

車両衝突を受ける鋼製橋脚の挙動に関する数値解析的研究

NUMERICAL ANALYSES ON BEHAVIOR OF STEEL PIERS SUBJECTED TO VEHICLE COLLISION IMPACT

伊藤 義人^{*}, 大野 隆^{**}, 森 正樹^{***}

Yoshito ITOH, Takashi OHNO and Masaki MORI

^{*}工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)^{**}工修 近畿日本鉄道株式会社(〒543-8585 大阪市天王寺区上本町6丁目1番55号)^{***}大学院生 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

In this paper, the behavior of steel piers subjected to vehicle's collision impact is studied using dynamic FEM analysis method. An original FEM model of truck has been developed for collision analyses of steel piers having rectangular and circular sections. The results of collision analysis using the truck and car models are compared with respect to the deformation responses of vehicles and piers. In addition, the effect of filling the base of the pier with concrete is investigated on the impact energy absorption characteristics of steel piers.

Key Words: steel pier, vehicle collision impact, energy absorption

1. まえがき

車両衝突時における衝突エネルギーの吸収過程は、車両の車体構造によって大きく異なる。乗用車のような比較的重量の小さい車両は、車両前部のクラッシュブルゾンにおいて衝撃エネルギーを吸収できうる構造¹⁾⁻⁴⁾であるのに対し、大型トラックのような重量の大きい車両は、車両前部とシャーシの損傷によってエネルギー吸収をすると同時に車体重量が大きいことから、衝撃力の影響が道路構造物に大きく伝達する。

道路構造物には、高速道路の橋脚や高欄、ガードレール等の防護柵など、車両衝突を受ける可能性のある数多くの構造物が存在する。このような構造物は、数は少ないが実車衝突実験⁵⁾⁻⁷⁾や事故事例⁸⁾、あるいは理論的計算などから設計基準が定められたり、構造的な対策が立てられたりしている。

高速道路橋脚のような構造物では、供用したままでの補修が難しいため車両衝突時の衝撃エネルギーに対し構造物の変形を大きくしないようにする必要がある。コンクリート橋脚のようなマッシブな構造物への車両衝突の場合は、橋脚本体にはほとんど損傷が見られないが、一方で、鋼製橋脚の場合は車両衝突によって衝突部に局部変形が発生し、補修が必要となる場合がある。文献8)のように、大型トレーラーが鋼ラーメン橋脚の円形柱に衝突し、最大で66mmの凹状の損傷を与えたといった例も見られる。一般に、こうした自動車衝突の可能性のある鋼製橋脚には橋脚基部に低品位コンクリートを充填し、衝突による損傷を防ぐ対策が立てられている。

これまでの研究で車両衝突に対する鋼製橋脚に関する

研究は文献8)を除きほとんどないが、その他の道路構造物に対してはコンクリート壁高欄の衝撃実験より車両の衝突時に発生する衝撃力を振り子式実験装置を用いることから衝突を再現して車両の衝撃力特性を把握しようとしている研究^{9),10)}や、模型自動車の衝突実験結果¹¹⁾から車両のばね質点モデルを推定して解析的に衝撃力特性を明らかにするような研究^{12),13)}も比較的多く見られる。しかし、こうしたモデルを用いた研究は、小型模型実験結果を比較的良好にシミュレートできているが、実際の道路構造物への車両衝突問題を考える場合、衝突時における車両特有の衝撃力特性が存在するために、実構造物と実車両について検討する必要があると思われる。

そこで本研究では、道路構造物の中から高速道路の鋼製橋脚柱に着目し、衝突車両であるトラックのモデル化を行い、衝突時における構造物の実現象についてフルスケールの数値シミュレーションを行う。このシミュレーションから円形断面鋼製橋脚および矩形断面鋼製橋脚に車両が衝突した時の橋脚の挙動や変形量を定量的に評価し、衝突時の衝撃エネルギーの伝達の様子を把握するとともに、被害軽減用の充填コンクリートの有効性を検証する。なお、数値解析には汎用衝撃応答解析プログラム LS-DYNA3D¹⁴⁾⁻¹⁶⁾を用いている。

2. 耐衝撃設計法の現状

道路橋示方書¹⁷⁾においては、車両が橋脚柱に衝突する場合において、その衝突荷重を『自動車の衝突のおそれのある脚柱には、コンクリート壁などの十分な防護施設を設けるものとする。これらの防護施設が設けられない

場合には、衝撃荷重(車道方向は100tf、車道と直角方向については50tf)が路面から1.8mの高さに水平に働くものとして設計を行わなければならない。』と定めている。

