

有孔支点上ダイアフラムの挙動特性について*

永藤壽宮*¹・井上智之*²・野口亮輔*³

Behavior of the Existence Aperture Diaphragm on the Fulcrum of the Beam

NAGATO Toshimiya and INOUE Tomoyuki and NOGUCHI Ryosuke

Purpose in study is to investigate mechanical behavior of the existence aperture diaphragm on the fulcrum of the beam.

I carry out numerical value simulation in some models that changed the position of existence aperture and subsidence by the aging of the laminated rubber fulcrum this time.

Then I want to offer the data that is behavior of existence aperture diaphragm on the fulcrum of the beam.

キーワード：ダイアフラム，有孔，挙動

1. 本研究の背景と目的

我が国での橋は高度経済成長期に多く建設された。1960年までに建設された橋の数は約13,000橋だが、1970年までに建設された橋はその3倍の約41,000橋であり、今後、建設から50年を超える橋の数が急激に増加することになる。

道路橋は適切にメンテナンスしないと、腐食やひび割れに進展し、それがきっかけとなり強度が低下する恐れがある。そのため鋼橋を点検する場合には目視で腐敗やひび割れ状況を確認する必要がある。しかし鋼箱桁の場合、ダイアフラムに孔が設けていないと桁の内側の鋼板の状態を確認することが出来ず、点検のためダイアフラムに孔を設けているケースが多くある。

また橋梁の支承としてゴム支承を用いることが一般的となっている。ゴム支承上のダイアフラムの座屈挙動はまだ十分に解明されていない。

支点上ダイアフラム（支持ダイアフラム）はプレートガーダーの支点上補剛材に対応する部材で、ボックスガーダーのフランジとウェブを伝わってきた力を速やかに支承に伝達するためのものである。これに関する研究の多くは英国で行われている。

従って本研究では、以下に示す2項目について明らかにすることを目的としている。

- 1) 支送上ダイアフラムに設ける孔の位置、面積が耐荷力にどのような影響を与えるかを明らかにする。
- 2) ゴム支承を適用することが支点上ダイアフラムにどのような影響を与えるかを明らかにする。

支点上ダイアフラムの耐荷力に関する既存の設計では、提案されている応力算定式において、支点上ダイアフラムに設けた孔とダイアフラムの応力の関係は、開孔部に関してはその幅でのみ算入されているが、孔の上下の位置や面積については考慮されていない。

よって本研究では支点上ダイアフラムに設けた孔の位置、面積がどのようにダイアフラムの耐荷力に影響を与えるか調査した。

また支承条件を鋼からゴムに変更した場合における耐荷力への影響の調査も、それらに関する論文が少ないため、それらの影響を考慮した解析を行った。ただし時間軸における緩和応力などの影響は考慮せずに今回は単なる弾性係数などの変化による沈下などの影響のみを考慮して解析を行った。

2. 解析仮定と解析モデル

2-1 解析方法

本研究では3次元CAD設計ソフトウェアSolid Worksを用いて3次元でのモデルを作成し、同ソフト内でのSolid Works Simulationを用いて材料的非線形を考慮した解析を実行した。

*2015年3月土木学会中部支部で発表

*1 環境都市工学科教授

*2 株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング

*3 金沢大学工学部

原稿受付 2015年5月20日

2-2 材料特性解析モデル

鋼，積層ゴムの材料特性を表1に示す。

またゴムのポアソン比は通常0.45～0.5程度の値を取るとされているがポアソン比を0.5に設定すると解析ができないため上記の値にした。

2-3 解析モデル

今回の解析は既存の文献2)の実験的研究の成果との検証のためのAタイプ，開口部の大きさや位置の変化，支承の使用材料の変化などの影響を観察するためモデルをBタイプとして2種類のモデルを作成した。この2つのモデル間での相違点はウェブ，フランジの補剛材の有無，ダイアフラムの配置間隔のみである。

Aタイプは，既存の文献の実験で使用したモデルと同じ条件になるように作成した。

橋長5600mm高さ760mm幅1300mm，両端下部に250×250mmの支承を取りつけた垂直補剛材を有する単純箱桁とした。各部材厚は，フランジ厚9mm，ウェブ厚4.5mm，ダイアフラム厚10mmとして，ダイアフラムの間隔は520～1200mmとなっている。それらの支点上ダイアフラム，中間ダイアフラムの寸法図を図1に示す。

