

超弾性パラメータと接着層を考慮した ゴムと鋼板の簡易積層モデルの数値解析的検討

村上 海翔¹・佐藤 京²・寺澤 貴裕²・千田 知弘³・関昆 竜太郎⁴
荒川 弦太郎⁵・若槻 直暉⁵

¹学生会員 東北学院大学大学院 工学研究科環境建設工学専攻1年（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）

²正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34）

³正会員 東北学院大学准教授 工学部環境建設工学科（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）

⁴非会員（前）東北学院大学 工学部環境建設工学科（研究当時）

（現）東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻1年（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6）

⁵非会員 東北学院大学 工学部環境建設工学科（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）

1. はじめに

近年の耐震・免震設計，照査には，コンピュータを用いた数値解析が極めて重要な位置を占め，ゴム支承の開発・照査に関しても，FEM解析が用いられるようになってきている．一方で，解析を行う上で少なからず解決すべきゴム特有の課題がある．

千田らは，複合材料の各材料のヤング率が大きくなる程，異種材料界面に生じるせん断応力が卓越し，せん断破壊するとともに，接着層によってせん断応力の卓越を緩衝できることを報告している¹⁾．また，その挙動は，等方性材料，直交異方性材料で大きな違いがないとしている．つまり，免震や分散設計で用いられるゴム支承は，ゴムと鋼板が積層に配置され，その材料間でのヤング率比は，数万オーダーと大きく，接着層をモデル化しないとゴムと鋼板の挙動を評価する際に最適解が得られないことが予想される．

そこで本研究では，部材試験レベルの定性評価を実施することを目的とし，ゴム層の中間に1枚だけ内部鋼板が接着されている簡易モデルに対しFEM解析を実施した．(1)ゴムを超弾性体とした場合と弾性体とした場合，(2)接着層のヤング率と厚さの違いの2点の条件を設定し，各条件が接着層およびゴム層に生じるせん断ひずみの大きさ，分布にどのような差，影響を与えるか，それらに伴い内部鋼板にどのような挙動が生じ得るのかの評価を行った結果を報告する．

2. 解析諸元

本研究では，汎用有限要素解析ツール ANSYS (ANSYS.inc,ver.21R2)を用いて行った．

本研究で対象とした2つのモデルの側面図を図-1，図-2に示す．なお，図-1のモデルを簡易モデル1，図-2のモデルを簡易モデル2と以後，呼称する．両モデルとも，ゴム，鋼板，接着層および各界面に生じるせん断ひずみ，曲げ応力の定性評価をより分かりやすくするため，内部鋼板が1枚だけのモデルとした．また，モデルの中央に原点Oを取り，高さ方向にy軸，断面の外側にかけてそれぞれx軸，z軸を取った．

ゴムと鋼板を接着させる材料の塗布量は，数 μm であり，形成される接着層の厚さは非常に薄いと想定される．そこで，接着層を10.00mmと十分な厚さを有するモデル(図-1)とした上で，接着層のヤング率の違いによる影響を分析し，その後，図-2のモデルに対し，接着層の厚さがゴム，鋼板，接着層に生じるせん断ひずみ，曲げ応力の値，分布にどのような違いが生じるかを確認することとした．

図-1のモデルに関しては，内部鋼板の回転挙動が，幅に対して高さがある構造に起因するものかを検討するため，より高さを強調してモデル化した．高さ50.00mm×幅100.00mm×奥行100.00mmの鋼板を上下に配置し，ゴム層は1層あたり高さ50.00mm×幅100.00mm×奥行100.00mmとし，内部鋼板は，高さ20.00mm×幅100.00mm×奥行100.00mm，接着層は，

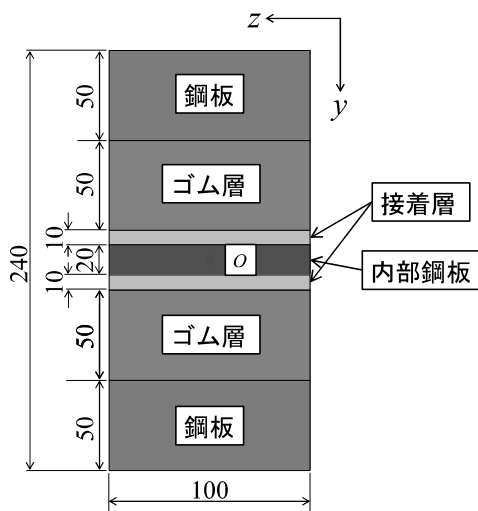


図-1 簡易モデル1の側面図(単位: mm)

