

桁間衝突が下部構造系へ及ぼす影響に関する基礎的検討

武野 志之歩¹・大野 敬美²・監崎 達也²・伊津野 和行³

¹正会員 工修 株式会社建設技術研究所 東京本社道路・交通部 (〒338-0804 埼玉県さいたま市上木崎 1-14-6)

²学生員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

1. 検討概要

桁間における地震時相互作用に起因する衝突現象や落橋等による系の崩壊が問題視され、その対策に関する研究開発が盛んに行われてきた¹⁾⁴⁾。一般に桁間衝突については桁剛性よりも柔らかい緩衝材の設置により衝突力の吸収を行い、躯体への損傷軽減を図っている。また落橋に対しては桁間あるいは桁～橋脚間の連結装置や変位制限構造といった落橋防止システムの採用が一般的である。また、最近では落橋防止システムにも緩衝材の設置が行われている⁵⁾。これら連結部に生じる地震時相互作用は、桁間の相対変位が縮小される場合と拡大される場合により方向性は異なるが、いずれも変位を強制的に抑制される現象であり、また、ともに緩衝材のエネルギー吸収により影響低減を図っている点で共通している。

一方、連結部における変位の抑制により、桁の応答変位の低減効果が期待されている⁶⁾。適切なレベルで衝突現象や落橋防止システムが作動することにより構造全体系として耐震性を大幅に向上できる可能性がある。この場合、連結部の損傷レベルとともに支持躯体である橋脚の安全性に関する検討が必要となる。桁間衝突時において橋脚の応答特性が変動し、また、緩衝材の設置により軽減する可能性が指摘されている⁴⁾。しかし、定量的な評価手法が確立されていないのが現状である。

地震時における相互作用を把握するには数値シミュレーション解析によるところが大きい。しかし、近年の免震化にともなう水平方向剛性の柔らかい支承の介在は、上部構造と下部構造間で位相を生じさせ、構造系の応答性状を複雑化させる傾向にある。また、解析上再現される現象は入力波特性に依存するため、相互作用を完全に把握することは非常に困難であり煩雑な作業を要求される。特定のパラメータを用い簡易な方法で安全性を評価できれば有効である。

本研究では、桁間衝突時に下部構造が受ける影響につ

いて衝突速度に着目した検討を行った。力積の概念を用いれば、衝突現象における影響力は衝突速度に依存している。

現象を簡易に把握するため、まず2章において桁及び橋脚を1質点とした衝突現象を運動量保存則に基づいて検討し、桁間衝突後の橋脚応答速度の算定式を誘導した。また、3章では任意の運動量に対する躯体の水平、回転挙動の算定を行った。以下、検討結果を示す。

2. 桁間衝突時の躯体入力運動量の誘導

(1) 桁間衝突時の橋脚入力運動量

ここでは、桁間衝突時に躯体に作用する影響量を誘導する。検討対象は連続高架橋などにおける橋脚に着目し、隣接する上部構造が異なるケースを想定する。桁及び橋脚は質点として取り扱う。検討に際し、桁間衝突時における構造系の挙動を以下のように仮定した。

- 桁間衝突による影響が他の部材により緩衝されることなく躯体に入力されることを前提とする。設計上は安全側の評価を行っているものとする。
- 桁間衝突時に桁端部や支承構造の損傷により桁挙動が拘束されるようなケースを想定しない。したがって桁の衝突は任意の反撥係数に準じて行われる。
- 桁と橋脚間において支承の介在による摩擦及びエネルギー吸収を想定しない。すなわち、衝突前後において桁が橋脚上をスムーズに滑る状況とする。
- 桁の質量中心と橋脚の質量中心のレベル位置は橋脚高と比較して短いことから同一線上にあるものと仮定する。

ここで、桁1、桁2、橋脚による3質点系内における2質点の衝突現象を考える。図-1に対象橋梁概要を示す。衝突前における各々の速度を v_1 、 v_2 、 v_p 、衝突後における速度を v_1' 、 v_2' 、 v_p' と定義する。また、それぞれの質量を m_1 、 m_2 、 m_p とする。3質点系の質量中心に着目する。

質量中心における応答速度を v_G と定義すると、衝突前後の物体応答速度はそれぞれ質量中心系で以下のように示される。(図-2 参照)

