

極限状態のゴム製支承の応力分布に関する 超弾性パラメータを用いた FEM 解析

千田 知弘¹・村上 海翔²・寺澤 貴裕³・植田 健介⁴・佐藤 京⁵

¹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)
E-mail: tchida@mail.tohoku-gakuin.ac.jp(Corresponding Author)

²学生会員 東北学院大学修士2年 工学研究科環境建設工学専攻
(〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1)
E-mail: s2194403@g.tohoku-gakuin.ac.jp

³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)
E-mail: terasawa-t22ab@ceri.go.jp

⁴正会員 一般社団法人ゴム支承協会 技術委員会 (〒107-0051 東京都港区元赤坂 1-5-26 東部ビル)
E-mail: ueda@mgb-gouda.co.jp

⁵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)
E-mail: taka4@ceri.go.jp

積層されたゴムと鋼板が接着剤で一体化される構造を有するゴム製支承の設計に際しては、ゴムの破断より先に接着剥離を生じさせないことが極めて重要であり、道路橋支承便覧では、JIS K 6256-2:2013 を用い、90° 剥離強さが 7N/mm 以上であることを確認するよう求めている。一方、水平変位が作用している状況下における実際のゴム製支承の内部応力状態は未だ明らかになっておらず、上記試験法を適用しての評価に、潜在的な課題が残されている現状にある。

そこで本論文では、試設計した 4 種類のゴム製支承、90° 剥離強さ試験、一面せん断試験を対象に、超弾性パラメータと接着層を考慮した FEM 解析を実施し、各試験体に生じる内部の応力状態を明らかにした上で比較評価を行い、より良い接着力評価方法を検討した結果を報告する。

Key Words: rubber bearing, 90° peel test, single lap shear test, FEM, hyperelastic material parameters

1. はじめに

ゴムと鋼板を交互に積層させ接着剤を介して一体化するゴム製支承は、供用期間中に想定される地震の作用に対してゴムと鋼板が一体で挙動することやゴムの破断よりも先に接着剥離を生じさせないことに留意した製作が必要かつ重要である。

道路橋示方書 V 耐震設計編¹⁾で示されているゴム製支承の限界状態 3 に対する機能評価の参考として、道路橋支承便覧²⁾には、せん断ひずみ 300%における履歴を評価する試験方法が示されており、せん断に対するゴムと鋼板の接着剥離強さに高い信頼性が求められているといえる。

この接着剥離強さに関し、道路橋支承便覧では、JIS K 6256-2:2013 が標準的な試験法として挙げられており、90° 剥離強さが 7N/mm 以上であることを確認するよう求めている。その一方で、実際のゴム製支承に水平変位が作用している状況下における内部の応力状態が、未だ明らかにされていないことから、JIS K 6256-2:2013 の試験を適用した評価には、潜在的な課題が含まれると思われる。近年では、崔ら³⁾などが超弾性パラメータを用いた FEM 解析を用い、ゴム製支承の内部に生じる応力状態を明らかにしようとする試みが行われるようになってきたが、接着剥離に着目した検討事例は見当たらない。

そのような背景の元、筆者らは、接着層を考慮した簡易積層ゴム試験体の FEM 解析を試行し、接着剥離の評

価には接着層のモデル化が必須なこと、また接着層厚は 0.1mm 以下とする必要性があること等を明らかにした⁵⁾。加えて、実際のゴム製支承の実験でも見られる鋼板の曲げ変形、支承の回転挙動をも評価可能であったことから、次のステップとして、実構造のゴム製支承の内部に生じる応力状態を明らかにするための FEM 解析による検討を進めている。

本論文では、ゴムと鋼板の集合体としてのデバイスのより良い接着力評価方法を検討するために、試設計された橋梁に用いる 4 種類のゴム製支承を対象に、超弾性パラメータを適用し、接着層を考慮した FEM 解析により、ゴム製支承の内部に生じる応力状態をシミュレーションした。また、90° 剥離強さ試験 (JIS K 6256-2:2013) および一面せん断試験を対象とした FEM 解析も実施し、各モデルで得られた内部応力状態とゴム製支承の内部に生じる応力状態を比較した結果を報告する。

2. FEM 解析モデルおよび解析手法

(1) ゴム製支承

解析モデルに用いたゴム製支承は、3 径間連続鉄桁、単純 3 連鉄桁と形式の異なる橋梁の試設計により、それぞれに配置されるゴム支承を解析モデルの対象とした。

ゴム製支承の諸元を表-1 に、試設計したゴム製支承の断面図の一例として単純 3 連鉄桁のピアに設置するゴム製支承の断面図を図-1 に示す。なお、同一橋梁においては、アバットに設置されるゴム製支承同士、ピアに設置されるゴム製支承同士は同じ形状寸法とした。

ゴム製支承の側面 4 面を覆う被覆ゴムは、全モデル共通で厚さ 10mm とし、上下中央部に設置されるせん断キーおよび各種取り付けボルトは省略した。また、上鋼板上部および下鋼板下部の 4 辺のエッジに厚さ 2mm×幅 20mm の切り欠き部を設け、その部分に被覆ゴムが充填される構造とした。この切り欠き部のモデル化も全モデル共通とした。

FEM 解析には、汎用 FEM (有限要素法) 解析ツール ANSYS(ANSYS,inc.ver.2021.R1)を用いた。

ゴム製支承の要素分割図の一例を図-2 に示す。ゴム製支承の重心位置に原点 O を取り、水平変位荷重方向に z 軸、下向きに y 軸、幅方向に x 軸を取った。本試験体は、 y 軸について対称な断面を有するので、 yz 面で 2 分割された試験体の半分を解析対象とした。なお、全ての部材の接合は剛結とした。

使用した要素は、要素の頂点間に中間節点を有することで大変形の解析に有効である 4 面体 10 節点 30 自由度のソリッド要素を用いた。要素サイズは、接着層のみ 1 辺 5mm とし、その他は全て 1 辺 15mm とし、ANSYS の

表-1 試設計したゴム製支承の諸元 (単位: mm)

橋梁形式	設置箇所	内部鋼板 (枚数)	総ゴム層厚 (単層厚・層数)	上下鋼板 (枚数)	上下沓 (枚数)
3径間連続鉄桁	アバット	4.5×800×800 (6枚)	189 (27・7層)	28×800×800 (2枚)	35×920×920 (2枚)
	ピア	4.5×1050×1050 (4枚)	165 (33・5層)	40×1050×1050 (2枚)	35×1170×1170 (2枚)
単純3連鉄桁	アバット	4.5×750×750 (5枚)	180 (30・6層)	36×750×750 (2枚)	35×870×870 (2枚)
	ピア	4.5×800×800 (5枚)	198 (33・6層)	36×800×800 (2枚)	35×920×920 (2枚)

