

鋼道路橋の落橋防止装置連結板の応力解析と設計手法に関する一考察

Stress Analysis and Design of Tie Plate used as a Bridge Restrainer

鈴木五月*

後藤芳顕**

松浦聖***

By Satsuki SUZUKI , Yoshiaki GOTO , Sei MATSUURA

This paper is on the design formulas for the tie plate used as a bridge restrainer. In the present specification, it is required to check the tie plate for the maximum tensile stress as well as the bearing stress due to the pressure between the pin and the tie plate. However, the design formulas to estimate the magnitude of these stresses is derived using a simplified model and, hence, the validity of these formulas is not clear.

Herein, the accuracy of the present design formulas is investigated by analysing the link system as a contact problem, where the interaction between the pin and the tie plate is precisely taken into account. Further, based on the above investigation, accurate formulas are presented.

1. まえがき

現在、道路橋においては、地震時に上部構造が橋脚または橋台から逸脱、落下しないようにすべての桁に落橋防止構造を設けることが、道路橋示方書¹⁾(以下道示と略記する)により義務づけられている。この落橋防止構造として、図1に示すように次の三つの方法がある。それは、1)地震時に上沓が下沓から逸脱するのを防止するために可動支承部に移動制限装置を設けることと、2)地震時に桁が下部構造頂部から逸脱して落橋するのを防止するために、桁端から下部構造頂部縁端までの桁長さを

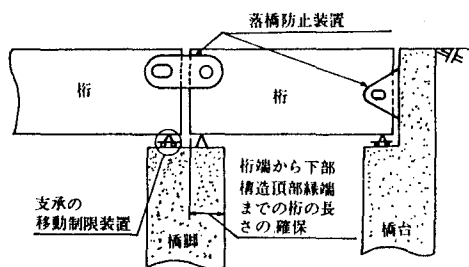


図1 落橋防止構造

を十分確保することと、3) 2)と同じ目的で支承部以外に鋼橋の場合、図2、図3にその詳細図が示されるような落橋防止装置を設けることである。このうち、道示では、1)と少なくとも2), 3)のどちらか一方の組み合わせで、対処することが義務づけられている。本報告では、3)のピンと連結板と主桁腹板を補強する補強板より構成されている落橋防止装置を対象とし、特にピンと連結板の支圧応力と連結板に発生する最大引張

* 工修 名古屋高速道路公社

(〒460名古屋市中区三の丸)

** 工博 名古屋工業大学助教授

工学部社会開発工学科

(〒466名古屋市昭和区御器所町)

*** 工博 名古屋工業大学教授

工学部社会開発工学科

(〒466名古屋市昭和区御器所町)

応力の算定式について検討する。なお、補強板については、別の機会に報告し、ここでは扱わないことにする。

落橋防止装置の設計法について、道示では明確に示されていないので、各団体により独自に決められているのが現状である^{2)~6)}。しかしながら、これらの各団体の設計法についても、多くの仮定が導入されており、その妥当性は必ずしも明確でない。

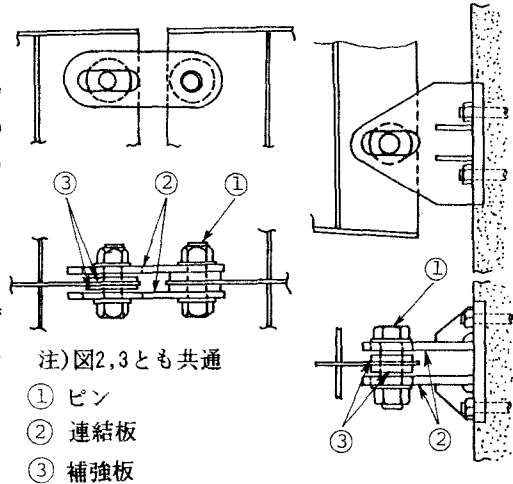
まず、落橋防止装置のピンと連結板との支圧形式は、連結板の孔径とピン径との比は通常約1.02以上なので、ヘルツ理論による支圧形式になるが、基準の式は接触時に連結板がかなり変形をすることを予想して、面接触になると考え、ヘルツ理論による算定は行われていない。すなわち、現行の支圧応力の算定式は、図4に示すように支圧応力の分布形状を三角関数で仮定し、その範囲を 45° ²⁾または 90° ^{3) 4)}と仮定して、外力とのつりあい条件により求められている。しかし、面接触になるという仮定と、支圧分布形状ならびにその範囲の仮定は十分検証されていない。

また、ヘルツ理論による支圧公式を用いるにしても、この理論は、半無限弾性体上の一点に作用する集中荷重に対する解を利用していることと、接触面での応力分布を円弧で仮定しているため、解の適用性もこの仮定の範囲に限られ、落橋防止装置の連結板のような有限領域の弾性体についてどのような精度を有しているか不明である。

