

実験データに基づく鋼構造柱梁溶接接合部の変形性能に関する統計的考察

野田 隆博

1. はじめに

地震時における建築物の変形量は構造躯体の損傷や被害程度と比較的良く対応する。したがって、性能明示型の設計法では変形量が性能を規定する有効な物理量となる。限界状態設計法の考え方に基づけば、建築構造物の安全性能は安全性に関して定義された限界状態を構造物の応答が超過する確率で評価される。したがって、構造物の安全性能を変形量に基づいて定量的に評価するためには、構造物が崩壊に至るまでの挙動に影響する各種不確定要因の統計的なデータが不可欠となる。

鋼構造部材の耐力に関しては比較的古くから多くの研究が進められており¹⁾、素材の降伏強度や初期たわみの変動などを考慮した耐力の統計量が提示されている²⁾³⁾⁴⁾。しかし、骨組が崩壊に至るまでの挙動を考えた場合、局部座屈による部材の耐力低下や溶接接合部の脆性破断など、部材や接合部の変形性能が構造物の性能に大きな影響を与える要因となってくるが、部材や接合部の変形能力について統計的な扱いをした研究⁵⁾は極めて少ない。

そこで本研究では、変形性能に基づいた鋼構造骨組の定量的な安全性評価のための基礎データとして、柱梁溶接接合部を対象とし、その塑性変形性能が有する不確定性を実験データから統計的に整理すると共にデータベース化し、データの共有を図る。次に、この統計量の考察を行うために、分類コードごとの推定母集団を求める。最後に、動的荷重下のシステム信頼性からみた接合部変形性能について検討を行う。

2. 文献調査に基づく柱梁溶接接合部の統計量調査

2.1 調査対象とした文献

本研究では鋼構造溶接柱梁接合部を対象とし、国内外で発表された諸論文、及び資料集より実験データを収集した。対象とした文献は以下に示す12誌であり、過去10年分である。

- 1) 日本建築学会構造系論文集
- 2) 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 3) 日本建築学会支部研究報告集
- 4) 土木学会論文集
- 5) 日本鋼構造機関紙
- 6) 鋼構造論文集
- 7) 構造工学論文集
- 8) 鉄骨工事 (JASS6) 運営委員会調査研究成果報告会資料集
- 9) 鉄骨接合部の限界状態の定量化とそれに基づく骨

組設計法

10) Journal of Structural Engineering, ASCE

11) The Structural Engineer

12) Engineering Structures

2.2 収集データの概要

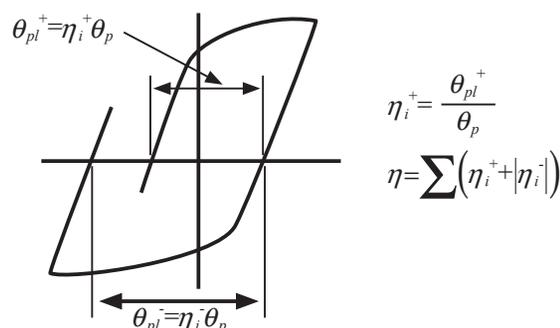
接合部の変形性能を表す指標には、回転角、最大塑性率、骨格曲線の吸収エネルギーに基づく塑性変形倍率、履歴曲線の吸収エネルギーに基づく累積塑性変形倍率などがある⁶⁾⁷⁾。本研究では、1) 柱梁溶接接合部の限界変形までの変形能力を表現できる、2) 以後に行う解析での扱いが容易である、の2つの理由から、図1に示すような履歴曲線に基づいた累積塑性変形倍率 η を変形性能を表す主な指標として扱った⁸⁾。

試験体形状におけるデータは鋼構造柱梁溶接接合部を対象としており、溶接接合を施していないもの、柱梁の材質に鋼材以外を利用した実験データは除外した。また、スカラップ形状は従来型、改良型、ノンスカラップ型であるが、梁形状がRBS工法による実験データにおいては、塑性化部分を梁端溶接部から母材部分に移行させることが目的であるので除外した。スカラップ形状は主に形状の大きく異なる三種類に、試験体に含まれる欠陥は特に記述がなければ「欠陥無」、溶接場所においても特に記述がなければ「工場溶接」とした。載荷方法による違いは、載荷速度による違いである。

