確認できた建築物は22棟であった。22棟の建物用途の内訳は、公共建築物3棟、商業ビル4棟、集合住宅15棟である。表1の結果から、ガス圧接継手箇所数に対する圧接部破断の割合は建築物ごとのばらつきはあるが平均値は11.1%であった。表中No.1, No.3は比較的古い建築物であるが、継手破断は見られず、年代による影響は小さいと考えられる。建物ごとの継手破断割合のばらつきは、建物別の施工精度によるものが原因の1つであると考えられている。

[†] 原稿受理 平成15年12月19日 Received December 19, 2003

* 工学研究科建築学専攻 大学院生

** 建築学科 (Department of Architecture)

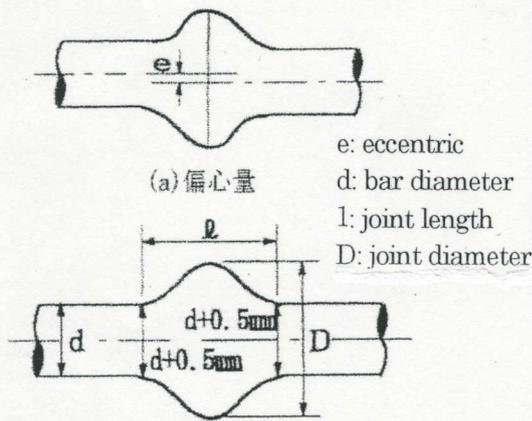


Fig. 1 Gas-pressure welded joint

Table 1 Ruptured joint numbers at Hyogo-ken Nanbu Earthquake

No.	site	story	joint numbers	ruptured joint
1	Kobe	5	7	0
2	Kobe	8	8	0
3	Kobe	8	17	0
4	Kobe	11	14	0
5	Ashiya	8	12	0
6	Nishinomiya	9	8	0
7	Kobe	8	36	10
8	Kobe	9	2	0
9	Kobe	9	2	2
10	Kobe	7	3	0
11	Ashiya	7	36	0
12	Kobe	5	5	0
13	Kobe	7	6	0
14	Kobe	-	7	0
15	Kobe	10	3	2
16	Ashiya	2	3	3
17	Kobe	5	6	4
18	Kobe	8	1	1
19	Kobe	12	4	0
20	Kobe	7	12	0
21	Ashiya	-	72	0
22	Kobe	7	15	9
sum			279	31

同調査において継手設置位置について報告されている。ガス圧接継手の破断は継手が受ける応力の大きさに関係するため、継手の設置位置は重要である。日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」においてガス圧接継手位置の許容範囲が規定されている。図2に示すように、柱部材においては柱部材内法寸法 H_0 に対して材端部 $H_0/4$ 以外の部材中央部を許容範囲としている。調査は継手設置許容範囲と材端部にわけて行われた。調査の結果を表2に示す。ガス圧接継手の80%は許容範囲の部材中央部に設置されていたが、20%は材端部に設置されていた。調査において継手位置を確認できたものは207例であった。この中で、部材中央部に設置されていて破断していたものは5%、材端部に設置されていて破断していたものは30%であった。この設置位置と破断割合の関係は、継手部設置位置が継手破断に影響を及ぼす事を示唆している。

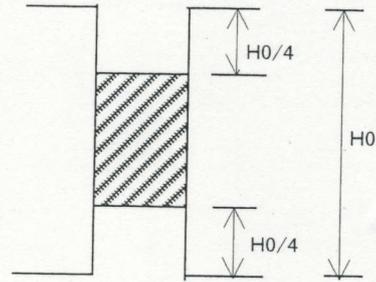


Fig. 2 Joint allowable area in RC structure Regulation

Table 2 Position of gas-pressure welded joint in existing structure

Total test-piece Numbers	Position of gas-pressure welded joints	
	End area of elements	Center area of elements
207	42 (20%)	165 (80%)