次に、連結板の引張応力の算定式については、図5に示すように同心円板の内側半円領域と、外側の半円領域に三角関数で仮定された法線方向の力を加えた場合について求めたアイバーの設計式⁷⁾が準用されているのが一般的である^{2) 3) 4)}。しかしながら、連結板の孔径とピン径との比が約1.02~1.15程度の場合には、支圧応力は内側半円領域全体には発生しない。また、その反力分布も、アイバーのような反力分布は示さない。したがって、アイバーの場合の算定式がそのまま連結板の設計に適用できるとは限らないと考えられる。

そこで、本報告では、落橋防止装置のピンと連結板の連成を考慮し、この部分の応力解析の問題をより実状に即した接触問題としてとらえ、力学特性を明らかにすることにより、現設計法の問題点を明らかにするとともに、改良を加えるものである。なお、落橋防止装置の連結板の本来の性格からして、地震時に連結板に作用する動的荷重のもとで、図5の終局強度に基づいた設計を行うべきであるが、今回は、現行設計法^{2)~6)}のわく内で検討することにとどめ、震度法により評価される静的荷重のもとでの弾性解析による設計を基本としている。

接触問題の解法としては、最近、とみにその有用性が認められてきた境界要素法により接触問題の定式化を行い、数値計算により解く手法を用いている。境界要素法を解析手法として用いた理由としては、境界要素法による線形弾性問題の解析においては、最終的に弾性体表面での変位と表面力を扱うことにより解析を行うことができるため、接触問題のような境界非線形問題に対する取扱いが比較的容易にできるということ



注) 図2,3とも共通

- ① ピン
- ② 連結板
- ③ 補強板

図2 落橋防止装置 (2連の桁を連結)

図3 落橋防止装置 (桁と下部構造を連結)

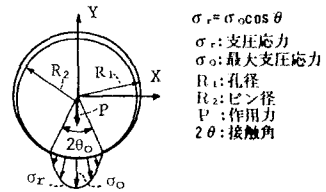


図4 支圧応力の仮定

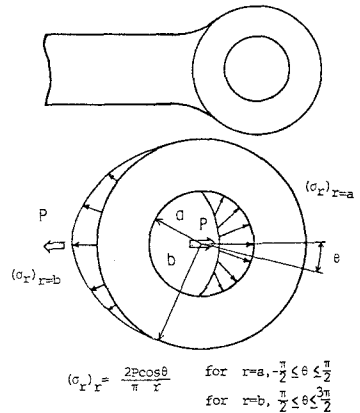


図5 アイバーとその力学モデル

と、数値計算のために行う境界要素法の基礎方程式の離散化は、弾性体の表面のみを分割することで足りるので、解析すべき問題を1次元少なくすることができ、計算時間の短縮ができるからである。

2. 境界要素法による接触問題の定式化^{8)~11)}

全体座標系としては、図6で定義される直交直線座標 $X_i (i=1, 2)$ を導入する。この座標系に基づき、一つの弾性体について、物体力を考慮しない2次元弾性微小変位問題における境界要素法の基礎方程式を記述すると次のようになる。

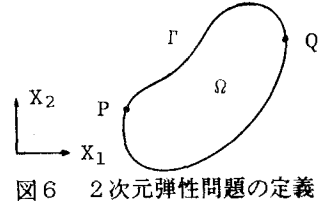


図6 2次元弾性問題の定義

$$c_{ij} u_j(P) + \int_{\Gamma} T_{ij}(P, Q) u_j(Q) d\Gamma(Q) = \int_{\Gamma} U_{ij}(P, Q) q_j(Q) d\Gamma(Q) \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 c_{ij} は、点Pが境界の場合は点Pにおける境界の形状により決定される係数であり、点Pが領域内の点である場合は単位行列である。 $u_j(P)$ は、P点におけるj方向の変位であり、 $u_j(Q)$ 、 $q_j(Q)$ は、Q点におけるj方向の変位と表面力をそれぞれ表す。また、 $T_{ij}(P, Q)$ 、 $U_{ij}(P, Q)$ は、Kelvinの基本解であり、Q点におけるj方向の単位荷重に対するP点でのi方向の表面力と変位をそれぞれ表す。なお、式(1)における下添字のローマ字は2次元の全体座標系1,2を表す。式(1)におけるように、添字が二重に使われている場合は、それらの添字に総和規約を適用する。以後の式についても、特に明記しない限り下添字のローマ字は、2次元の全体座標系または後に定義される局所座標系1,2を表し、添字についての総和規約も適用される。

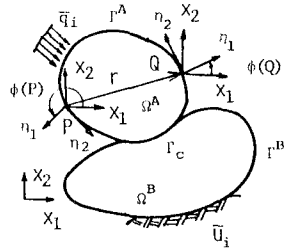


図7 接触問題の定義

次に、図7に示すように2次元弾性体A,Bが、境界 Γ_c を界して接している問題を考える。ここで、境界の物理量成分を記述するために新たに局所座標系 $\eta_i (i=1, 2)$ を導入する。この局所座標系は図7に示すように、境界にそって η_2 を、またそれに直交し、外側を向く方向に η_1 をそれぞれ選ぶ直交曲線座標である。2次元弾性体A,Bの境界を $\Gamma^E (E=A, B)$ で表すとき、式(1)の基礎方程式をそれぞれの2次元弾性体に適用し、局所座標成分を用いることで、以下の基礎方程式が、2次元弾性体 $E=A, B$ についてそれぞれ成立する。