Bタイプでは解析時の利便性を考慮してウェブ，フランジに補剛材は無く，またダイアフラムの配置間隔は541mmと270.5mmとした。

A,B各モデルの全体図を図2，図3に示す。

2-4 拘束条件と荷重条件

拘束条件は，支承部にXYZ方向に拘束，1/2モデルの断面となっている面に対称，中間ダイアフラム上に鉛直荷重を中間ダイアフラム上に1点荷重した。

本研究では解析モデル，拘束条件，入力荷重全てが鉛直方向を軸に左右対称になっているため，解析結果の応力や変位も左右対称になると考え1/2モデルで解析した。

荷重を載荷させる位置を図に示し，境界条件らを視覚的に示したものを図5，図6に示す。

3. 解析結果

3-1 既存文献との比較

ここでは文献2)より引用した支点上ダイアフラムの下端部中央点での鉛直方向変位と荷重によって描かれる図7に示す荷重-変位曲線について論じる。

文献2)での実験では鋼板の弾性-塑性-崩壊挙動が明確に描かれている。一方で本解析では弾性挙動に関しては文献2)とかなり近い挙動をしている。しかしこれ以降のデータを得ることが出来なかった。原因としては，本研究では増分制御方法に荷重増分法を使用しているが荷重増分法では極限点に近づくと，アルゴリズムが不安定になり計算が収束しなく

表1 材料特性

使用材料	弾性係数	ポアソン比	降伏応力
	(N/mm ²)	(N/A)	(N/mm ²)
SS400	205000	0.29	283
天然ゴム	2.4	0.49	—

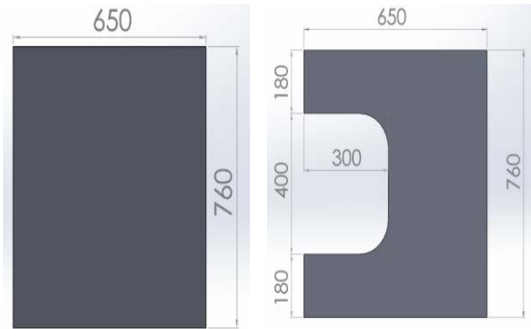


図1 支点上無孔と有孔ダイアフラム

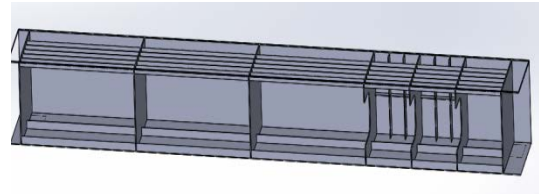


図2 Aモデル全体図

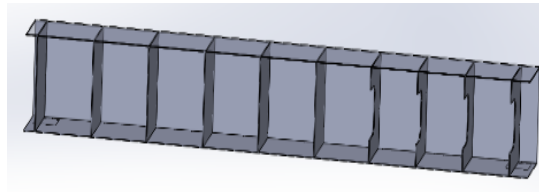


図3 Bモデル全体図

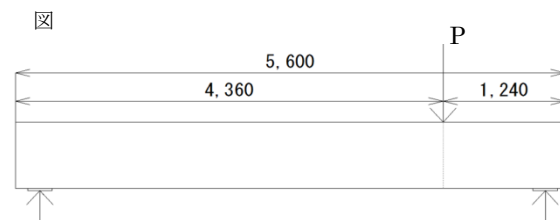


図4 荷重載荷位置図

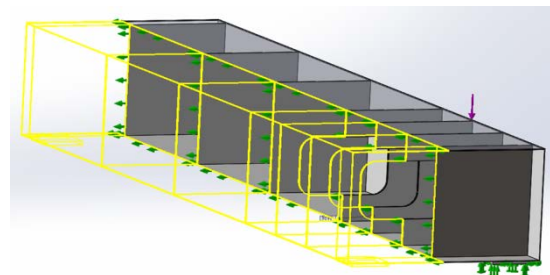


図5 境界条件図

なり解を得ることが出来ない、そのためある一点が極限点を迎えた荷重以上の荷重では計算させることが不可能である。

今回の解析では支点上ダイアフラムに注目してデータを採取しているが上フランジが先に極限点を迎えた、桁中央付近では強い曲げモーメントが生じるのでその影響と考えられる。そのため支点上ダイアフラムの極限点を求めることが不可能となってしまった。その模様が観察できるコンター図を図7に示す。