実際の鋼製橋脚の設計計算書^{18),19)}においては、柱部材に上記の設計衝突荷重を用いて変形法による骨組構造解析を行い、面内および面外フレームにおいて断面力を算出することから断面形状を決定している。計算に用いる荷重は、主荷重と衝突荷重を組み合わせ、これに許容応力度の割り増し係数を乗じたものを用いている。ここで、本研究に用いた円形断面鋼製橋脚¹⁸⁾(詳細は3.1)の設計計算書における面内および面外への荷重(衝突荷重、地震荷重、風荷重(面内)、温度変化(面外))を入力した場合の橋脚最大水平変位の算定結果を表-1に示す。表-1から分かるように、現行の設計衝突荷重においては、明らかに他々の荷重に比べて小さな影響しか与えないため、断面力の集計には影響しない。

実際の車両衝突に対しては柱部材としてではなく衝突部の局所的な板の変形が問題となる。そこで、車両衝突の可能性のある鋼製橋脚には、路面から高さ2mまで橋脚内部に低品位の中詰めコンクリートを打つことによって車両衝突対策としているのが現状である。この効果については、これまで明確にされたものがなく、また、平成5年に道路橋の設計に用いる設計自動車荷重が20tfから25tfに変更されたが、それに対する設計衝突荷重の評価についても再検討されていないなどの問題点がある。

表-1 荷重ケースごとの橋脚最大水平変位

荷重種類	面内(mm)	面外(mm)
衝突荷重	0.295	0.590
地震荷重	40.2	22.8
風荷重	10.8	---
温度変化	---	23.6

3. 解析モデル

3.1 高速道路鋼製橋脚モデル

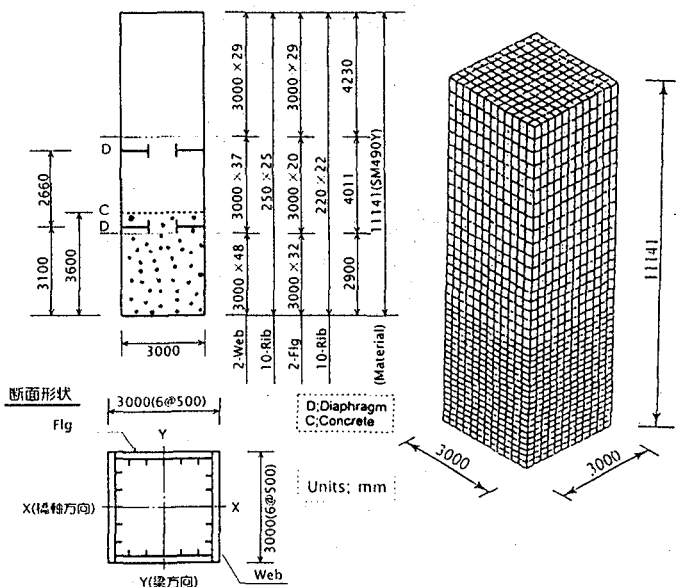
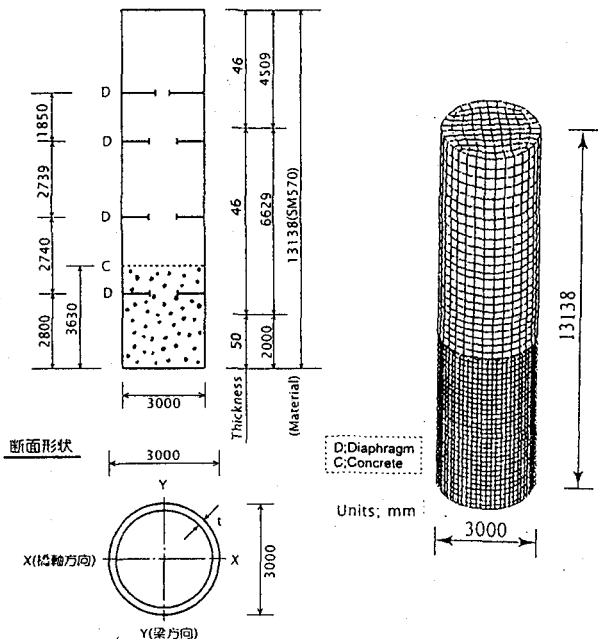
鋼製橋脚モデルは、実際の名古屋都市高速道路橋脚一般図に従って、円形断面鋼製橋脚¹⁸⁾および矩形断面鋼製橋脚¹⁹⁾それぞれについてモデル化を行った。横梁は、衝突時の柱の曲げ挙動には影響を与えないものと考え、横梁の上端まで柱部が続くようなモデルを考えた。解析プログラムLS-DYNA3Dでは円形Shell要素が定義できないため、3種の感度解析より鋼柱部は正32角柱に決定し、4節点断面内2点積分Hughes-liu Shell要素を用いてモデル化した。この要素は、Solid要素の縮退型として定義され、断面内2点積分がデフォルト値である。縦リブおよびダイヤフラムについても同じ要素を用いてモデル化した。また、コンクリートモデルには1点積分Solid要素を用いた。なお、本研究では橋脚のコンクリート充填による有効性を検証するために、実際の橋脚基部に充填されているコンクリートを考えない非充填モデルも作成した。