$$\begin{aligned} c_{ij}^{*E} u_j^{*E}(P) + \int_{\Gamma^E - \Gamma_c} T_{ij}^{*E}(P, Q) u_j^{*E}(Q) d\Gamma(Q) + \int_{\Gamma_c} T_{ij}^{*E}(P, Q) u_j^{*E}(Q) d\Gamma(Q) \\ = \int_{\Gamma^E - \Gamma_c} U_{ij}^{*E}(P, Q) q_j^{*E}(Q) d\Gamma(Q) + \int_{\Gamma_c} U_{ij}^{*E}(P, Q) q_j^{*E}(Q) d\Gamma(Q) \quad \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ただし、Eについては、総和規約は適用しない。

また、式(2)は接触条件を考慮するのに便利のように、次式で示される座標変換を行った後の式である。

$$\begin{aligned} T_{ij}^{*E}(P, Q) &= f_{ki}(P) f_{lj}(Q) T_{kl}^E(P, Q) & U_{ij}^{*E}(P, Q) &= f_{ki}(P) f_{lj}(Q) U_{kl}^E(P, Q) \\ u_j^{*E}(Q) &= h_{jk}(Q) u_k^E(Q) & q_j^{*E}(Q) &= h_{jk}(Q) q_k^E(Q) & c_{ij}^{*E} &= f_{ki}(P) f_{lj}(P) c_{kl}^E \quad \dots \quad (3 \cdot a \sim e) \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} f_{11}=f_{22}=\cos \phi \quad f_{21}=-f_{12}=\sin \phi \quad f_{ki} h_{kj}=\delta_{ij} \quad \dots \dots (4 \cdot a \sim c)$$

ここに、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。物理的には、 u_j^{*E} 、 q_j^{*E} は境界上で定義された局所座標系の η_j 方向の変位ならびに表面力成分であり、図8にその方向を示す。

接触部分において、2次元弾性体A,Bに対する4個の基礎方程式(2)を連立して解くためには2次元弾性体 Ω^A 、 Ω^B の接触境界面で合わせて8個の未知量があるので、接触部分での接触条件式4個が必要である。また、非接触部分では、境界条件から方程式の数と未知量の数は一一致する。本解析で使用了接触条件式は、摩擦がない接触を仮定しており、次式のとおりである。以上により、基礎方程式(2)を解くことができる。

$$u_1^{*A} + u_1^{*B} - u_1^{*0} = 0 \quad q_1^{*A} = q_1^{*B} \leq 0 \quad q_2^{*A} = q_2^{*B} = 0 \quad \dots \dots (5 \cdot a \sim c)$$

ただし、 u_1^{*0} は図8に示すような接触前の2点間の距離である。しかしながら、一般的には図8において、2次元弾性体 Ω^A の η_1 方向と2次元弾性体 Ω^B の η_1 方向が一致するとは限らない。本解析における u_1^{*0} の計算方法は、3.2要素分割のところで述べる。

次に、数値計算を行うために、式(4)の接触条件式のもとに基礎方程式(2)の離散化を行う必要がある。本解析では、弾性体の境界を一定要素で分割し、また境界での変位と表面力も各要素中央点の値で代表させる一定要素による解析を行った。本解析の対象である落橋防止装置のピンと連結板の要素分割については、3.2要素分割のところで述べる。

式(2)の積分を実行するためには接触境界 Γ_c を知る必要がある。しかしながら、 Γ_c は外力の関数となり未知量であるため、ある外力に対し Γ_c を仮定して式(4)を満足するような Γ_c を反復計算により求めるなければならない。本解析では円と円孔との接触問題であり、その支圧応力分布は接触領域の中央点に対して対称となるので、1/2の領域を計算対象とすればよい。接触領域決定のためここで用いた反復計算法は、離散化された接触境界の端の節点の支圧応力を q_1^* とする時、次に示す通りである。

- 最初に仮定した Γ_c に対して計算された q_1^* が許容誤差以内の場合は、この Γ_c を答えとする。
- 最初に仮定した Γ_c に対して計算された q_1^* が許容誤差より大きい圧縮力の場合は、接触要素をひとつずつ増して行き、引張力に転じた時の Γ_c と1つ前のステップの Γ_c をこれらの引張応力と圧縮応力により線形補間して求めた Γ_c を答えとする。
- 最初に仮定した Γ_c に対して計算された q_1^* が許容誤差より大きい引張力の場合は、接触要素をひとつずつ減して行き、圧縮力に転じた時の Γ_c と1つ前のステップの Γ_c をこれらの圧縮応力と引張応力により線形補間して求めた Γ_c を答えとする。

上述の反復計算により境界上の各節点での変位と表面力が求められると、一定要素により離散化された式(1)より、弾性体内部の任意の点での変位が計算できる。そして、弾性体内部の任意の点での歪や応力は式(1)の変位により表わされるので、やはり境界上の各節点での変位と表面力がわかれば計算できる。