この結果から境界条件などに問題はないが、以降の解析を進めていく上でモデルに問題があると判断し、モデルの一部を変更して作成しBモデルとして以降の解析を行った。

3-2 ダイアフラムの耐荷力と孔の関係

3-2-1 孔の位置が一定で孔の面積が変化

前述したように、ダイアフラム以外の部材が極限点を迎えないようにダイアフラムの配置間隔を増やしたモデルで解析を行った。

本項で支点上ダイアフラムに設けた孔の位置は、ダイアフラムの中心点が孔の中心点になるようにモデリングした。

開口部の面積をダイアフラムの面積で除した値を面積比として、面積比が0.75までのモデルで解析を行い前述と同様に荷重-変位曲線を各面積比において作成したものを図8に示す。

面積比が大きくなるほど耐荷力が低下しており面積比0と0.75を比べると約50%低下していることが分かる、弾性域での挙動も比が大きくなるに従って傾きが大きくなっている。

変位の最大発生点はいずれの場合も支点近傍となっている、支点上ダイアフラムは「プレートガーダーの支点上垂直補剛材に対応する部材で、箱桁のフランジとウェブを伝わってきた力を速やかに伝達するためのもの」2)であるので本来の目的が十分に機能していることが分かる。

座屈形状を見ると断面が回転するように崩壊しているのが観察できた。

3-2-2 孔の面積一定で位置が変化

ここでは支点上ダイアフラムに設けた孔の面積を一定のまま、その位置を変更した場合の解析結果について論ずる。

ダイアフラム中心部に幅600mm、高さ400mmの孔を設け、図9に示すように孔の中心点からダイアフラム底辺までの鉛直距離 h とし、ダイアフラム高さ D で除した比をパラメーターとして作成した耐荷力の荷重-変位曲線を図10に示す。