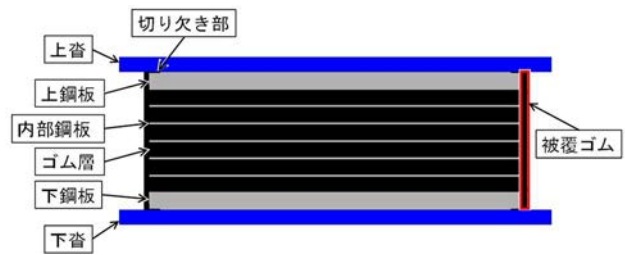


図-1 ゴム製支承の断面図の一例

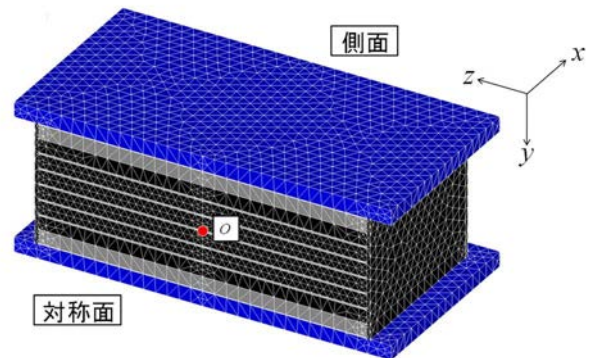


図-2 ゴム製支承の要素分割図

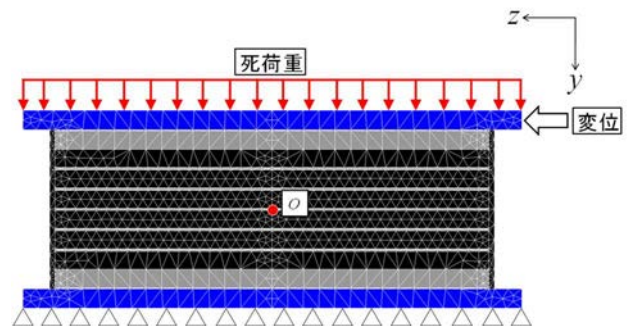


図-3 荷重条件および境界条件を示した断面図

要素自動生成機能を用いて要素分割を行った。

接着層のモデル化に関しては、本研究では、既報⁵⁾を参考に、鋼板とゴムの境界部全てに、厚さ 0.1mm の接着層を設けた。なお、試験体の総幅、総高さを一定とした上で接着層をモデル化したため、例えば、ゴムの単層厚が 27.0mm の場合、本解析上は 26.8mm となる。

解析に使用した各材料定数を表-2 に、荷重条件および境界条件を示した断面図を図-3 に示す。内部鋼板お

表-2 解析に使用した各材料定数

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
内部鋼板	206.00	0.30	77.00
上下鋼板	206.00	0.30	77.00
接着層	2.43	0.41	8.92
上下沓	206.0 × 10 ¹⁰	0.30	77.00
ゴム層	超弾性パラメータ (ogden)		8.92

表-3 解析に使用した変位と死荷重

橋梁形式	設置箇所	変位 (mm)	水平せん断ひずみ%	死荷重 (kN)
3径間連続鉄桁	アバット	435.1	230.2	1552.0
	ピア	356.1	215.8	3504.0
単純3連鉄桁	アバット	395.6	219.8	1690.0
	ピア	461.8	233.2	1670.0

表-4 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	0.05
2	0.21392	4	0.05
3	-0.13031	-2	0.05

よび上下鋼板の値は公称値を用いた。

上下沓に関しては、解析の特性上、図-3 に示す死荷重を載荷した場合、ゴム部より張り出した上沓部が片持ちとなることで曲げ変形が生じ、上鋼板とゴム部にめり込む挙動が生じてしまう。この変形挙動は実際の橋梁では生じないので、上沓を剛として設定することとし、極めて高いヤング率を設定した。下沓は上沓に合わせた。

接着層に関しては、各材料定数が明らかとなっていないため、文献 7) の値を用いた。なお、既報 9) においては、接着層のヤング率を 0.21GPa~2.43GPa の間で変化させた解析を実施したが、ゴム層と鋼板の境界付近に生じる応力分布に、接着層のヤング率の違いによる差はみられなかった。単位体積重量に関しては、接着層の体積が全体積に占める割合は極めて小さいため、ゴム層と同じ値を便宜的に用いた。

ゴム層に関しては、後述する超弾性パラメータを用いた。単位体積重量は文献の値 9) を用いた。

解析に使用した変位（最大応答変位）と死荷重を表-3 に示す。表-3 中の水平せん断ひずみは、試設計を行った橋梁において、レベル 2 地震動の各タイプで最大を示した応答変位をゴムの総厚で除した値となる。死荷重は、図-3 に示すように、上沓上面に分布荷重としてそれぞれ与えた。水平変位もまた図-3 に示すように、上沓の xy 側面全面が、 z 方向に変位するように表-3 の値をそれぞれ強制変位として与えた。自重は鉛直方向に重力加速度を与えることによって考慮した。また、幾何学的非線形を考慮できるように設定した。

境界条件は、下沓底面に位置する全ての節点の全方向変位、 yz 対称面（図-2）上に位置する全ての節点の x 方向変位を拘束することで与えた。

超弾性体をモデル化するにあたっては、Ogden モデルを用いた。解析に使用した超弾性パラメータを表-4 に示す。 α 、 μ は、単軸引張試験、等方二軸試験、一軸拘束一軸伸長試験から得られた値をカーブフィッティングすることで得られる ogden モデルの無次元となる材料定数であり、文献 6) と 9) の値を用いた。非圧縮性パラメータに関しては、ゴムは非圧縮性材料であるので、理論上は 0.0 となるが、実際に 0.0 を用いて解析を実施した場合、水平せん断ひずみが 120% を超えると解が収束しなかった。よって、0.05 という小さい値を与え、収束性を担保した。

(2) 90° 剥離強さ試験の解析モデル

接着剥離強さ試験体の検討における標準モデルとして、JIS K 6256-2:2013 に示されている 90° 剥離強さ試験体を解析モデルの対象とした。試験体の側面図と正面図を図-4 に示す。JIS K 6256-2:2013 の試験ジグの形状は三角形となっており、上部のピン構造が回転を許容する構造となっている。しかし、FEM 解析のモデル化を合理的に簡素化し、試験ジグを板形状にモデル化している。次章で詳述するが、FEM 解析では、変位を入れる角度を調整することで、実際の試験でジグが回転することによ

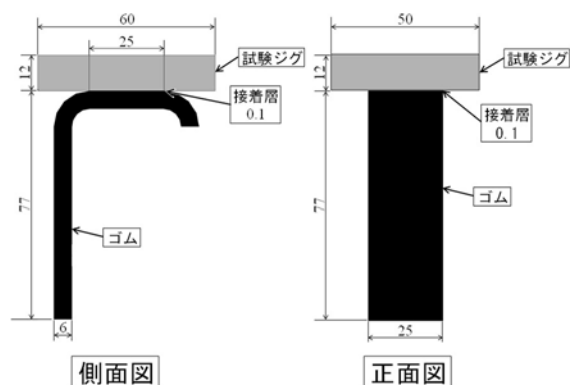


図-4 90°剥離強さ試験体 (JIS K 6256-2:2013) (単位 : mm)

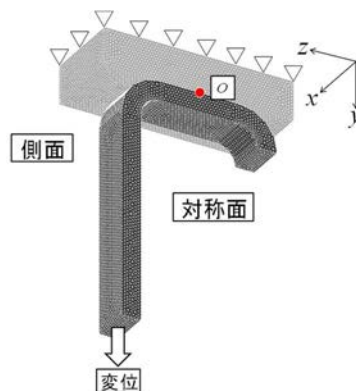


図-5 90° 剥離強さ試験の要素分割図

て生じるゴムの変形挙動に近付けた。接着面積等は JIS K 6256-2:2013 に準じた。

90° 剥離強さ試験体の要素分割図を図-5 に示す。図-5 中に O で示した位置に原点を取り、下向きに y 軸、幅方向に x 軸、残りの方向に z 軸を取った。本試験体も y 軸について対称な断面を有するので、 yz 面で 2 分割された試験体の半分を解析対象とした。なお、接着層厚はゴム製支承のモデルと同じ 0.1mm とし、全ての部材の接合は剛結とした。