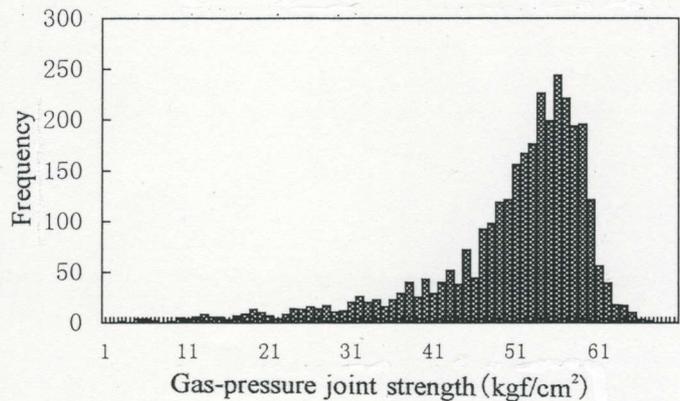


Fig. 3 Histogram of gas-pressure welded joint strength

3. ガス圧接継手の破断強度

全国の公的試験機関23機関が1982年～1986年の5年間に現場施工管理用のガス圧接継手抜き取り試験片の引張試験を行った。その95万本のデータより、継手破断したSD345の破断強度に関する3220個のデータを用いてガス圧接継手の破断強度に関する確率密度関

数の検討を行った³⁾。ヒストグラムを図3に示す。試験片の鉄筋径はD22~D29の範囲であった。

脆性を示す金属材料の強度は一般にひずみを持った分布形となることが多く、最弱リンク理論に基づき極値分布最小値の第3漸近分布である Weibull 分布がよく用いられる⁴⁾。これら強度のデータは負の値となり得ないという性質により、下限値を設定する Weibull 分布が選択されることが多いと考えられる。しかし、ガス圧接継手の強度は破断強度の小さい継手ほど破断する可能性が高くなる。従って破断強度の小さい部分の分布形が重要であると考えられ、分布形の採用にあたっては裾野部分の検討を行う必要がある。

ここでは Weibull 分布と Gumbel 分布に対するデータの適合度について確率紙により検討を行った。図4と図5に Weibull 分布および Gumbel 分布の確率紙による検討を示す。Weibull 分布では破断強度の小さいところで適合しないが、Gumbel 分布では全体的にほぼ直線になっている。裾野部分の適合から、SD345 のガス圧接継手の継手部破断強度の確率分布としては Gumbel 分布が適当であると考えられる。

最小値に関する極値 I 型確率密度関数 $f_{X1}(x)$ および累積分布関数 $F_{X1}(x)$ はそれぞれ(1)式(2)式のように表される。

$$f_{X1}(x) = \alpha_1 e^{\alpha_1(x-u_1)} \exp\{-e^{\alpha_1(x-u_1)}\} \quad (1)$$

$$F_{X1}(x) = 1 - \exp\{-e^{\alpha_1(x-u_1)}\} \quad (2)$$

ここに u_1 は原確率変数 X の特性最小値であり、 α_1 は X_1 の広がりを表す逆尺度である。データを用いてモーメント法により2つのパラメータを求めたところ、 $\alpha_1=0.125$ 、 $u_1=55.1$ となった。データの累積頻度と上記のようにパラメータ設定して求めた累積分布関数の比較を図6に示す。累積確率の大きいところで多少の差があるが、小さいところでは比較的良く追従しており、Gumbel 分布の適用が可能であると考えられる。

4. 被害建物の継手部破断数に関する検討

兵庫県南部地震の被害建物で、地震後柱部材の補修に際してコンクリートを除去した状態で鉄筋継手の状態について調査を行った。このデータを用いて地震により発生する継手破断数のシミュレーションを行った。被害建物には、58本の柱があり、各柱に鉄筋が6本配筋されていた。被害建物の柱における継手破断本数を表3に示す。継手破断数は39本、継手破断を含む柱の本数は22本であった。

この被害建物の鉄筋継手部破断に関して、モンテカルロシミュレーションを行い、破断本数および同じ部材内での破断の集中度をシミュレーションにより再現する。この建築物における鉄筋の継手位置は不明であるため、ここでは一般建築物の平均である材端部に継手が20%含まれるとした。

