

### 鋼材の素材特性を考慮した耐震設計手法の提案

#### Propose for Seismic Resistance Design Method Considering Material Properties of Steel

○新井佑一郎<sup>1</sup>, 清水俊介<sup>2</sup>, 千田光<sup>3</sup>, 半貫敏夫<sup>1</sup>, 秋山宏<sup>4</sup>

\*Yuichiro Arai<sup>1</sup>, Shimzu Shunsuke<sup>2</sup>, Senda Hikaru<sup>3</sup>, Toshio Hannuki<sup>1</sup>, Hiroshi Akiyama<sup>4</sup>

**Abstract:** Brittle fracture of steel structural elements is unstable phenomenon. To construct a structural design procedure referencing unstable brittle fracture of elements is a difficult problem. A proposal for structural design method is presented in this study. The brittle fracture of structural elements is referenced systematically in the new structural design flow. The design criteria to prevent the brittle fracture of structural elements are presented as a rank of safety of the steel structure.

#### 1. はじめに

一般に大地震時に、骨組みを弾性範囲にとどめることは困難であり、現行の鋼構造建築物の耐震設計では、骨組み要素の塑性変形能力が重要視されている。構造物が十分な塑性変形能力を発揮するには、鋼素材が引張強さに達するまで部材が安定的に挙動する必要がある。しかし、脆性破壊は鋼材の作用応力が引張強さ以下で発生するため、耐震設計の前提である塑性変形能力の低下に繋がる。以上から、構造物の耐震性能を確保するためには、脆性破壊を回避するような設計の配慮が必要となる。しかし、鋼構造部材の脆性破壊は不安定な現象であり、設計法として回避条件を一般化させることは難しい。

兵庫県南部地震以降の研究<sup>1)~7)</sup>などから、Charpy 衝撃試験と実大部材の耐力・塑性変形能力に対応性が検討された。この結果から、脆性破壊を防止し耐力を保証する条件が、日本建築センターのガイドライン<sup>8)</sup>により示された。しかし、ガイドラインに示される条件は Charpy 吸収エネルギーの絶対値( $E > 70J$ )のみに注目した指標であり、素材特性の多様性を考えると不安が残るのも事実である。また、最近の研究では Charpy 衝撃試験から評価できる吸収エネルギー遷移曲線を用いた部材の終局耐力評価法も提案されている<sup>9)</sup>。

本論では、兵庫県南部地震以降の研究<sup>1),2),6)</sup>や、近年報告された新しい知見<sup>3),4),5),7)</sup>を用いることで、鋼構造部材の脆性破壊防止だけではなく、部材の耐震性能を向上させる設計条件を提案する。

#### 2. Charpy 吸収エネルギー遷移曲線を用いた部材の耐力評価

Charpy 衝撃試験から評価される吸収エネルギー遷移曲線を実大部材の耐力評価に適用した例<sup>5)</sup>を示す。Fig.1 は最大耐力比—USE 比関係を示す。ここで最大耐力比は、実験による最大梁端モーメント  $M_u'$  を、素材試験から予測した梁端終局モーメント  $M_u$  で除したものである。USE 比  $R_{USE}$  は吸収エネルギー遷移曲線の相対的な位置関係に注目した指標で、式(1)のように定義される。

$$R_{USE} = \frac{vE}{vE_{USE}} \quad (1)$$

$vE$ : Charpy 吸収エネルギー  $vE_{USE}$ : 上部棚吸収エネルギー

なお USE 比と Charpy 吸収エネルギーの関係は、素材により異なるものの、概ね  $R_{USE}=0.2\sim0.45$  で  $E=70J$  と対応する。

Fig.1 から、USE 比が 0.1 以下の領域では最大耐力比が 1.0 を下回り、 $0.2 < R_{USE} < 0.4$  の領域で最大耐力が上限に達していることがわかる。また、 $0.2 < R_{USE} < 0.4$  を上回る領域では破壊形式も脆性から延性に遷移する。

Fig.2 は最大耐力比(延性破壊時)—上部棚吸収エネルギーUSE 関係を示す。素材の上部棚吸収エネルギーUSE が高まるにつれ、延性破壊時最大耐力比も上昇していることがわかり、その相関性が強いことも確認された。特に上部棚吸収エネルギーUSE が 200~250J になると、延性破壊時最大耐力比が 1.2 以上、300J 以上では 1.3 と高い値を示した。部材耐力が上昇すると、部材の塑性変形能力も向上するため、USE が高い素材を用いることで構造物の耐震余裕度が高まることを意味する。しかし、Fig.2 に示す関係は破壊までの加力