使用した要素の条件はゴム製支承の条件と同じであるが、全て 1 辺 15mm でメッシュ分割を行った。

解析に用いた材料定数は、ゴム層と接着層は表-2、表-4 と同じとした。試験ジグは、表-2 の上下沓の値を用いた。

境界条件は、試験ジグ上面に位置する全ての節点の全方向変位を拘束、 yz 対称面上に位置する全ての節点の x 方向変位を拘束することで与えた。

载荷は、図-5 に示すように、長くぶら下がった方のゴムの底面に強制変位を与えることで与えた。変位を与える方向は、 y 軸方向に与えるケースと、 y 軸に対して 30° となる方向に与えるケースの 2 種類を実施した。後者のケースは、実際の 90° 剥離強さ試験において、载荷が進むにつれて試験ジグが回転し、ゴムが斜め方向に引っ張られる挙動を想定したものとなる。

自重と幾何学的非線形条件は前節と同じとした。

(3) 一面せん断試験体の解析モデル

ゴム支承に求められる接着剥離の限界を想定し、せん断試験による剥離強さが合理的評価となると仮定し、図-6 に示す一面せん断試験体も解析対象とした。一面せん断試験には、確立した試験方法が無いことから、ラップシヤ試験を参考に寸法を決定した。

本研究において、道路橋支承便覧で指定されていない一面せん断試験を解析対象とした理由は、鋼板間にゴムが挿入接着されている点、変位の作用方向が接着面と平行している点など、一面せん断試験体とゴム製支承に多くの共通点があり、ゴムと鋼板の接着界面付近に生じる応力分布が一致する可能性があるためである。

また、一面せん断試験法に類似した試験法となるラップシヤ試験を対象とした FEM 解析結果⁹⁾と、簡易ゴム積層試験体の解析結果⁹⁾に多くの共通点が見られたこともまた、本論文で一面せん断試験を解析対象とした理由となっている。

一面せん断試験体の要素分割図を図-7 に示す。図-7 中に O で示したゴム材の重心位置に原点を取り、下向きに z 軸、幅方向に x 軸、鋼板とゴムの積層方向に y 軸を取った。本試験体も z 軸について対象な断面を有するので、 yz 面で 2 分割された試験体の半分を解析対象とし

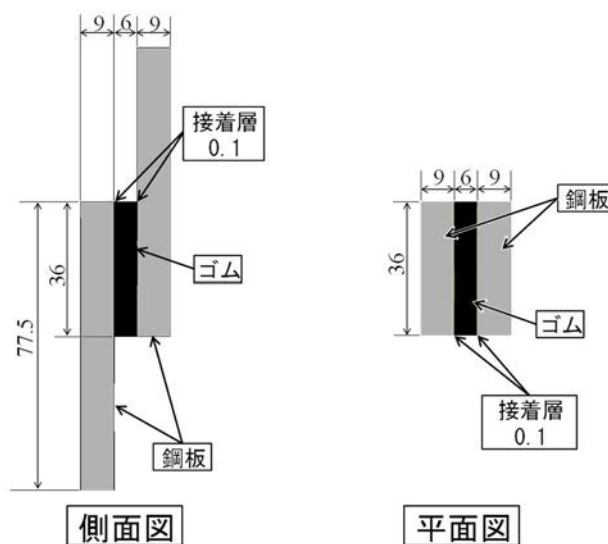


図-6 一面せん断試験体

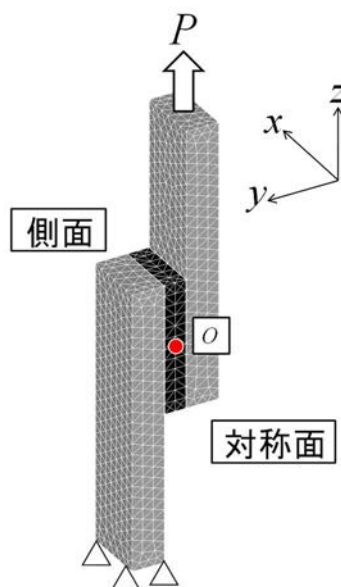


図-7 一面せん断試験体の要素分割図

た。なお、接着層厚はゴム製支承のモデルと同じ 0.1mm とし、全ての部材の接合は剛結とした。

使用した要素の条件はゴム製支承の条件と同じであるが、全て 1 辺 0.5mm でメッシュ分割を行った。

解析に用いた材料定数は、ゴム層と接着層は表-2、表-4 と同じとした。鋼板は、表-3 中の上下鋼板と同じとした。

境界条件は、図-7 に示すように、下側に張り出した方の鋼板の下面に位置する全ての節点の全方向変位を拘束、 yz 対称面上に位置する全ての節点の x 方向変位を拘束することで与えた。

载荷は、図-7 に示すように、上側に張り出した方の鋼板の上面に、 z 方向に荷重制御で与えた。

自重と幾何学的非線形条件は前節と同じとした。

3. 解析結果および考察

(1) 90° 剥離強さ試験の解析結果

y 軸方向に変位を与えたモデルのせん断ひずみ γ_{yz} の分布を図-8 に、y 軸に対して 30° の方向に変位を与えたモデルのせん断ひずみ γ_{yz} の分布を図-9 に示す。本節においては、両モデルに生じるひずみや応力の差が大きく、どちらかに合わせると、片方の色が 1 色で表示されてしまうため、コンター表示を合わせていない。また、図-9 において、赤い四角で示した箇所が高いせん断ひずみ γ_{yz} が生じているが、これは、図-2 に示した図の形状で FEM 解析モデルを作成すると、y 軸に対して 30° の方向で载荷した場合、曲率を有する箇所さらに大きな曲率が生じるような変形挙動が生じ、大きいひずみが生じてしまうためである。これは、本解析特有の挙動であり、実際の試験では生じないため、この点に留意して y 軸に対して 30° の方向に変位を与えたモデルは考察していくこととする。

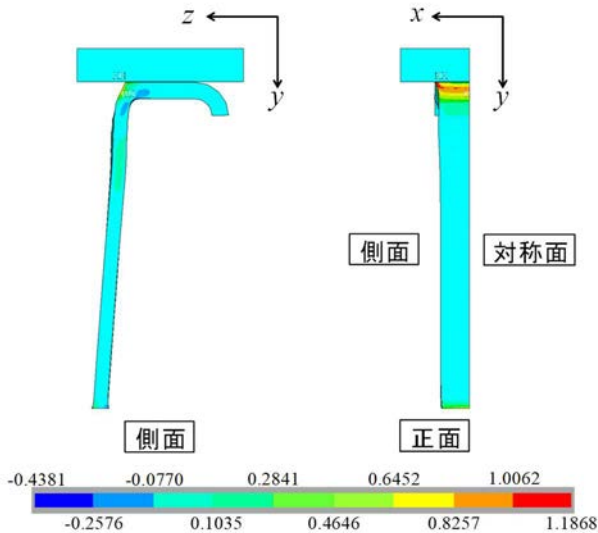


図-8 y 軸方向に変位を与えたモデルのせん断ひずみ γ_{yz} 分布

接着界面に焦点を当て図-8 と図-9 を比較すると、いずれのモデルにおいても、接着層および接着界面付近のゴム層にせん断ひずみ γ_{yz} は生じておらず、接着部の端部に局所的に高いせん断ひずみ γ_{yz} が生じている。また、せん断ひずみ γ_{yz} の値を比較すると、ジグの回転を拘束した図-8 のモデルの方が高いせん断ひずみ γ_{yz} が生じている。

y 軸方向に変位を与えたモデルの第一主応力の分布を図-10 に、y 軸に対して 30° の方向に変位を与えたモデルの第一主応力の分布を図-11 に示す。接着界面に焦点を当て図-10 と図-11 を比較すると、両モデルとも接着部の端部周辺に高い応力が分布し、生じる値は図-10の方が大きいことが分かる。これらの挙動は、せん断ひずみ γ_{yz} の挙動と一致する。

