

木質ラーメン構造物に用いる接続用金物の変形解析

塩田 祐久* 藤森 資希**

Deformation Analysis of Steel Connector on Timber Frame Structures

Hirohisa SHIOTA and Yoshiki FUJIMORI

The deformation analysis was performed for the box-type steel connector on timber frame structures using the elastic-plastic finite-element method(FEM). The development of the plastic deformation zone was shown through the FEM analysis. The results indicated that the load vs. displacement relationship of the connector was markedly influenced by the base-plate thickness. Moreover, for optimum design of this connector, it was important that the side-plate thickness was almost the same as the base-plate thickness.

Key words: Timber frame structure, Box-type steel connector, Finite-element method

1. はじめに

近年、集成材技術の進歩により体育館や公民館などの中規模施設が木質構造物で建てられている。このような施設は多人数で使われることが多いため、筋かいや耐力壁のない柱と梁のみで構成されたラーメン構造を使って建物の出入口に大開口部が作られる。ところで、ラーメン構造では梁と柱の間でモーメントを伝達する必要があるため、それに耐え得る接合部が必要となる。一方で、建物の施工に際して接合部は作業の手間にかかる箇所であるため、簡単に組み付けができるものでなくてはならない。そのような要求のもと、ラーメン構造用の接合部品としてラグスクリュウボルト（以下、LSB）が開発された¹⁾。LSBは施工性が良く、いろいろな接合金物を使用できるという特徴があり、今後さらに実用化が広がると思われる。ところで、LSBを使用した接合部における破壊としては、集成材の割裂破壊²⁾、LSBの引抜け³⁾、LSBと接合金物を締結するボルトの破断などに起因することが考えられており、これらはいずれも構造物としては脆性的な破壊であるため、実用上問題視されている。このため現在、LSBを保持する接合金物を工夫することにより、このような脆性的な破壊が起こる前に接合金物を変形させ、接合部で変形とエネルギー吸収を起こさせることが試みられており⁴⁾、テーパナットとちぎり金物を組み合わせた金具⁵⁾、箱型金物⁴⁾、せん断抵抗棒と連結金物を使用したもの⁴⁾などが提案されている。

これらの中で大きな変形能を持つと考えられるのが箱型金物である。これは鋼板を箱状に溶接したもので、接合する木材間に挿入し、木材にねじ込んだLSBの他端をこの金物に固定するというものである。これによりLSBによる固定作業が簡単になるとともに、構造物に大きな変形が生じたとき箱型金物が塑性変形することで脆性的破壊が起こる前に変形量を稼ぐことが期待できる。しかし、上述した脆性的な破壊を起こす荷重に対して箱型金物が適当な塑性変形を起こすためには、金物を適切な材料と板厚で作製しておく必要がある。

このような背景のもと、これまで箱型金物を構成する材料の特性と板寸法を使って、引張力が作用したときの金物全体の初期剛性や耐力を予測する試みがなされている⁴⁾。しかし、金物の塑性変形を考慮したうえで板厚の適性を調べた報告はない。

そこで本研究では、箱型金物について有限要素法による弾塑性解析を行い、金物における荷重と変形量の関係と変形の様相を調べ、それらに影響を及ぼす因子について考察し、板厚の選定に関する指針を検討する。

2. 箱型金物とLSBを組み合わせた接合方法

図1に箱型金物の実物写真とモデル図を示す。以後、ボルト穴の開いた2面の板をベースプレート（BP）、それらの側面に位置する面のうち底面を除く2面の板をサイドプレート（SP）、底面の板を底板と呼ぶ。また、図2に箱型金物とLSBを組み合わせた梁と柱の接合状態を模式的に示す。このような接合方法は木質構造物以外では一般的ではないので、以下に概要を説明する。梁と柱を接続する前に、LSBを梁および柱にねじ

原稿受付 平成25年8月30日

*機械工学科

**津山工業高等専門学校専攻科 平成24年修了生

(現 マツダ株式会社)

込んでおく。このときボルトの他端は木材から出た状態になっている。次に、箱型金物の穴に木材から出ている LSB の端を通し、ナットで固定する。一般に、梁および柱どちらに対しても LSB を 4 本使用する。このように金物を介して梁と柱を接続する手法である。

