

単支間任意形状桁の分散支持構造による 落橋防止効果について

井嶋克志¹・錦織真樹²・帯屋洋之³

¹正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840 佐賀市本庄1)

²学生会員 佐賀大学 理工学部工学研究科 (同上)

³正会員 工修 佐賀大学助手 理工学部都市工学科 (同上)

ピン・ローラ支承破壊後、落橋可能性のある形状の桁に対して、本来靱性が大きい分散あるいは免震支承を用い、支承破壊そのものを発生させることなく落橋を防止する構造について基礎的研究を行った。本支承構造は、支承変形を抑制するための桁とパラペットの衝突による減衰効果と、桁のモード特性からのパラペットによる拘束効果の可能性を検証することによってその有効性が確認できる。本研究は、桁振動の線形理論に基づくパラペットの拘束効果は期待できないが、衝突による減衰効果を考慮すれば実用的な落橋防止構造となる可能性を示している。

Key Words : prevention of fall of girder, skew girder, curved girder, rubber bearing, impact

1. まえがき

ピン・ローラ支承により支持された単支間の斜桁および曲線桁の中には、震度法を超える地震を受けたとき、支承破壊後、落橋による崩壊を招くものがある。これは、支承破壊後、パラペットによる拘束を逃れる桁変位が増大することが原因であり^{1),2)}、このような橋梁に対しては落橋防止装置が義務付けられるようになった。本研究は、取り付け道路との段差の原因ともなる、支承破壊そのものを防止することによって落橋に至る崩壊を防ぐ方法として、靱性が大きい特性を有する分散支承を使用する構造に対して考察を行ったものである。

本来、分散支承は橋脚の安全性の確保を目的とするものであるから、単支間橋梁に対して有効でないとされている。しかしながら、積層ゴムの使用により、破壊までの変形の許容値が大きく、桁とパラペットの衝突が確実に生じることによる減衰効果およびパラペットの拘束効果により、支承そのものの変形を抑制し、支承破壊を防止できることが期待される。

パラペットによる拘束効果については、桁と分散

支承を振動単位とすると、パラペットによる撃力も外力であるから、桁の並進モードおよび回転モードに対してパラペットが有効な拘束を与えるように、分散支承によりモード特性を操作すれば、線形理論上では、各モードとも基準座標は拘束を受け、支承変形を抑制できることが予想される。この拘束効果は、本研究によって、実質上期待できないことが判明したが、桁のモード特性を分散支承によって操作することは、衝突回数を増加させ、これによる減衰効果を生み出すと思われる。

以上のような観点から、本研究は、パラペットによる拘束を利用した分散支承剛性による桁のモード特性の制御と、桁とパラペットとの衝突事象を含む地震応答により、パラペットによるモードの拘束効果について検討するとともに、桁とパラペットとの衝突による桁変位について調べたものである。

2. 分散支承支持の桁のモード特性

積層ゴムのようにせん断変形を行う支承は、水平方向に方向性を有しないため、桁の重心と支承の剛心が一致しない場合、桁のモードは一意的な方向の

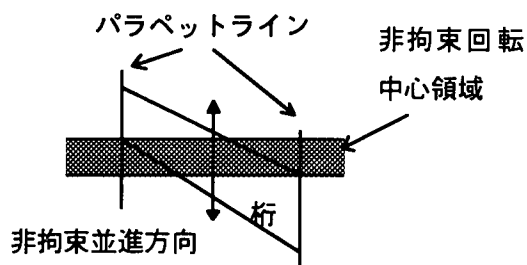


図-1 パラペットが平行な場合

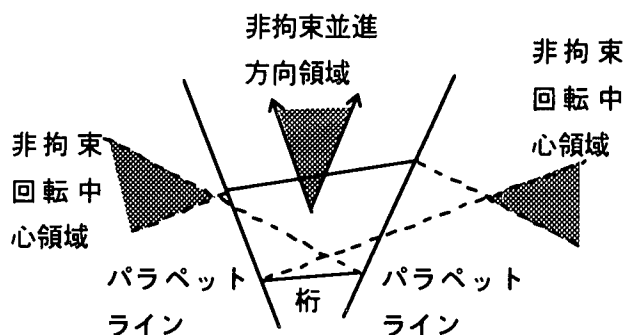


図-2 パラペットが平行でない場合

並進モードと2つの回転モードとなる。

この並進モードは、桁の重心と支承の剛心を結ぶ線（以下、剛心線と呼ぶ）の方向であり、回転モードの回転中心はこの剛心線上にある。低次の回転モードは剛心側、高次の回転モードは重心側に来る。