3. 数値計算

3. 1 解析モデルとパラメータ

通常使用されている落橋防止装置としては、適用箇所の差により異なった2種類の構造がある。すなわち、図2に示すように、2連の桁を連結する端部が丸い帯状の連結板を用いるものと、図3に示すように桁と下部構造を連結するためにテーパのついた連結板を用いるものとで、それぞれタイプ1、タイプ2と呼ぶことにする。タイプ1の落橋防止装置の連結板に関する力学特性を知る意味では、片方の接触部分のみを考慮する部分モデルで十分である。したがって、本解析ではタイプ1、タイプ2いずれについても、落橋防止装置のピンと連結板に着目して、図9に示すような部分モデルを用いる。解析モデルの形状を決定するパラメータは、 $R_1/R_2, R_3/R_1, L_1/R_1$ 、

$L_2/R_1, L_3/R_1$ 、 ϕ があげられるが、このうち $L_2/R_1, L_3/R_1$ は、実構造に用いられる範囲では、応力分布の差に大きく影響しないと考えられるので、これらのパラメータについては検討しない。荷重としては、X方向の力Pを半径 R_2 のピンの重心に作用させる。作用方法の詳細は、次の節で述べる。左端の支持条件について、Y

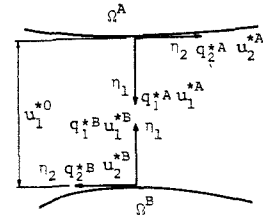


図8 u_1^{*E}, q_1^{*E} の方向と初期すきま

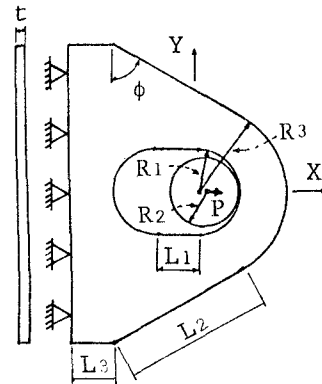
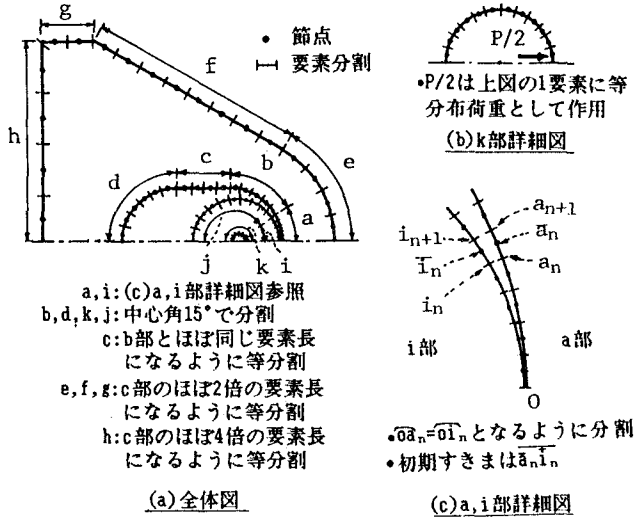


図9 解析モデルとパラメータ

方向の変位拘束の有無により解析結果はほとんど変わらないので、XY方向とも固定として解析を行った。

3. 2 要素分割

図9のモデルは、2章で述べたように数値計算を行うために一定要素により分割を行う必要がある。要素分割としては収束性、精度を考慮して、図10(a)に示すものを用いた。すなわち、円弧の部分を中心角が 15° となるように分割するのを基本とし、接触領域の部分は、対称な接触領域の半分で10程度の節点が得られるようにさらに細かい分割をおこなった。直線部分は、連結板内側円弧の分割長さの1.4倍程度の長さで分割し、接触領域より離れるにしたがい要素分割長を長くした^{10)~12)}。作用荷重Pは、ピンの中心に R_2 の4%の半径の円をあけて¹²⁾、図10(b)に示すように荷重を作用させた。これらの分割方法によると、以下の解析結果よりわかるように、支圧応力は、ヘルツ理論による結果とほとんど一致するので、分割方法には問題はないと考えられる。なお、接触問題を解析するための初期すきま u_{i^*0} は、次のように決定する。図10(c)に示すように、近似的に接触領域の中央からその境界長さが等しくなる点どうしが接触することを考え、これらの変形前の距離を u_{i^*0} とする。



3. 3 力学特性

図10 要素分割

3. 3. 1 タイプ1の落橋防止装置

(1) パラメータの範囲

タイプ1は、図9の ϕ が 90° と固定されるので、これを除外したパラメータ $R_1/R_2, R_3/R_1, L_1/R_1$ の範囲について述べる。

R_1/R_2 については、実際に使用されている落橋防止装置では、約1.02~1.1程度であるので、この範囲について調べればよいのであるが、面接触による支圧形式の範囲も含むように、 $R_1/R_2=1.001\sim1.2$ を範囲とした。

R_3/R_1 については、現在使用されている設計式の範囲が $R_3/R_1=2\sim4$ であるので、この範囲を含むように $R_3/R_1=1.5\sim4$ とした。