まず継手位置に関する一様乱数を発生させ、継手部ご

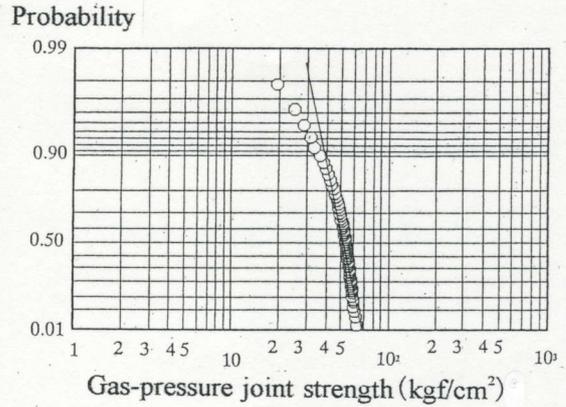


Fig.4 Weibull probability paper

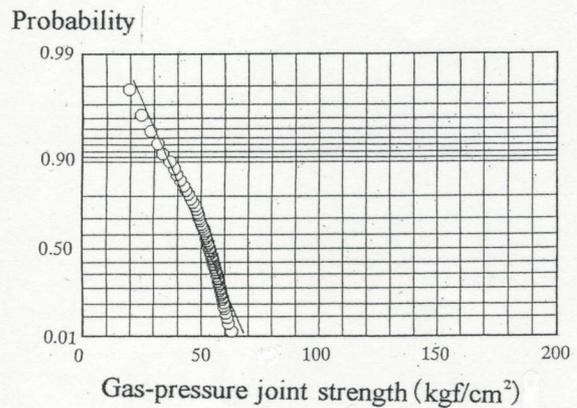


Fig.5 Gumbel probability paper

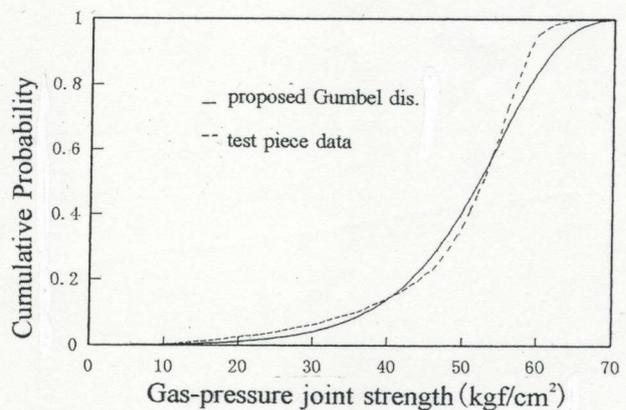


Fig.6 Cumulative distribution function
Table3 Ruptured joint numbers of existing structure

Joint rupture numbers in every columns									
0	0	0	0	0	2	3	1	2	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	2	0	0	2
0	0	1	0	1	0	0	2	1	4
1	0	0	2	0	1	0	1	0	2
0	0	0	0	0	2	2	2	3	

とにガス圧接継手位置をランダムに設定する。材端部に継手が存在する場合に、継手部の破断強度に対する Gumbel 乱数を発生させ、以下の条件となったとき破断したと判定する。

$$Z = \sigma - 1.35\sigma y \quad (3)$$

ここに σ は継手部の破断強度、 σy は鉄筋の降伏強度を表す。1.35 σy は、日本建築センターの継手性能判定基準における SA 級継手強度の基準値である⁹⁾。なお、同じ柱の継手は同じ技術者により圧接が行われる可能性を考え、同一柱における破断強度は相関を持つものとした。

相関を持つ継手部破断強度の乱数を発生されるため、Box & Muller 法により相関を持つ正規乱数を発生する。その正規乱数を Gumbel 乱数に変換することにより、相関を持つ Gumbel 乱数とした。継手部破断強度に $\rho=0.0 \sim 0.9$ の相関を設定し、各継手部について(1)式により破断の判定を行い、建物全体で柱ごとに破断数を数える。1000 回のシミュレーションを行い、破断本数の平均を求めた。鉄筋ガス圧接部の破断本数の結果を図 7 に、圧接部破断を含む柱本数を図 8 に示す。破断本数 39 本、破断を含む柱本数 22 本という被害建物の破断発生状況に最も近似するのは、図 7 および図 8 より、破断本数および継手部破断えお含む柱本数がいずれも $\mu \pm \sigma$ の領域に入った継手部強度間の相関を 0.7 とした場合であると考えられる。ここに μ は平均値、 σ は標準偏差を表す。