また、接合部ディテール、実験条件、及び実験結果を整理し、これらを試験体ごとにまとめデータベースの製作を行う。

3. 塑性変形性能に関する統計量

3.1 試験体仕様、および実験条件による整理



θ_{pl}^+ : i 番目の正側履歴ループの塑性回転角

η_i^+ : i 番目の正側履歴ループの塑性変形倍率

θ_p : 梁の全塑性モーメント M_p に対応する弾性梁端相対回転角

図1 累積塑性変形倍率の定義

表 1 塑性変形能力を求める分類項目

シリーズ	分類コード	試験体形状	柱形状	鋼種	ダイヤフラム	スカラップ	エンドタブ	欠陥	載荷方法	溶接場所	破壊性状	n	μ	COV
T	T1	ト字型	*	*	*	*	*	*	*	*	*	200	46.7	0.72
	T2	十字型	*	*	*	*	*	*	*	*	*	24	29.4	0.67
C	C1	*	鋼管	*	*	*	*	*	*	*	*	201	47.0	0.70
	C2	*	H形	*	*	*	*	*	*	*	*	23	25.7	0.78
B	B1	*	*	SN	*	*	*	*	*	*	*	125	44.9	0.55
	B2	*	*	SM	*	*	*	*	*	*	*	17	44.7	0.62
	B3	*	*	SS	*	*	*	*	*	*	*	29	74.0	0.72
	B4	*	*	その他	*	*	*	*	*	*	*	53	28.5	0.81
D	D1	*	*	*	通し	*	*	*	*	*	*	169	47.5	0.73
	D2	*	*	*	内	*	*	*	*	*	*	30	45.2	0.47
	D3	*	*	*	スチフナ	*	*	*	*	*	*	21	27.2	0.75
	D4	*	*	*	その他	*	*	*	*	*	*	4	22.3	0.77
S	S1	*	*	*	*	従来	*	*	*	*	*	81	32.2	0.64
	S2	*	*	*	*	改良	*	*	*	*	*	113	50.1	0.58
	S3	*	*	*	*	無	*	*	*	*	*	30	59.1	0.91
E	E1	*	*	*	*	*	スチール	*	*	*	*	56	45.3	0.59
	E2	*	*	*	*	*	フラックス	*	*	*	*	119	46.8	0.79
	E3	*	*	*	*	*	その他	*	*	*	*	49	39.4	0.66
F	F1	*	*	*	*	*	*	無	*	*	*	209	46.3	0.71
	F2	*	*	*	*	*	*	有	*	*	*	15	24.6	0.87
L	L1	*	*	*	*	*	*	*	静的	*	*	199	46.3	0.71
	L2	*	*	*	*	*	*	*	動的	*	*	18	35.7	0.92
	L3	*	*	*	*	*	*	*	準動的	*	*	7	25.6	0.49
WP	WP1	*	*	*	*	*	*	*	*	工場	*	178	45.0	0.77
	WP2	*	*	*	*	*	*	*	*	現場	*	46	43.8	0.50
P	P1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	脆性破断	185	36.5	0.60
	P2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	その他	39	84.2	0.52
SBE	SBE1	ト字型	鋼管	SN	通し	従来	スチール	無	静的	工場	*	10	35.4	0.42
	SBE2	ト字型	鋼管	SN	通し	従来	フラックス	無	静的	工場	*	9	40.5	0.39
	SBE3	ト字型	鋼管	SM	通し	従来	スチール	無	静的	工場	*	4	34.3	0.27
	SBE4	ト字型	鋼管	SM	通し	従来	フラックス	無	静的	工場	*	2	33.0	0.00
	SBE5	ト字型	鋼管	SS	通し	従来	スチール	無	静的	工場	*	1	20.7	-
	SBE6	ト字型	鋼管	SS	通し	従来	フラックス	無	静的	工場	*	2	53.6	0.14
	SBE7	ト字型	鋼管	SN	通し	改良	スチール	無	静的	工場	*	11	48.1	0.63
	SBE8	ト字型	鋼管	SN	通し	改良	フラックス	無	静的	工場	*	22	59.3	0.20
	SBE9	ト字型	鋼管	SM	通し	改良	スチール	無	静的	工場	*	5	34.6	0.20
	SBE10	ト字型	鋼管	SM	通し	改良	フラックス	無	静的	工場	*	0	-	-
	SBE11	ト字型	鋼管	SS	通し	改良	スチール	無	静的	工場	*	3	54.7	0.44
	SBE12	ト字型	鋼管	SS	通し	改良	フラックス	無	静的	工場	*	7	98.9	0.49
	SBE13	ト字型	鋼管	SN	通し	無	スチール	無	静的	工場	*	0	-	-
	SBE14	ト字型	鋼管	SN	通し	無	フラックス	無	静的	工場	*	1	44.8	-
	SBE15	ト字型	鋼管	SM	通し	無	スチール	無	静的	工場	*	3	99.7	0.21
	SBE16	ト字型	鋼管	SM	通し	無	フラックス	無	静的	工場	*	0	-	-
	SBE17	ト字型	鋼管	SS	通し	無	スチール	無	静的	工場	*	0	-	-
	SBE18	ト字型	鋼管	SS	通し	無	フラックス	無	静的	工場	*	0	-	-