L_1/R_1 について、この値は固定支承側の落橋防止装置の連結板については $L_1/R_1=0$ である。可動支承側については、温度変化による桁の伸縮量により決定されるが、本パラメータが支圧応力に及ぼす影響は小さいので、ここでは、支圧応力の検討では主として $L_1/R_1=2$ に固定し、引張応力の検討では $L_1/R_1=0\sim3$ として解析を行った。これは、桁長が約150m位までの鋼橋を対象にしたことになる。

(2) 支圧応力

支圧応力は、従来の設計法の表示で用いられているようにピンの直径 $2\cdot R_2$ と連結板厚 t と作用荷重 P を用い

て無次元化した。

図11に最大支圧応力と R_1/R_2 の関係を、 $R_3/R_1, L_1/R_1$ をパラメータとしてヘルツ理論による支圧応力とともに示す。この図より、いずれも R_1/R_2 の増加とともに支圧応力も増加し、通常使用される R_1/R_2 が1.02以上で R_3/R_1 が2.5程度の連結板については、計算値とヘルツ理論による支圧応力はほとんど一致していることがわかる。また、この図より R_3/R_1 が2以上の場合、1.002から1.03の R_1/R_2 に対して計算値はヘルツ理論による支圧応力とほとんど一致しているか、あるいはヘルツの支圧応力の方が若干安全側を与えていることがわかる。他のパラメータ $R_3/R_1, L_1/R_1$ については、図示の範囲では影響は小さい。図中の太実線は、従来の設計式に関するものであるが、これについては4章で説明する。

支圧応力の分布の状態を、図12(a)に $R_3/R_1=1.5, 2, 2.5, 4$ の場合につき、また図12(b)に $R_1/R_2=1.005, 1.02, 1.1$ の場合につきそれぞれ示す。図12(a)より支圧応力分布は、 R_3/R_1 が1.5と2~4では相当変化し、最大支圧応力は、 $R_3/R_1=2\sim 4$ では接触領域の中央、 $R_3/R_1=1.5$ では端部に生じている。図12(b)より、応力分布は R_1/R_2 により大きく変化することがわかる。この場合も最大支圧応力は、 $R_1/R_2=1.02, 1.1$ の場合は、接触領域中央に、 $R_1/R_2=1.005$ の場合は、接触領域の端部に生ずる。

以上より、支圧応力と各パラメータの関係についてまとめると、支圧応力は R_1/R_2 により支配的に変化するが、通常用いられる範囲の $R_3/R_1, L_1/R_1$ の影響は小さいといえることができる。

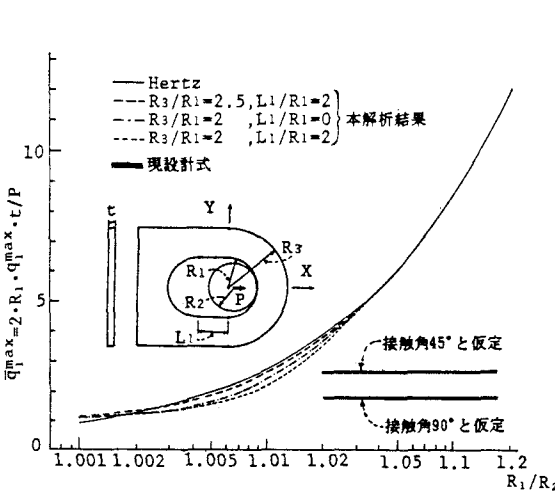


図11 最大支圧応力 $\bar{q}_1^{\max} - R_1/R_2$

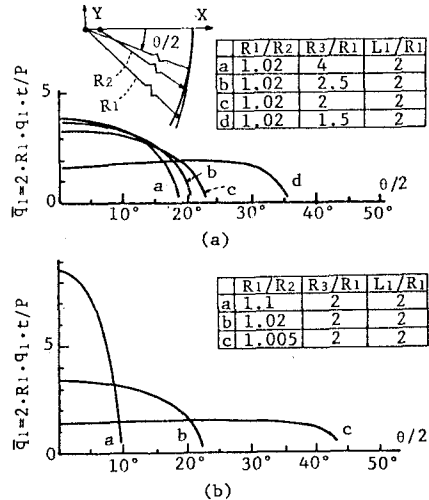


図12 支圧応力分布

(3) 引張応力

引張応力も、従来の設計法の表示に従いピンの直径 $2 \cdot R_2$ と連結板厚 t と作用荷重 P を用いて無次元化した。

図13に、境界上の各点での接線方向の引張応力と R_1/R_2 の関係を示す。この図より、接触領域近傍のa, b, c点では、1.02より小さい R_1/R_2 に対して、引張応力は相当変化しているが、接触領域より離れたd, e点では、引張応力は R_1/R_2 にたいしてほとんど変化しないことがわかる。