境界条件には、下端は固定、上端は自由で、かつ、橋脚上部荷重の死荷重と橋脚の鋼重の1/3を載荷している。以上より作成した各断面橋脚の断面一般図と有限要素モデルを図-1および図-2に、また橋脚モデルの諸元を表-2にそれぞれ示す。なお、解析モデル名のSPはSteel Pipe pier, CPはConcrete-filled Pipe pier, SBはSteel Box pier, CBはConcrete-filled Box pierを示す。また、1つの解析に要した時間はSun Workstation S-4/20Lで約97時間であった。

解析に用いた構成則は、鋼についてはvon Misesの降伏条件に従う等方弾塑性体とし、応力-ひずみ関係に完全弾塑性体とひずみ速度依存性の効果を考慮したものを用いた。鋼のひずみ速度効果依存性については、降伏点応力をひずみ速度によって変化させたものを考えた²⁰⁾。降伏応力は、道路橋示方書¹⁷⁾に記載されている各鋼材の規定値を用い、円形断面鋼製橋脚が使用しているSM570については450MPa、また、矩形断面鋼製橋脚が使用しているSM490Yについては352MPaとした。また、ヤング率とポアソン比はそれぞれ206GPaと0.3を用いている。

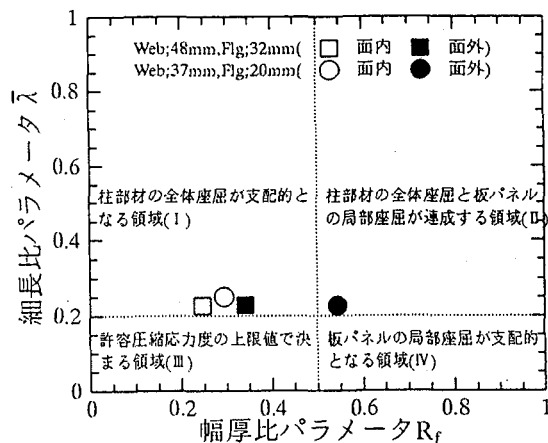
中詰めコンクリートモデルについては、文献20)よりひずみ速度効果を考慮していない完全弾塑性体モデルを用いた。コンクリートの構成則においては圧縮側で降伏後は完全弾塑性、引張応力が引張強度に達した後はカットオフ応力のみが働くものとし、降伏基準にはDrucker-Prager則を用いている。圧縮強度は23.52MPa、引張強度は2.20MPaであり、ヤング率、ポアソン比はそれぞれ24.36GPa、1/6¹⁷⁾を用いている。また、鋼とコンクリートのインターフェイスについては、本研究では衝突方向の一方向のみを考えれば良く、また、外側は鋼で拘束されているのでコンクリートの剥離なども考える必要がないことから、tied interfaceにより剛結とした。解析に使用した材料定数を表-3に示す。

本研究で用いた橋脚の力学的パラメータの一般的位置づけを確認するために、ここでは細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ および径厚比パラメータ R_t あるいは幅厚比パラメータ R_f を算定する。まず、円形断面鋼製橋脚について、橋脚基部より高さ0~2000mm(板厚 $t=50\text{mm}$)においては $\bar{\lambda}=0.3074$ 、 $R_t=0.1805$ であり、また、橋脚基部より2000~13138mm(板厚 $t=46\text{mm}$)では $\bar{\lambda}=0.3070$ 、 $R_t=0.1179$ である。文献21)によると、これらの値は供用されている鋼製橋脚のほぼ平均値を取っている。また、ここで矩形断面鋼製橋脚の幅厚比パラメータ R_f と細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の関係を図-3に示す。この図では、衝突部付近の橋脚の板厚が変化しているので、2種の板厚について面内および面外の各パラメータの値をプロットしている。同様に文献21)によると、実際の橋脚の約90%は柱部材の全体座屈が支配的となる領域(I)および柱部材の全体座屈と板パネルの局部座屈が連成する領域(II)に含まれ、本研究でモデル化した矩形断面鋼製橋脚の各パラメータ値もこれらの領域に含まれており、本研究ではほぼ一般的な鋼製橋脚