そこであらためて同じモデルどうしのせん断ひずみ γ_{yz} と第一主応力の分布を比較すると、図-8 と図-10 どうし、図-9 と図-11 どうしはそれぞれ非常に近い分布挙動を示す事が分かる。破壊の起点となるのが局所的に生じ

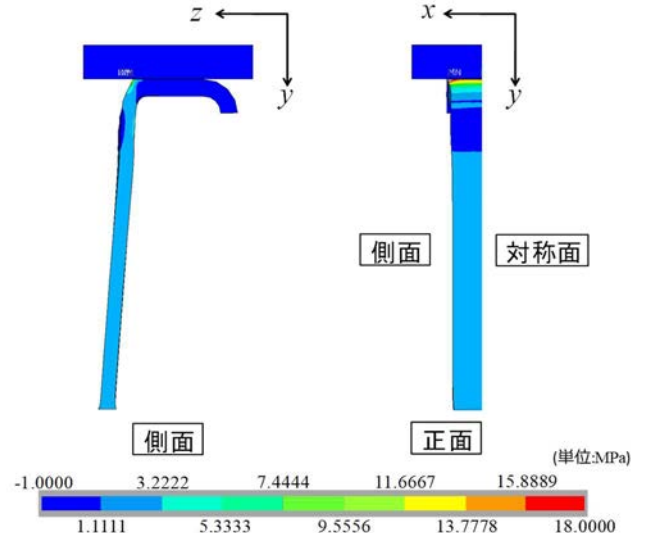


図-10 y 軸方向に変位を与えたモデルの第一主応力分布

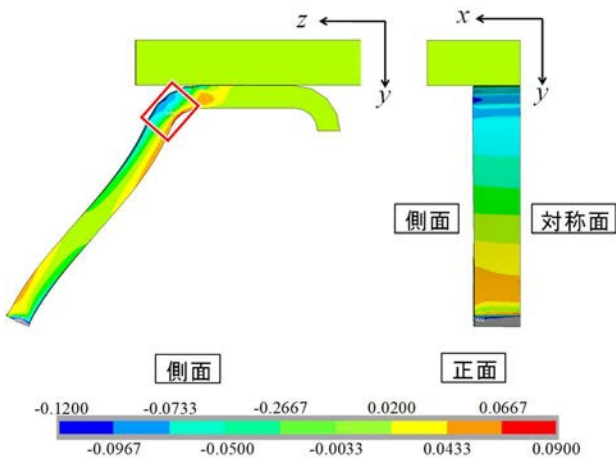


図-9 y 軸に対して 30° の方向に変位を与えたモデルのせん断ひずみ γ_{yz} 分布

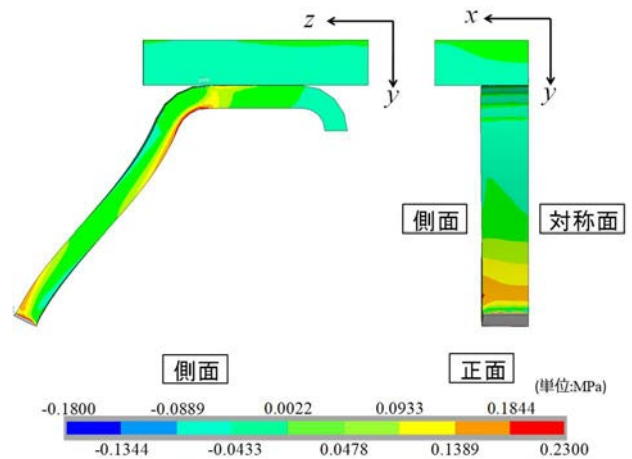


図-11 y 軸に対して 30° の方向に変位を与えたモデルの第一主応力分布

る高い値であれば、90° 剥離強さ試験の破壊原因がどちらかという判断は難しい可能性がある。また、JIS K 6256-2:2013 に規定される剥離強さは、剥離時の荷重を試験体幅で除して求めるので、剥離の起点が局所的に生じる高いせん断ひずみ γ_{yz} もしくは第一主応力によるもの場合、非常に安全側の値を求めてしまう可能性が示唆される。

(2) 一面せん断試験の解析結果

15kN 荷重時の一面せん断試験体に生じるせん断ひずみ γ_{yz} の分布を図-12 に示す。

図-12 を見ると、せん断ひずみ γ_{yz} は yz 断面に一樣に同じ値が分布するのではなく、中心部に生じるせん断ひずみ γ_{yz} に対して、鋭角となる変形が生じるエッジの箇所ではせん断ひずみ γ_{yz} が大きく生じ、鈍角となる変形が生じるエッジの箇所ではせん断ひずみ γ_{yz} が小さくなる挙動が見られる。

側面と対称面とでせん断ひずみ γ_{yz} を比較すると、対称面に生じるせん断ひずみ γ_{yz} 分布の方が値が大きい。せん断破壊が生じる場合、対象面から生じる可能性が示唆される。

接着界面に焦点を当てると、対称面、側面ともに、界面に高いせん断ひずみ γ_{yz} は生じていない。本試験体は、エッジ部に生じるせん断ひずみ γ_{yz} が試験体全体のせん断ひずみ γ_{yz} の分布に影響していることが見て取れ、接着界面に生じるせん断ひずみ γ_{yz} を十分な精度で把握するためには、せん断面の荷重方向の長さ (z 軸方向の長さ) を長くする必要が示唆される。

一面せん断試験体に生じる第一主ひずみの分布を図-13 に示す。図-12 に示すせん断ひずみ γ_{yz} の分布とは分布形状が逆となり、鈍角側に第一主ひずみが卓越していることが分かる。また、図-13 のコンターの黄色とオレンジの境目の値を第一主応力に換算すると 36MPa となるが、ゴム支承便覧では、引張強さを 15MPa 以上、文献 2), 10) では破断時の第一主応力を 63.1MPa としており、それらと比しても大きい値となる。よって、鋭角側で破壊する場合はせん断、鈍角側で破壊する場合には引張による破壊となり得ることが示された。

(3) ゴム製支承の解析結果と他試験結果との比較

a) せん断ひずみ γ_{yz} 分布

3 径間連続鋸桁のアバットのモデル (以後、3 径間連続アバットモデル) に極限状態に相当する水平せん断ひずみを 230.2%を与えた時に支承内部に生じるせん断ひずみ γ_{yz} 分布を図-14 に、3 径間連続鋸桁のピアのモデル (以後、3 径間連続ピアモデル) に極限状態に相当する水平せん断ひずみを 215.8%を与えた時に支承内部に生じるせん断ひずみ γ_{yz} 分布を図-15 に、単純 3 連鋸桁のア