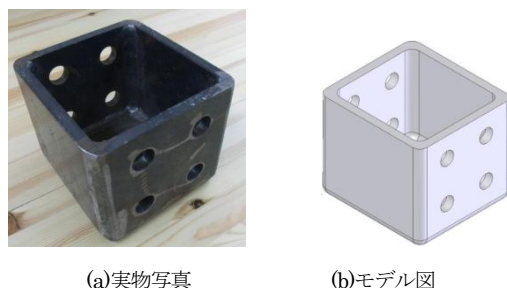


図1 箱型金物

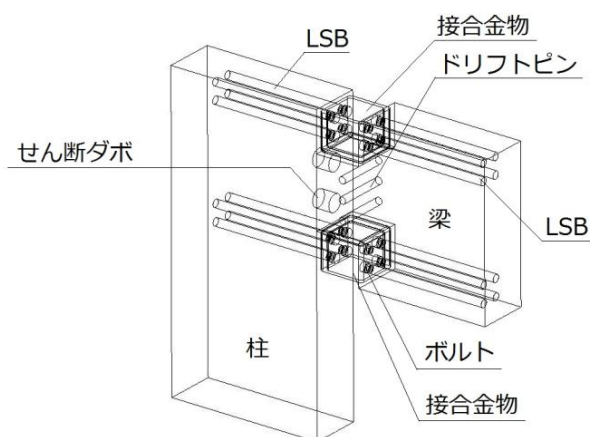


図2 箱型金物と LSB の取付模式図

3. 解析方法

3. 1. 解析条件

有限要素法解析ソフトとして ANSYS 12.0 Workbench を使用し、弾塑性解析を行った。また、実物の接合金物を用いた引張試験の結果⁹⁾と比較することを考慮し、解析でも箱型金物を引張試験用治具に取り付けた状態で引張負荷を加えた。

解析は BP および SP の板厚を変えた接合金物に対して行った。解析に用いた板厚の組み合わせを表 1 に示す。なお、板厚を変えときは、Model A を基準として箱型金物の内寸は変えず、箱の外寸を変化させた。

表1 箱型金物の板厚の組み合わせ (単位:mm)

Model	A	B	C	D	E	F
BP	9	9	16	30	12	9
SP	9	12	9	12	30	30

箱型金物に使用する材料の力学特性を表 2 に示す。ヤング率、降伏応力および引張強さは本研究で同じ材料の引張試験を行って得られた値である。また LSB に用いられている材料の力学特性を表 3 に示す。

表2 箱型金物に用いた材料の力学特性

材質	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 [-]	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]
SS400	206	0.3	337	460

表3 LSB の材料の力学特性

材質	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 [-]	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]
SCM435	206	0.33	1100	1200

3. 2. 解析モデル

箱型金物を引張用治具に取り付けた全体図を図 3 に示す。実際の解析は対称性を考慮して 4 分の 1 部分について実施した。なお、箱型金物の板のない面を開口側と呼ぶ。治具先端部の穴をピン拘束し、単軸引張負荷を加えた。穴は治具の長手方向にのみ直進するように拘束し、ピン穴中心の回転は自由とした。

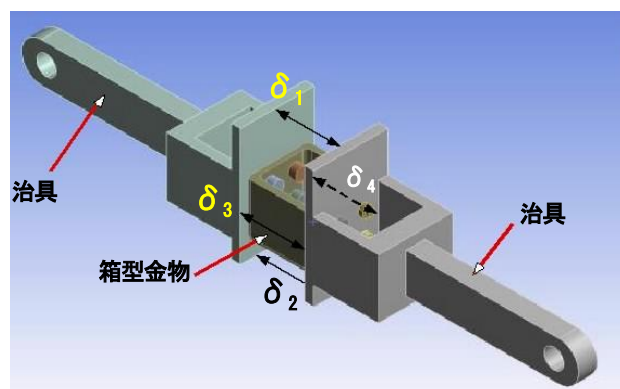


図3 箱型金物と治具を接合した全体図

図 3 の解析モデルにおいて治具の両端に引張負荷を加えると、開口側の変形が底板側より大きくなるように回転する。そこで、箱型金物全体の変形量として、回転のみによって生じる伸びを除いた変位 δ を下の式から求めた。