解析モデル名	円形断面 鋼製橋脚		矩形断面 鋼製橋脚	
	SP	CP	SB	CB
節点数	3377	6712	3069	9941
要素数	3360	6048	3116	8227
要素タイプ	2点積分Hughes-liu shell要素 1点積分solid要素			
最小メッシュサイズ (mm)	147 × 187			
境界条件	下端 ; 固定, 上端 ; 自由			
載荷上部荷重 (tf)	1779		1482	

材料定数	SP, CP 鋼材	SB, CB 鋼材	CP, CB コンクリート
ヤング率E (GPa)	206	206	24.36
ポアソン比 ν	0.3	0.3	1/6
せん断弾性係数 G_s (GPa)	15.85	15.85	10.44
降伏応力 σ_v (MPa)	450	352	---
体積弾性係数K _c (GPa)	---	---	12.18
圧縮強度 f'_c (MPa)	---	---	23.52
引張強度 f_t (MPa)	---	---	2.20



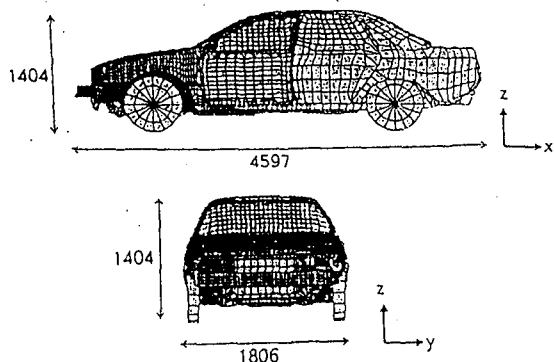


図-4 乗用車モデル

Center(NCAC)より実車両のFord Taurus Car Model(車両重量1.564tf)を入手し、乗用車の衝突によって橋脚にどのような挙動が見られるかを検証するとともに、解析精度についても検討を行った。解析に使用した有限要素モデルを図-4に示す。モデルの節点数および要素数はそれぞれ28353と26729である。モデルに使用している構成則はvon Misesの降伏基準に従う等方弾塑性体で、応力-ひずみ関係には鋼やバンパー、ガラス、ゴムなど、それぞれの材料の特性値が使われている。また、橋脚と車両間の接触条件を指定するスライドインターフェイスには、接触を定義するslide-void-frictionタイプを使用している。

3.3 トラックモデル

(1) モデル化の必要性

トラックやトレーラーのような総重量の大きな車両の衝突では、衝突時における車体の破損は小さいものの被衝突体には大きな衝撃力が働く。これは、愛知県警から提供された数多くの衝突事例からも明らかであり、衝撃力が作用した場合にシャーシフレームによって衝撃エネルギーを吸収する割合が大きく、キャブ部分のクラッシュストロークは乗用車よりも小さくなると考えられるからである。しかし、トラックの有限要素モデルを用いた研究例は少なく、また、有限要素モデルも公開されていない。

そこで、本研究では独自にトラックのモデル化を行った。ただし、できるだけ簡易的なものとして、キャブおよびフレームの破損によって衝撃エネルギーを吸収できる有限要素モデルを作成した。作成したモデルは、総重量25tfのトラックである。

(2) シャーシフレームのモデル化

シャーシフレームのモデル化については、文献24)～26)にあるような一般的な大型トラックに利用されているフレームを参考にした。このフレームは、一般的なはしご型フレームであり、部材断面などはみぞ型断面形状である。みぞ型断面は各種装置等を取り付けるのに容易であることなどから、大型トラックにしばしば用いられ

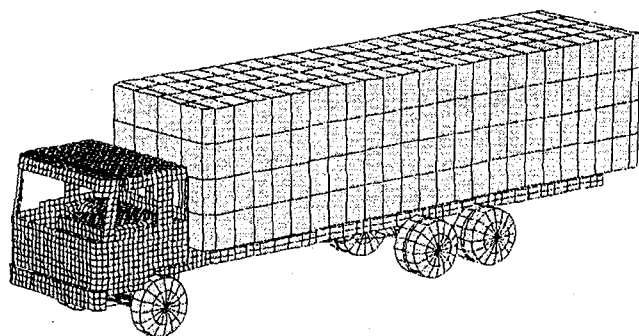


図-5 トラックモデル

表-4 トラックモデル諸元

解析モデル名	TM
節点数	7224
要素数	6327
ヤング率E(GPa)	206
ポアソン比 ν	0.3
せん断係数G _s (GPa)	15.85
最小メッシュサイズ ^a (mm)	100 × 100
モデル重量(tf)	25.0

ている。ただし、開断面であるためねじり剛性が小さくなるため、それを補う意味でクロスメンバーを用いて剛性を高めている。解析においては、フレームの板厚8mmより、降伏点応力を295Mpaとした²⁷⁾。