○衝突前速度

$$\begin{cases} V_1 = v_1 - v_G & (1a) \\ V_2 = v_2 - v_G & (1b) \\ V_p = v_p - v_G & (1c) \end{cases}$$

○衝突後速度

$$\begin{cases} V_1' = v_1' - v_G & (2a) \\ V_2' = v_2' - v_G & (2b) \\ V_p' = v_p' - v_G & (2c) \end{cases}$$

また、質量中心速度は次式となる。

$$v_G = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 + m_p v_p}{m_1 + m_2 + m_p} \quad (3)$$

ここで、検討対象系における質量の総和 $M = m_1 + m_2 + m_p$ 、桁間衝突速度 $V_c = v_1 - v_2 = V_1 - V_2$ とする。

反撥係数の定義より次式を誘導する。

$$e = -\frac{V_1' - V_2'}{V_1 - V_2}$$

$$\therefore V_2' = V_1' + e(V_1 - V_2) \quad (4)$$

質量中心系における運動量保存則より次式を導く。質量中心系における運動量は常に 0 となる。

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 + m_p V_p = m_1 V_1' + m_2 V_2' + m_p V_p' = 0 \quad (5)$$

(6)

$$\therefore V_p' = -\frac{m_1 V_1' + m_2 V_2'}{m_p}$$

$$V_p'^2 = \left(\frac{1}{m_p} \right)^2 \left((m_1 + m_2) V_1' + m_2 e (V_1 - V_2) \right)^2 \quad (7)$$

質量中心系におけるエネルギー保存則を適用する。

$$m_1 V_1'^2 + m_2 V_2'^2 + m_p V_p'^2 = m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2 + m_p V_p^2 \quad (8)$$

(8) 式に (6) 式及び (7) 式を代入する。

$$(\text{左辺}) = m_1 V_1'^2 + m_2 V_2'^2 + \frac{1}{m_p} (m_1 V_1' + m_2 V_2')^2$$

(右辺) =

$$\frac{1}{m_p} (m_1 + m_2) M V_1'^2 + 2e \frac{m_2}{m_p} M V_c V_1' + \left(1 + \frac{m_2}{m_p} \right) e^2 V_c^2$$

したがって、 V_1' に関する二次方程式を得る。

$$\frac{1}{m_p} (m_1 + m_2) M V_1'^2 + 2e \frac{m_2}{m_p} M V_c V_1' + \left(1 + \frac{m_2}{m_p} \right) e^2 V_c^2 - \left\{ m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2 + \frac{1}{m_p} (m_1 V_1 + m_2 V_2)^2 \right\} = 0 \quad (9)$$

(9) 式より、桁間衝突時の反撥係数を考慮した質量中心系の桁 1 応答速度が誘導される。(4) 式を適用し同様に

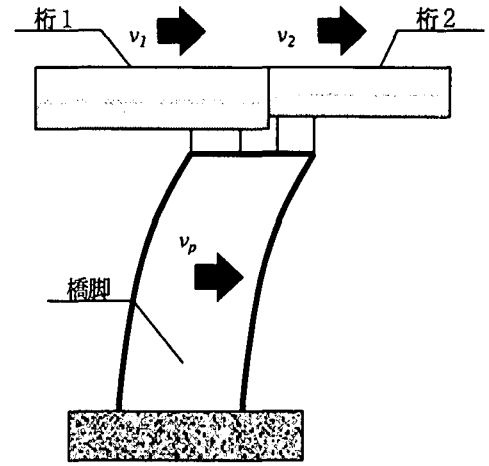


図-1 対象橋梁概要

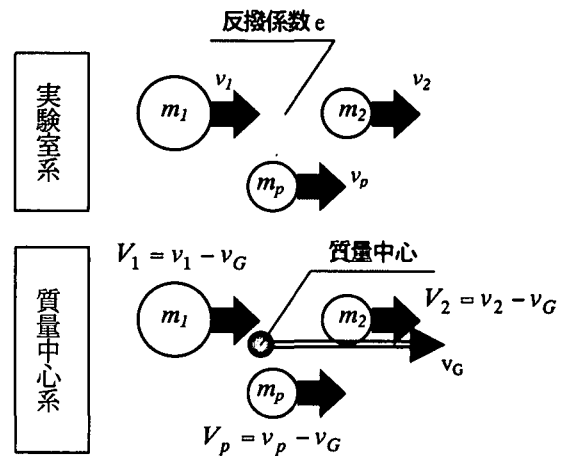


図-2 質量中心系への変換

桁 2 応答速度が誘導可能である。また、(9) 式は反撥係数 $=0$ の場合、以下の式となる。

$$V_1' = \sqrt{\frac{1}{(m_1 + m_2)M} \left\{ m_1 m_p V_1^2 + m_2 m_p V_2^2 + (m_1 V_1 + m_2 V_2)^2 \right\}} \quad (10)$$