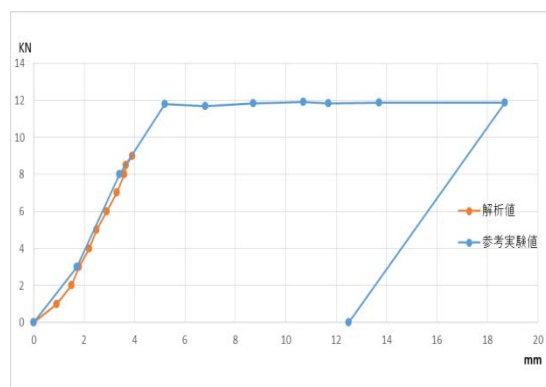


図6 荷重変位曲線による文献と本解析の比較

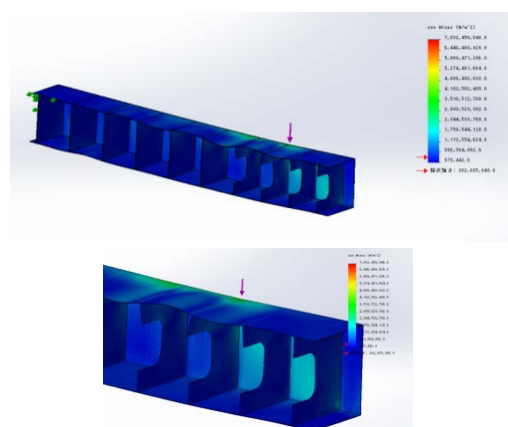


図7 von-Mises 応力分布図

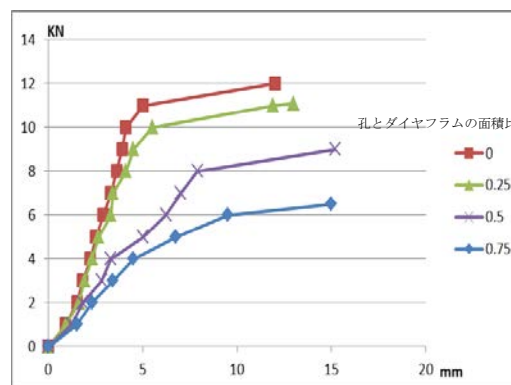


図8 孔の面積による荷重変位曲線の相違

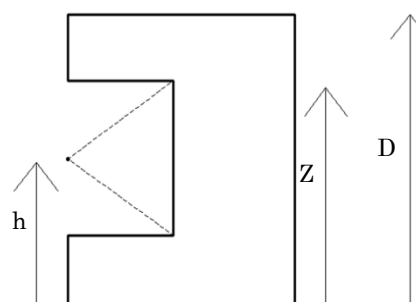


図9 高さパラメーター

孔の位置が下端部に近づくにつれて耐荷力が低下することが分かる。支点上ダイアフラムの応力は支点反力に支配的なため応力も下端部付近で強く発生する。そのため支点付近で孔により有効幅が減少したことが耐荷力の低下の原因として考えられる。

応力分布については、設計時に応力算定式として

$$\sigma_1 = \frac{R_v(1 - \frac{Z}{D})}{0.75 \sum A_{sz} + (b_{eff} - \sum W_c)t_D}$$

σ_1 :ダイアフラムの応力, R_v :支点反力, D :ダイアフラム高さ, Z :支点直上の下からの距離, A_{sz} :補剛材の断面積, b_{eff} :ダイアフラムパネルの有効幅, W_c :開口部などに対する控除幅, t_D :ダイアフラムの板厚が、すでに座屈設計ガイドライン等で提案されている。前述のように支点上ダイアフラムに設けた孔とダイアフラムの応力の関係は、開孔部に関してはその幅でのみ算入されているが、孔の上下の位置や面積については考慮されていない。

ここでは支点上ダイアフラムの応力と発生位置について論ずる。

前述と同様のモデルに荷重を載荷させたときの応力(N/mm)を横軸、図9に示すように下端から発生点までの鉛直距離Zをダイアフラム高さDで除した無次元パラメータD/Zを縦軸に作成したグラフを図11に示す。

現在の応力算定式を図に《既存式》と称して示したがこれを見るとダイアフラムの応力はZ/Dが小さくなる、つまり下端に近づくにつれて応力が大きくなり、応力勾配が一定の三角形分布をしていることが分かる。しかし本解析での結果を見ると、応力分布は曲線を描くことが分かった。

また、h/D=0.3時の荷重変位曲線を見ると、下端近傍では算定式よりも大きな応力を示している、そのためh/D=0.3以下で現在の算定式を元に設計を行うことは問題がある、またZ/Dが大きい0.9までは算定式よりも応力は小さく余裕のある値を示している。しかし0.9を超えると若干であるが算定式を超える応力が生じている。