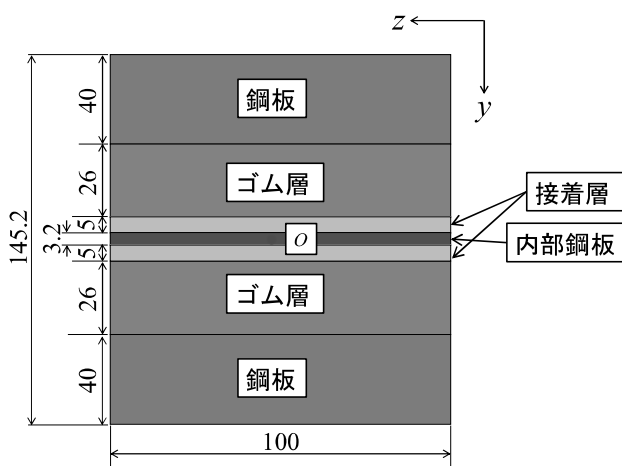


図-2 簡易モデル2の側面図(単位: mm)

高さ 10.00mm×幅 100.00mm×奥行 100.00mm から成るモデルとした。

図-2 のモデルに関しては、内部鋼板の回転挙動が積層構造に起因するものかを検討するために図-1 のモデルの幅はそのままで高さを低くモデル化したものである。高さ 40.00mm×幅 100.00mm×奥行 100.00mm の鋼板を上下に配置し、ゴム層は高さ 26.00mm×幅 100.00mm×奥行 100.00mm とし、内部鋼板は、高さ 3.20mm×幅 100.00mm×奥行 100.00mm、接着層は、高さ 5.00～0.01mm×幅 100.00mm×奥行 100.00mm から成るモデルとした。なお、図-2 のモデルに関しては、接着層の厚みは 5.00mm, 1.00mm, 0.10mm, 0.01mm の 4 種類で検討を行った。

超弾性体、弾性体とした 2 種類の特性を用いた解析によりゴム支承の応答を比較した。超弾性モデルに使用した超弾性パラメータは、次式の ogden モデルを使用し、単軸引張試験、等方二軸試験、一軸拘束一軸伸長試験の値をカーブフィットして得られる

表-1 解析に用いた超弾性パラメータ

| n | μ_n | α_n | 非圧縮性パラメータ d |
|-----|----------|------------|---------------|
| 1 | 0.70135 | 2.0 | 0.047619 |
| 2 | 0.21392 | 4.0 | 0 |
| 3 | -0.13031 | -2.0 | 0 |

表-2 解析に用いた材料定数

| | ヤング率 E (N/mm ²) | ポアソン比 ν |
|------|-------------------------------|-------------|
| 鋼板 | 2.060×10^{11} | 0.300 |
| ゴム | 3.779 | 0.499 |
| 内部鋼板 | 2.060×10^5 | 0.300 |
| 接着層1 | 206.000 | 0.300 |
| 接着層2 | 350.000 | 0.300 |
| 接着層3 | 1000.000 | 0.300 |
| 接着層4 | 2430.000 | 0.410 |

係数 α , μ を用いた²⁾ (表-1)。

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_n} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_n} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_n} - 3)$$

W は、ひずみエネルギー関数であり、 μ はせん断弾性係数、 α はカーブフィットから得られた係数、 λ は伸長比である。また、超弾性体と比較する弾性体は、等方性材料とし、次式からせん断弾性係数、ヤング率をそれぞれ求めた。

$$G = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \mu_n \alpha_n$$

$$E = \frac{3}{2} \sum_{n=1}^3 \mu_n \alpha_n$$

ポアソン比は、上記から得られたせん断弾性係数、ヤング率を用いて、次式から求めた。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

各材料定数を取りまとめたものを表-2 に示す。

境界条件はモデル上面に位置する全ての節点の y 方向変位を拘束、モデル底面に位置する全ての節点の全方向変位を拘束した。

3. 解析結果および考察

(1) 超弾性モデルと弾性モデルとの比較および接着層のヤング率の違いによる影響

超弾性モデルに対し、接着層のヤング率を表-2 に示す接着層 1～接着層 3(206N/mm², 350 N/mm²,

1000N/mm²)としz軸方向変位を10mm与えたせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ10%)を図-3, 弾性モデルに対し, 接着層のヤング率を表-2に示す接着層1~接着層3(206N/mm², 350N/mm², 1000N/mm²)としz軸方向変位を10mm与えたせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ10%)を図-4に示す。

超弾性モデルと弾性モデルとで, 解析結果にどのような差が生じるかを図-3と図-4で比較すると, 超弾性モデルは部材界面に生じるせん断ひずみの分布範囲が狭く, 弾性モデルに比べても大きなせん断ひずみが生じていないことが見てとれる。超弾性モデルの場合, 非圧縮性を有するゴムがx方向にも変形し, z方向の変位が減少するためと推察される。また, どちらのモデルも接着層とゴム層の界面でせん断ひずみの卓越が見られ, ゴム側で破断, 割裂する可能性があることが示唆される。