兵庫県南部地震で実際に被害を受けた建築物の外観調査では、材端部に継手が設置されていた割合が 20% であり、ガス圧接継手位置で破断していた破断割合は平均 11.1% であった。本シミュレーションによって求められた平均はほぼ近い値となり、継手部強度間の相関係数 0.7 は適当な値であると考えられる。

シミュレーションで生じた継手部破断の分布状態の 1 例を表 4 に示す。図中の数字は、シミュレーションにおいて各柱に生じた継手部破断本数である。破断本数および 2 本以上の都異議継手部破断が生じる柱が存在することをシミュレーションで再現できた。

兵庫県南部地震の被害状況によると、建物によりガス圧接継手部破断割合はばらついていた。施工精度も原因の 1 つであると考えられるが、ガス圧接継手部の位置により継手にかかる応力状態が異なるため、継手部の位置が破断発生に影響すると考えられる。

外観調査では、20% の継手部が材端に存在していた事がわかっているが、材端に含まれている継手部の割合により破断の可能性が高くなると考えられる。材端部に 1 ~ 27% の継手部が含まれるとして同様のモンテカルロシミュレーションを行い破断する継手数求めた。結果を図 9 に示す。継手部が材端部に存在する場合、継手部にかかる応力が大きくなり破断する可能性が高くなる。材端部に継手部を設けないという鉄筋コンクリート構造計算規程が遵守されていればガス圧接継手における破断が多数発生する事による構造物の能力低下を免れられると考えられる。

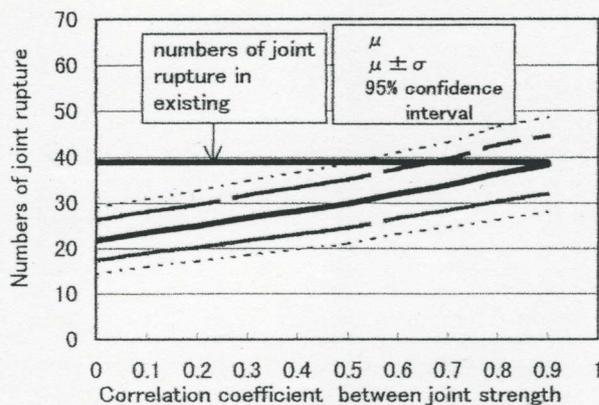


Fig.7 Ruptured joint numbers by Monte Carlo simulation

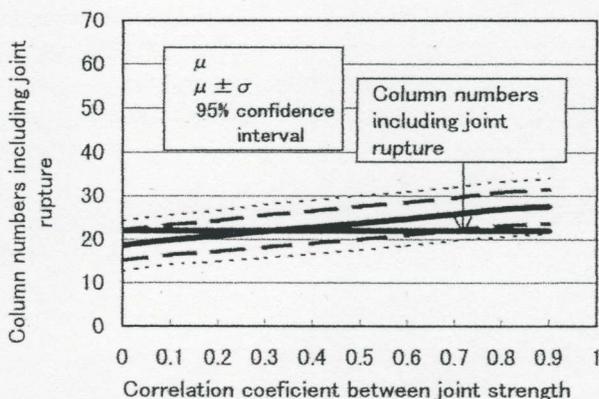


Fig.8 Column numbers including ruptured joints

Table 4 An example of ruptured joint numbers by simulation

Joint rupture numbers in every columns									
0	0	0	2	0	0	0	3	0	1
2	0	0	3	1	1	0	1	2	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	2	0	0	1	0	0	0	2
1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	2	0	0	1	0	0	2	