(3) その他の部分のモデル化

モデル化はフレーム、エンジン部とキャブ、エンジン、荷室、バンパーの大きめに6つのパーツに分けてモデル化を行った。エンジン、荷台については、衝突時、重量の慣性のみ影響することからその大まかな重量を再現するようなsolid要素をフレームにtied interfaceで剛結した。また、キャブについては、カタログ²⁸⁾の外寸を利用して、shell要素を用いてモデル化した。キャブの板厚については、文献26)よりここでは2.3mmとしている。

(4) 解析モデルの概要

有限要素モデルを図-5に、諸元を表-4に示す。鋼の構成則については、von Misesの降伏条件に従った等方弾塑性体を用い、鋼の応力-ひずみ関係についてはひずみ速度効果を考慮していない完全弾塑性体を基本としたが、ひずみ速度効果依存性を考慮したものも行った。また、橋脚との接触条件は乗用車モデルと同様である。

4. 解析結果の処理

4.1 ひずみ速度効果

一般に衝突現象においては、鋼材の力学特性にひずみ速度効果の影響が現れる²⁸⁾。具体的には、ひずみ速度の増加によって降伏応力の増加が見られる。本研究では、文献20)に述べられている降伏応力のスケールアップ関係

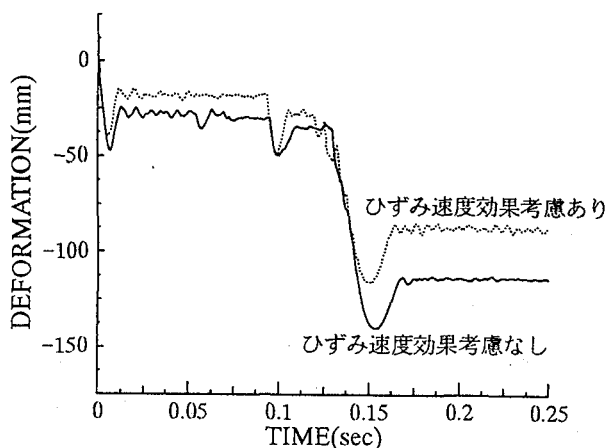


図-6 ひずみ速度依存性の考慮の有無による比較

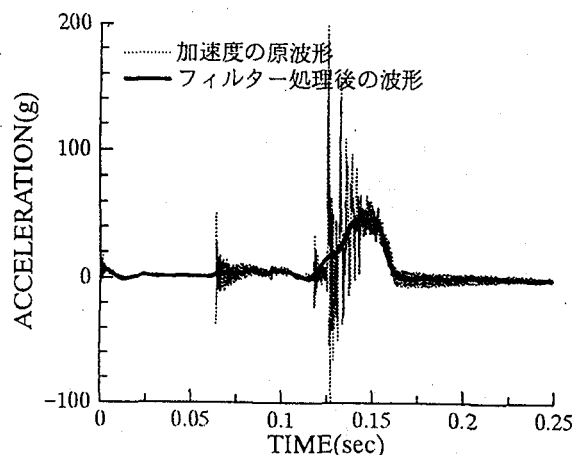


図-7 波形処理結果

を用い、ひずみ速度依存性の考慮の有無について比較を行った。解析結果を図-6に橋脚の最大変形点の応答変形量の比較を示す。なお、この解析結果は円形断面鋼製橋脚にトラックモデルが衝突速度50km/hで衝突した場合のひずみ速度依存性の考慮の有無を比較したものである。

解析結果では、ひずみ速度依存性を考慮した時の方が最大応答変形量は約15%、残留応答変形量は約25%、また、応答時間も最大で約20%の減少が見られた。また、この時のひずみ速度は局部的ではあるが最大でおよそ50/secを示した。このことは、ひずみ速度効果により降伏応力の増加が認められ、応答変形量が小さくなったことが分かる。本研究の以後の計算においては、変形の絶対量は多少異なるが傾向は変わらないことおよび安全側評価になることなどから、鋼材のひずみ速度依存性を考慮しないこととした。

4.2 アワグラスエネルギーについて

本研究の一連の解析では、衝突前後においてモデル全体のエネルギー保存則が完全には成立していない。これは、モデルに発生するアワグラスモードによるアワグラスエネルギーが全体のエネルギーの約10%程度発生しているためである。アワグラスモードとは、ソリッドやシェル積分要素において砂時計形の変形を示すような数値不安定現象が生じることであり、要素の変形モードによっては剛性がゼロとなってしまうために生じるゼロエネルギーモードでもある。

