

(19) 地震時における橋梁の桁端衝突解析に関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON POUNDING RESPONSE ANALYSIS OF A BRIDGE AT THE TIME OF AN EARTHQUAKE

後藤恵一\*, 玉井宏樹\*\*, 園田佳巨\*\*\*, 梶田幸秀\*\*\*\*, 濱本朋久\*\*\*\*\*

Keiichi GOTOU\*, Hiroki TAMAI\*\*, Yoshimi SONODA\*\*\*, Yukihide KAJITA\*\*\*\*, Tomohisa HAMAMOTO\*\*\*\*\*

\*九州大学大学院修士課程, 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\*修士 (工学) 九州大学大学院博士課程, 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\*\*工博 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\*\*\*博士 (工学) 九州大学大学院助教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\*\*\*\*工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社, 九州本社第二技術部 (〒819-0007 福岡県福岡市愛宕南 1-1-7)

キーワード: 桁端衝突, 衝撃応答解析, 損傷度評価, レオロジーモデル

(pounding of bridge girder, impact response analysis, damage evaluation, rheology model)

1. 緒言

1995年の兵庫県南部地震以降, 道路橋示方書では, 隣接する上部構造どうし, 上部構造と橋台または上部構造と橋脚の段違い部が衝突しないように必要な遊間を設けることを推奨している<sup>1)</sup>。それに伴い, レベル2地震動に対しても衝突が生じないように遊間を確保するような設計が行われているが, 遊間を大きくすることで地震動により上部工が大変位する可能性が大きくなり, 橋脚への損傷が顕在化する恐れがある。それに対して, 橋脚への損傷を抑える目的で, 鋼板や鉄筋コンクリートを使った巻立て補強をする必要があり, 経済面においても不利になる場合がある。そのため, 近年では, 遊間を小さくし, 大規模地震時に橋桁を橋台に衝突させ, 橋台部の水平抵抗により変位を拘束するという考えが出てきている<sup>2), 3)</sup>。しかし, このような考え方を採用するためには, 桁衝突による桁端部や橋台の損傷を適切に把握し, 必要ならばその対策をあらかじめ構築できなければならないが, 桁衝突時の橋台部の損傷形態や橋台背面土の抵抗特性の定量的な評価が困難であることから, 一般的な耐震設計では橋台部の水平抵抗を考慮することは行っていない。

また, 桁衝突を考慮した橋梁の地震時挙動に関する研

究は数多くなされているが<sup>4), 5)</sup>, それらのほとんどが振動問題として捉えた骨組モデルによる非線形時刻歴応答解析であり, 桁端衝突時の桁および橋台の損傷状態を定量的に把握するには至っていない。

そこで, 本研究では, 桁と橋台の3次元有限要素モデルを作成し, 衝突速度をパラメータとした桁端衝突の詳細解析を行った。また, それによって得られた衝撃力-変位関係を用いて, 桁端衝突現象を簡易にレオロジーモデルで表現することで, 衝突ばね特性に関する検討を行い, レオロジー定数の決定法に関して考察を行った。

2. 3次元有限要素法による桁端衝突の解析概要

2.1 解析対象橋梁

本研究では, 両端部に橋台を有する2径間のPC箱形断面橋梁を解析対象として用いた。解析対象橋梁の側面図および断面図をそれぞれ図-1, 図-2に示す。対象とした橋梁の支承条件はA1, A2橋台において可動支承, P1橋脚において固定支承としている。上部工形式は2径間連続PC箱桁であり, 下部工形式は鉄筋コンクリート橋台および橋脚, 基礎工形式は直接基礎である。また橋台はフルウィングを有しており, 地盤はI種地盤である。

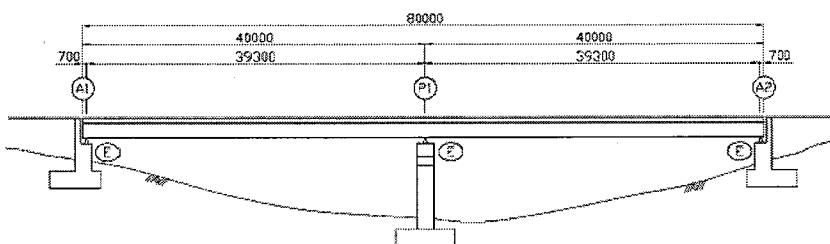
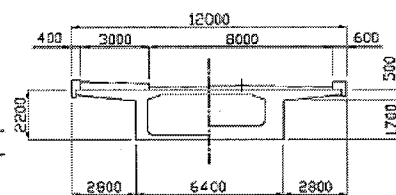