接着層のヤング率の差によってどのような挙動の違いが生じるかを, 図-3の3つのモデルどうし, 図-4の3つのモデルどうしで比較すると, 各図中で四角枠で示した材料界面において, どちらのモデルもヤング率比の違いによる差は見受けられない。千田らは, ヤング率比が大きい程, 異種材料界面に生じるせん断応力の卓越が大きくなると示している一方で, ある一定のヤング率比を超えると, せん断応力の卓越の上昇率は極端に減少していくことを示唆している。本解析における接着層とゴム層のヤング率比は55~265であるが, この範囲の場合, 材料界面に卓越するせん断応力の値には差が生じないと推察される。以上より, 接着剤を用いた積層構造は, 材料界面に応力の卓越を生じさせるが, 接着剤のヤング率の違いによる差は小さいことが示された。

一方で, 図-3, 図-4の丸枠で囲んだ領域に関しては, 上下鋼板とゴム層は接着層を考慮せずにモデル化しているが, 接着層を考慮している四角の枠で囲んだ領域に比べ, 材料界面に約1.8倍程度の大きなせん断ひずみが生じている。ゴム層と鋼板とのヤング率比は54512もあるため, 異種材料間に生じるせん断応力の卓越の上昇率が無視できないほど大きくなるためと考えられる。よって, 接着層を考慮せずに解析を行うと, 材料間の剥離を大きく安全側に評価してしまうことが示された。

超弾性モデルにz軸方向変位を40mm与えたせん断ひずみ γ_{xz} 分布図(ひずみ40%)を図-5に示す。ひずみ10%を与えた図-3と比較すると, 内部鋼板が大きく回転していることが分かる。また, 界面に生じるせん断ひずみが増加し, ゴム層に生じるせん断ひずみの分布の範囲が広がっている。内部鋼板が単純に回転挙動を示すのであれば, 内部鋼板には大きな変

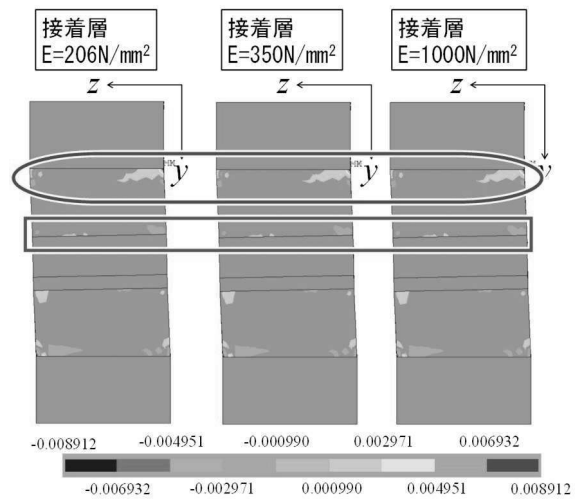


図-3 接着層のヤング率を変更した超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ10%)

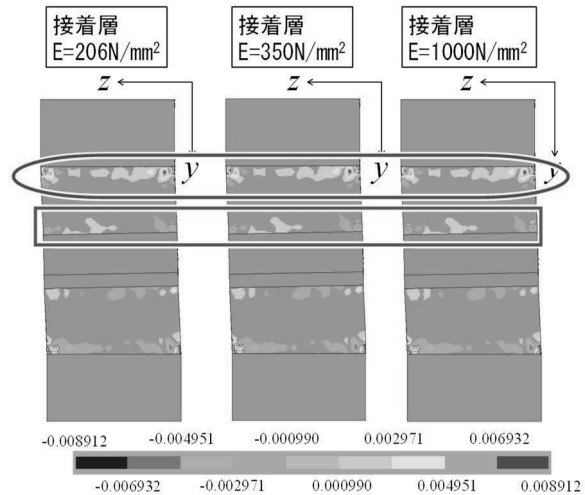


図-4 接着層のヤング率を変更した弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ10%)

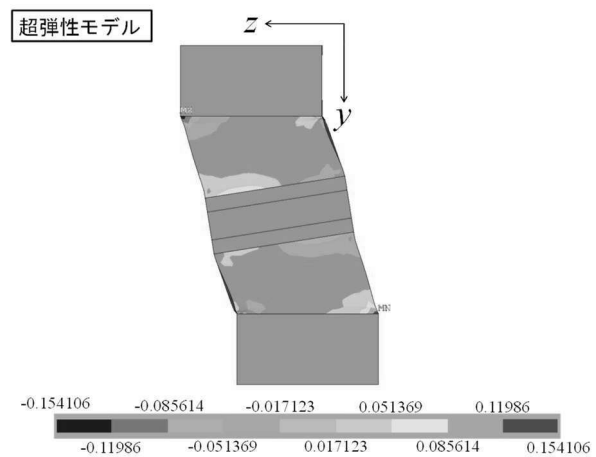


図-5 超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ40%)