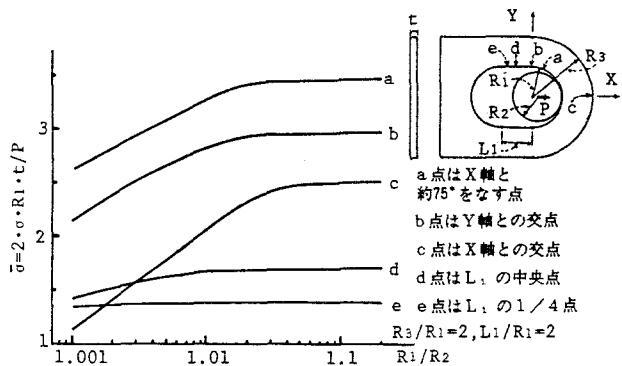


図13 引張応力 $\bar{\sigma} - R_1/R_2$

図14には、境界上の各点での接線方向の引張応力と L_1/R_1 の関係を示す。この図より、引張応力は L_1/R_1 に対してもほとんど変化しないことがわかる。

図15に、連結板内側の境界円上に沿う引張応力を示す。この図より、最大引張応力は、X軸と約75°の角度のところで発生していて、現行設計の照査点である90°のところより約10%大きいことがわかる。

図16に最大支圧応力と R_3/R_1 の関係を示す。この図より、 R_3/R_1 の減少とともに引張応力は増大するのがわかる。増大傾向としては、2以下の R_3/R_1 で急増し、2以上の R_3/R_1 に対してはその増加の仕方はゆるやかである。また、 R_1/R_2 による差は少ないことがわかる。図中のd,e線については、引張応力算定のための設計式であるが、これについては4章で説明する。

図17に主応力の分布を示す。この図より、接触領域の反対側の連結板外周上と、接触領域外の連結板孔の円周上で大きな引張応力が、発生していることがわかる。引張応力と各パラメータについて、以上の結果より、引張応力は通常使用される $R_1/R_2=1.02$ 以上の連結板については R_3/R_1 により支配的に変化し、 $R_1/R_2, L_1/R_1$ についてはあまり変化しないことがわかった。なお、一つのパラメータを変化させる場合、他のパラメータは固定したが、これには図中に示してあるような $R_1/R_2=1.02, R_3/R_1=2$ という平均的な値を選んだ。