本節で算定した応答速度式について、以下、具体値を入力して応答傾向を確認する。

(2) 反撥係数による応答特性の変化

まず、衝突後の応答特性に支配的な影響を及ぼすと考えられる反撥係数について検討を行う。反撥係数による衝突後の速度応答を桁 1、桁 2 及び橋脚について図-3 に示す。初期条件は以下のようなものである。

○桁 1⇒質量 $m_1=5.0 \times 10^3 \text{ ton}$ 、速度 $v_1=2.0 \text{ m/sec}$

○桁 2⇒質量 $m_2=2.0 \times 10^3 \text{ ton}$ 、速度 $v_2=1.0 \text{ m/sec}$

○橋脚⇒質量 $m_p=1.0 \times 10^3 \text{ ton}$ 、速度 $v_p=1.0 \text{ m/sec}$

桁 A の衝突前速度 2.0m/sec 及び桁 B の衝突前速度 1.0m/sec はともに同方向の速度ベクトルを有し、桁 A が桁 B を追従して衝突する場合を考える。

反撥係数が0の場合、衝突後に桁同士が一体となって挙動する。図上でもその傾向が伺える。また、橋脚の応答速度は衝突前速度1.0m/secに対して大きく低減している。反撥係数を次第に大きくとると、衝突する側の桁1の応答速度が次第に減少し、衝突される側の桁2の応答速度が増加する傾向が伺える。一方、橋脚の応答値は次第に減少し、反撥係数が1近傍では負の値を示しているのが確認できる。桁及び橋脚がともに同方向の速度成分を有して衝突を発生した場合、衝突される側の桁のみ速度量が増加する傾向にある。また、橋脚に対しては衝突前の速度成分と反転する方向の速度作用が生じる。

(3) 質量比による応答特性の変化

構造系を構成する要素の質量比が、衝突後の応答特性に与える影響は大きいと考えられる。ここでは、桁同士の質量比と桁と橋脚の質量比に着目する。

次に桁質量比による影響について確認する。桁質量比は桁2質量を桁1質量で除したものと定義する。桁質量比が小さいほど桁質量の格差が大きいことを示している。また桁質量比が1となる場合、双方の桁質量は同等である。ここでは橋脚の規模を一定として検討するため、桁1及び桁2の質量和は一定とする。また、衝突前速度は $v_1=2.0\text{m/sec}$ 、 $v_2=1.0\text{m/sec}$ であり、反撥係数0.2の場合について傾向の確認を行う。

図-4 に桁質量比に対する桁及び橋脚の応答速度を示す。図より応答特性には一定の傾向が伺える。すなわち、桁質量比が小さいほど桁及び脚の応答速度が大きく、桁質量比が大きくなるにつれ、いずれも応答値が減少する。特に、桁応答速度の傾向は桁質量比に対して一次相関的である。また、桁質量比が変化しても応答速度の差はほとんど変化がなく、橋脚の応答特性に作用する影響が大きい。

図-5 に反撥係数を変化させた場合の橋脚応答速度を示す。反撥係数が小さいほど応答値の変動が平準化されている。桁質量比が比較的小さい範囲では反撥係数が小さいほど応答速度が小さく、逆に反撥係数が1に近い範囲では反撥係数が小さいほど応答速度が大きい結果となる。傾向が異なるのは桁質量比がおよそ0.43付近であり、この近傍ではいずれの反撥係数に対しても応答値がほぼ均衡する。

以上より、支持重量が等しい橋脚であるとき、桁の質量格差が大きい構造物ほど、桁間衝突後の橋脚応答速度の変動量が大きくなる。またその変動量は桁間衝突時の反撥係数に依存する。

次に、桁と橋脚の質量比に着目する。桁質量は桁1及び桁2の総和とする。ここでは、橋脚質量は一定であり、桁2の質量を変化させ図化を行った。図-6 に応答速度を示す。桁/脚質量比の増加により、衝突後の応答速度はい