形は生じないはずである。そこで, 内部鋼板に生じる応力を確認していくこととする。

図-3 のコンター出力を z 方向応力分布に変更した図を図-6 に、図-5 のコンター出力を z 方向応力分布に変更した図を図-7 に示す。図-6、図-7 とともに、回転量の大小にかかわらず、四角枠の箇所に引張応力、丸枠の箇所に圧縮応力が生じており、曲げ変形が生じていることが分かる。また、引張応力と圧縮応力は、点対称に生じている。図-6、図-7 とともに、内部鋼板の左側では、上側が引張、下側が圧縮になるので、反時計回りのモーメントが生じている一方、右側では、上側が圧縮、下側が引張となるので、同じように反時計回りのモーメントが生じており、偶力の関係となっている。この偶力によって生じる回転の向きは、図-6、図-7 で見られる内部鋼板の回転の向きと一致する。

以上より、内部鋼板の回転は、ゴムの変形によって内部鋼板に点対称となる曲げ変形が生じ、それによって生じる偶力によって回転することが示された。

(2) 接着層の厚さの違いによる影響

本節では、図-2 に示す簡易モデル 2 を用いて解析を実施した。前節において、接着層のヤング率の大小によって解析結果に差は生じないことが明らかとなったため、より実際の接着層の材料定数に近いと考えられる表-2 中の接着層 4 の値³⁾を用いて解析を行った。また、接着層の厚さの異なる 4 つのモデル（接着層厚 5.00mm, 1.00mm, 0.10mm, 0.01mm）を対象とし、 z 軸方向変位を 10mm 与えて解析を行った。

z 軸方向変位を 10mm(ひずみ 10%)与えた場合の、超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布を図-8 に、弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布を図-9 に示す。

本節の解析は、極めて薄い接着層をモデル化することによって、収束性に難が生じたり、細かいモデル化によって生じ得る FEM 解析固有の応力集中の有無を確認することが目的の一つであるが、図-8 と図-9 を見るとモデル化に起因する応力集中といった挙動は見られないことが確認されるとともに、収束性に問題が無いことが確認された。ただし、接着層が薄くなる程、計算時間が数倍に上昇する。

図-8 と図-9 を比較すると、超弾性モデルの場合（図-8）、接着層が薄くなる程、ゴム層と接着層の界面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} がの範囲が広くなり、ゴム層に生じる最大値も大きくなるのに対し、弾性モデルの場合（図-9）、接着層が薄くなる程ゴム層と接着層の界面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} の範囲が減少し、ゴム層に生じる最大値も減少するといった、逆の傾向を示す。図-3 と図-4 との比較において、弾性モデルの方が接着層界面に生じるせん断ひずみ

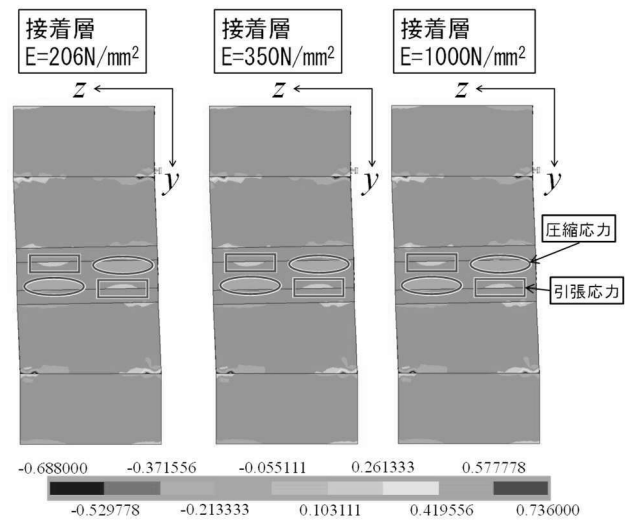


図-6 接着層のヤング率を変更した超弾性モデルの z 方向応力 σ_z 分布(単位: MPa)

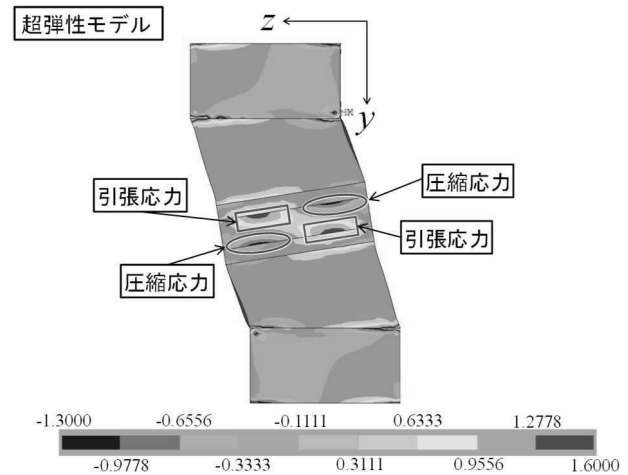


図-7 超弾性モデルの z 方向応力 σ_z 分布(単位:MPa)

