

落橋防止装置連結部材の衝撃応答解析

Impact Response Analysis of the Aseismic Tie Plates

長嶋 文雄* 成田 信之**

by Fumio NAGASHIMA and Nobuyuki NARITA

Impact response behavior of the aseismic bridge-tie system is determined through analytical study utilizing three-dimensional finite element code JDYNA3D. Falling down problem of the overall bridge and aseismic tie system in the gravity field is analyzed by using large deformation dynamic response method for inelastic solids and a contact-impact algorithm that permits sliding along material interfaces.

The results show that the tie plate designed by $\sqrt{2}$ Rd method in the existing design code still remains in the state of yielding even if it suffers such severe loading. However, the results also show a possibility of the existence of more rational design method, kinematic energy method and/or impact coefficient method.

A simple and effective method to evaluate the kinematic energy of the plate is also proposed.

Key Words: aseismic tie plates, impact response analysis, earthquake engineering

1. まえがき

道路橋示方書¹⁾では、新潟地震における昭和大桥の被害を教訓として、落橋防止構造装置を設置するように定めている。しかし、細部構造についての規定がないため、各道路公団・公社毎に設計方法が異なっていると指摘がなされている(例えば、文献2)。落橋防止装置を設置した後、明らかに落橋防止装置が効いて落橋を免れたといった報告例は見受けられず、各公団・公社の基準の不統一を解決するような有効な経験上の知見は得られていない。

一方、落橋防止装置に関する研究においては、最近、落橋防止装置の連結板そのものについての静的あるいは動的な、また実験的あるいは解析的な研究が見られる(例えば、文献3)ものの、連結板に作用させるべき外力(衝撃力)についての検討は不足している。また、衝撃問題として扱った例は見受けられない。

本論文は、落橋防止装置の一つである耐震連結板の衝撃応答特性を重力場における動的応答解析を通して明らかにし、設計外力に関する一つの基礎資料を得ることを目的としたものである。道路橋示方書(耐震設計編)に示される落橋防止構造には、「可動支承部の移動制限装置」、「桁の掛け違い長さ」、「落橋防止装置」の3種がある。正しくはこれら相互の効果を加味した検討をすべきであるが、ここでは基本問題の一つとして「落橋防止装置」のみに注目し、橋桁の片端がなんらかの理由により橋脚から逸脱した場合を考える。従って、ここでは地震加速度による横力などは考慮していないが、落橋防止装置に対しては最も厳しい

* 工博 東京都立大学 助手 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

** 工博 東京都立大学 教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

外力の一つを想定することになる。ここで論じる耐震連結構造を含む橋梁全体系についての大規模モデルの衝撃応答解析手法が確立されれば、落橋時のシミュレーションによるパラメータ解析が可能となり、他の装置の効果を加えた、より複雑な問題の解明へと発展させることができるであろう。

衝撃応答解析とともに、幾何学的な条件と剛体棒の落下問題を用いた簡易な運動エネルギーの算定法についても検討した。

2. 重力場における橋桁落下問題の解析手法

本研究では「落橋防止装置」のみに注目し、橋桁の片端がなんらかの理由により橋脚から逸脱した場合を想定し、重力場における落下、そして落橋防止装置が働き出すまでの動的応答解析を行い、主に連結板に作用する衝撃力を明らかにする。

解析には、市販の3次元非線形衝撃応答解析ソフト(JDYNA3D)を用いた。解析モデルとしては、耐震連結構造を含む橋梁全体系を3次元ソリッド要素でモデル化したものを用いた。解析対象は、図-1(a)、(b)に示すような支間30m、4主桁の道路橋(1断面合成桁橋)とし、各桁に対して落橋防止装置が設置されているものとした。

解析条件として、連結ピン側面と連結板の左右の長円孔側面および母材ウェブと補強板におけるピン孔側面にスライド面を設定する、対称性を利用して桁1本の半分(ハッチ部分)を解くことにする、隣接橋桁の一部もモデル化する、8節点ソリッド要素で離散化する(図-2参照)、材料非線形性(降伏後の弾性係数は降伏前の1/100とする)を考慮する、母材および補強板と連結ピン・連結板の材料はそれぞれSM50Y、SS41相当とし、スライド面に対して次式で示されるような、速度によって指数関数的に変化する摩擦を考慮する、などを設定した。

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) e^{-d_v v_{rel}} \quad (1)$$