*は分類分けを行っていない

柱梁接合部の塑性変形性能は、部材の材質や試験体形状の違いなどにより変化する。これら複合する要因を含む項目を検討するには、まず要因別に分類しなければならない。そのため、本章では前章に挙げた仕様を実験データ分類のための条件とし、表1に示すような分類コードを設けて整理を行った。分類コードT～Pシリーズは単独の仕様を条件とした分類、SBEシリーズは鋼種、スカラップ形状、エンドタブをパラメータとした分類である。設計あるいは施工段階であらかじめ確定できる要因が分類の条件となるべきであり、表1の仕様以外にパス間温度管理、溶接材料、施工工場の認定グレードなどの要因が考えられるが、今回の調査では分類の対象とはしていない。

3.2 塑性変形性能に関する統計量

各分類コードにおける対象試験体数 n と、分類内での η の平均値 μ 、及び変動係数 COV を表1に示す。T～Pシリーズを見ると、COVは0.5～0.9と広い範囲に分布しており、その値も比較的大きい。また、

同一シリーズ内での n に偏りがみられる。これは過去10年間において、重点的に実験が行われた項目であると考えられる。そこで、T～Pシリーズでの n が多い項目を考慮し、分類条件を絞り込んだ。それがSBEシリーズである。対象試験体数が0体となる分類も存在しているが、T～Pシリーズと比べると全体的にCOVが小さくなっている。

図2に対象試験体数が原則として3体以上となった分類コードにおける η のヒストグラムを示す。また、同図中の実線は、 η の μ と COV を持つ対数正規確率密度関数を表す。分類コードによっては十分なデータ数が得られていないものもあるが、分類コードに対応するデータ数が最も多いSBE8(図2(b-2))を見ると、数学的な確率モデルである対数正規分布と極めてよい対応をしており、不確定な要因として取り扱わざるをえない η の統計的性質が抽出されているものと考えられる。なお、この分類コードにおける μ は59.3、COVは0.20であった。他の分類コードにおいても今後データベースが充実することに