本研究の解析では、①アワグラス粘性の種類を大きくする、②アワグラス粘性係数を変更する、③要素タイプを多点積分点数要素に変更する、といったアワグラス制御を行い、比較、検討を行った。結果としては、①および②ではほとんどアワグラスエネルギーをはじめとする諸エネルギー値に変化は見られなかった。③の要素タイプ変更による制御において、デフォルトの積分点数からsolid要素を8点積分(デフォルトは1点積分)、shell要素を4点Gauss積分要素(デフォルトは2点積分)にそれぞれ

変更した場合は、アワグラスエネルギーの減少は多少見られたが、そのかわりにスライドインターフェイスエネルギーの増加およびわずかながらであるが橋脚の吸収エネルギーが減少する結果となった。

本研究においては、アワグラスモードが橋脚モデルにおけるメッシュサイズの比較的大きい橋脚上部で生じており、この発生位置は車両の衝突位置ではない点、また、衝突前後のエネルギーの各モデルに対する伝達割合に着目している点などから、これ以上の要素分割を細くしなかった。このアワグラスエネルギーの制御については、モデル化等も含め今後の課題である。

4.3 波形の処理方法

一般に、衝撃の応力波による局所的な破壊が問題とならないような衝撃問題を扱う場合、加速度や荷重などの波形から高周波成分を取り除くことが必要となる。特に、解析結果においては、実際の現象では発生しないような高次の振動を含み、また、鋼材どうしの衝突においては、波形に現れた高周波成分の値には変形などの挙動は追従しない(図-13(a)参照)ことから、ローパスフィルターにより高周波成分を取り除くこととした。ここでは、文献20)と同様にローパスフィルターの値を60Hzに決定して波形処理を行い、衝突時の衝撃の大きさを検討した。図-7に波形処理前後の時間-加速度関係を示す。なお、この解析結果は衝突速度50km/hのトラックモデルが円形断面鋼製橋脚へ衝突した時の解析結果であり、図中の実線は波形処理後、また、点線は波形処理前のそれぞれ加速度応答を示している。また、縦軸の加速度は重力加速度gの倍数で表している。