γ_{xz} の範囲が広いことも、この挙動を裏付けるものとなる。

図-8 のコンター出力を z 方向応力分布に変更した図を図-10 に、図-9 のコンター出力を z 方向応力 σ_z 分布に変更した図を図-11 に示す。

内部鋼板に着目し各モデルを比較すると、図-10 と図-11 とで、内部鋼板に生じる z 方向応力分布に差は生じていない。ゴムを超弾性体とするか弾性体とするかのモデル化の違いは、鋼板に生じる応力分布に差を生じさせないことが示された。また、図-8 と図-9 は明確に差が生じるにも関わらず、図-10 と図-11 とで差が無いことから、前述のせん断ひずみの卓越は、あくまで鋼板とゴムの剥離に影響するだけであり、鋼板の変形挙動に影響しないことが示唆される。この挙動は、木材に鋼板を挿入接着した鋼板挿入集成材³⁾の挙動と同じ傾向である。

超弾性モデル

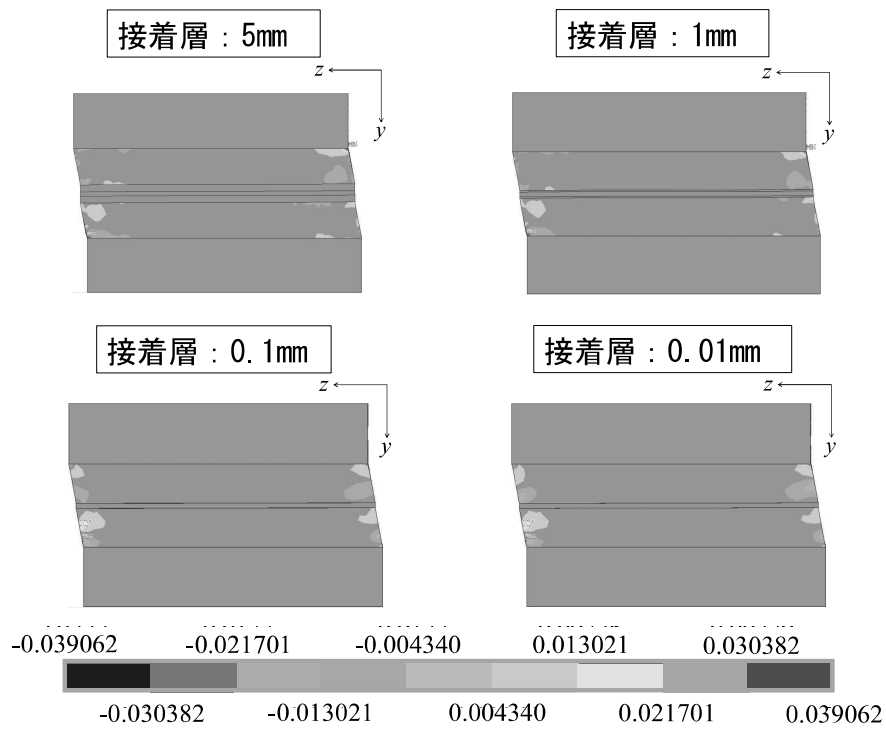


図-8 接着層の厚さを変更した超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ 10%)