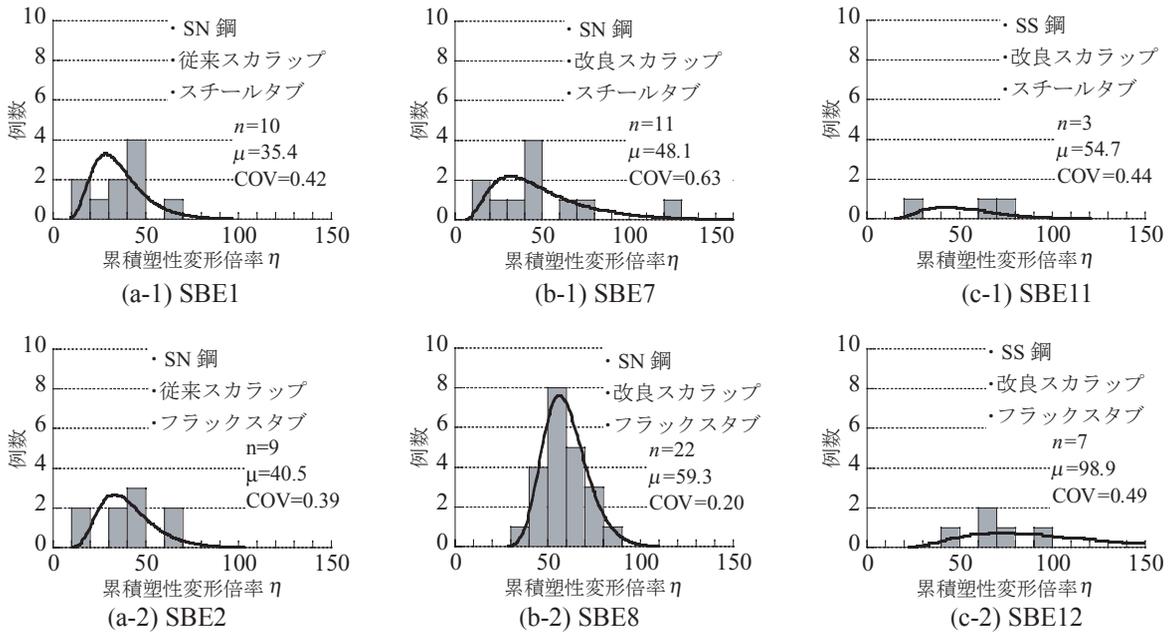


図2 塑性変形性能に関する統計量

よって同様な統計的性質が明らかになってくるものと考えられる。

4. 確率モデル化に伴う推定母集団での考察

4.1 最尤法に基づく母集団の推定

統計量は標本値であり、元来、確率モデルのパラメータは母集団で評価する必要がある。ことから本章では母数を推定し、それに基づき考察を行う。

まず、統計量等の不規則現象を考察する場合に分布形を決定することは、その現象の確率特性を明確に表現でき考察しやすい。そこで、変形性能を表す η の定義域が正の値のみであることを考慮した上で、母集団が対数正規密度関数に従うと仮定し、最尤法を用いて分類コードごとの母数を算出する。これらのデータは母集団 (λ, ζ) (λ と ζ は母集団の平均値と標準偏差) からの標本抽出が無作為であるとして行うことができることから、 n 個の独立な観測値 $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \lambda, \zeta)$ が実現する確からしさは尤度関数として表せ、2 個以上の母数を持つ密度関数に対しては、(1) 式のようなになる。

$$L(x_1, \dots, x_n; \lambda, \zeta) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x_i - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

この推定量を得るには(1)式から λ, ζ について微分し、微分係数を 0 とおけばよく、これらから (2)、(3) 式が得られる。

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i)}{n} \quad (2)$$

$$\hat{\zeta}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \hat{\lambda})^2 \quad (3)$$

したがって、分類コードごとの標本値を (2)、(3) 式に代入することで、推定母集団とすることができる。

4.3 推定母集団による考察

柱梁接合部が持つ最小の変形性能を知るために、推定母集団にて確率分布関数を求め、非超過確率が 90%、95%、99% となるような η の下限値を分類コードごとに整理し、図 3 に示した。従来スカラップより改良スカラップ、スチールタブよりフラックスタブと変更すれば、 η が大きくなることは既往の研究⁹⁾でも言われている。下限値で見てもこれらと同様な結果となっており、中でも改良スカラップ・フラックスタブの関係が最も大きな値となっている。しかし、スチールタブを使用した従来スカラップと改良スカラップの間ではあまり変化は見られない。また、対象試験体数の都合によりノンスカラップ工法においてはスチールタブの結果しか得られていない