5. 乗用車モデルの橋脚への衝突解析

5.1 解析内容

解析では乗用車モデルを衝突速度100km/hで円形断面鋼製橋脚に衝突させる。衝突角度は衝突時に最も危険となる90°(正面衝突)とした。

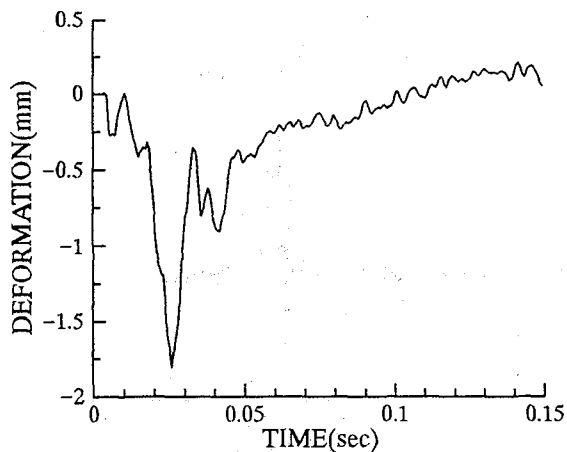


図-8 乗用車衝突の時間-応答変形量関係

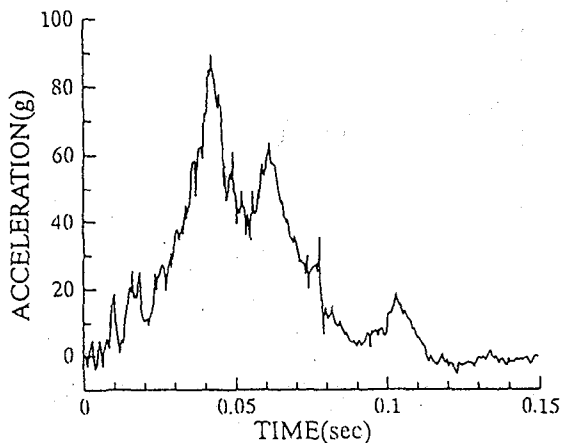


図-10 乗用車衝突の時間-加速度関係

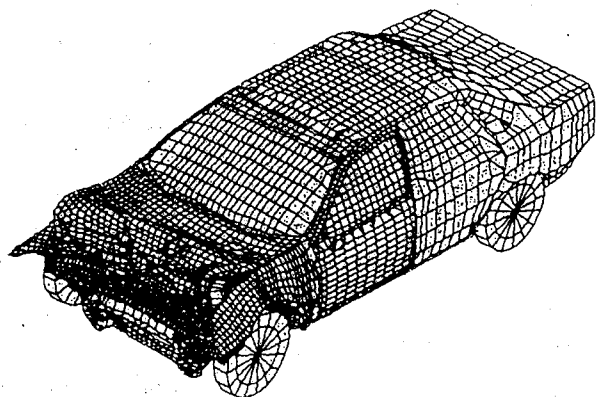


図-9 乗用車の変形

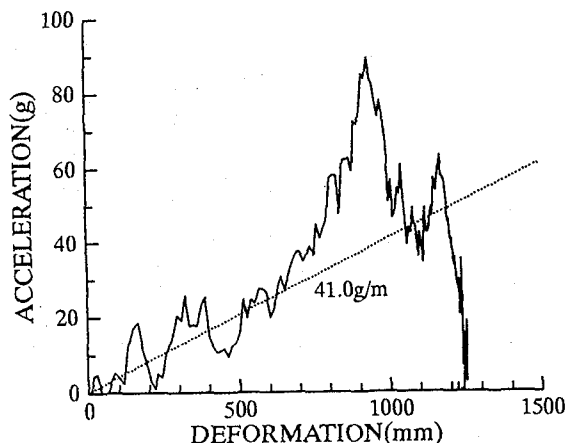


図-11 変形量-加速度関係(乗用車モデル衝突)

5.2 解析結果

(1) 円形断面鋼製橋脚モデルの衝突時の挙動

乗用車モデルが衝突速度100km/hでコンクリート非充填の円形断面鋼製橋脚に衝突し、最大応答変形を示した節点での時間-変形量関係を図-8に示す。図-8より、橋脚の最大応答変形量は1.8mmで残留応答変形量はほとんど見られない。これは、衝突時のエネルギーは車両の塑性変形によってほとんどが吸収されてしまい、橋脚には衝突による影響がほとんどないことを示している。また、コンクリートが非充填の場合でこの程度の応答変形量であることから、コンクリート充填鋼製橋脚においてはほとんど応答変形量は見られないと推定されるので、コンクリート充填鋼製橋脚に対する乗用車モデルを用いた解析は行わなかった。

(2) 乗用車モデルの衝突時の挙動

乗用車モデルの衝突時における変形の様子を図-9に示し、また、車両最後部での時間-加速度関係を図-10に示す。図-10からは、加速度応答波形には高周波成分がのっているものの、ピーク加速度は約80g、また、衝撃継続時間は約100msecであり、このことから推定される衝撃力は、およそ100tf程度である。ここで、乗用車の剛体壁衝突実験結果^{11,12)}と比較し、車体のクラッシュストロークと加速度の関係を示したものが図-11である。

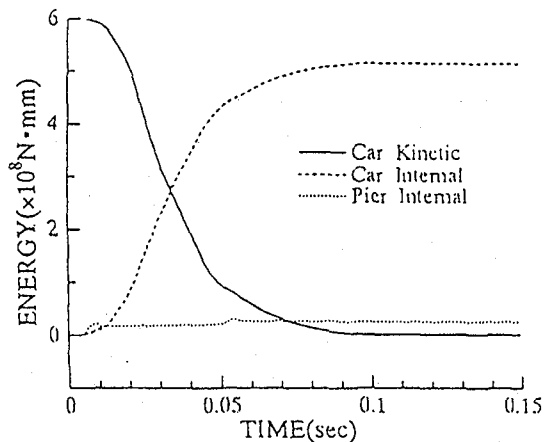


図-12 エネルギー伝達(乗用車モデル衝突)

図中の点線は実車実験結果から得られた衝突車両の塑性ばね定数である。この塑性ばね定数は文献4)によると車体の車種、衝突速度に関わらずほぼ約41.0g(単位mあたり)という値が得られており、本研究の解析結果も、おおむね実車実験と同じ結果が得られたといえる。

(3) エネルギーの評価

衝突前後の運動エネルギーと内部(ひずみ)エネルギー

の伝達の様子を図-12に示す。実線は乗用車モデルの運動エネルギーの変化、点線は橋脚が吸収する内部エネルギーの変化、そして、破線は乗用車モデルの内部エネルギーの変化を示す。図-12から、はじめ車両が持っていた運動エネルギーは、衝突によって車両と橋脚のそれぞれの内部エネルギーに変化していく様子が分かり、衝突後、橋脚の内部エネルギーの約24倍が車両側の内部エネルギーに変化した。また、衝突の時の橋脚が吸収するエネルギーは、車両の持っていた運動エネルギーの約3.4%程度にすぎないことが分かった。このことから、重量の小さい車両は車体構造のクラッシュが大きいために衝突時に車両本体の吸収するエネルギーが大きく、反対に、構造物への影響は大きくないことが分かる。