ここで、 μ_s :静摩擦係数(0.5)、 μ_k :動摩擦係数(0.05)、 d_v :形状係数(1.19×10^{-4})、 v_{rel} :相対速度(mm/sec)である。式(1)は静摩擦から動摩擦に移行する間を指数関数を用いてなめらかに結んだものであり、0 km/hで0.5、100 km/hで0.067程度の摩擦係数を与える。

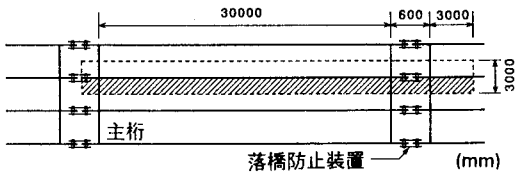


図-1(a) 解析対象橋梁概略図

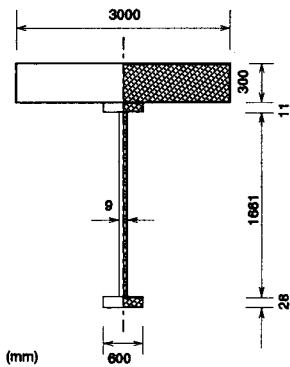


図-1(b) 橋桁断面寸法

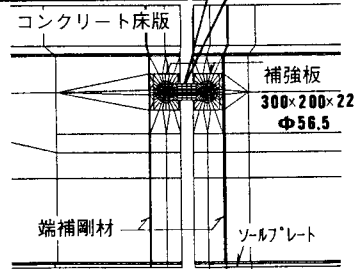
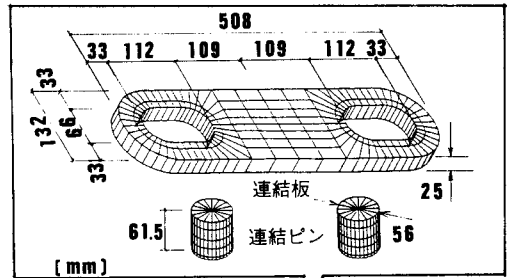


図-2 解析モデル図(部分)

3. 橋桁落下問題の解析結果

解析モデルは総要素数が 1,065、総節点数が 2,366 となった。また、収束条件を満足させるための演算時間刻みは（最小要素寸法と物性値に依存するが） 4.5×10^{-7} 秒であった。コンピュータ（EWS, 17MIPS, 20MB-RAM）の総演算時間はおおよそ 3 週間であった。図-3 は 0.0, 0.09, 0.18, 0.24 秒の各時刻における橋桁全体の落下の様子を示したものである。連結ピンと連結板および腹板・補強板の接触が始まる（以後は簡単に「衝突」と呼ぶ）時刻はおおよそ 0.177 秒であり、その後約 0.1 秒間、0.27 秒まで解析した。

図-4 に衝突開始から約 0.03 秒後（ $t=0.21$ 秒）の落橋防止装置の変形図を示す。この時点は運動エネルギーはピークを過ぎ、下降を始めた状況にある。連結板はほぼ 45° の傾きを有している。衝撃による連結ピンの変形は、母材・補強板（SM50Y 相当）との接触部において大きく、連結板（SS41 相当）との接触部において小さくなっている。この現象は落橋防止装置の材質に関係しており、装置全体のエネルギー吸収性状を統一するためには、補強板の材質も連結ピンなどに合わせる必要がある。

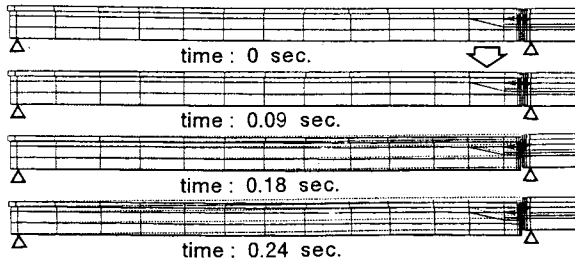


図-3 解析結果（橋桁落下挙動図）

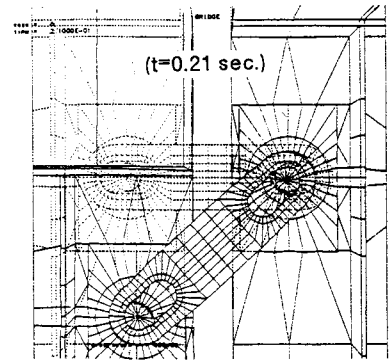


図-4 落橋防止装置変形図

図-5 には橋桁落下に伴う運動エネルギー (E_k) と橋桁・落橋防止装置全体の歪みエネルギー (E_i) の時刻歴を示す。0.177 秒付近から落橋防止装置が効き始め、 E_i が E_k との差を埋めようとして急増している。これに伴って、 E_k は急変している。しかし、衝突（接触）以後も連結板に発生する伸びなどによって連結ピン中心間距離が少し増え続けるため、 E_k も多少増え続けてピークを迎えることになる。