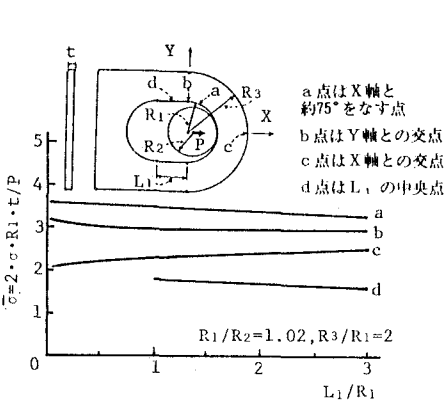


図 14 引張応力 σ_t - L_1 / R_1

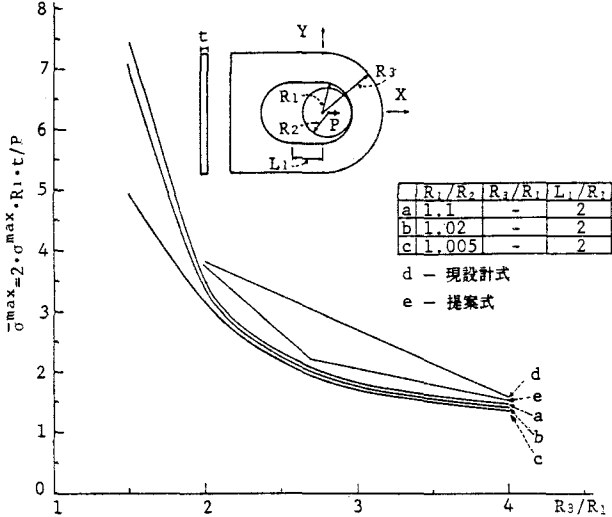


図 16 最大引張応力 σ_{max} - R_3 / R_1

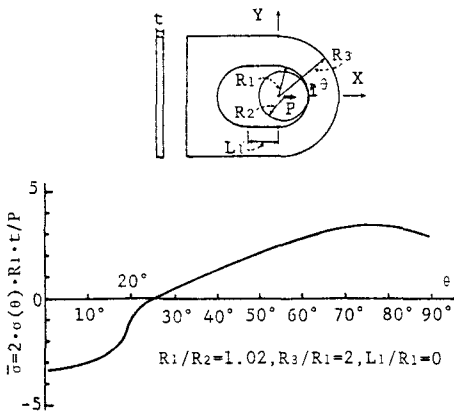


図 15 円孔円周に沿う引張応力分布図

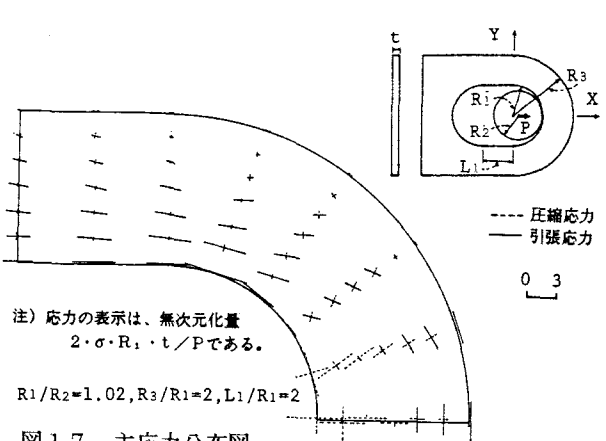


図 17 主応力分布図

3. 2. 2 タイプ2の落橋防止装置

(1) パラメータの範囲

解析に使用したパラメータ $R_1/R_2, R_3/R_1, L_1/R_1$ の範囲は、タイプ1とほとんど同じである。また、 ϕ については、約 $\phi=60^\circ$ 程度で設計される場合が多いので、この値を含むように $\phi=45^\circ \sim 90^\circ$ の範囲とした。ここでは簡単のため、タイプ2の検討結果について、タイプ1の場合とほぼ同じ結果については省略し、タイプ2に特有な結果を中心に示す。

(2) 支圧応力

タイプ2の支圧応力はタイプ1の場合と、ほとんど同じ値を示すので、ここでは省略する。

(3) 引張応力

引張応力の無次元化の方法は、タイプ1の場合と同様である。

図18に、各境界上の点での接線方向の引張応力と R_3/R_1 の関係を示す。この図のa線は、最大引張応力を示し、 $\phi=60^\circ$ の場合には、x軸と約 60° をなす連結板内側の円周上に生じていることがわかった。

図19に、図中に示す各境界上の点での接線方向の引張応力とテーパ角 ϕ との関係を示す。この図のa線は、最大引張応力を示しテーパ角 ϕ の増加とともに最大引張応力は増加しており、 $\phi=60^\circ$ の値は $\phi=90^\circ$ の値より約10%小さくなっていることがわかる。また、図中の点線は設計式であるが、これについては4章で説明をする。固定するパラメータとして値を、 $R_1/R_2=1.02, R_3/R_1=2, L_1/R_1=1, \phi=60^\circ$ に選んだ理由は、タイプ1の場合と同様である。

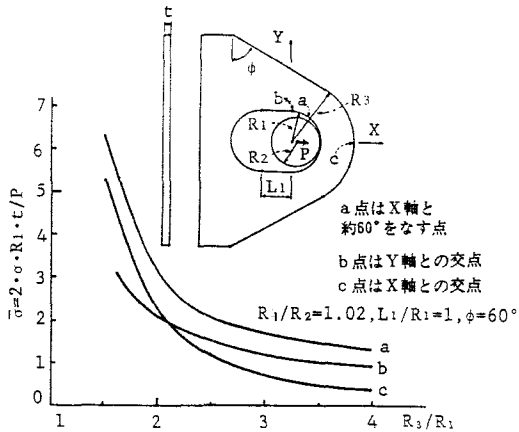


図18 引張応力 $\bar{\sigma}$ - R_3/R_1

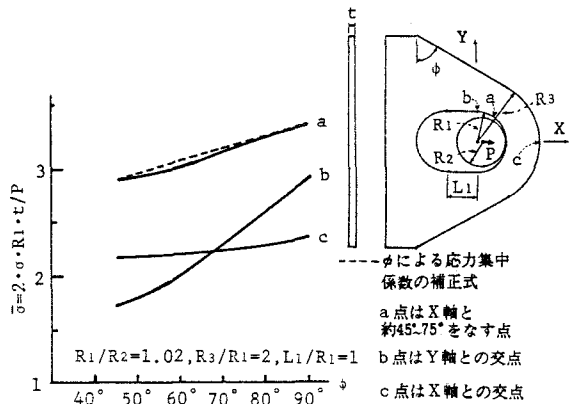


図19 引張応力 $\bar{\sigma}$ - テーパー角 ϕ

4. 現設計法に対する考察と提案式

4. 1 概要

落橋防止装置のピンの設計としては、支圧応力の他にせん断応力と曲げ応力について照査する必要があるが、これらの照査は道示の鋼橋編2.2.3の規定に従えば問題ないと考えられる。

連結板について、支圧応力と引張応力の他に、図20に示すように(a)板のはしぬけせん断と(b)板の端部引

張りについても照査することが考えられる。しかしながら、板のはしめせん断については、図17の主応力分布よりわかるように、せん断応力より引張応力の方が卓越するので、あえて照査する必要はないといえる。また、板の端部引張りについても、図13,14,18,19よりわかるように、c点の引張応力はa点の引張応力より常に小さいので、この照査もする必要はないと考えられる。したがって、以下に述べるように支圧応力と引張応力評価のための2つの式を提案することで、落橋防止装置の連結板の設計法をまとめることができると考える。