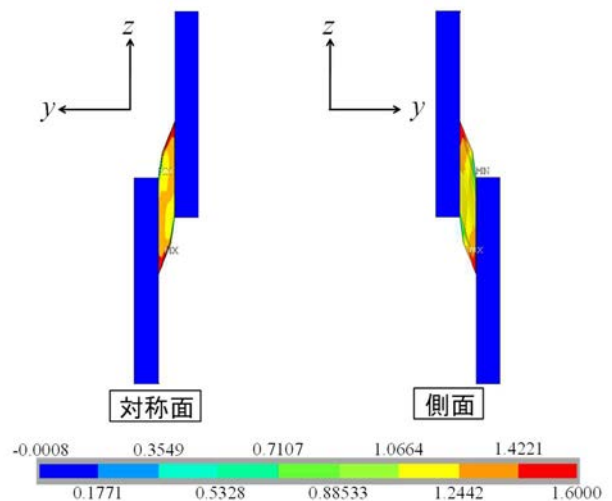


図-12 一面せん断試験体に生じるせん断ひずみ γ_{yz} 分布

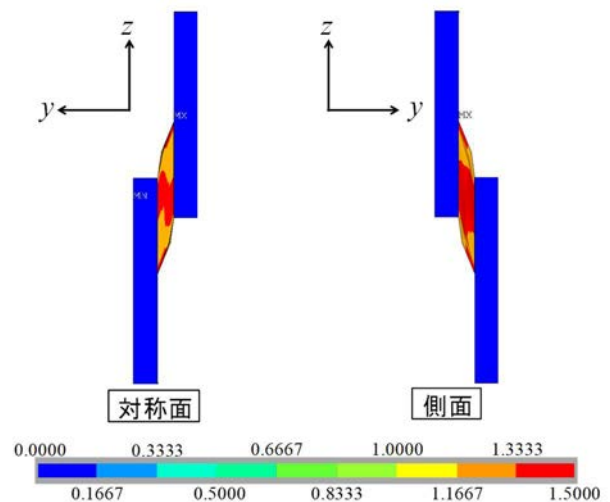


図-13 一面せん断試験体に生じる第一主ひずみ分布

バットのモデル (以後、単純 3 連アバットモデル) に極限状態に相当する水平せん断ひずみを 219.8%を与えた時に支承内部に生じるせん断ひずみ γ_{yz} 分布を図-16 に、単純 3 連鋸桁のピアのモデル (以後、単純 3 連ピアモデル) に極限状態に相当する水平せん断ひずみを 233.2%を与えた時に支承内部に生じるせん断ひずみ γ_{yz} 分布を図-17 に示す。なお、各図では、図を見やすくするために上下沓を取り除いて表示した。また、解析結果を応力で出力した場合、鋼材に大きい値が生じ、応力分布図のゴム部にコンターが割り振られなくなる。そこで本節では、応力ではなく、ひずみで検討していく。

図-14~図-17 を比較すると、せん断ひずみ γ_{yz} 分布の傾向に大きな差は見られない。各モデルにおいては、支承全体の高さ、上沓上部に荷重した死荷重、ゴムの単層厚に差があるが、それらの差は、極限状態時のせん断ひずみ γ_{yz} 分布に大きな影響を及ぼさないことが確認された。

せん断ひずみ γ_{yz} の挙動を詳しく見ていくと、ゴムが

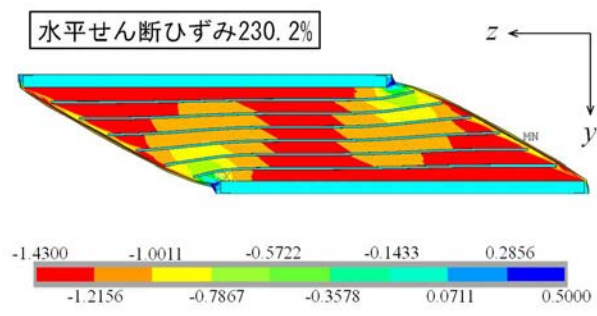


図-14 3径間連続アバットモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

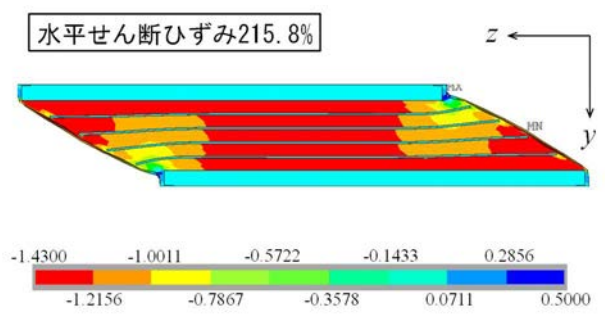


図-15 3径間連続ピアモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

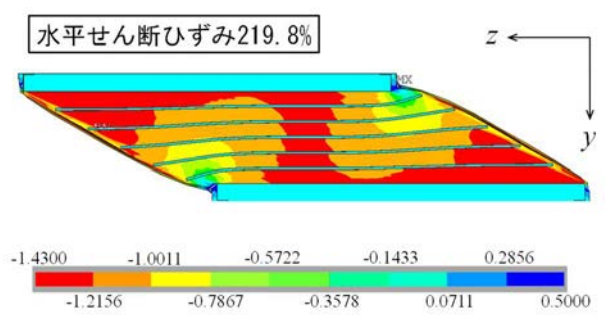


図-16 単純3連アバットモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

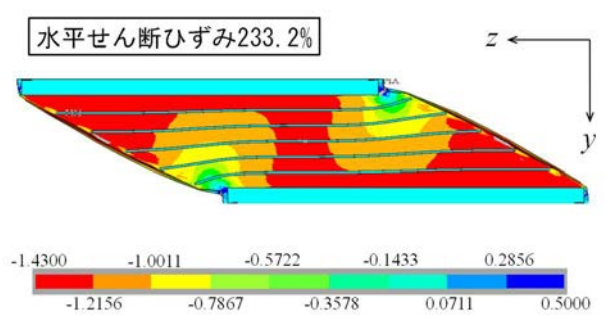


図-17 単純3連ピアモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

鈍角に変形する側の上下鋼板のエッジ部周辺（各図で左下，右上）で変形が複雑となっており，局所的に正のせん断ひずみ γ_{xz} が生じている．鈍角に変形する箇所以外のせん断ひずみ γ_{xz} は負であるため，ひずみの連続性が

ら，徐々に正のせん断ひずみ γ_{xz} が減少し，負のせん断ひずみ γ_{xz} へと代わり，徐々に値が大きくなっていく挙動が球根状に分布している．また，鈍角に変形する箇所でのせん断ひずみ γ_{xz} 分布は複雑なものとなるが，生じる正の値の最大値は，負の最大値の1/3ほどの値であるから，この箇所でのせん断破壊は生じないと推察される．

材料界面に焦点を当てると，既報⁵⁾では，異種材料間のヤング率比に大きな差がある場合，接着界面にせん断ひずみ γ_{xz} が卓越し剥離に繋がる可能性を示唆したが，各図を見ると，接着層を含む鋼板とゴムの境界面にせん断ひずみ γ_{xz} の卓越は見られない．よって，仮にゴム製支承の接着界面でせん断破壊が生じた場合，単純に，支承内部に生じるせん断ひずみ γ_{xz} が，接着層のせん断強度，ゴムのせん断強度を超えた場合にのみ生じる可能性が示唆される．

せん断ひずみ γ_{xz} 分布に関し，ゴム製支承（図-14～図-17）と，90°剥離強さ試験体（図-8，図-9）および一面せん断試験体（図-12）とを比較すると，ゴム製支承の内部に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布と一面せん断試験体に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布とが，よく一致していることが分かる．せん断によってゴム製支承が破壊する場合，一面せん断試験結果を接着剥離の評価に用いる方が精度が高い可能性が示唆される．

しかしながら，図-14～図-17を見ると，せん断ひずみ γ_{xz} が球根状に低くなっている箇所に位置する内部鋼板が曲げ変形をしており，この挙動が図-14～図-17の挙動に影響している可能性が示唆され，単純に一面せん断試験で得られる結果と比較してよいかどうかの判断は難しい．よって，単純3連ピアモデルを対象とし，ひずみ%が50%，100%，150%，200%となる変位を与えた解析を実施し，内部鋼板の曲げ変形挙動がせん断ひずみ γ_{xz} の分布挙動に与える影響を確認した．

単純3連ピアモデルを対象とし，ひずみ%が50%，100%，150%，200%となる変位を与えた解析結果を図-18～図-21にそれぞれ示す．なお，最初に内部鋼板が曲げ変形で降伏するひずみは，83%となる．