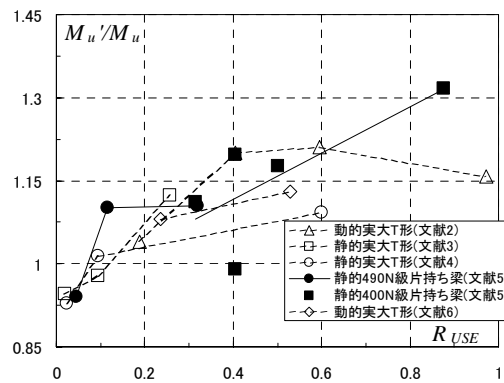


Fig.1 Relation between  $M_u'/M_u$  and USE ratio.

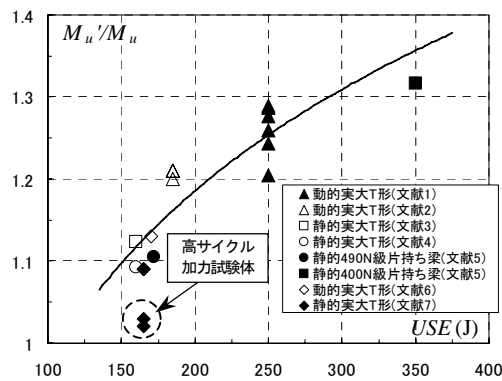


Fig.2 Relation between  $M_u'/M_u$  and USE

1 : 日本大学理工学部 College of Science and Technology, Nihon Univ. 2 : 日本大学大学院 Graduate school of Science and Technology, Nihon Univ. 3 : 住友金属工業(株) Sumitomo Metal Industries Co., Ltd. 4 : 東京大学名誉教授 Prof., Emeritus, Univ. of Tokyo, Dr. Eng

パターンが数回程度の低サイクル大振幅のものであり、載荷条件が限定的である。加力パターンを変化させ、比較的高サイクルで破壊させた実験では、最大耐力比の低下が確認された。このため、今後は加力パターンが部材耐力に及ぼす影響についても検討する必要がある。

### 3. 遷移曲線による耐力評価手法を反映した鋼構造部材の設計フローの提案

2 節に示す実大実験から整理された知見を用い、脆性破壊を考慮した耐震設計フロー(Fig.3)を提案する。Fig.3 中のルート A は、文献 8)に示されるものである。本論では、構造物の重要度判定を追加し、 $\mu E > 70J$  以外のルートとしてルート B, C を追加した。各ルートについて解説する。

ルート A では部材耐力が概ね予測値以上になることが設計目標となり、一般的な構造物の設計においては十分な耐震性能が確保できるものと考えられる。ただし部材の破壊モードは脆性破壊になる可能性もあり、予測耐力を確保できない場合もあり得る。

ルート B では、部材の延性破壊を保証することを目標としている。延性破壊は脆性破壊と比較して安定した破壊モードであり、部材耐力が予測値を下回る確率が低下する。このためには使用環境における  $\mu E$  を 70J から適宜割り増しするか、吸収エネルギー遷移曲線を用いた詳細な検討(USE 比など)が必要になる。既往の実大実験から 100~150J 程度あれば脆性破壊しないと報告されているため、 $\mu E$  の割り増し係数は 70J に対して 1.5~2 倍程度が適当と考えられるが、今後更なる検討が必要である。吸収エネルギー遷移曲線を用いた検討は、USE 比が 0.4~0.5 以上であることを確認できれば延性破壊が保証できると考えられる。

ルート C では、設計想定を超える地震時においても倒壊や崩壊が許容できない重要構造物を対象としている。これは、構造部材の強度余裕度を高めることにより塑性変形能力を高め、振動エネルギーを吸収させることで実現する。そのためには、まず延性破壊を保証するために、吸収エネルギー遷移曲線を用いた評価を行い、USE 比が 0.4~0.5 以上であることを確認する。そして、部材の耐力余裕度を高めるために、素材の上部棚吸収エネルギー USE の下限値を設定する。