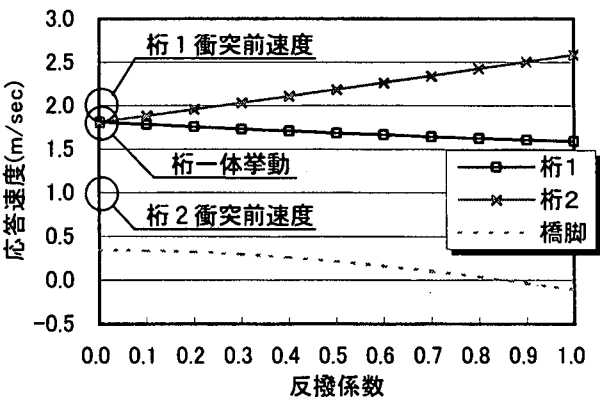


図-3 反撥係数が応答速度に与える影響

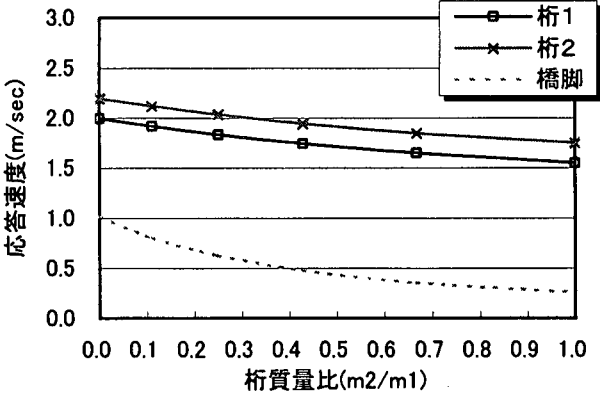


図-4 桁質量比が応答速度に与える影響

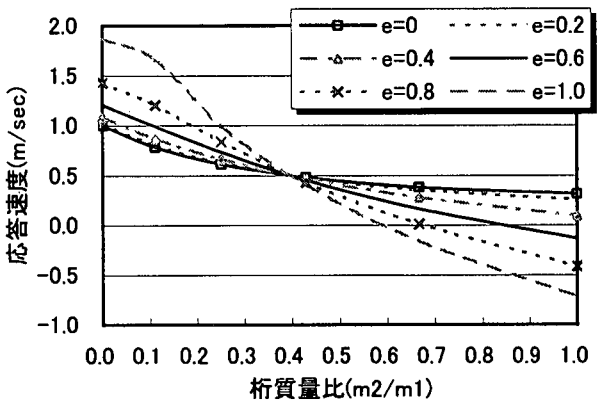


図-5 桁質量比と反撥係数が橋脚応答速度に与える影響

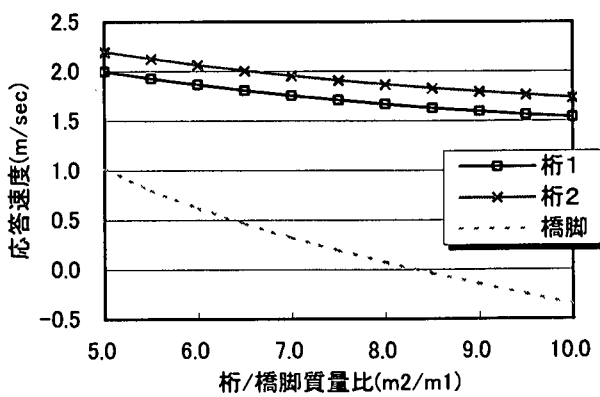


図-6 桁と橋脚の質量比が応答速度に与える影響

ずれも減少する傾向にある。また、桁/橋脚質量比が変動しても桁応答速度の格差には影響が小さく相関性を有しているのに対し、橋脚に対する入力量の変動が大きい。

(4) 衝突速度による応答特性の変化

橋脚に入力される速度変化に端的な影響を及ぼす要素として桁間衝突時の衝突速度が挙げられる。桁間衝突速度は衝突前の桁1と桁2の相対速度とした。図-7に桁間衝突速度に対する橋脚の応答速度を示す。衝突速度が0の時、すなわち衝突が発生しない場合、橋脚の衝突前速度1.0m/secを示す。桁間衝突速度が増加するにしたがい、橋脚の応答速度は減少傾向にあり、場合によっては速度成分が反転する可能性を示している。すなわち、桁間衝突速度が増加するほど、橋脚に対しては負の速度成分が大きく作用する。一方、桁間の反撥係数に着目すると、反撥係数が0ケースで最も大きい応答値を示す傾向にある。