E_i 曲線において P、TP と記した箇所は、それぞれ連結ピン、連結板が塑性化して歪みエネルギーが急増したところを示している。 E_k が減少した後も E_i が減らず、 E_i 曲線と E_k 曲線が交差しているのは残留歪みが存在するためである。

図-6 は連結板中央断面に生じた衝撃力を、図中に示した 3 種類の応力度に断面積を乗じて示したものである。

高周波振動を含むような変動の激しい波形が得られるものと予測していたが、図に示すような比較的变化の少な

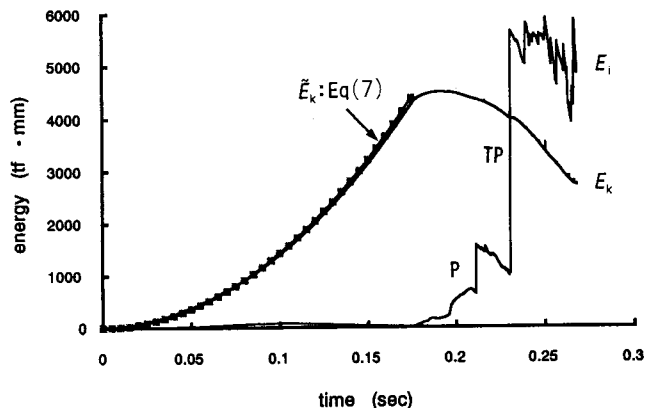


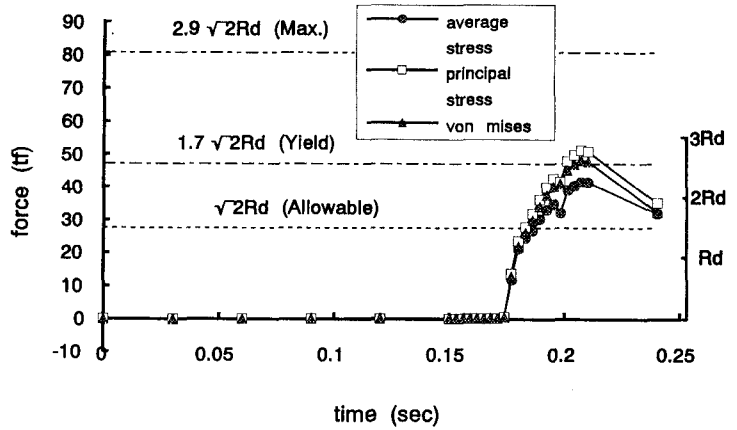
図-5 運動エネルギーと歪みエネルギーの時刻歴

い衝撃力曲線が得られた。この理由として、橋桁の質量が非常に大きいため、また、それに対して連結装置の材質をSS41相当に設定したためにエネルギーの吸収機能が働いたことなどが考えられる。

橋桁の自重 W は 39.0 tonであり、設計で用いられる R_d は18.5 tonとなる。

衝撃力の最大値 f_{max} は 2.7 R_d 程度である。 $\sqrt{2} R_d$ を用いて現行の許容応力度設計を行った場合、 f_{max} は $\sqrt{2} R_d$ (図中に Allowable と記した) を越えるが、

部材の降伏荷重 1.7 $\sqrt{2} R_d$ (Yield) にほぼ等しく、最大荷重 2.9 $\sqrt{2} R_d$ (Max.) に対して余裕のある設計となることになる。今回は一つの解析例による結果ではあるが、 $\sqrt{2} R_d$ を用いた現行設計法は、橋桁の片端が橋脚から逸脱した場合を想定した、最も厳しい荷重条件に対して、丁度部材の降伏に一致するという効率の良い設計となっている。連結板に作用する、この衝撃力は残念ながら解析学的に求めることはできず、実験的あるいはここで展開した数値シミュレーションによって知るのみである。ただし、もう一つの重要な物理量である運動エネルギーについては次章で示すように概算することができる。