$$\delta = (\delta_3 + \delta_4) / 2 - \delta_R$$

ここで、

$$\delta_R = (\delta_1 + \delta_2) \times a / 234$$

$$a = 92 - (\delta_2 / (\delta_1 + \delta_2)) \times 234$$

δ_1 および δ_2 は治具の突出部分先端の距離の変化であり、 δ_1 は開口側、 δ_2 は底板側である。 δ_3 および δ_4

は両 SP 側の治具間距離の変化である。これらは、実物の箱型金物の引張試験で変位を測定した箇所と同じ位置であり、図 3 に併記してある。

4. 解析結果

4. 1. 箱型金物全体の荷重—変形量関係

板厚のすべての組み合わせで得られた荷重と変形量の関係を取りまとめて図 4 に示す。BP の厚さだけを変化させた場合、BP の厚さが増加すると箱型金物の変形抵抗が顕著に増加する。また、BP の厚さを変えた場合に比べ、SP の厚さのみを変えた場合は荷重と変形量の関係にあまり大きな影響を与えないことがわかる。したがって、金物全体に生じる変形量を変える場合は BP の厚さを調節する必要がある。

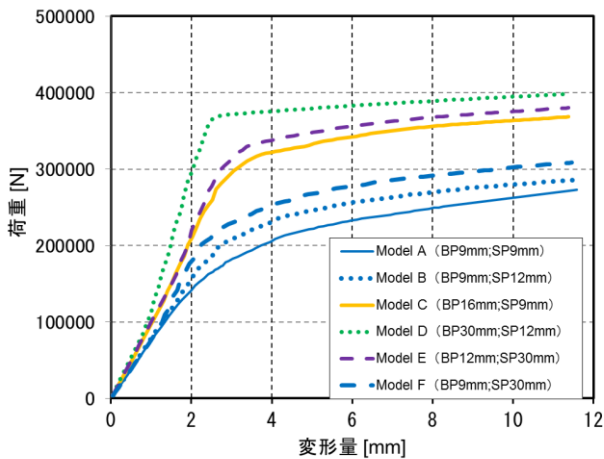


図 4 板厚を変えた場合の荷重—変形量の関係の変化

4. 2. 箱型金物の変形過程

Model B におけるひずみ分布の様子を図 5 および図 6 に示す。図 5 は降伏が起こる前の弾性ひずみの分布である。また、図 6(a)～(d)は荷重の増加にともなう相当塑性ひずみ分布の変化の様子を示している。いずれの図も、左の図が金物の 4 分の 1 部分の外面を右の図が内面を示している。なお各図では、それぞれの強制

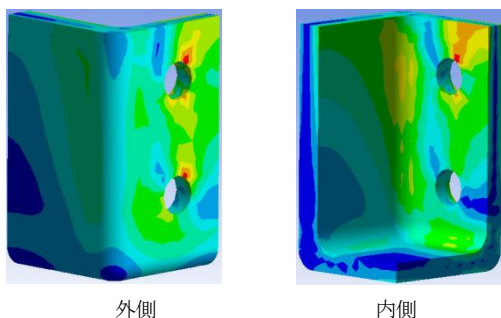
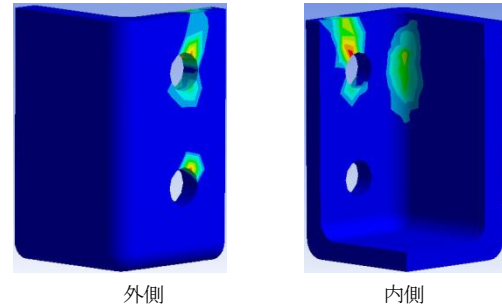