弾性域となる図-18を見ると，被覆ゴムに生じるせん断ひずみ γ_{xz} は，中心部のゴムと比べて1/3ほどの低い値で分布することが分かる．その影響で，左右端部の鋼板付近に他所より小さいせん断ひずみ γ_{xz} の分布が見られるが，それ以外のゴムにはほぼ一定のせん断ひずみ γ_{xz} が分布している．

内部鋼板が降伏した後の図-19と図-20を見ると，被覆ゴムに生じるせん断ひずみ γ_{xz} は，鋭角の変形をする側から徐々に大きくなるとともに，中心部に生じていた大きいせん断ひずみ γ_{xz} の分布が，狭まって行くのが分かる．

さらに200%水平せん断ひずみを作用させた図-21に

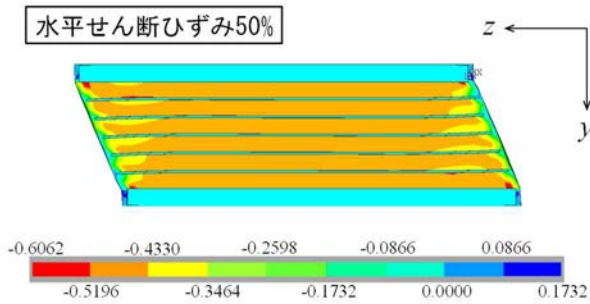


図-18 50%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

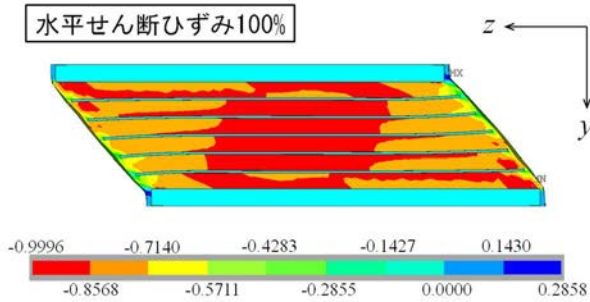


図-19 100%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

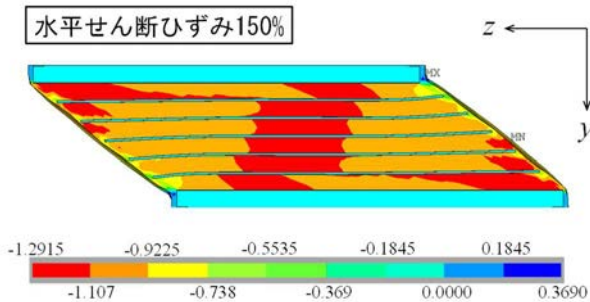


図-20 150%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

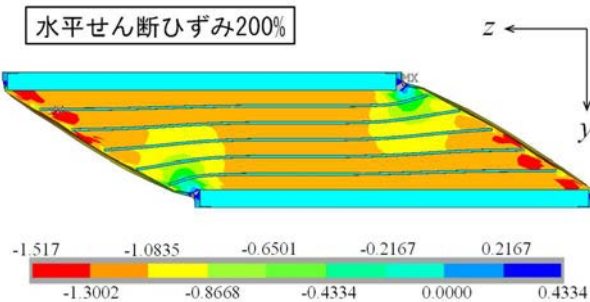


図-21 200%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じるせん断ひずみ γ_{xz} 分布

おいては、下から2番目の内部鋼板の左側と上から2番目の内部鋼板の右側にも降伏箇所が現れ、図-17同様、せん断ひずみ γ_{xz} の分布が一面せん断試験体に生じるせん断ひずみ γ_{xz} の分布とよく一致する挙動となることが

分かる。

以上より、ゴム製支承が極限状態に近づけば近づくほど、一面せん断試験体の挙動と一致する可能性が示唆された。3.(2)では、内部に生じる応力分布を一様にするため、エッジ部の応力の卓越の影響が小さくなるよう、せん断面を荷重方向に拡大する必要を記したが、極限状態のみを対象とするのであれば、図-6のモデルでも十分であり得る。

b) 第一主ひずみの分布

3 径間連続アバットモデルに極限状態に相当する水平せん断ひずみを 230.2%を与えた時に支承内部に生じる第一主ひずみ分布を図-22に、3 径間連続ピアモデルに極限状態に相当する水平せん断ひずみを 215.8%を与えた時に支承内部に生じる第一主ひずみ分布を図-23に、単純3連アバットモデルに極限状態に相当する水平せん断ひずみを 219.8%を与えた時に支承内部に生じる第一主ひずみ分布を図-24に、単純3連ピアモデルに極限状態に相当する水平せん断ひずみを 233.2%を与えた時に支承内部に生じる第一主ひずみ分布を図-25に示す。なお、各図では、図を見やすくするために上下沓を取り除いて表示した。

図-22～図-25を見ると、与えた水平せん断ひずみの値が近い図-22と図-25、図-23と図-24がそれぞれ同じような分布をしている。図-22と図-25においては、断面全体に大きい第一主ひずみが分布しているのに対し、図-23と図-24においては、鋭角に変形する側の鋼板に沿ってゴムに大きい第一主ひずみが分布している。第一主ひずみは、与える水平せん断ひずみがいほど大きくなるため、上記結果は与えた水平せん断ひずみの量によって生じた特徴である可能性がある。そこで、同じモデルに対し異なるひずみを与えて比較していくこととする。

単純3連ピアモデルを対象とし、ひずみ%が50%、100%、150%、200%となる変位を与えた解析結果を図-26～図-29にそれぞれ示す。各図においては、左右の挙動が点対称となるので、ここでは左側の断面に焦点を当て考察していく。また、水平せん断ひずみ83%で一番下の内部鋼板に曲げ変形によって降伏箇所が現れるが、降伏していない箇所では曲げ応力最大の位置を結んだラインを図-27と図-28には加えてある。

水平せん断ひずみ50%時(図-26)には、上下鋼板のエッジ部周辺のゴムに他所より大きい第一主ひずみが局部的に生じているのみであるが、水平せん断ひずみが100%に拡大すると、図-27中に加えた各内部鋼板に生じる弾性域の曲げ変形最大箇所を結んだライン上を中心として、内部鋼板に沿うような形でゴムに大きい第一主ひずみが生じている。この内部鋼板に沿うように生じる大きい第一主ひずみは、内部鋼板の曲げ変形の引張側、つまり、図-27中では内部鋼板の上側に生じているが、曲