図一六 連結板に発生する応力

4. 運動エネルギーの簡易算定法

橋桁を図一七に示すような、長さ L 、質量密度 ρ 、断面積 A (一定) の剛体棒 p q に置き換えて考えてみる。端点 q を自由端とし、 p 側支点まわりに回転する剛体棒の任意時刻における位置は一つの変数、回転角 (θ) によって完全に定められる。重力の加速度を g とし、全質量を M 、回転慣性モーメントを I とすると運動方程式は次式で表わされる。

$$I \ddot{\theta} = (1 / 2) M L g \cos (\theta) \quad (2)$$

ここで、回転慣性モーメント (桁高方向の慣性力成分を考慮しておらず、従って、実際よりもやや小さい) 、

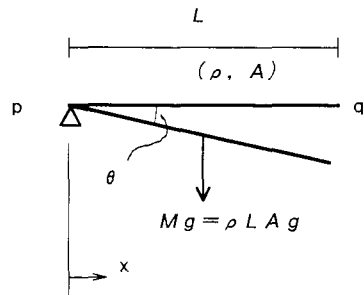
$$I = \int_0^L \rho A x^2 dx = (1/3) \rho A L^3 \quad (3)$$

を式 (2) に代入して積分すると、初期条件: $t = 0$ 秒において $\dot{\theta} = 0$ 、 $\theta = 0$ に対して、回転速度と回転角の関係を示す次式が得られる。

$$\dot{\theta}^2 = 3 g \sin (\theta) / L \approx 3 g \theta / L \quad (4)$$

従って、端点 q の落下速度は、

$$L \dot{\theta} = \sqrt{3 g L \theta} \quad (5)$$



図一七 剛体棒の落下問題

となり、落体の自由落下速度 $\sqrt{2 g u}$;ここで u は落下距離、に対して、 $\sqrt{3/2}$ 倍速いことになる。

また、端点 q が $L \theta$ だけ落下するに要する時間は次式で表わされる。

$$t = L \theta / \sqrt{3 g L \theta} = \sqrt{(L \theta) / (3 g)} \quad (6)$$

運動エネルギー \dot{E}_k は、

$$\dot{E}_k = (1/2) I \dot{\theta}^2 = (1/6) M L^2 \dot{\theta}^2 = (3/8) M g^2 t^2 \quad (7)$$

と表わすことができ、時刻 t の 2 次関数となる。

橋桁が落下してから耐震連結装置が効き始める時刻 t_p は、図-8 に示す橋桁の幾何形状から求めることができる。時刻 t_p における回転角 θ_p は、 h : 支点から連結ピンまでの鉛直距離、 ℓ : 桁端から連結ピン中心までの水平距離、 a : 連結ピン初期中心間距離、 c : ピン補強版・連結板間の総クリアランス、 ℓ_1 : 左側支点から連結ピン中心までの距離 ($\ell_1 = \sqrt{\ell^2 + h^2}$)、 ℓ_2 : 左側支点から隣接する桁の連結ピン中心までの距離 ($\ell_2 = \sqrt{(\ell + a)^2 + h^2}$) とすると次式で表わすことができる。

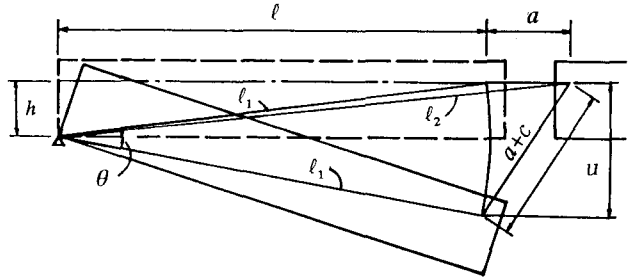


図-8 簡易算定法における説明図

$$\theta_p = \cos^{-1} \left\{ \frac{(\ell_1^2 + \ell_2^2 - a^2)}{(2\ell_1\ell_2)} \right\} + \cos^{-1} \left\{ \frac{(\ell_1^2 + \ell_2^2 - (a+c)^2)}{(2\ell_1\ell_2)} \right\} \quad (8)$$

耐震連結装置が効き始める時刻 t_p は式 (6) の θ に上式の θ_p を代入し、 $L \approx \ell$ として求められる。また、そのときの運動エネルギー $\dot{E}_{k,p}$ は次式となる。

$$\dot{E}_{k,p} = (3/8) M g^2 t_p^2 = (3/8) W g t_p^2 \quad (9)$$

ここで W は橋桁の全重量 (本解析モデルでは $W = 39.0 \text{ ton}$) である。図-5 に式 (7) を用いて計算した曲線を示したが、式 (7) が成立する衝突開始時刻以前は、衝撃応答解析結果とほとんど一致した曲線となる。