つまり支承付近と上部端では本式によって安全性照査を行うことはできない。

それ以外については、どの高さパラメータでのグラフを見てもZ/Dが0.2~0.9の間では応力は算定式よりも低い値を有し、安全側に寄与していることが分かる。

3-3 ゴム支承適用時の挙動特性

3-3-1 支承部の材料による相違

ここでは支承部の材料を鋼かゴムかの違い、また

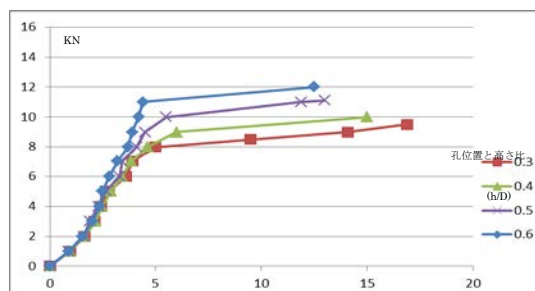


図10 孔の位置による荷重変位曲線の相違

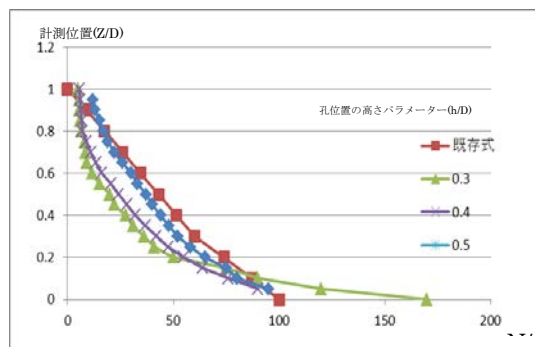


図11 高さとの関係図

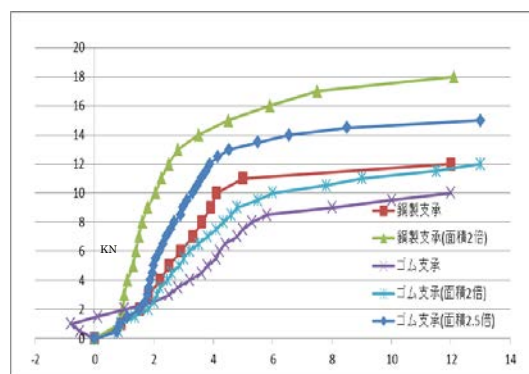


図12 支承材料面積による荷重変位曲線の相違

表2 ゴムの劣化を考慮した材料特性

	ヤング係数 N/mm ²	変化率 %	初期変位 mm
鋼製支承	205000	-	-
積層ゴム支承 (供用初年)	105800	-	-
積層ゴム支承 (供用20年)	117800	11.3	5.0

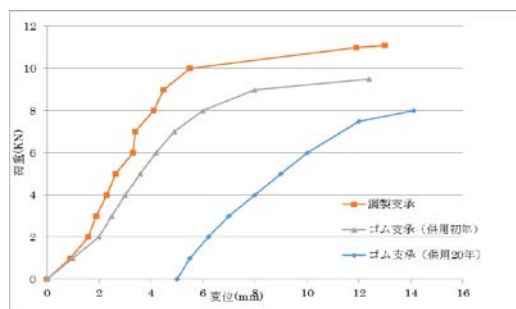


図13 支承経年沈下での荷重変位曲線の相違

ゴム支承の支持面積の変化がダイヤフラムにどのような影響があるかを検証した。

鋼製支承とゴム支承で同面積の場合での耐荷力を比較すると、鋼製支承が高い値を有している。これはゴム支承のヤング係数が小さく、剛性が低いことが理由のひとつとして挙げられる。また、ゴム支承の曲線の挙動を見ると、ゴム支承側で変位量が負から正に転じているが、ゴム支承の影響によりひずみの反転現象が起きていると考えられる。

実際にゴム支承で橋梁を作成する場合は支持面積を鋼製支承よりも大きくすることが一般的とされている、本研究ではアスペクト比を同一のまま支持面積を2倍、2.5倍にしたモデルでも解析を行った。

その結果について論じると、ゴム支承の面積を2倍程度にすると、鋼製支承と近い耐荷力が得られることがわかる。ゴム支承の面積を増加させることにより、支承からの反力を、局部的に応力が集中する箇所がないように分散したことが耐力の上昇に起因していると考えられる。

しかし本解析では時間変化によりゴム材料の応力緩和は考慮していないため、支承面積の増加が必ずしも耐荷力に良い影響を与えるかを論じることが今回はできない。

3-3-2 積層ゴムの劣化による相違

積層ゴムの時間変化による劣化に着目し、その沈下量を強制的に変位させて、挙動特性を調査した。積層ゴムの劣化による材料特性を表2に示す。支承の経年沈下による荷重変位曲線の相違については図13に示す。経年沈下により、耐荷力性能が落ちているのが観察できるが、データ数が少ないため系統的に論じることは、今回は難しい。