また、重心と剛心が一致する場合、方向性のない1つの並進モードと、重心を回転中心とする回転モードとなる。

3. パラペットによる桁の非拘束領域

ピンローラ支承により支持された斜桁および曲線桁が落橋の可能性を有するのは、支承破壊後、これらの桁形状がパラペットにより拘束を受けない並進方向あるいは回転中心が存在するためである。

これらの非拘束領域は、桁両端のパラペットが平行である場合と平行でない場合とで異なり、それぞれ図-1 および図-2 に示される影領域である。

図-1 の影領域に回転中心があるとき、図の桁形状で桁は時計回りの回転を行ってもパラペットによる拘束を受けない。当然、パラペットに平行な並進に対してパラペットは拘束しない。このことは、平行四辺形の桁に対して、全分散支承剛性値を均等にすることは、方向性のない並進モードが現れパラペット方向の加振に対して拘束を受けず、また、回転中心も非拘束領域に入ることから得策でないことが判る。

一方、パラペットが平行でない場合、図-2 の影領域では、並進あるいは回転ともに、それぞれ片方向の向きについて非拘束となる。

なお、パラペットが平行である場合は、桁形状によっては桁の回転振動に対し常にパラペットの拘束を受ける形状もあるが、パラペットが平行でない場合は、支承破壊後の並進運動を考えれば、あらゆる桁形状で落橋の危険性を有する。

4. モードの回転中心の制御

桁の並進モードの方向の制御は、剛心線が図-1、図-2 の非拘束並進方向と一致しないよう、適切な剛心位置となる分散支承剛性を決定することが得策と考えられる。

一方、回転モードの中心は、桁の回転半径 (l_r)、重心から剛心までの剛心距離 (l_g) および回転剛性半径 (l_k) から決定する。この回転モードが時計回り、反時計回りともにパラペットによる拘束を受けるためには、図-1、図-2 の領域に回転中心が入らない、すなわち、重心から回転中心までの距離（回転中心距離 l_{c2}, l_{c3} ）に、パラペットが平行である場合は下限、パラペットが平行でない場合には上限が与えられることになる。

重心からこの下限あるいは上限距離を l_{cr} とすれば、桁の回転半径、剛心距離および回転剛性半径に次の関係が成り立てば、非拘束回転中心領域に回転モードの中心が入ることはない。

(a) $l_{cl} < l_r$ のとき

$$i) l_{c2} > l_{cl} \text{ であるためには、} \frac{l_g}{l_r} > \frac{l_{cl}}{l_r} \frac{1-l_k^2/l_r^2}{1-l_d^2/l_r^2} \quad (1)$$

$$ii) l_{c3} > l_{cl} \text{ であるためには、} \frac{l_g}{l_r} > \frac{l_{cl}}{l_r} \frac{l_k^2/l_r^2 - 1}{1-l_d^2/l_r^2} \quad (2)$$

(b) $l_{cl} > l_r$ のとき、

$$i) l_{c2} > l_{cl} \text{ であるためには、} \frac{l_g}{l_r} < \frac{l_{cl}}{l_r} \frac{1-l_k^2/l_r^2}{1-l_d^2/l_r^2} \quad (3)$$

$$ii) l_{c3} > l_{cl} \text{ であるためには、} \frac{l_g}{l_r} < \frac{l_{cl}}{l_r} \frac{l_k^2/l_r^2 - 1}{1-l_d^2/l_r^2} \quad (4)$$

これらの条件を、概略で図示すると次のようにな

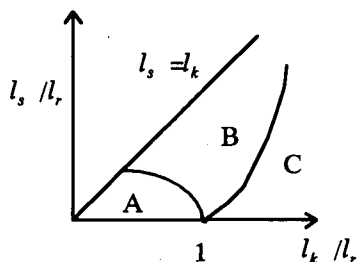


図-3 与条件を満たす剛心距離と回転剛性半径

る。

回転中心距離に下限が与えられた場合、この下限距離が回転半径より小さいとき、式(1)は図中のBとCの領域であり、式(2)はAとBの領域である。2つの回転モードともに下限がある場合、Bのみが条件を満足する。一方、回転中心距離の下限が回転半径より大きいとき、式(1)はA、式(2)はCとなり、2つのモードとも満足する領域は存在しない。同様に、回転中心距離に上限が与えられた場合、この上限距離が回転半径より大きい場合は、2つのモードともに条件を満たす領域が存在するが、上限距離が回転半径より小さい場合、条件を満足する領域は存在しない。