図-1 解析対象橋梁側面図 (単位: mm)



支間中央部 中橋支点部・端支点部

図-2 解析対象橋梁断面図 (単位: mm)

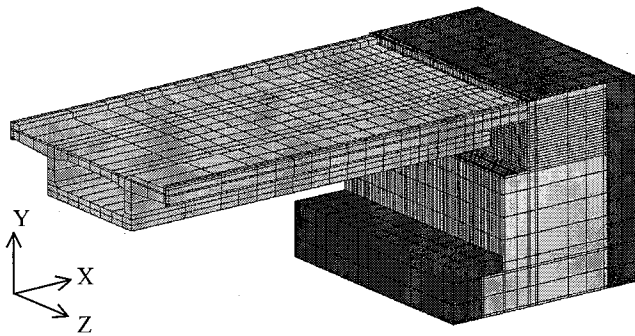


図-3 解析モデル

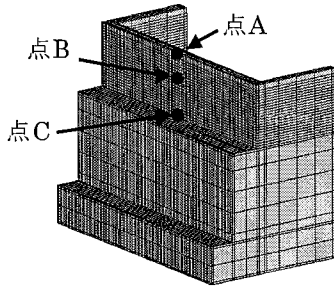


図-5 変位の出力節点

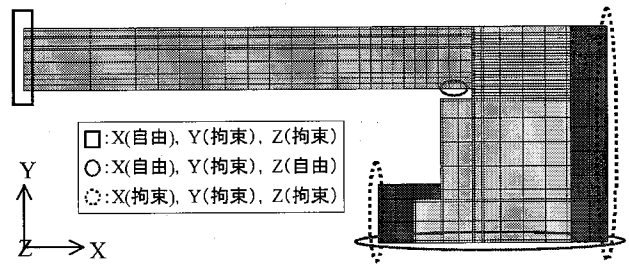


図-4 各節点の拘束条件

表-1 本解析に用いた材料定数

	橋台		橋桁	裏込め土
	鉄筋要素	コンクリート要素	RC 要素	
弾性係数 (GPa)	206	20.6	28.8	0.014
ポアソン比	0.30	0.20	0.20	0.45
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	7.85	2.45	2.69	1.80
圧縮強度 (MPa)	294	29.4	29.4	-
引張強度 (MPa)	(降伏応力)	2.94	2.94	-

## 2.2 解析モデル

図-1の解析対象橋梁のA2橋台とA2橋台側から1/2径間部分の箱桁を、3次元有限要素を用いて忠実にモデル化した。解析モデルを図-3に示す。まず、橋台部のモデル化に関して、橋台部はコンクリート要素と鉄筋要素から構成されているが、コンクリート要素には8積分点を有するソリッド要素を、鉄筋要素にはトラス要素を用いた。また、橋台背面の裏込め土はコンクリート要素と同じく、8積分点を有するソリッド要素でモデル化を行った。次に、上部工は桁端部側の断面寸法で統一された等断面でモデル化した。用いた要素は、8積分点を有するソリッド要素である。支承に関して、今回の解析は支承が破壊した後の状態を想定しているためモデル化していない。本解析モデルの総節点数および総要素数はそれぞれ24762、34303である。

境界条件に関しては、図-4に示すように、四角で囲まれた上部工の橋台側から1/2径間部分の節点を鉛直方向および橋軸直角方向拘束とし、実線の丸で囲まれた橋台の底面および上部工の可動支承部の節点を鉛直方向拘束、そして破線の丸で囲まれた裏込め土の背面部の節点を全自由度拘束とした。また、裏込め土および橋台部の全要素には重力加速度  $9800\text{mm/sec}^2$  を鉛直下向きに与えた。

また、図-5に解析結果として変位を出力した箇所を示している。ちなみに、点Aはパラペット天端中央の節点、点Bは上部工断面図心位置に相当する節点、点Cはパラペット基部中央の節点となっている。