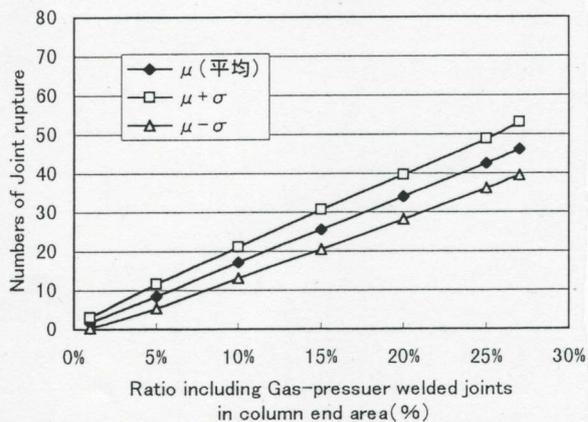


Fig.9 Influence by the ratio including joint in column end area

5. 一般建築物におけるガス圧接継手部の
破断分布状態に関する検討

鉄筋コンクリート構造物には、ガス圧接継手が多数使用されており、1本の柱に多くの破断が生じた場合、柱の耐力低下を起し、建物の破壊を誘発する危険性がある。

ここでは実際の建物被害例を参考にさまざまな規模の建築物について、継手部破断のシミュレーションを行い、その破断割合について検討を行う。シミュレーションを行う建物規模は、表5に示すとおりである。

被害建物例と同様、材端部に20%の継手が含まれるとし、破断強度に関しては全国データより得られた値をパラメータとする Gumbel 分布を用いた。同一柱におけるガス圧接継手は、同一技術者が行う可能性が高く検討結果より継手破断強度間の相関係数は $\rho=0.7$ と仮定した。

表5の各ケースについて1000回のシミュレーションを行い、破断数に対する平均値、標準偏差、ヒストグラムを求めた。図10に各ケースの平均値、 $\mu \pm \sigma$ を示す。ここに μ は平均値、 σ は標準偏差を表す。建物規模、継手数の設定などにより多少のばらつきはあるが、平均値は概ね10%程度となった。継手数の少ない小規模の建築物の場合、ばらつきが大きく $\mu \pm \sigma$ の範囲が広がるが、大規模な建築物の場合には、ばらつきが小さくなった。

破断数に関する確率分布は、対称性を示すものあるいは右側にひずみを持った分布となった。いずれの場合も適合する確率分布としては対数正規分布が妥当であると考えられる。継手部破断数のヒストグラムの例を図11および図12に示す。

建物全体の継手数が同じであっても柱本数と柱に含まれる継手数が異なる場合について比較を行ったところ、柱に継手が多く入っている場合には、多数の柱に継手が分散している場合より、わずかであるが破断する割合が高くなっている。従って、ガス圧接継手の破断に関してのみ考えると、できるだけ柱に分散して継手部を設置の方が良いと考えられる。

Table5 Numbers of columns and joints for simulation

No.	Column numbers	Joint numbers	No.	Column numbers	Joint numbers
C-10-5	10	5	C-100-5	100	5
C-10-10	10	10	C-100-10	100	10
C-10-15	10	15	C-100-15	100	15
C-10-20	10	20	C-100-20	100	20
C-30-5	30	5	C-150-5	150	5
C-30-10	30	10	C-150-10	150	10
C-30-15	30	15	C-150-15	150	15
C-30-20	30	20	C-150-20	150	20
C-50-5	50	5	C-200-5	200	5
C-50-10	50	10	C-200-10	200	10
C-50-15	50	15	C-200-15	200	15
C-50-20	50	20	C-200-20	200	20
C-70-5	70	5			
C-70-10	70	10			
C-70-15	70	15			
C-70-20	70	20			