なお、これらの条件に入らない桁形状は、一般に橋長の長い連続橋のような桁形状であり、この場合、別の観点から桁変位の低減を考える必要がある。

上記の条件を満たす剛心位置および回転剛性半径から、分散支承剛性値を決定すれば、回転モードは双方向ともにパラペットによる拘束を受ける。

5. 桁とパラペットの衝突のモデル化

桁とパラペットの衝突事象は、次のようにモデル化を行った。通常、桁は凸形状であるから、桁隅角部がパラペットと衝突するものとして、この隅角部の衝突前後の速度の変化を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_{ip}^+ &= e_u \dot{u}_{ip}^- \\ \dot{v}_{ip}^+ &= e_v \dot{v}_{ip}^- \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 u_{ip} 、 v_{ip} は、衝突が発生した桁隅角部のパラペットに沿う方向の変位とこれに直交方向の変位であり、サフィックスのプラスは衝突後、マイナスは衝突前を表す。 e_u 、 e_v は一種の反発係数であり、現象的に、パラペットに平行な方向の反発係数は直交する方向と独立には扱えず、また、厳密に考えれば緩衝材の影響等も考えられるが、ここでは、桁の振動モードへのパラペットの拘束効果を調べるのが目的であるため、簡単ではあるが上式によって衝突を

定義することとした。

地震応答計算は、桁の振動を3自由度とし、直接ニューマークβ法による数値計算を行い、衝突時には式(5)による桁速度の変化が生じるものとした。

6. 地震応答計算例と考察

計算に使用した地震加速度記録は、兵庫県南部地震における気象庁データNS成分(820gal 最大値)である。

分散支持された斜桁と曲線桁について応答計算を行い、重心と剛心が一致する分散支持の場合と、並進モードの方向が非拘束並進方向と一致せず、かつ回転モードの中心も非拘束領域に入らない分散支持の場合の応答を比較した。

斜桁の諸元は、斜角 60° 、橋長20m、幅員6.93m、桁とパラペットの遊間9mmである。等幅員の斜桁は、全分散支承剛性を等しくするとき、重心と剛心が一致し、本計算では並進モードの固有周期を1秒に設定した。一方、モードの制御を考慮した分散支持では、並進モードの方向を桁の鋭角部を結ぶ線とし、この並進モードの固有周期を重心と剛心が一致する場合に合わせて1秒とした。斜桁では、重心側に回転中心が来る高次のモードが非拘束領域に入る可能性があるが、この下限距離の1.2倍の位置に回転中心が来るように分散支承剛性値を決定した。

曲線桁は、曲率半径60m、中心角 20° 、幅員6mで、重心と剛心が一致する場合は各分散支承剛性は異なる。なお、全分散支承剛性を等しくすれば、並進モードの方向は桁の対称軸となる。重心と剛心を一致させる場合も分散剛性によりモードの制御を行った場合も、並進モードの固有周期を1秒に設定した。

応答計算により得られた桁隅角部の最大変位を、図4から図7に示す。図中のCase1が重心と剛心が一致する分散支持であり、Case2がモードの制御を行った分散支持である。加振方向は、 -90° および 90° が、斜桁の場合パラペットの方向、曲線桁の場合桁対称軸の方向である。

Case2は、桁の3モードにおいて、いずれも双振動方向でパラペットによる拘束を受けるはずであるが、設定された遊間より非常に大きい変位となり、各モードに対して常にパラペットによる拘束が作用しているとは思われない結果となった。したがって、線形振動の概念におけるパラペットによる拘束は通用せず、桁はパラペットとの衝突後、拘束を受けない変位も発生する。