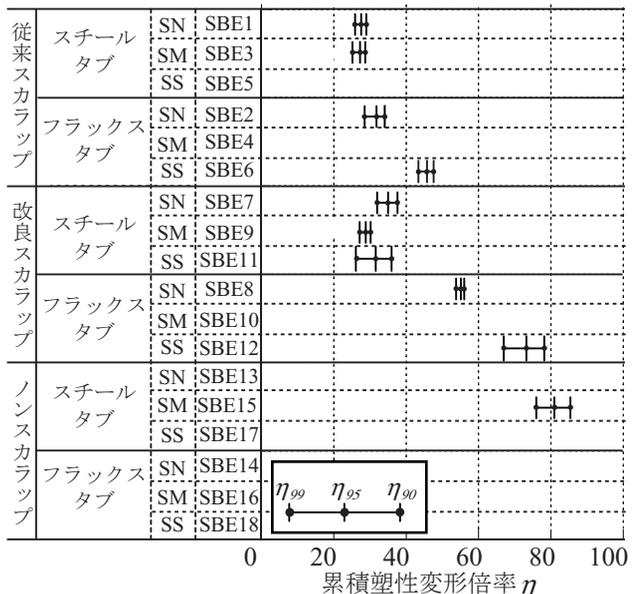


図3 分類コードごとにおける η の下限値

表 2 等価 1 自由度系の解析モデル

等価質量 $m(t)$	等価剛性 $k(kN/mm)$	降伏震度 q_v	等価減衰定数 h_e
3.9×10	2.4×10^2	4.7×10^{-1}	$h_e = \alpha \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) + h_0$

但し $\alpha=1.5$ 、初期減衰定数 $h_0=2.0(\%)$

が、従来スカラップ及び改良スカラップの傾向を考えるとフラックスタブを使用すればさらに η が大きくなると考える。

5. 動的荷重下の骨組応答変位からみた接合部仕様の差

前章では接合部変形性能特性として、累積塑性変形倍率 η の統計量を提示した。しかし、 η は構造要素レベルの特性であり、構造安全性の検討はシステムの特性との関係の中で議論されるべきである。そこで本章では、分類コードごとの特性の差が、動的荷重下におけるシステム信頼性に及ぼす影響からみた検討を行う。

5.1 骨組の解析モデル

まず、建築構造システムの解析モデルとして、全体崩壊型の 2 層 1 スパンの鋼構造骨組を想定する。次に各柱梁接合部の変形性能に前章で示した確率モデルを当てはめモンテカルロシミュレーションを行う。シミュレーションでは、柱梁接合部の累積塑性変形量が接合部の累積変形性能に達した時点で破断が起こり、負担応力が他の要素に再配分されるものとして解析を行った。脆性挙動を含むシステムの信頼性解析には、等価な並列モデルを用いる手法によった¹⁰⁾。建物モデルの諸パラメータを表 2 に示す。入力地震波は最大速度 y' を基準化した *El Centro NS* とする。 y' には名古屋における 50 年最大速度の統計