弾性モデル

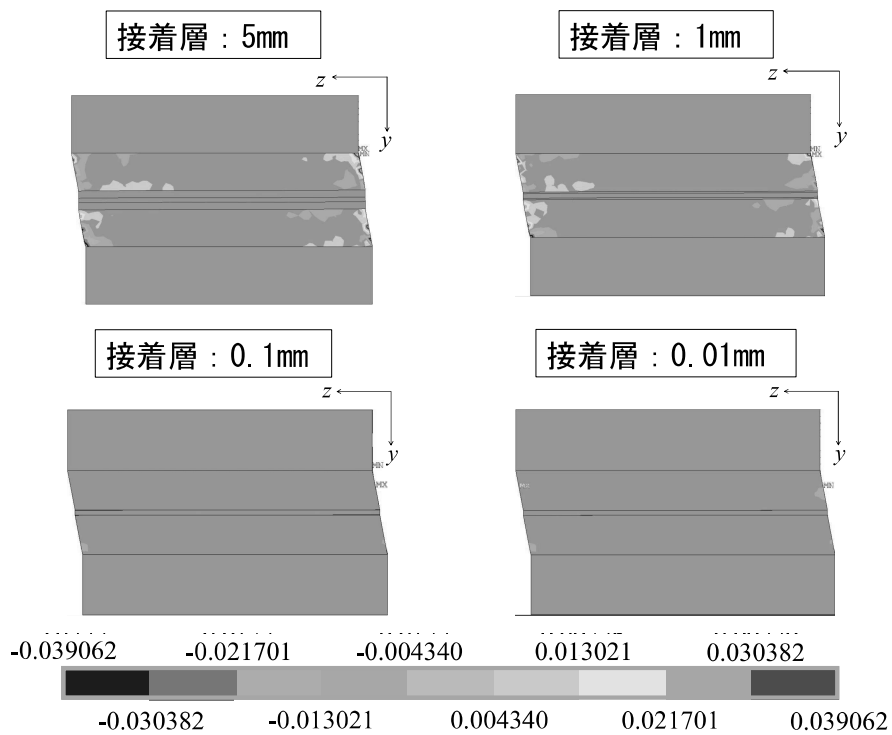


図-9 接着層の厚さを変更した弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布(ひずみ 10%)

超弾性モデル

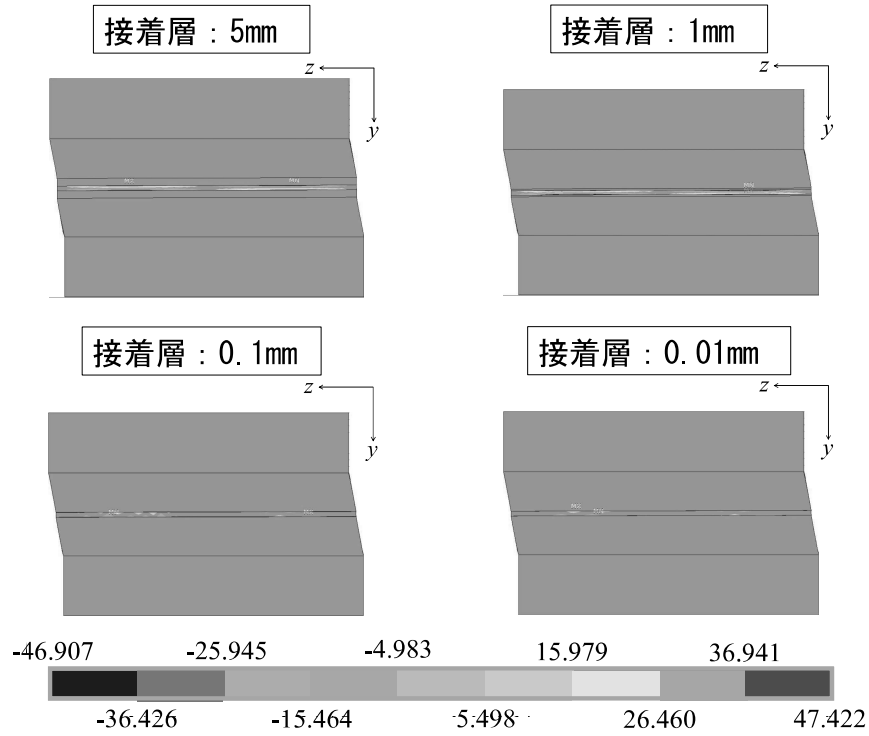


図-10 接着層の厚さを変更した超弾性モデルの z 方向応力 σ_z 分布(単位:MPa)