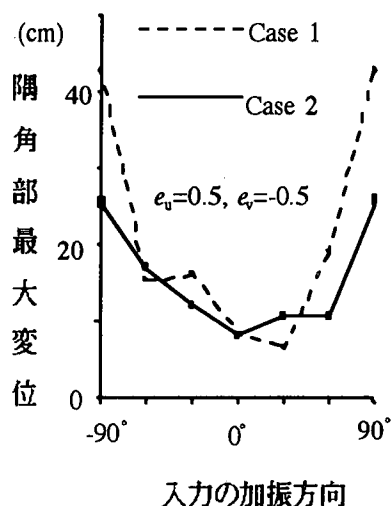


図-4 斜桁の地震応答($e_u=0.5, e_v=-0.5$)

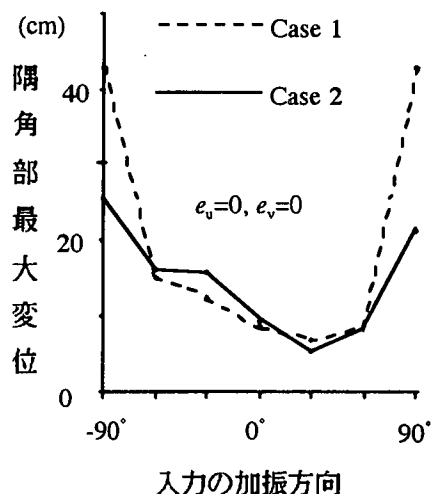


図-5 斜桁の地震応答($e_u=0, e_v=0$)

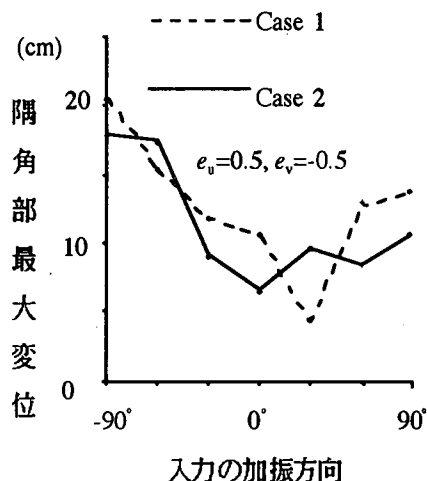


図-6 曲線桁の地震応答($e_u=0.5, e_v=-0.5$)

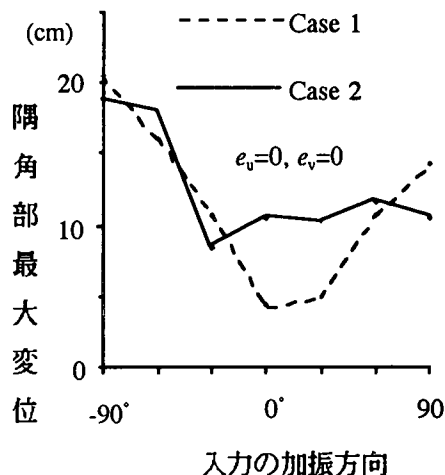


図-7 曲線桁の地震応答($e_u=0, e_v=0$)

しかしながら、パラペットによる拘束を全く受けない斜桁 Case 1 における地震波の加振方向 90° の場合の変位は、他の最大応答変位に比べ突出して大きい。衝突が発生した場合には、この半分程度まで桁隅角部の変位は減少することが判る。また、曲線桁の Case 1 の応答計算例から、たとえ並進モードの方向が非拘束並進方向と一致しても、片方向の振動に対しては衝突が発生するため、桁の応答変位は衝突が発生しない場合より半分に減じられる。

なお、反発係数は鋼鉄と鋼鉄で $5/9$ 程度であるから図-4 および図-7 で使用した値でも十分と思われるが、これより反発係数を小さくとっても最大変位にはあまり変化が見られないことは興味がある。

分散支持による桁の安全性を考えた場合、支承の最大変形量が問題となり、斜桁の場合パラペットの加振方向、曲線桁の場合その対称軸の加振方向に対して、合理的な桁の回転によってパラペットとの衝

突が発生するように、分散支承剛性を設定すれば支承変形量を抑制できると思われる。

本論では、パラペットは剛として取り扱ったが、緩衝材、裏込め土の影響を含めて桁撃力に対するパラペットの安全性の検討も必要である。

参考文献

- 1) 川神雅秀他、斜角を有するけた橋の水平地震動による回転挙動、土木学会第 51 回年講 1(B), 1996.9.
- 2) 吉澤努他、曲線橋上部構造の水平地震動による移動挙動解析、土木学会第 51 回年講 1(B), 1996.9.
- 3) 森口繁一、初等力学、倍風館