3-4 箱桁フランジ部でのLP鋼板の使用

箱桁に1面増厚と2面増厚の2種類のLP鋼板のフランジを使用して直線橋と斜橋で最大応力の比較を行った。

斜橋は、図15に示すように85°とした。

フランジに使用したLP鋼板を図14に示す。またダイヤフラム数と直線橋、斜橋での最大応力の比較表を図16、と図17に示す。

平均断面積を同じとする場合、ねじれ荷重や等分布荷重において一面増厚モデルが優位性が高いことが観察できる。

4. 結論

4-1 まとめ

本研究では、高次四面体要素を用い、支点上ダイヤフラムの耐荷力についての解析を行った。まず、

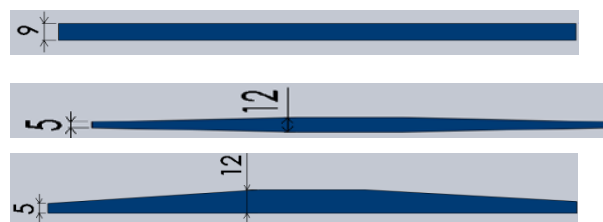


図14 フランジ等厚とLP鋼板の寸法

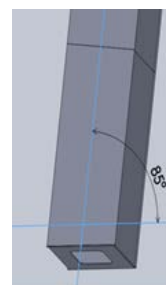


図15 斜橋俯瞰図

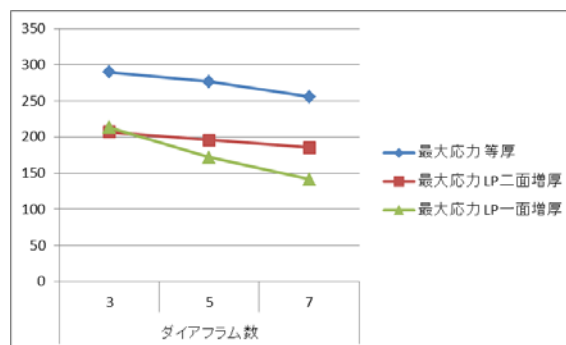


図16 直線橋最大応力

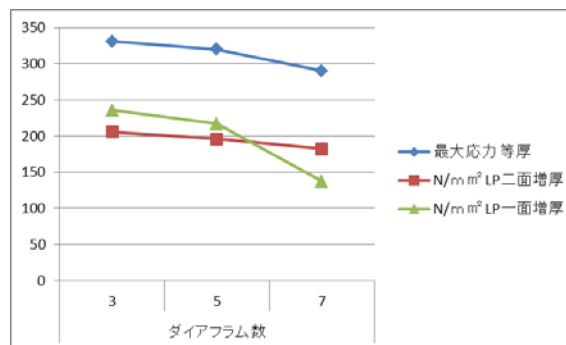


図17 斜橋最大応力

既存の文献と比較検証を行い、その後有孔ダイヤフラム、ゴム支承上のダイヤフラムについての荷重-変位挙動を調査した。

(1)既存論文とは弾性域での挙動は一致した。

既出の文献同様の条件下で解析を行い比較したところ、弾性域では近いデータを与えることが出来たが、塑性域付近の挙動はダイヤフラムより先にフランジが極限点を迎えてしまいダイヤフラムの耐荷力を求めることが出来なかった。以後の解析ではダイヤフラム以外が先に降伏することが無いよう留意しモデル作成を行った。

(2) 支承上ダイアフラムと孔の関係は耐荷力に影響している。

孔の位置をダイアフラムの中心に合わせ面積を変化させて解析を行った結果、孔が大きくなるにつれて耐荷力が低下することが分かった。

孔の面積を変えずにその位置を変化させて解析を行った結果、孔が支承に近づくほど応力が大きくなり、既存の算定式は支承付近では適用できないと分かった。

(3) ゴム支承の場合、挙動に変化が認められた。

ゴム支承を適用して解析を行うと、ダイアフラムの変形挙動が鋼製支承と異なることが確認された。時間による応力緩和を考慮しない場合、ゴム支承で鋼製支承と同等の耐荷力を発揮するには面積を2倍

倍程度にする必要があると分かった。

(4) L P 鋼板をフランジに使用するとねじれ荷重や等分布荷重において一面増厚モデルが優位性が高い。

参 考 文 献

- 1) 座屈設計ガイドライン改定第2版[2005年版], 土木学会, 第12章
- 2) 鋼箱桁支点上ダイアフラムの挙動に関する基礎的研究, 清水茂, 第6章
- 3) 天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究, 柳・開発他, 昭和電線レビュー, Vol. 59, No. 1 (2012)