## 2.3 材料特性および材料モデル

本解析に用いた材料定数を表-1にまとめて示す。橋台部の鉄筋要素およびコンクリート要素は、どちらも弾塑性体としてモデル化した。鉄筋要素は降伏強度に達した以降は初期剛性の1/10の剛性でひずみ硬化を示すバイ

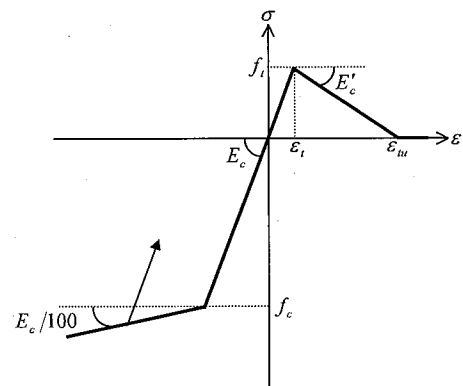


図-6 コンクリート要素の単軸換算応力 - ひずみ関係

リニア型の応力 - ひずみ関係を有し、除荷時の剛性は初期剛性で弾性復帰するものを仮定した。また、コンクリート要素に関しては、図-6に示すように、圧縮域は鉄筋要素と同様であり、引張域に関しては、圧縮強度の1/10である引張強度に到達後、軟化挙動を示すものを仮定した。ここでの引張強度は圧縮強度の1/10、引張軟化勾配は2.45GPaとした。また、鉄筋要素とコンクリート要素の付着特性は完全付着を仮定した。

上部工である桁は、鉄筋量から換算された弾性係数を用いたRC要素として取り扱い、橋台部のコンクリート要素と同様の構成則モデルを適用した。

裏込め土は、N値が5程度の強度を有する砂質土を想定しており、材料モデルは簡易に弾性体とした。なお、弾性係数は道路橋示方書<sup>9)</sup>に示されている式(1)を用いてN値換算にて算出した。