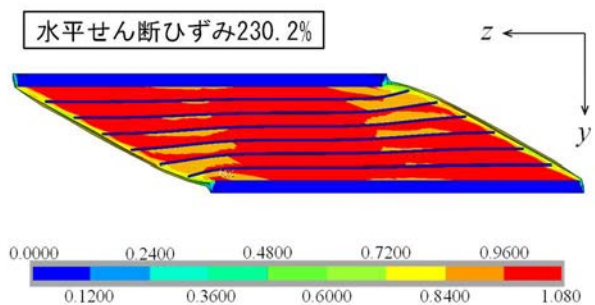


図-22 3径間連続アバットモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

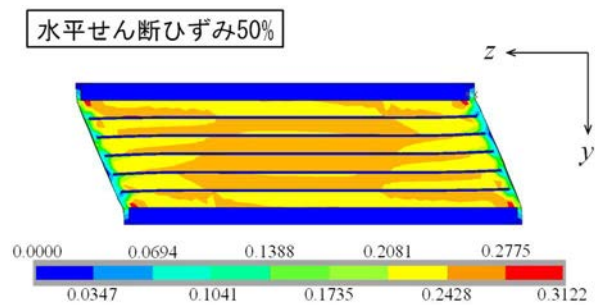


図-26 50%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

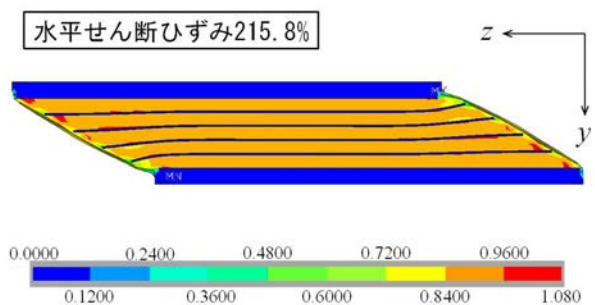


図-23 3径間連続ピアモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

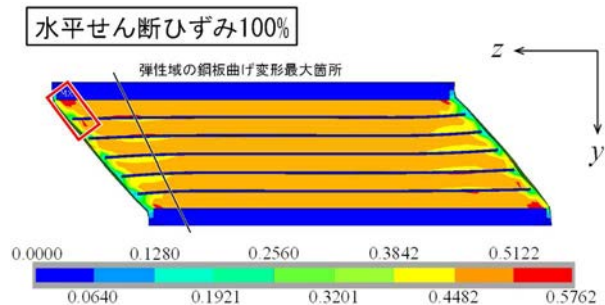


図-27 100%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

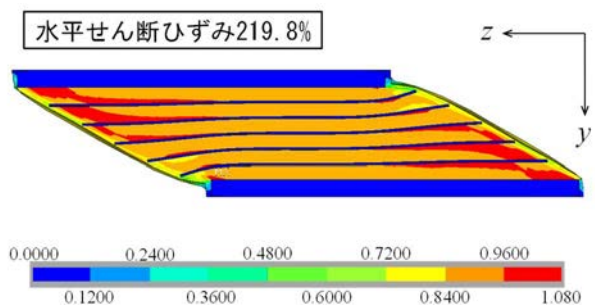


図-24 単純3連アバットモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

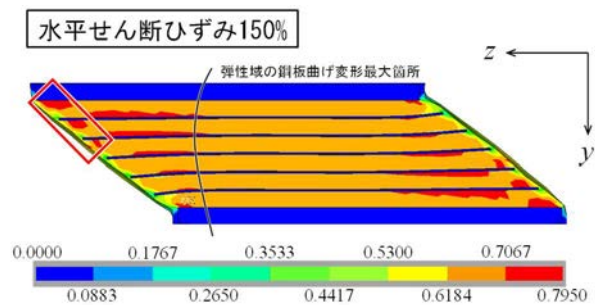


図-28 150%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

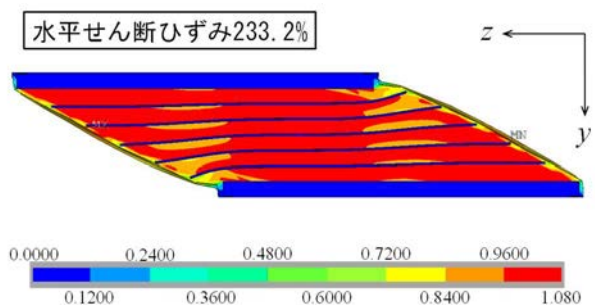


図-25 単純3連ピアモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

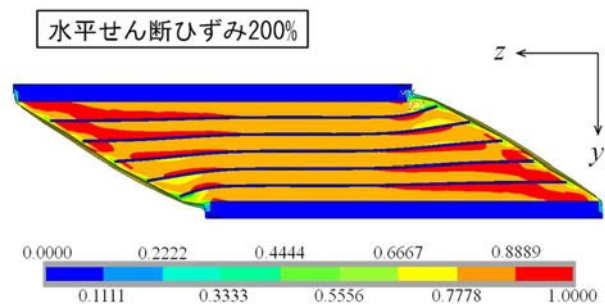


図-29 200%水平せん断ひずみを作用させたモデルの対称面に生じる第一主ひずみ分布

げ変形が大きい下部の内部鋼板では無く、曲げ変形が小さい上から2枚分の内部鋼板の上側に生じている。また、図-27 中で赤い四角で示した位置では、上鋼板のエッジ部に生じる大きい第一主ひずみの領域が拡大し、一番上

の内部鋼板下部にも、局所的に大きい第一主ひずみが生じている。それに対し、下鋼板のエッジ部に生じる大きい第一主ひずみの領域は拡大しておらず、一番下の内部鋼板のエッジ付近に大きい第一主ひずみは見られない。

水平せん断ひずみが 150% (図-28) に拡大すると、全内部鋼板の上側に位置するゴムに、内部鋼板上側に沿うように大きい第一主ひずみが生じており、曲げ変形が小さい上部に位置する内部鋼板の上側ほど、大きい第一主ひずみが水平方向に広がっていくことが分かる。また、一番下の内部鋼板の塑性領域が広がるにつれ、各内部鋼板に生じる弾性域の曲げ変形最大箇所を結んだラインがより中心部にずれており、その挙動によって大きい第一主ひずみが水平方向に広がる挙動に繋がっていると推察される。また、赤い四角で示した箇所では、上鋼板および内部鋼板の下側に生じる大きい第一主ひずみが上から 2 番目の内部鋼板にも生じており、領域も拡大している。

水平せん断ひずみが 200% (図-29) においては、上の 3 本の内部鋼板の上側に生じる大きい第一主ひずみと、上鋼板および上から 2 番目までの内部鋼板の下側に生じていた大きい第一主ひずみとが連続するようになる。水平せん断ひずみがさらに大きくなっていくにつれて、下から 2 番目の内部鋼板の上側のゴムにも同じ挙動が現れ、加えて図-29 の大きい主ひずみの領域が拡大し、最終的に図-25 に示す第一主ひずみの分布になっていくことが示された。

以上より、内部鋼板の曲げ変形によって内部鋼板の上側に大きい第一主ひずみが生じるようになり、内部鋼板の降伏によって、大きい第一主ひずみの領域が拡大していく挙動が明らかとなった。この第一主ひずみがゴム製支承の破壊に繋がり得るかを確認するために、応力の値が大きく出てしまう鋼部材を取り除いた図の代表例として、図-25 の時のゴムのみが生じる第一主応力分布を図-30 に示す。

図-30 を見ると、ゴム支承便覧で引張強さの最低値として示されている 15MPa を超える第一主応力が、鋭角に変形している左上および右下の位置に広く分布していることが分かる。よって、第一主応力が鋼板とゴムの剥離に影響する可能性が示唆される。

以上の結果と、90° 剥離強さ試験結果、一面せん断試験結果を比較すると、最大値が鋭角側か鈍角側かの違いはあるが、一面せん断試験の方が、ゴム製支承に生じる第一主応力に似た挙動を示すことが分かる。よって、せ

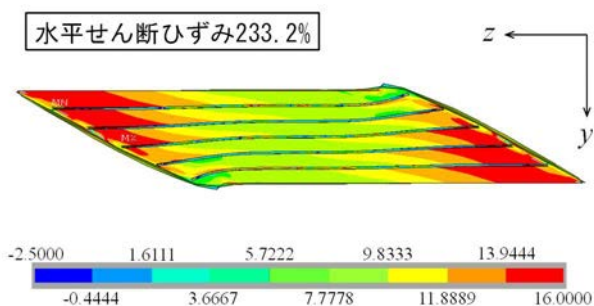


図-30 単純3連ピアモデルの対称面に生じる第一主応力分布

ん断ひずみ γ_x 同様、第一主応力で破壊に至る場合も、一面せん断試験結果の方が、よりゴム製支承に生じる破壊応力が得られる可能性が示唆された。

4. まとめ

本論文では、ゴムと鋼板の集合体としてのデバイスのより良い接着力評価方法を検討するために、試設計した 4 種類のゴム製支承、90° 剥離強さ試験 (JIS K 6256-2:2013) および一面せん断試験を対象とした FEM 解析を実施し、内部応力状態を比較した。得られた知見を以下に示す。