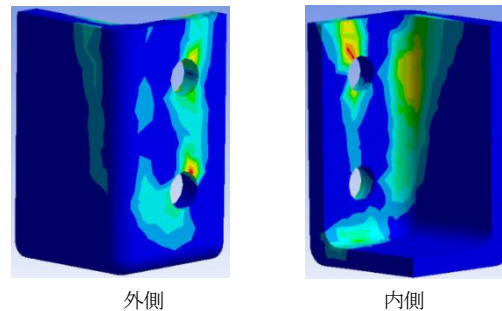
図 5 Model B における弾性ひずみの分布

変位において接合金物に生じているひずみの最大値から最小値の間を等分割して色分けしてある。したがって、各色に対応するひずみの絶対値は図によって異なる。そのため、これらの図ではひずみの絶対値の変化ではなく、ひずみの領域が拡大していく過程を定性的に観察する。

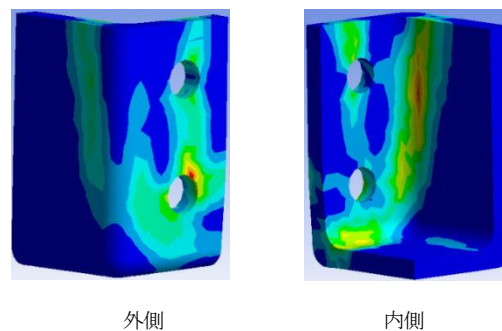
図 5 より弾性ひずみは BP のボルト穴周辺から自由端までの範囲および金物内側 R 部分とその周辺に集中



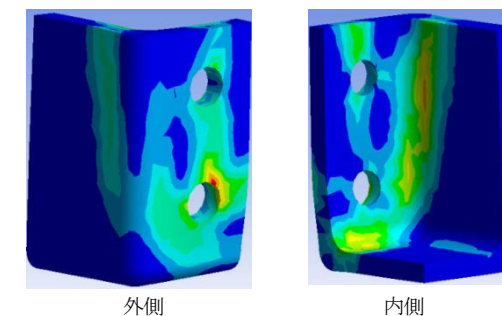
(a) 強制変位 0.95 mm



(b) 強制変位 1.49 mm



(c) 強制変位 3.89 mm



(d) 強制変位 6 mm

図 6 Model B における相当塑性ひずみの進行過程

し、いずれでも自由端に近づくほど大きくなっている。また図6より、相当塑性ひずみはまず大きな弾性ひずみが生じていたボルト穴周辺と金物内側R部分の開口側で生じ、荷重の増加とともにそこからボルト周辺と内側R部分に広がっていく。相当塑性ひずみはこれらの箇所局所的に大きくなり、BPとSP、底板の境界内側近傍に集中する。このことから、箱型金物は開口側が開くように変形するが、全体で生じている変形のほとんどはBPの端のR部分とボルト穴付近の変形に起因するBPの湾曲によるものであると考えられる。

4. 3. 板厚差の影響

SPとBPの板厚の差が比較的小さい組合せであるModel A, Model B, Model Cではひずみ分布および変形過程の傾向に大きな差は見られなかった。これらの板厚の組合せでは図6で示したとおり、塑性変形の領域はBPのR部内側周辺とボルト穴周辺に集中していた。

次に、相対的な厚さの違いの影響を調べるために、BPあるいはSPの板厚を他方に対して厚くした金物の解析結果を図7および図8に示す。図7はModel D (BP: 30mm, SP: 12mm)の様子であり、図8は、Model F (BP: 9mm, SP: 30mm)の様子である。

図7より、BPの板厚が厚い場合、相当塑性ひずみはボルト穴近傍のみに局所的に生じるだけで、R部分を含め各プレートのおよそほとんどの領域で生じない。そのため、BPが大きく湾曲することなく、箱型金物全体でも大きな変形は生じない。図4に示したように、BPが厚くなると荷重-変形量関係は直線から外れる荷重が大きくなり、屈曲後もほとんど直線的になる。このような荷重-変形量関係における屈曲後の急なひずみの増加は、BPの湾曲ではなくLSBの塑性変形による伸びに起因した変位である。

一方、図8より、SPを厚くした箱型金物の場合、BPが大きな湾曲を起こし、全体の大きな変形を生じさせていることがわかる。また、SPは塑性変形をほとんど起こさず、相当塑性ひずみの分布はボルト穴周辺の領域と金物内側R部分のBP側にかかなり限定されている。SPを厚くすることにより、BPのみに変形が集中する結果となった。