図-8、図-9では桁応答速度について、反撥係数と桁間衝突速度の影響を示している。衝突する側の桁1の応答速度は橋脚と同様、衝突速度が大きいほど減少傾向にある。一方、衝突される側の桁2では反撥係数により応答傾向がことなる。反撥係数が0となる場合、桁2は前述の桁1と一体となって挙動する。また、反撥係数が増加することにより桁1による追突を受け、応答速度は増加する傾向にある。

以上より、桁及び橋脚が同方向の速度成分を有して挙動する場合、橋脚の速度成分は負の速度作用を受け低減されるが、反撥係数や衝突速度が過度に大きい場合は絶対値として大きな速度が作用する可能性がある。

3. 運動量入力による下部構造の応答

(1) 躯体応答速度の誘導

前章では桁間衝突により躯体に入力される運動量について算定式の誘導を行い、応答特性について検討した。また、桁間衝突後の躯体応答速度 v_p を誘導した(本章では v_{cp} と示す)。躯体への入力是天端において行われ、実挙動として水平挙動に利用される成分と回転挙動に利用される成分に分配されると考えられる。ここでは、任意の運動量に対する躯体応答値の誘導を試みる。検討における構造諸元を以下のように設定する。なお、本章における検討は鉛直運動を無視したものであり、橋脚の挙動は水平・回転運動に限定されるものとした。算定に用いるパラメータを以下に示す。