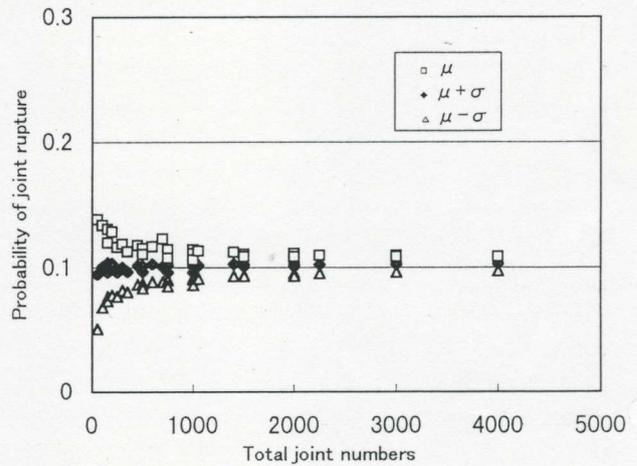


Fig.10 Results of the joint rupture simulation

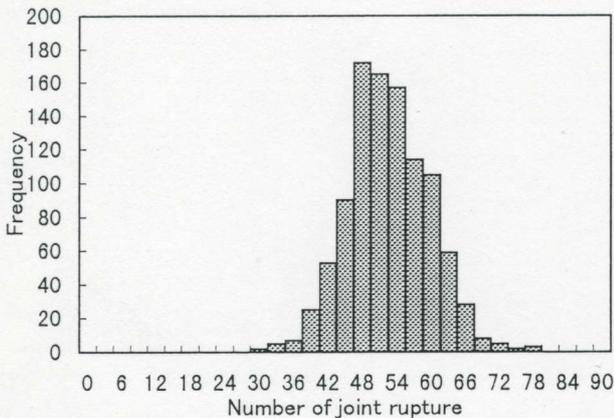


Fig.11 Histogram for the case of 50-columns and 10-joints

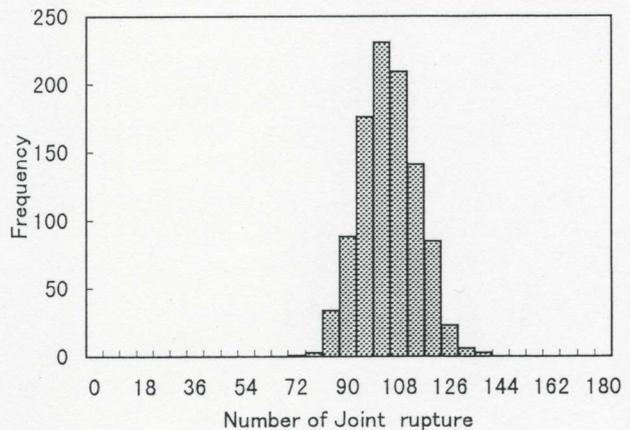


Fig.12 Histogram for the case of 100-columns and 10-joints

6. まとめ

ガス圧接継手部の破断強度の確率分布に関する検討を行い極値 I 型分布である Gumbel 分布が適当であることを示した。導いたガス圧接継手強度の確率分布および調査データに基づいたガス圧接継手位置を用いて、兵庫県南部地震の被害事例に関するガス圧接継手部破断発生状況を再現するモンテカルロシミュレーションを行った。ガス圧接継手強度間には、同じ技術者が施工する事を考慮し、相関係数 $\rho=0.7$ を設定した場合に最も近い値となった。

一般にガス圧接継手部は鉄筋の引張強さ以上の強度を持つよう設計されているが、鉄筋が引張強さに達する以前に継手部が破断する可能性がある。シミュレーションにより継手部の 20% が材端部に存在する場合継手部の破断発生割合は 10% 程度となった。なお規模の小さい建物における破断発生割合はばらつきが大きく、大規模な建築物の場合には破断発生数に対する変動係数は小さくなった。

参考文献

- 1) 日本圧接協会鉄筋のガス圧接工事標準仕様書, 2002
- 2) 田中礼治, 大須賀義善, 熊谷元行, 小沢昌弘, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 521 号, pp.95,1999
- 3) 田中礼治, 高橋利恵, 大須賀義善, 熊谷元行, 小沢昌弘, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 527 号, pp.133,2000
- 4) 田中泰明, 機械の研究, 第 48 巻, 第 9 号, pp.77, 1996
- 5) 田中礼治, 大須賀義善, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 393 号, pp.46, 1988