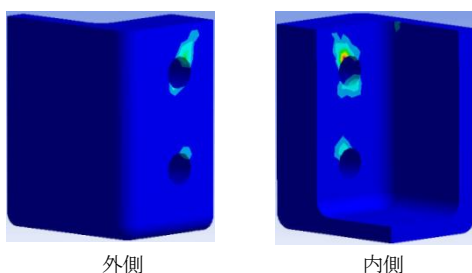


図7 Model Dにおける相当塑性ひずみの分布

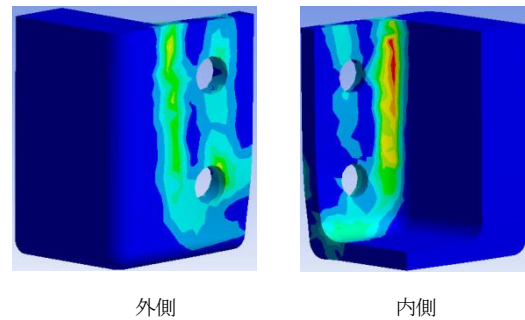


図8 Model Fにおける相当塑性ひずみの分布

4. 4. LSBの引抜けおよび破断との関係

Model Aについて、金物を固定するLSBに生じる相当応力の最大値が外力により変化する様子を図9に示す。最大値は常に固定部分に生じるが、同じ要素で生じるとは限らず、最大値を示す要素が荷重によって変わるため図は滑らかな曲線となっていない。なお、LSBの材料の引張強度は1200MPaであり、図中に黒実線で示した。一方、LSBの引抜け耐力は条件によってかなり変わる⁷⁾。本研究と同様のLSBの本数および配置での引抜け耐力の実測値はLSB1本当たり60~65kNという報告⁸⁾があるので、4本のLSBに均等に荷重が加わるものと仮定し、箱型金物に負荷される荷重が250kN程度でLSBの引抜けが起こるものとして、図中に黒破線で示した。

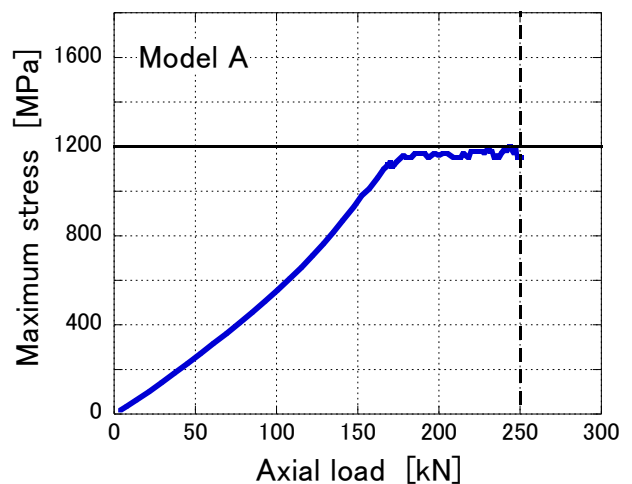


図9 荷重にともなうLSBに生じる相当応力の最大値の変化

この図より、LSB固定部に生じる相当応力はLSBの引抜け耐力より低い引張荷重でかなり大きな値に達することがわかる。これは、図6に示したように、BPが比較的薄い場合はBPが大きく湾曲するために固定部分のボルトは曲げ変形を受け、局所的に大きな相当応力が発生するためと考えられる。このことは、LSBの引抜けより早く、ボルトが破断する可能性があることを示している。実際、実物試験においても3回実施された試験のうち1回はボルトが破断することで試験

が終了している⁶⁾。BPを薄くすることで箱型金物に大きな変形が生じることが期待できるが、一方で固定用ボルトには大きな曲げ変形を与えることとなり、接合部での破壊を早める危険性がある。

5. 箱型金物の板厚選定指針の検討

接続用金物の目的は、LSBの引抜けや破断が生じる前に金物全体で大きな変形を生じさせることである。4節で述べたように、BPとSPとの相対的な板厚差が大きい場合、R部に局所的な変形が生じる。金物全体の大きな変形量がR部に局所的に集中した変形のみに起因するより、できるだけ広く分布した塑性変形に起因する方がR部への負担は少なくなると考えられる。そのためBPとSPの間の板厚差は小さいほうがよいことになる。また、箱型金物はBP、SPおよび底板を溶接でつなぎ合わせるため、金物のR部分の強度はばらつくことが予想される。このことから、R部に局所的に変形が集中することは避けた方が良く考えられる。