### 4. まとめと今後の課題

本論では、既往の実大実験結果を整理し、脆性破壊を考慮した耐震設計手法を提案した。Charpy 衝撃試験から評価される吸収エネルギー遷移曲線を積極的に利用することで、構造物の重要度に応じた設計が可能であることが示された。

今後の課題としては、加力サイクルが部材の耐力と塑性変形能力、破壊形式に与える影響や、近年大規模構造物に用いられることが増えた高強度鋼材と破壊の関係についての調査が必要である。

#### 【参考文献】

- 1) 秋山宏, 山田哲, 松本由香, 松岡三郎, 小倉桂治, 北村春幸: 実大振動台実験による柱梁接合部の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.165-172, 1998.10
- 2) 秋山宏, 山田哲, 松本由香, 松岡三郎, 大竹章夫, 杉本浩一: 実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊-脆性破壊遷移, 日本建築学会構造系論文集, No.522, pp.105-112, 1999.8
- 3) 岩佐州紘, 新井佑一郎, 半貫敏夫, 秋山宏: 実大鋼構造柱梁接合部の延性破壊-脆性破壊遷移実験, 日本鋼構造協会 鋼構造論文集, No.50, pp.45-56, 2006.6
- 4) 新井佑一郎, 半貫敏夫, 秋山宏: 従来型スカラップ工法による実大鋼構造柱梁接合部の延性破壊-脆性破壊遷移実験, 日本建築学会構造系論文集, No.631, pp.1649-1657, 2008.9
- 5) 新井佑一郎, 小中孔明, 半貫敏夫, 秋山宏: Charpy 衝撃試験特性が鋼構造部材の耐力に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No.648, pp.357-365, 2010.2
- 6) 松本由香, 山田哲, 岡田健, 井出匡俊, 竹内徹, 竹内悦男, 小川信行, 秋山宏: 実大振動台実験における鋼構造柱梁接合部の破壊性状と変形能力評価, 日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.181-188, 2002.10
- 7) 片山浩一, 井垣良也, 松本由香: スカラップと載荷履歴をパラメータとした柱梁接合部破壊実験, 2009 年度日本建築学会関東支部研究報告集 (No.2035 CD-ROM), 2010.3
- 8) 鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説, 日本建築センター, 2003.9

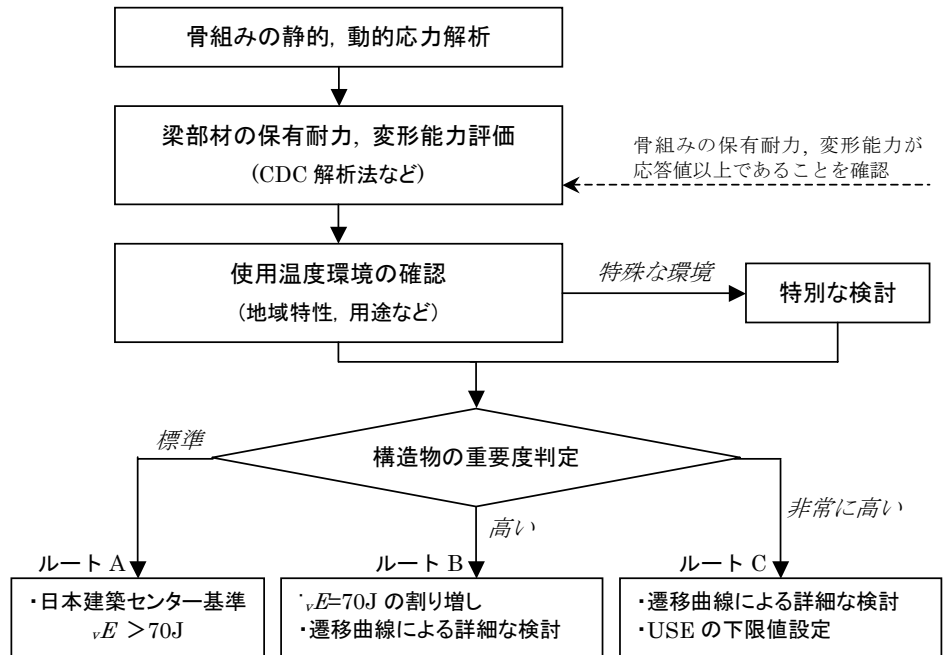


Fig.3 Design flow of steel structure considering material properties