$$E = 0.0028N \quad (\text{GPa}) \quad (1)$$

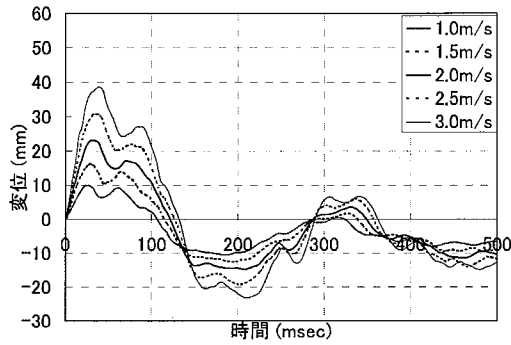


図-7 点Bにおける水平変位応答

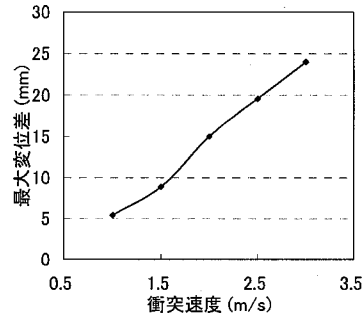


図-8 点Aと点Cにおける最大変位差

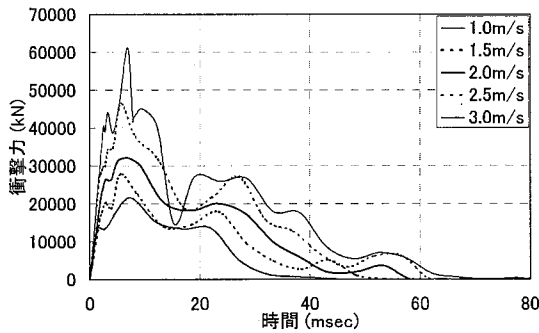


図-9 各衝突速度の衝撃力応答

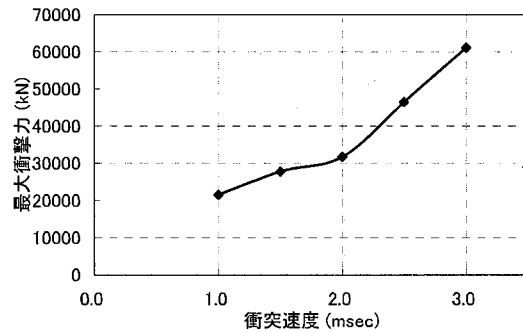


図-10 最大衝撃力と衝突速度の関係

## 2.4 解析手法および解析条件

本研究における解析は、非線形有限要素解析ソフトウェア MSC.MARC2005 を用いて行った。衝突解析を行う際に必要となる直接時間積分法には、無条件安定であるシングルステップフォーボルト法を用い、最小時間刻みが  $1.0 \times 10^{-6}$  sec、最大時間刻みが  $1.0 \times 10^{-3}$  sec の間で自動制御するものとした。

解析条件としては、桁が衝突速度 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m/sec で橋台に衝突するという 5 ケースを設定し、全 5 ケースとも桁衝突後 0.5 秒後には桁が完全に跳ね返っていることから、0.5 秒までの現象を対象として計算を行った。また、実現象ではレベル 2 相当の地震が発生した場合、遊間の大きさによっては、桁と橋台間で繰返し衝突が起こることや、桁が斜め衝突することなどが容易に予想できるが、本解析では、繰返し衝突は考慮せず、桁と橋台パラペット部が垂直に面全体で衝突することを仮定した。なお、衝突速度は衝突体である桁の全節点に初期条件として与えた。

## 2.5 解析結果

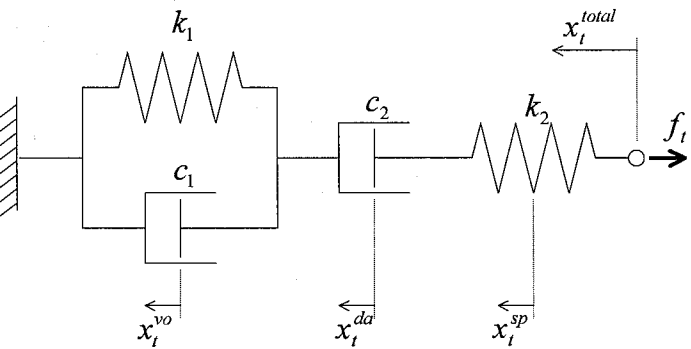
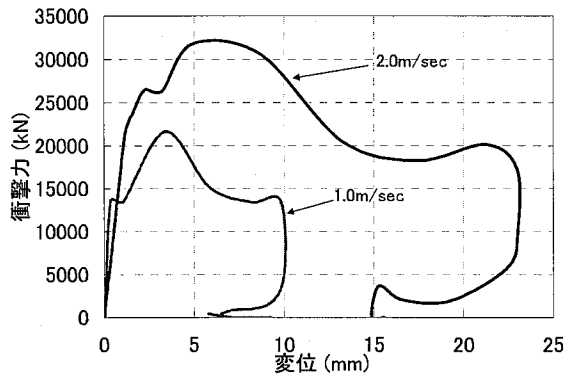
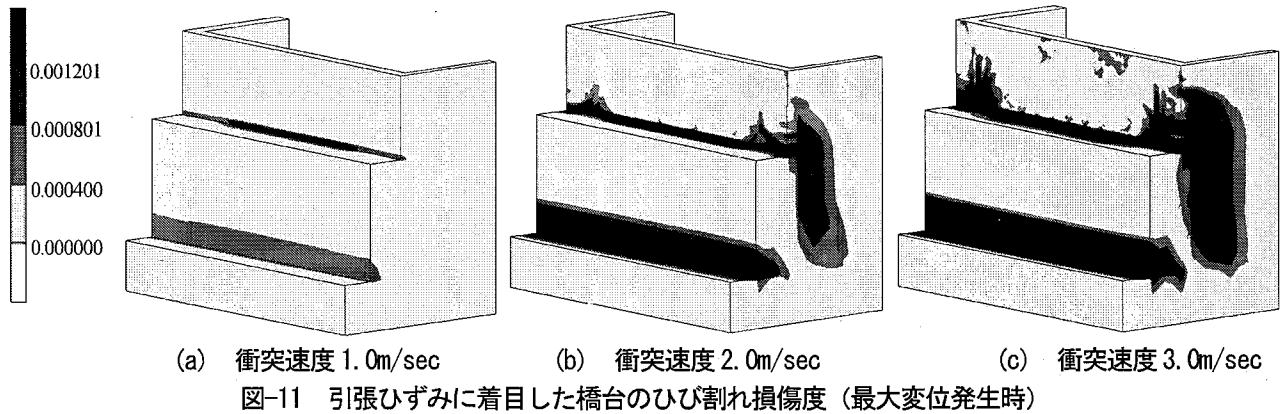
### (1) 橋台パラペット部の挙動