弾性モデル

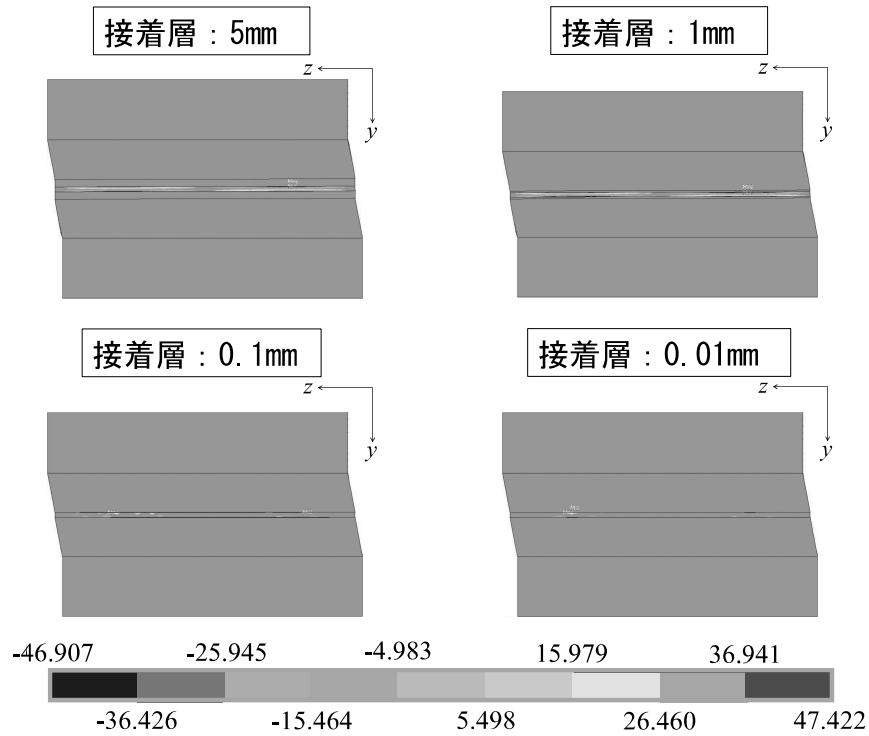


図-11 接着層の厚さを変更した弾性モデルの z 方向応力 σ_z 分布(単位:MPa)

また、接着層の厚さの違いによる鋼板に生じる z 方向応力 σ_z を比較すると、**図-10**、**図-11** ともに、接着層が薄くなる程、 z 方向応力 σ_z が減少していく様子が見られ、その応力分布は、**図-8** に示したように引張と圧縮が点対称に分布することが分かる。よって、試験体の幅に対する高さ方向の割合が大きいことが内部鋼板に回転や曲げ変形挙動を生じさせるのではないことがこのことから分かる。

接着層が 5.00mm の場合と 0.01mm の場合とを比較すると、約 1.8 倍もの応力差が生じている。適切に接着層の厚さをモデル化しないと、内部鋼板の剛性を低く評価することになり、鋼板の塑性変形等を過大評価してしまうことが示唆される。また、接着層 0.1mm と 0.01mm とで、鋼板に生じる z 方向応力 σ_z に差が無いことに加え、**図-8** 中でもせん断ひずみの卓越にも差が見られないことから、計算コストを鑑みた場合、接着層 0.1mm でモデル化することで十分に性能を評価できることが示唆される。

超弾性モデルに z 軸方向変位を 50mm(ひずみ 96%) 与えたせん断ひずみ γ_{xz} 分布を**図-12** に、超弾性モデルに z 軸方向変位を 100mm(ひずみ 208%) 与えたせん断ひずみ γ_{xz} 分布を**図-13**、超弾性モデルに z 軸方向変位を 250mm(ひずみ 480%) 与えたせん断ひずみ γ_{xz} 分布を**図-14** に示す。なお、弾性モデルの場合、50mm 以降の解析は収束しなかった。

図-12 と **図-13** を見ると、 z 軸方向変位の増加につれて、界面に生じるせん断ひずみの卓越の範囲が広がり、値も大きくなっていくことが分かる。**図-14** ではそれらが逆に小さくなっているが、鋼板が大きく回転挙動を示す事によって、界面に生じるせん断ひずみの向きが代わり、全体系での表示では小さく表示されてしまうためであり、実際は**図-13** に生じているせん断応力の卓越よりも大きな値 (1.304) となる。よって、 z 軸方向変位の増加によって、せん断応力の卓越がより顕著となって行き、その挙動を起因とするゴム層が剥離、破断が生じ得る可能性が示唆された。

以上より、接着層をモデル化することによる挙動の知見として、

- [1]接着層をモデル化しないと、材料界面に生じるせん断ひずみの卓越を過大に評価してしまうため、接着層をモデル化することが必要。
- [2]接着層をモデル化する際に使用するヤング率の違いによっては、解析結果に大きな影響を及ぼさない。
- [3]接着層の厚みは、材料界面に生じるせん断ひずみの卓越に大きく影響する。
- [4]超弾性モデルと弾性モデルとでは、接着層の厚みの違いによって、材料界面に生じるせん断ひずみの

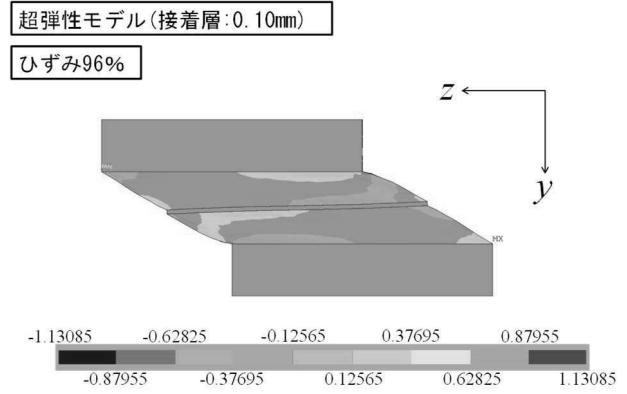


図-12 超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布 (ひずみ96%)