- ・90° 剥離強さ試験モデルでは、せん断ひずみ γ_x 、第一主ひずみとともに、接着面のエッジに局所的に大きく生じることが示された。JIS K 6256-2:2013 では、剥離時の荷重を試験体幅で除して求めるため、試験から得られる剥離強さは非常に安全側の数値である可能性が示唆された。
- ・一面せん断試験モデルでは、せん断ひずみ γ_x 、第一主応力とともに、試験体の中心から点対称となる分布を示し、せん断ひずみ γ_x の場合、鋭角となる変形をする側のひずみが最大値となり、鈍角となる変形をする側のひずみが最小値となる。一方、第一主ひずみの場合、せん断ひずみ γ_x とは逆に、鋭角となる変形をする側のひずみが最小値となり、鈍角となる変形をする側のひずみが最大値となることが示された。
- ・ゴム製支承の内部に生じるせん断ひずみ γ_x に関し、接着層および接着層界面のゴムと鋼材には、応力の卓越が生じないことが示されるとともに、一面せん断試験モデルのひずみ分布挙動とよく一致することが示された。ただし、水平せん断ひずみが 150% 時と 200% 時とでは、ゴム製支承の内部に生じるひずみの分布は大きく異なり、極限状態に近付いて行くほど一面せん断試験体の挙動に近付いて行くことが示された。
- ・ゴム製支承の内部に生じる第一主ひずみに関し、内部鋼板が曲げ変形によって降伏するまでは、上下鋼板のエッジ付近のゴムにのみ局所的に大きい第一主ひずみが生じるが、内部鋼板の上下一枚目が曲げ変形によって降伏すると、鋼板の降伏部の引張側界面に位置するゴム部に、薄く水平方向に広がるように大きい第一主ひずみが生じる。また、降伏を生じない鋼板のエッジ付近の鋼板下側にも球根状に大きい第一主ひずみが生じる。上下 2 枚目の鋼板も降伏すると、鋼板の上側に薄く水平方向に生じる第一主ひずみと下側に生じる球根状の第一主ひずみがつながり、やがて全体的に大きい第一主ひずみが分布することとなることが示された。
- ・極限状態にゴム製支承内部に生じる第一主応力の分布は、一面せん断試験に生じる分布と似た分布をすること

が示された。また、その時に得られる最大第一主応力は、ゴム製支承便覧に示されている最低値である 15MPa を超えることが示された。

REFERENCES

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，p. 267，2017. [Japan Road Association: *Dorokyo-shihosyo & Doukaisetsu V Taishinsekkei-hen*, p. 267, 2017.]
- 2) 日本道路協会：道路橋支承便覧，p.143，2019. [Japan Association: *Bearing Design Handbook for Road Bridge*, p.143, 2019.]
- 3) 崔準祐，成炫禹，原暢彦，今井隆，植田健介：軸応力をパラメータとした積層ゴム支承のせん断特性確認実験の再現解析とゴム支承の局部応力変化に関する検討，土木学会論文集 A1，Vol.74，No.4，p.795-802，2018. [Joon-Ho, Hyunwoo SUNG, Nobuhiko HARA, Takashi IMAI and Kensuke UEDA: FE analyses of experiments for shear properties of rubber bearing with parameters of axial stress parameters and evaluation of local internal stress of rubber bearing, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.74, No.4, pp. 795-802, 2018.]
- 4) 寺澤貴裕，佐藤京，安中新太郎：ゴム支承受付ボルトの超過作用時における破断に関する解析的検討，第 24 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.101-104，2021. [Takahiro TERASAWA，Takashi SATO，Shintaro YASUNAKA：gomu shisho toritsukeboruto no chokasayoji ni okeru hadan ni kansuru kaisekitekikento, *Proceedings of the 24th Symposium on Bridge Earthquake Engineering*, pp. 101-104, 2021.]
- 5) 村上海翔，佐藤京，寺澤貴裕，千田知弘，関昆竜太郎，荒川弦太郎，若槻 直暉：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：第 25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.357-364，2022. [Kaito MURAKAMI, Takashi SATO, Takahiro TERASAWA, Tomohiro CHIDA, Ryotaro SEKIKON, Gentaro ARAKAWA, Naoki WAKATSUKI: choudansei-parameta to secha-
- 6) 瀬戸万夢，千田知弘，崔準祐：ゴム支承の FEM 解析に向けた天然ゴム G10 の超弾性パラメータの同定，土木学会東北支部技術研究発表会（令和元年度），I-18，2020. [Maamu SETO, Tomohiro CHIDA, Joon-Ho：gomu shisho no FEM kaiseki ni muketa tennengomu G10 no choudansei-parameta no doutei, *Japan Society of Civil Engineer Technical research presentation*, I-18, 2020.]
- 7) 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，No.1，pp. 108-120，2011. [Tomohiro CHIDA, Takanobu SASAKI, Seizo USUKI, Humihiko GOTOU: Performance test and FEM analysis of a square steel tube-timber hybrid beam with a joint in the center, *Transaction of Japan Society of Civil (Engineers Structural engineering and Earthquake Engineering)*, Vol.67, No.1, pp. 108-120, 2011.]
- 8) 日本ゴム協会 配合技術研究分科会編：やさしいゴムの加工技術第 1 講 配合技術 原料ゴムの基礎，日本ゴム協会誌，Vol.92，No1，pp45-50，2019. [The Society of Rubber Science and Technology Japan haigo gijutsu kenkyubunkakaihen: yasashii gomou no kakogijutsu dai1ko haigo gijutsu genryogomou no kiso, *Journal of the Society of Rubber Science and Technology, Japan*, Vol.92, No1, pp45-50, 2019.]
- 9) 秦逸平：G10 ゴム材料の超弾性パラメータの同定，第 3 回ゴム支承研究会報告書，2019. [Ipppei HATA:G10 gomou zairyo no choudanseiparameta no doutei, *dai3kai gomou shisho kenkyukai houkokusho*, 2019.]
- 10) S.Kusuba, T.Kobayashi, K.Tasaki, J.Choi, T.Imai, K.Ueda: NUMERICAL SIMULATION ON FAILURES OF RUBBER BEARING DUE TO THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE, *The 17th World Conference on Earth Engineering*, 2020.

FE ANALYSES UTILIZED HYPERELASTIC MATERIAL PARAMETERS FOR STRESS DISTRIBUTION OCCURRED INSIDE RUBBER BEARINGS UNDER ULTIMATE STATE

Tomohiro CHIDA, Kaito MURAKAMI, Takahiro TERASAWA, Kensuke UEDA and Takashi SATO

When designing a rubber bearing with a structure in which rubber and steel plates are bonded together by adhesive, it is extremely important to prevent adhesive delamination from occurring before the rubber breaks. The road bridge bearing guidelines require that the 90° peel strength be 7 N/mm or greater. However, the actual internal stress state of rubber bearings under horizontal displacement has not yet been clarified, leaving a potential problem in the evaluation using the above test method.

In this paper, the internal stress state of four types of rubber bearings, a 90° peel strength test specimen, and a single lap shear test specimen were subjected to FEM analysis that took into account hyperelastic material parameters and adhesive layers. Better evaluation method of adhesive delamination was considered based on the results that internal stress state occurred each model was clarified and compared.