図-7 に点 B (上部工断面図心位置に相当する節点) の水平方向 (図-3 参照, X 方向) の変位 - 時間関係を示している。衝突速度 3.0 m/sec での最大変位は、1.0 m/sec の最大変位の約 3.5 倍を超えていることが確認できた。また、全ての衝突速度において、半周期分である約 150 msec までの変位応答波形が M 型を示しているが、これは衝突

直後に発生する裏込め土の水平抵抗によるものであると考えられる。図-8 には、点 A と点 C の最大変位差と衝突速度の関係を示す。この最大変位差はパラペットの剛体運動的な並進変位量を除いた実変形量を示すことから、パラペットの損傷状態を照査する上で基本となる値であると考えられる。衝突速度 1.0 m/sec のときの最大変位差は約 5.0 mm であるが、衝突速度 2.5 m/sec, 3.0 m/sec の場合の最大変位差はそれぞれ約 20 mm, 25 mm であり、パラペットの高さ 3000 mm に対して、その 1/150 を超えていることが確認できた。

### (2) 衝撃力応答に衝突速度が与える影響

図-9 に衝突直後 80 msec までの衝撃力応答を、また、図-10 に最大衝撃力と衝突速度の関係をそれぞれ示している。図-9 より衝突速度 1.0 m/sec の最大衝撃力は約 20000 kN、その継続時間は約 40 msec であり、衝突速度 3.0 m/sec の最大衝撃力は約 60000 kN、その継続時間は約 65 msec であった。つまり、衝突速度が増加するにつれて、最大衝撃力および衝撃力継続時間も増加していることが確認でき、また、衝突速度 3.0 m/sec の場合の最大衝撃力は、1.0 m/sec の場合の 2.5 倍以上となっていることがわかった。さらに、A2 橋台の死荷重反力が約 4400 kN であることを考えると、衝突速度が 1.0 m/sec の場合の最大衝撃力は、その約 5 倍以上、衝突速度が 3.0 m/sec の場合は、その約 13 倍以上となっており、発生最大衝撃力を死荷重反力をベースとして想定することは必ずしも適切ではないと考えられる。



### (3) 引張ひずみに着目した橋台のひび割れ損傷度

桁衝突を受ける橋台コンクリートの損傷度を定量的に評価するために、引張ひずみに着目して損傷度の照査を行った。図-11 (a), (b), (c)にそれぞれ衝突速度 1.0m/sec, 2.0m/sec, 3.0m/sec における最大変位発生時の引張ひずみのコンター図を示している。コンター図で示した値は、引張強度に達した後の軟化領域におけるひずみ量を表したもので、図-6 に示す  $\epsilon_m - \epsilon_t$  の値に相当するひずみを生じた要素には、ひび割れが生じたものと考え、黒色で示した。