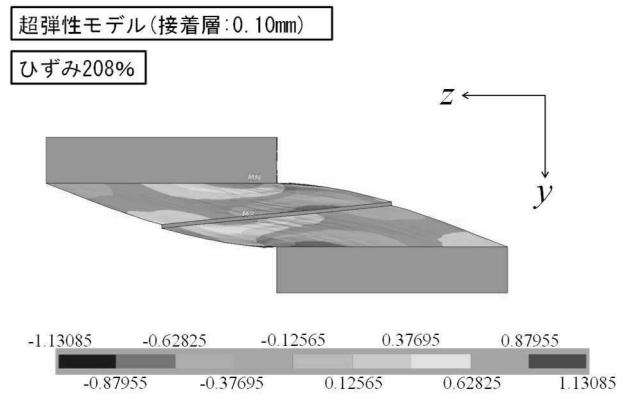


図-13 超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布 (ひずみ208%)

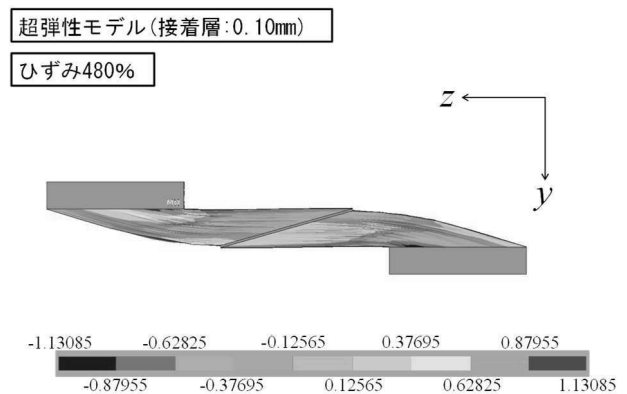


図-14 超弾性モデルのせん断ひずみ γ_{xz} 分布 (ひずみ480%)

分布が逆の傾向を示すので、接着層の厚さ、ゴムのモデル化は、適切にモデル化する必要がある。
 [5]鋼板に生じる曲げ挙動に関し、ゴムを超弾性体とするか弾性体とするかといったモデル化の違いによる差は生じないが、接着層の厚さによって、曲げ変形挙動に大きな差が生じる。よって、接着層の厚さのモデル化は、適切に行わなければならない。

まとめ

本研究では、ゴムを超弾性体とした場合と弾性体とした場合、接着層のヤング率と厚さの違い、の2点の条件を設定し、各条件が接着層およびゴム層に生じるせん断ひずみの大きさ、分布にどのような差、影響を与えるか、それらに伴い内部鋼板にどのような挙動が生じ得るのかを検討するため、ゴム層の中間に1枚だけ内部鋼板が接着されている簡易モデルに対しFEM解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

- ・簡易モデル1において、超弾性モデル、弾性モデルのどちらにおいても接着層のヤング率の違いによる影響は確認されない。また、ゴムと接着層のヤング率比が大きいと部材界面にせん断ひずみが生じゴム側で破断、割裂する可能性があることが示唆された。

- ・試験体幅に比べて高さがある試験体の場合、内部鋼板に回転挙動が生じやすいが、その回転挙動は、鋼板に点対称に生じる曲げ変形挙動によって内部に生じる偶力によって生じることが示された。この挙動は、高さが低いモデルでも見られたことから、ゴムと内部鋼板の積層構造に生じ得る定性的な挙動であることが示唆された。

- ・超弾性体や弾性体としたモデルにおいて、接着層の有無、その厚さ、ヤング率の違いによって、応答が異なるため、破断に至るような大変形の解析を実施する場合には、モデル化する材料については、注意を必要とすることが示された。

- ・ゴムと接着層界面には、せん断ひずみ γ_{xz} の卓越が生じ、ゴムと内部鋼板が剥離し得る挙動が確認された。この挙動は、ヤング率比が大きい材料同士を組み合わせた構造に生じる定性的な挙動であり、超弾性体とした本解析においても同様の応答を示すことが確認された。

参考文献

- 1) 千田知弘, 佐々木貴信, 山内秀文, 岡崎泰男, 川合安生, 飯島泰男: スギ材のせん断破壊標準試験法の提案とせん断強度の推定(第1報)木材を補剛材として用いたスギ積層材の有限要素解析とせん断破壊試験, 木材学会誌 Vol.58, No.5, p.260-270,2012
- 2) 秦逸平(2019) 第3回ゴム支承研究会報告書 G10 ゴム材料の超弾性パラメータの同定

- 3) 千田知弘, 佐々木貴信, 薄木征三, 後藤文彦: 支間中央に継手を持つハイブリッド木桁の性能試験及びFEM解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No1, 108-120, 2011