衝撃解析における橋桁モデルの諸寸法 ($\ell = 30135 \text{ mm}$, $h = 1400 \text{ mm}$, $a = 330 \text{ mm}$, $c = 56.5 \text{ mm}$) を用いて衝突時の回転角を求めると、 $\theta_p = 7.154 \times 10^{-3} \text{ rad} = 0.4099 \text{ deg}$ となり、衝突時刻は $t_p = 0.1713 \text{ 秒}$ 、運動エネルギーは $\dot{E}_{k,p} = 4204 \text{ ton} \cdot \text{mm}$ となる。式 (6) で計算された衝突時刻はシミュレーションで得られた、 0.177 秒 よりも少し早くなっている。この理由としては、回転慣性モーメントを少なく見積もっていること、およびピン連結板間の摩擦力の影響などが考えられる。

シミュレーションによる最大運動エネルギーは $4506 \text{ ton} \cdot \text{mm}$ であり、式 (9) による $\dot{E}_{k,p}$ よりも幾分大きい。これはシミュレーションでは衝突後も連結板などに変形が進んでいるため、および簡易モデルを用いたために生じた誤差が原因である。従って、より実際に近い最大運動エネルギーを求めるためには、式 (9) で求めた $\dot{E}_{k,p}$ に 1 割弱程度の割り増しをする必要があるように思われる。

このようにして最大運動エネルギー、すなわち、要請吸収エネルギーが求められると、これを満足するような落橋防止装置のセットを用意さえすれば容易に設計ができることになる。運動エネルギーを衝撃力に関係づける適当な式が見当たらないことが衝撃問題の難点である。ただし、衝撃係数などを用いた衝撃力に基づいた設計をするには、さらに数多くの実験あるいは解析を行う必要がある。その点、ここで示した要請エネルギーを用いる方法は合理性も持っており、より簡便な設計法となり得る。

5. まとめ

落橋防止装置の一つである耐震連結部材の衝撃応答特性を重力場における動的シミュレーション応答解析を通して明らかにした。判明した結果を以下に箇条書にして示す。

- ① シミュレーション解析により、連結部材の落下の衝突による衝撃力は全自重の1.3倍強（片端反力 R_d の2.7倍）程度になることがわかった。すなわち、現行設計法の一つである、 $\sqrt{2}$ R_d 反力に対して許容応力度に基づく設計法を用いた場合、この衝撃力は部材降伏レベルにほぼ合致することがわかった。
- ② 連結板が効き始めてから衝撃力が最大値に達するまでの時間は約 0.04 秒程度であった。
- ③ 連結ピン付近に発生する応力集中は、高強度部材において高く、強度の低い部材において低い。今回の解析モデルでは、連結板よりもウェブ補強板の部材強度が高かった。従って、ピンに発生する支圧応力は、連結板側ではなく、補強板で補剛されたウェブ側が高かった。バランスをとった設計をするためには、ピン、補強板、連結板の材質をなるべく揃えるなどして、強度を統一するのが良い。
- ④ 橋桁の落下開始から、連結板が効き始める直前までの運動エネルギーを概算する簡易算定式を提案した。この運動エネルギーと歪みエネルギーがバランスしなければならないことから、連結部材の要請吸収エネルギー量が定められ、これに基づいて断面または形状設計をすることができる。
- ⑤ 落橋防止装置の合理的な設計法としては、エネルギーによる方法（要請エネルギーを満足するような落橋防止装置セットを選択する方法）または衝撃係数による方法が考えられる。

以上の検討は、単一のモデルによる解析結果であり、従って、これから全ての落橋防止装置の構造を評価することはできない。しかし、動的衝撃力に対する落橋防止装置のエネルギー吸収機構に関する基本的な情報を含んでおり、簡易算定式法も含めて、今後の連結部材の設計に対する一助になるものと考えられる。

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）、PP88～92、PP206～223、1990。
- 2) 鋼橋技術研究会W/G Bグループ：落橋防止装置設計の現状について（成果報告書）、平成3年4月。
- 3) 小畑誠、後藤芳顕、松浦聖、藤原英之：高速引張時の落橋防止装置連結板の強度特性、土木学会論文集、No. 441/I-18, PP 97～105, 1992, 1。

(1993年 9月16日受付)