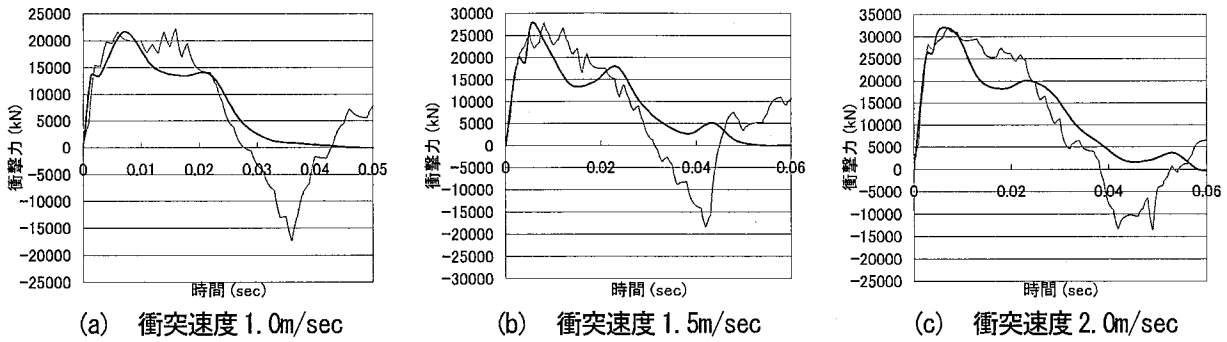
図-11 (a)より、衝突速度が 1.0m/sec の場合は、パラペット基部中央部付近にのみひび割れを伴う損傷が発生しており、橋台全体への損傷度合いはそれほど見受けられなかった。次に、図-11 (b)より、衝突速度が 2.0m/sec の場合は、パラペット基部全体および橋台底部およびウィングの一部にひび割れを伴う損傷が発生していることが確認できた。さらに、図-11 (c)より、衝突速度が 3.0m/sec の場合は、2.0m/sec の時とほぼ同様な傾向を示しているが、パラペットおよびウィング全体への損傷の拡大が顕著に見受けられた。つまり、衝突速度 3.0m/sec の時にはパラペット部の局所的な破壊だけでなく、橋台底部やウィングといった橋台全体の破壊の恐れがあることが確認できた。

### 3. 衝突ばね特性に関する一考察

#### 3.1 衝突ばね特性の算定方法

詳細解析により得られた結果を設計に直接反映させることは困難であるが、衝突による損傷の影響を考慮したこれらの結果を用いて、骨組要素による橋梁全体系解析で利用可能な衝突ばね特性を決定することは有意である。そこで、詳細解析により得られた衝撃力-変位関係を用いて、衝突ばね特性の算定方法に関する考察を行った。

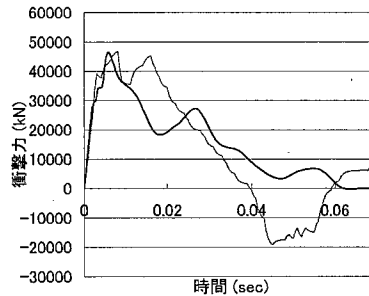
詳細解析により得られた衝撃力-変位関係の概形は衝突速度に関係なく、ほとんど図-12 に示すようなものとなった。この衝撃力-変位関係は衝突直後に急激に立ち上がり、その後、緩やかな勾配になり曲線を描きながら閉じたループとなっている。このような、曲線を一つのばね定数で表現することは非常に困難であるので、粘弾性体を表現する際に用いられるレオロジーモデルに着目して、それらを用いて桁端衝突現象を表現する手法について考察を行った。レオロジーモデルには、ばねとダッシュポットを並列配置した Kelvin-Voigt モデルおよび直列配置した Maxwell モデルなどが代表的なものとして挙げられる<sup>7)</sup>が、本研究では、これら2つを直列配置した図-13 に示す4要素モデルを適用した。4要素モデルにはその力学特性を表す定数として  $k_1, c_1, k_2, c_2$  の4つが存在するが、本解析でのレオロジー定数の決定方法を図-14 のフロー図に示し、以下に簡単な説明を述べる。



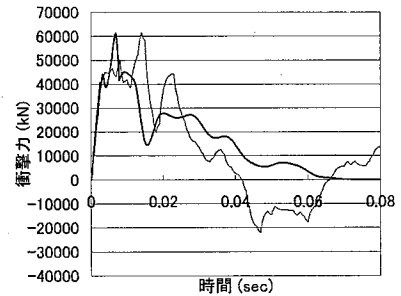
(a) 衝突速度 1.0m/sec

(b) 衝突速度 1.5m/sec

(c) 衝突速度 2.0m/sec



(d) 衝突速度 2.5m/sec



(e) 衝突速度 3.0m/sec

図-15 衝撃力応答の比較図

(— : レオロジーモデルにより算出, - - : 詳細解析により算出)