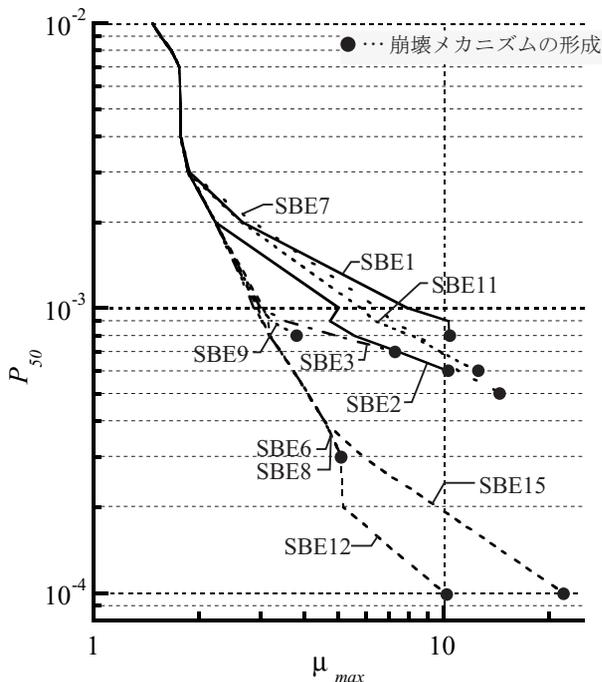


図 4 P_{50} と μ_{max} の関係

量を用い、その速度統計量を持つ地震波の 50 年最大加速度分布の非超過確率 P_{50} に対応する最大加速度 y''_{max} で入力波をスケールした。

5.2 骨組応答から見た接合部仕様の差

図 4 は動的荷重下における骨組の最大塑性率 μ_{max} を、入力地震波の最大加速度に対応する 50 年最大値の非超過確率 P_{50} との関係で示したものである。また、各曲線の先端の●は、骨組が崩壊メカニズムを形成した点である。 $y''_{max}=500gal$ 相当の $P_{50}=3.0 \times 10^{-3}$ までは分類コードによる μ_{max} の差は現れないが、 P_{50} がそれ以下になると分類コードごとに差が生じ、変形性能の低い SBE1、9 では $y''_{max}=840gal$ 相当の $P_{50}=8.0 \times 10^{-4}$ で最も早く崩壊に至っている。一方、変形性能の大きい、SBE12、15 では崩壊メカニズムに達するのは $y''_{max}=1,900gal$ 相当の $P_{50}=1.0 \times 10^{-4}$ である。本分類コードで対象とした様な接合部仕様では骨組崩壊に対応する荷重の超過確率において $10^{-3} \sim 10^{-4}$ の範囲である。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 接合部ディテール、実験条件、及び実験結果等を試験体ごとに記し、柱梁溶接接合部のデータベースを製作した。
- 2) 柱梁溶接接合部の変形能力を仕様別に分類し統計処理を行うことにより、図 2 のような統計量を提示した。また十分なデータ数が得られれば、柱梁接合部の変形性能は統計的に扱う物理量であることを示した。
- 3) 統計量の標本値から、推定母集団を最尤法によって求めることにより、分類コードごとの下限値を示した。
- 4) 柱梁溶接接合部の仕様の違いにより、骨組の最大塑性率と崩壊時の入力レベルとの関係を明らかにした。

【参考文献】

- 1) 坂本 順、小浜芳朗、大宮幸男：信頼性設計法に関する考察 [I]、[II]、学会論報、第 298 号、昭和 55 年第 305 号、昭和 56 年
- 2) 小野徹郎、平野富之：実験データに基づく鋼構造部材の耐力に関する統計論的考察 (I)、学会論報 第 328 号昭和 58 年 6 月
- 3) 坂本 順、小浜芳朗、大宮幸男：鋼構造部材強度の確率統計論的考察、学会論報、第 296 号昭和 55 年 10 月
- 4) 藤本盛久、岩田 衛、中谷文俊：鋼圧縮材の座屈強度の確率論的方法による研究、学会論報、第 229 号昭和 50 年
- 5) 松井康治、伊山 潤、桑村 仁：鉄骨部材の脆性破断変形能力とひずみ能力の確率分布、関東支部研究報告集、1998 年
- 6) 中込忠男、他：学会構造系論文集、1997 年 9 月
- 7) 鋼構造接合部の力学性能と設計法、日本建築学会 1996 年 10 月
- 8) 井上一朗、他：鋼構造論文集、Vol.4 1997 年 12 月
- 9) 鉄骨工事 (JASS6) 運営委員会 調査研究成果報告会資料集、日本建築学会・材料施工委員会鉄骨工事運営委員会、2000 年 11 月
- 10) 山崎賢二、伊藤貴紀、井戸田秀樹：脆性挙動のランダムな発生を考慮したシステムの信頼性解析、学会梗概集 2002 年 8 月