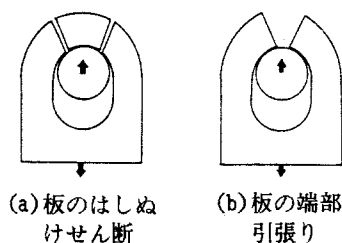


図20 破壊形式

4. 2 支圧応力

3. 2で述べたように、通常使用されている落橋防止装置のピンと連結板の支圧応力を計算するにはヘルツ理論による支圧公式を用いても、ほとんど問題はないことがわかった。すなわち、連結板は有限領域であり、ヘルツ理論による支圧公式が半無限弾性体を対象にしていることに反するが、このことは、あまり問題にならないことを意味する。一方、連結板に相当量の変形を予想した面接触による接触応力を求める従来の算定式については、図12より少なくともその分布は三角関数分布を示さないと考えられる。また、従来の算定式による最大支圧応力は図11に示すように、 R_1/R_2 により変化しないとしているが、このことは今回の解析結果より適当でないことがわかる。したがって、従来の算定式の適用には問題があると考えられる。

以上を考慮して、支圧応力を求める設計式として、ここではヘルツ理論による支圧公式を用いることを提案したい。すなわち、ピンと連結板のヤング係数が、 2100000kg/cm^2 の場合のヘルツ理論による支圧公式は、

$$q_1^{\max} = 60.63 \cdot (R_1 - R_2) \cdot P / (R_1 \cdot R_2 \cdot t) \quad \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここで、 $q_1^{\max}$:最大支圧応力、 R_1 :連結板孔径(半径)、 R_2 :ピン径(半径)、 P :1枚の連結板に作用する力、 t :連結板厚である。

4. 3 引張応力

引張応力については、3.2.1(3)で述べたように最大引張応力の発生位置は現設計法の場合とは少し異なり、引張応力の値そのものも現設計法の場合に求められた値の方が少し大きい、通常使用されている落橋防止装置の範囲ではほとんど差がないことがわかった。しかし、解析結果とともに示した図15の現設計式は、 $R_3/R_1=2$ と4の値を直線で結んでいるため、その間で過大な応力集中係数を与えている。そこで、現設計式と $R_1/R_2=1.1$ の場合の計算値の間に $R_3/R_1=2.7$ で勾配の変化するBi-Linearな曲線をタイプ1の落橋防止装置の最大引張応力の算定式として提案する。

$$\sigma^{\max} = k \cdot P / (2 \cdot R_1 \cdot t) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $2 \leq R_3/R_1 \leq 2.7$ の場合 $k = -2.143 \cdot R_3/R_1 + 7.986$

$$2.7 < R_3/R_1 \leq 4 \quad \text{の場合} \quad k = -0.5385 \cdot R_3/R_1 + 3.654 \quad \dots \dots \dots (8 \cdot a, b)$$

また、 $\sigma^{\max}$:最大引張応力、 R_3 :連結板の外径(半径)であり、その他の変数は、式(6)の場合と同じ意味である。

タイプ2の落橋防止装置の連結板については、テーパ角 ϕ により連結板の応力集中係数が変化することを考慮して、図19のa線で $\phi=90^\circ$ と 45° のところの引張応力の値を直線で結ぶことにより式(7)を補正した次式を最大引張応力の算定式として提案する。

$$\sigma^* = k^* \cdot \sigma^{\max} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{ここに、} 45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \text{ の場合 } k^* = 3.31 \cdot 10^{-3} \phi + 0.701 \quad \dots \dots \dots (10)$$

また、 $\sigma^*:k^*$ により補正された最大引張応力、 $\sigma^{\max}$:式(7)による引張応力、 ϕ :チーバー角である。

5. あとがき

本報告では、落橋防止装置のピンと連結板の応力解析の問題を線形弾性体の接触問題としてより厳密に解析することにより、現設計法で用いられている仮定ならびに設計式の妥当性を検討し、2,3の改善提案を行った。しかしながら、今回の検討では、現設計法同様、弾性解析に基づいているため、改善もその範囲にとどまっている。落橋防止装置の本来の機能からすると主にその終局強度が問題となるので、今後は、これに着目したより合理的な設計を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，PP.50-56，1980
- 2) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準，PP.398-422，1984
- 3) 首都高速道路公団：首都高速道路・鋼構造物設計基準，PP.83-88，1981
- 4) 福岡北九州高速道路公社：鋼構造物設計基準，PP.21-24，1982
- 5) 日本道路公団：鋼構造物設計基準，PP.7-243-7-249，1980
- 6) 阪神高速道路公団：鋼構造物設計基準，PP.350-357，1982
- 7) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. : Theory of Elasticity (3rd ed.), Tokyo, PP.136-139, 1970
- 8) Telles, J.C.F. : The Boundary Element Method Applied to Inelastic Problems, edited by Brebbia, C.A. and Orszag, S.A. , Lecture Notes in Engineering ,1, Springer , Berlin , 1983
- 9) Banerjee, P.K. and Butterfield, R. : Boundary Element Methods in Engineering Science, McGraw, Hill , London , 1981
- 10) Brebbia, C.A. : The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press, London , 1978
- 11) Brebbia, C.A. (ed.) : Progress in Boundary Element Methods, Volume 2, Pentech Press , PP.136-157, 1983

(1987年10月16日受付)