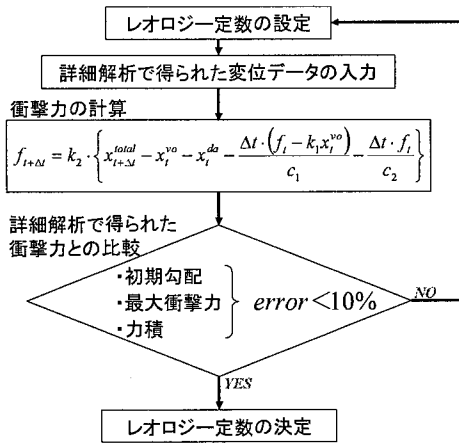


図-14 レオロジー定数決定までの流れ

まず、適当なレオロジー定数を設定する。次に、詳細解析によって得られた変位応答をレオロジーモデルの入力値として、そのレオロジーモデルの運動方程式を前進差分により解き、式(2)より衝撃力を算出する。なお、式(2)中の  $x_t^{vo}$ 、 $x_t^{da}$  は前進差分である式(3)、(4)により算出した。最後に、レオロジーモデルで算出された衝撃力応答と詳細解析によって得られた衝撃力応答を、初期勾配、最大衝撃力、力積という3つの項目で比較し、それらの項目の誤差が許容誤差 10%以下となるまで同様の計算を繰り返し、許容内に収まったものをレオロジー定数として決定する。

$$f_{t+\Delta t} = k_2 \cdot \left\{ x_{t+\Delta t}^{total} - x_t^{vo} - x_t^{da} - \frac{\Delta t \cdot (f_t - k_1 x_t^{vo})}{c_1} - \frac{\Delta t \cdot f_t}{c_2} \right\} \quad (2)$$

$$x_t^{vo} = \frac{(c_1 - k_1 \Delta t) x_{t-\Delta t}^{vo} + f_{t-\Delta t} \Delta t}{c_1} \quad (3)$$

$$x_t^{da} = \frac{c_2 x_{t-\Delta t}^{da} + f_{t-\Delta t} \Delta t}{c_2} \quad (4)$$

ここで、 $x_{t+\Delta t}^{total}$  は時刻  $t + \Delta t$  における詳細解析によって得られた変位データ、 $x_t^{vo}$  は時刻  $t$  における Voigt モデルの変位、 $x_t^{da}$  は時刻  $t$  におけるダッシュポットの変位、 $\Delta t$  は時間刻み、 $f_t$  は時刻  $t$  における出力衝撃力である。

さらに、誤差の算出は全ての項目において以下の式(5)を用いた。

$$error(\%) = \left| \frac{\phi_R - \phi_A}{\phi_R} \right| \times 100 \quad (5)$$

ここに、 $\phi_R$  はレオロジーモデルにより得られた値、 $\phi_A$  は詳細解析により得られた値を示す。

ただし、今回は、衝撃力の値が負となっている箇所はゼロとして取り扱うこととしたので、時間軸と衝撃力波形の正の部分で囲まれている部分を有効な力積とした。また、レオロジーモデルを用いた衝突ばね特性の検討を行う際の変位の入力データには、骨組モデルによる全体系解析との整合性を考慮して、桁断面図心位置に相当する点Bの変位を用いることとした。これは、実際のパラペットの変形挙動は3辺支持の版的な挙動を示すことが確認できており、着目する箇所によって変位応答にばらつきがあるためである。

### 3.2 レオロジー定数に関する計算結果と考察

あるレオロジー定数を設定し、上記で述べた手法を用いて許容誤差10%を満たすようになるまで繰り返し計算を行い、レオロジー定数を決定した。まず、決定されたレオロジー定数を用いた場合の衝撃力応答を図-15(a)～(e)に示す。すべての衝突速度において、レオロジーモデルにより算出された最大衝撃力の発生時間が多少遅れているものの、最大衝撃力および初期勾配はほぼ一致していることが確認できた。また、レオロジーモデルにより算出された衝撃力の値には負値となっている場合がある

表-2 算定されたレオロジー定数一覧

衝突速度(m/s) \ 各定数	$k_1$ (kN/mm)	$c_1$ (kN·s/mm <sup>2</sup> )	$k_2$ (kN/mm)	$c_2$ (kN·s/mm <sup>2</sup> )
1.0	800	60	35000	100
1.5	500	40	35000	100
2.0	400	30	35000	200
2.5	200	35	35000	250
3.0	150	30	35000	300