一方、BPの板厚が極端に厚い場合は、接合金物は塑性変形をほとんど起こさず、ボルトのみが塑性変形を起こす。これは金物の変形の前にLSBが破壊することになるので、箱型金物を採用する目的に合わない。

これらのことから、BPとSPの板厚はできるだけ同じものとし、BPの厚さはLSBの引抜け耐力程度の荷重で大きく塑性変形できる程度のものとする。LSBの引抜け耐力はLSBの規格(直径やピッチ)だけでなく、これをねじ込む集成材の特性に大きく依存する⁷⁾。例えば、集成材の強度そのものだけでなく、集成材の目の方向にも強く影響される。このため、箱型金物の設計に際しては、まずその構造物におけるLSBの引抜け耐力を正確に評価しておくことも重要となる。

6. まとめ

有限要素法による弾塑性構造解析を使って木質ラーメン構造における箱型金物の変形挙動に影響を及ぼす因子を調べた。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 変形はBPに開けたボルト穴周辺とBP付け根のR部内側に局所的に集中し、箱型金物全体の変形にはR部およびBPの湾曲が最も大きく寄与する。
- (2) BPとSPの厚さの差が小さい場合、BPの湾曲とともにSPでも変形が進行するがBPが厚くなるとBPでもSPでも変形はあまり生じず、箱型金物全体の変形が進む前にボルトが変形する。
- (3) 箱型金物の安全な設計のためには、LSBの引抜

強度程度の荷重でBPが塑性変形する程度の厚さを持たせるとともに、SPとBPの厚さの差を小さくする必要がある。

実際の構造物に変形するときは、箱型金物には曲げモーメントだけでなく引張荷重あるいは圧縮荷重が同時に加わる。実際の状態に近い柱と梁を組み合わせた構造体の破壊試験も実施されている⁴⁾ので、今後それらとの整合性を調べる予定である。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、銘建工業株式会社様より実験データの提供をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小松幸平：日本国特許第2653414号“ラグスクリーボルトを用いた木材の柱-梁接合構造”，(1997)
- 2) 中谷浩之，北守顕久，鄭基浩，森拓郎，小松幸平：ラグスクリーボルト柱脚接合部の割裂破壊に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，p. 171-172，(2009. 8)
- 3) 例えば，中谷誠，小松幸平：ラグスクリーボルトの引抜き性能に関する理論式の構築とその検証 その1 繊維平行方向引抜き性能，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，(2003. 9)
- 4) ラグスクリーボルト研究会：ラグスクリーボルト接合設計・施工指針，p. 46-59，(2007. 9)
- 5) 中谷誠，森拓郎，小松幸平：ラグスクリーボルトと特殊金物を用いた木質ラーメン構造の柱-梁接合部に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第73巻 第626号，p. 599-606，(2008. 4)
- 6) ラグスクリーボルト研究会：ラグスクリーボルト接合の金物引張試験-MK形式-試験報告書，銘建工業(株)社内報告書，(2009. 4)
- 7) 例えば，中谷誠，小松幸平：ラグスクリーボルトの引抜き性能発現機構(第1報)先孔直径，埋込み深さ，埋込み方向，縁距離が引抜き性能に与える影響，木材学会誌 Vol. 51, No. 2, p. 125-130，(2005)，(第2報)繊維平行方向引抜き理論の構築，木材学会誌 Vol. 51, No. 5, p. 311-317，(2005)，(第3報)繊維直交方向引抜き理論の構築，木材学会誌 Vol. 52, No. 3, p. 160-167，(2006)
- 8) 清水武，川原重明，中谷誠，森拓郎，小松幸平：ラグスクリーボルト(LSB)接合部の引張強度実験 その1-ラグスクリーボルトを多数本配置する場合の強度性能に及ぼす影響-，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，(2007. 8)