- 橋脚質量： m_p
- 躯体高さ： L
- 角速度： ω
- 慣性モーメント： I_0

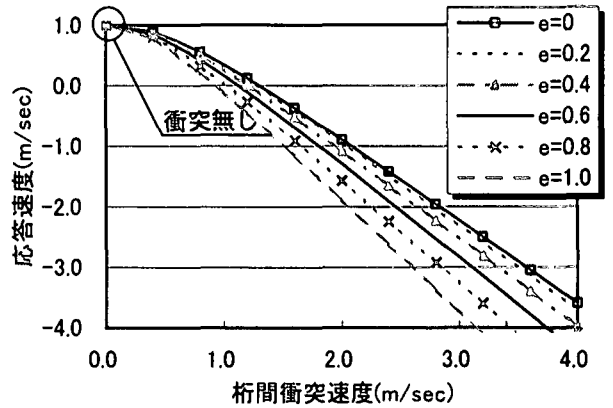


図-7 桁間衝突による橋脚応答速度の変動

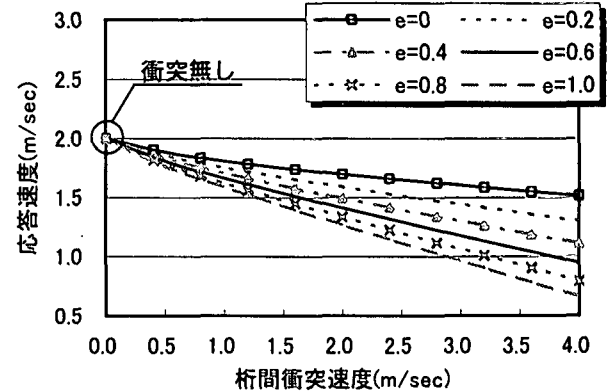


図-8 桁間衝突による桁1 応答速度の変動

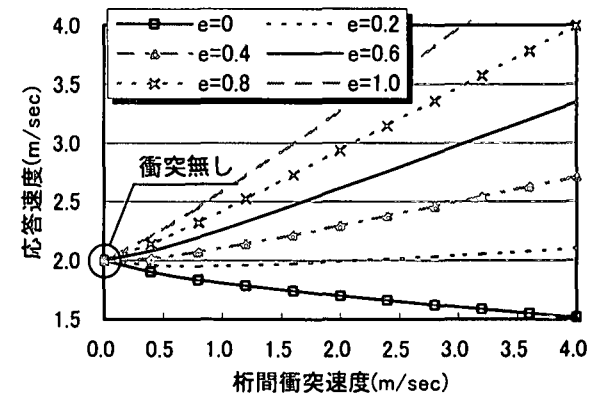


図-9 桁間衝突による桁2 応答速度の変動

○衝突後速度： v_{cp}

衝突直後における衝突位置の水平速度を V_s 、下部構造の慣性モーメントを I_0 とすると、下部構造系の角運動量保存則より次式を得る。

$$m_p v_{cp} L = m_p V_s L + I_0 \omega \quad (11)$$

ただし、慣性モーメント I_0 は次式で表される。

$$I_0 = \frac{m_p}{\theta} \frac{dv_{cp}}{dt} \frac{L}{2} \quad (12)$$

また、 V_s と角速度の関係式は以下で定義される。

$$\omega = \frac{V_s}{L} \quad (13)$$

(11)式に(13)式を代入すると、桁間衝突後における下部構造の応答速度 V_s は(14)式となる。

$$\therefore V_s = \left[\frac{1}{1 + I_0/m_p L^2} \right] \times v_{cp} \quad (14)$$

(2) 躯体応答

(14)式により誘導した応答速度 V_s により、躯体の応答変位と回転量を誘導する。まず、運動量 $m_p \times v_{cp}$ により躯体のみが挙動し、地盤面では挙動が生じないケースを考える(図-8参照)。このとき、下部構造の振動形態は基盤面を中心とした躯体の回転運動に限定される。したがって、下部構造の回転角を θ_L 、躯体の回転剛性を K_ϕ とするとエネルギー保存則より次式を得る。

$$\frac{1}{2} m_p V_s^2 = \frac{1}{2} K_\phi \cdot \theta_L^2 \Leftrightarrow \theta_L = \sqrt{\frac{m_p}{K_\phi}} V_s \quad V_s \quad (15)$$

躯体天端における水平変位を δ_c とすると躯体の回転角 θ_L との関係は(12)式となる。

$$\frac{1}{2} m_p V_s^2 = \frac{1}{2} K_{gs} \delta_g^2 + \frac{1}{2} (K_\phi + K_{gr}) \cdot \theta^2 \quad (16)$$

したがって、底面を起点とした場合の天端水平変位は次式により誘導される。

$$\delta_c = \theta_L \cdot L = \sqrt{\frac{m_p}{K_\phi}} L \cdot V_s \quad (17)$$

(3) 基盤面を考慮した躯体応答

次に、運動量 $m_p \times v_{cp}$ による影響が基礎構造を含めた地盤応答を引き起こすものと仮定する(図-9参照)。支持地盤の水平剛性を K_{gs} 、回転剛性を K_{gr} とし、運動量 $m_p \times v_{cp}$ の作用により基盤面での水平変位が δ_g 、天端部の水平変位が δ_c 、躯体及び地盤の回転が θ 、それぞれ生じたとする。このとき、振動系のエネルギー保存側より次式が誘導できる。

$$\frac{1}{2} m_p V_s^2 = \frac{1}{2} K_{gs} \delta_g^2 + \frac{1}{2} (K_\phi + K_{gr}) \cdot \theta^2 \quad (18)$$

ここで、躯体の受ける入力エネルギーに着目すると、(15)式が成り立つ。

$$m_p g \times \delta_g = \frac{1}{2} K_{gs} \delta_g^2 \quad (19)$$

よって、基礎応答を考慮した場合の躯体回転角 θ_p は(16)式となる。

$$\theta = \sqrt{\frac{m_p (V_s^2 - \delta_g \cdot g)}{2(K_\phi + K_{gr})}} \quad (20)$$

したがって、基盤応答を考慮した場合の底面を起点とした天端水平変位 δ'_c は次式により誘導される。

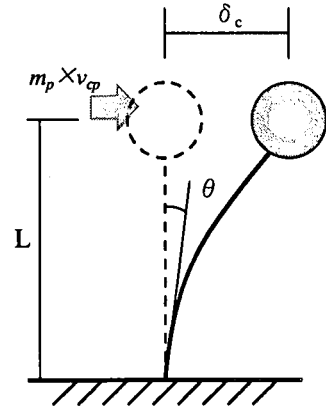


図-8 運動量の入力と応答値
(基盤面で完全固定)