が、これは、レオロジーモデルに対して3次元詳細解析で得られた変位を強制的に与えているが、時間とともに変位が減少する場合には、減衰定数 $c_2$ で表されるダッシュポットに負の力が働くためである。

次に、今回得られたレオロジー定数を表-2に、その際の最大衝撃力、力積に関する誤差を表-3に示している。決定されたレオロジー定数の特徴として、衝突速度が増加するに連れて、Kelvin-Voigtモデルの定数である $k_1$ 、 $c_1$ は減少傾向にあり、Maxwellモデルの定数である $c_2$ は増加傾向であることが確認できた。一方、 $k_2$ は衝撃力に大きな感度を有していないことが明らかとなったので、今回の試算では一定値とした。今回決定されたレオロジー定数は、事前に行った3次元詳細解析の応答値を使っているため、あくまで今回の解析対象橋梁にのみ有効なものと考えられる。しかし、同様な手法を用いて、簡易にレオロジー定数を算定することが可能なことから、桁衝突を想定した骨組解析に用いる衝突ばね特性の決定に有用な手法であると言える。今後、衝突速度および桁の断面形状などを変更した解析を行い、それらの結果を用いて、レオロジー定数を衝突条件および構造物諸元をパラメータとして決定可能な手法に発展していけば有用なものになると考えられる。

#### 4. 結論

本研究は、桁衝突を受ける橋台の損傷度を定量的に評価するために、橋桁および橋台を忠実にモデル化し、3次元有限要素法を用いて衝撃応答解析を行ったものである。さらに、それらの結果を用いて衝突ばね特性に関する一考察を行った。本研究の成果を要約すると以下のようになる。

- (1) 衝突速度が2.5m/sec、3.0m/secにおけるパラペット天端と基部の最大変位の差は、パラペットの高さの約1/150以上になることが確認できた。橋台の許容変位を、天端と基部の相対変位で設定した照査を行う場合には、同様の詳細解析が必要であると考えられる。
- (2) 衝突速度を増加するに伴い、最大衝撃力および衝撃力継続時間が増加する傾向になった。また、今回の解析対象橋梁において、最大衝撃力はA2橋台の死荷重反力である約4400kNの5.0~13.0倍に達するこ

表-3 最大衝撃力および力積に関する誤差

衝突速度(m/s) \ 判定項目	最大衝撃力	力積
1.0	2.97%	2.47%
1.5	0.03%	7.57%
2.0	0.93%	3.90%
2.5	0.58%	2.49%
3.0	0.50%	9.20%

とがわかった。

- (3) 橋台コンクリートの引張ひずみに着目して損傷度の照査を行ったところ、衝突速度1.0m/secの場合はパラペット基部にのみひび割れを伴う損傷が見受けられたが、衝突速度3.0m/secの場合はパラペット全体、橋台底部、さらにウイングにまで損傷の拡がり確認でき、橋台全体の破壊が危惧される結果となった。
- (4) 桁端衝突現象の特性を表現するために、詳細解析により得られた結果を入力データとしたレオロジーモデルを用いる手法を提案した。その結果、簡易に衝突ばね特性を表すレオロジー定数を算出することができ、その結果は骨組モデルによる全体系解析に対して有用であると考えられる。
- (5) 今回は一試算である詳細解析のデータを用いて衝突ばね特性を決定したが、今後、衝突条件および構造物諸元を変更した詳細解析を行い、それらのデータを用いた各レオロジー定数の決定方法を検討していく予定である。

#### 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2002。
- 2) 森山卓郎，濱本朋久，西本安志，依田照彦，石川信隆：PC橋の桁衝突を考慮した桁遊間縮小化に関する基礎的考察，構造工学論文集 Vol.51A，pp.641-648，2005。
- 3) 長靖朗：橋全体系の耐震補強検討事例，九州技法，No.38，pp.148-151，2006。
- 4) 矢部正明，武村浩志，川島一彦：直橋および斜橋の桁間衝突とその影響，構造工学論文集 Vol.43A，pp.781-791，1997。
- 5) 川島一彦，植原健治，庄司学，星恵津子：桁衝突および落橋防止装置の効果に関する模型振動実験および解析，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.221-236，2002。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV下部構造編2002。
- 7) 山田嘉昭：有限要素法の基礎と応用シリーズ6 塑性・粘弾性，培風館，1998。