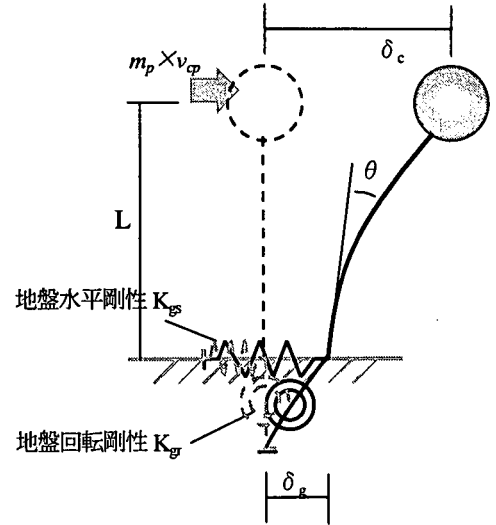


図-9 運動量の入力と応答値
(地盤特性を考慮)

$$\delta'_c = \theta \cdot L + \delta_g = \sqrt{\frac{m_p (V_s^2 - \delta_g \cdot g)}{K_\phi + K_{gr}}} \times L + \delta_g \quad (21)$$

(4) 降伏に対する照査方法に関する検討

前節までで誘導した算定式を用い、桁間衝突時の橋脚応答について、損傷の有無を確認する照査方法について検討する。

前3章の検討より得られた躯体の応答速度 V_s と躯体回転角 θ_L を用いて躯体が受ける影響について検討する。ここで、躯体に入力される主要な影響力は桁衝突による運動量に限定されるものとする。躯体の回転剛性 K_ϕ より躯体降伏時に発生するモーメント量 M_y と回転角 θ_y の関係が次式で表される。

$$M_y = K_\phi \times \theta_y \quad (22)$$

躯体が降伏に達する時点での衝突速度を降伏限界衝突速度 v_{cy} と定義する。入力されたエネルギーがすべて躯体の回転により吸収されたとする。(22)式より降伏に

至る場合の吸収エネルギーが次式で誘導できる。

$$\frac{1}{2} m_p V_{cy}^2 = \frac{M_y \theta_y}{2} \quad (23)$$

躯体に入力される運動エネルギーは(16)式により誘導できる。したがって、躯体が降伏に至らないための条件式として次式を得る。

$$V_s \leq V_{cy} = \sqrt{\frac{M_y \theta_y}{m_p}} \quad (24)$$

(24)式において、降伏モーメント M_y 、降伏時の回転角 θ_y 及び躯体質量 m_p は対象構造物ごとに明確な値である。したがって、桁間衝突が発生した結果、支持躯体において降伏に至る可能性照査は簡易に行うことが可能と考えられる。

4. まとめ

桁間衝突により躯体が受ける影響について速度に着目した検討を行った。現段階では物理現象として取り扱っている段階であり、今後、詳細な検討を行うとともに数値シミュレーション等により整合確認を実施する予定である。以下、主な検討結果を示す。

- (1) 桁間の反撥係数を考慮した橋脚入力運動量の算定式を誘導した。また、任意の運動量に対する躯体変位及び回転量式の誘導をあわせて行った。
- (2) 桁間反撥係数が大きくなるほど橋脚に作用する負の速度成分が増大する。したがって、橋脚の応答速度が反転する可能性もある。

- (3) 桁間衝突速度が大きい場合も、橋脚に作用する負の速度成分が増大する。
- (4) 適度な桁間衝突速度と反撥係数の組合せであれば、桁間衝突時の橋脚負荷は衝突が発生しない場合と比較して低減されるが、過度に大きい衝突速度と反撥係数の組合せに対しては、橋脚の負荷が増大する結果となる。

参考文献

- 1) 森山卓郎・依田照彦：桁間衝突が落橋におよぼす影響に関する実験的検討，土木学会論文集 No.654/ I -52, pp.223-232, 2001.
- 2) 井嶋克志，帯屋洋之，錦織真樹，後藤茂夫：ゴム支承支持された中小規模斜桁・曲線桁の地震時衝突応答と落橋防止，土木学会論文集 No.647/ I -51, pp.217-228, 2000.
- 3) 佐藤雅士，運上茂樹，星隈順一：桁と橋台の衝突を考慮した橋梁の地震時挙動に関する解析的検討，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1161-1164, 2001.
- 4) 川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集 No.612/ I -46, pp.129-142, 1999.
- 5) 西本安志，園田佳臣，石川信隆，彦坂熙，西川信二郎：落橋防止用矩形形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察，土木学会論文集，No.689/ I -57, pp.355-360, 2000.
- 6) 吉澤努，忽那幸浩，田崎賢治，川神雅秀：けた衝突を考慮した橋システムの地震時挙動，第 4 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.513-516, 2000.