6. トラックモデルの橋脚への衝突解析

6.1 解析内容

トラック衝突による橋脚の挙動やエネルギーの変化を考えるために、本研究では表-5に示す解析を行った。表中の解析名は(橋脚モデル)-(衝突車両モデル)-(衝突速度)-(衝突角度)を示している。解析ではトラックモデルを用いて衝突速度50km/hおよび100km/hで各橋脚モデル(SP, CP, SB, CB)に衝突させた。衝突速度については、一般的に車両が衝突する場合は走行速度の約80%で衝突することが統計的に報告されており²⁷⁾、50km/hについては高速道路橋脚が設置されている道路の最高速度を60km/hと考え、また、100km/hについては、それ以上の衝突速度は現実的でないことからこのように決定した。また、車両の衝突角度は90°と40°の2種類について行った。90°は最も危険側となる真正面から衝突する場合を想定し、40°は防護柵などで想定する最大衝突斜角である²⁷⁾。

6.2 円形断面鋼製橋脚への衝突解析結果

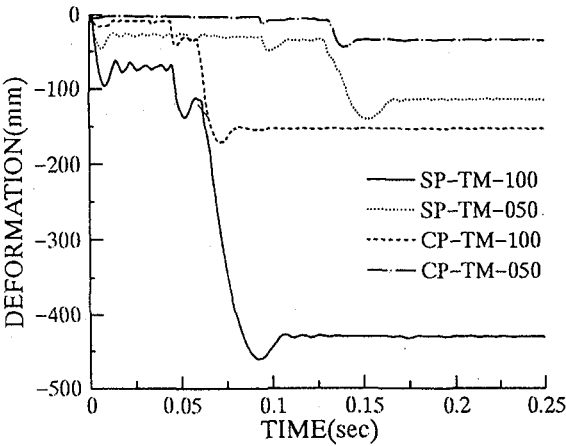
(1) 橋脚の変形挙動

円形断面鋼製橋脚にトラックモデルが衝突速度50km/hおよび100km/hで衝突した時の最大応答変形を示した節点での時間-変形関係を図-13(a)に示し、変形モードの代表例として衝突速度50km/hでの鋼製橋脚の変形モードを図-13(b)に、トラックの変形モードを図-13(c)に示す。図中の実線は衝突速度100km/hでの鋼製橋脚への衝突解析結果、点線は衝突速度50km/hでの鋼製橋脚への衝突解析結果を示しており、また、破線は衝突速度100km/hのコンクリート充填鋼製橋脚への衝突解析結果、そして、一点鎖線は衝突速度50km/hのコンクリート充填鋼製橋脚への衝突解析結果を示す。また、図-13(a)より得られる橋脚の最大応答変形量および残留応答変形量を図-13(d)に示す。

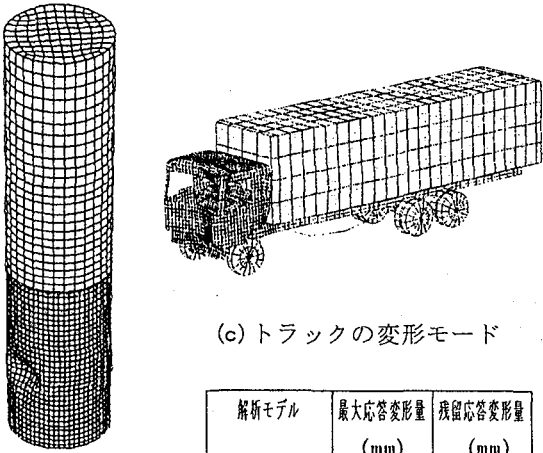
図-13(a)および(d)より、コンクリート充填による残留応答変形量の抑制効果は、衝突速度50km/hにおいては約78%、100km/hにおいては約74%になった。また、最大応答変形量から残留応答変形量へのスプリングバックの

表-5 トラックモデルの衝突解析種類

解析名	橋脚モデル	衝突速度 (km/h)	衝突角度 (°)
SP-TM-050	SP	50	90
SP-TM-100	SP	100	90
CP-TM-050	CP	50	90
CP-TM-100	CP	100	90
SB-TM-050	SB	50	90
CB-TM-050	CB	50	90
SP-TM-050-40	SP	50	40
CP-TM-050-40	CP	50	40



(a) 時間-応答変形量関係



(c) トラックの変形モード

(b) 鋼製橋脚の変形モード

解析モデル	最大応答変形量 (mm)	残留応答変形量 (mm)
SP-TM-050	171	152
SP-TM-100	461	430
CP-TM-050	45	34
CP-TM-100	140	114

(d) 橋脚の応答変形量

図-13 円形断面鋼製橋脚の変形

割合は、コンクリートを充填したときの方がそれぞれ約10%程度大きくなった。これらのことは、コンクリート充填によって橋脚の局所変形量を大きく減少させるができ、コンクリート充填の効果が現れていることが分かる。一方、橋脚上端部の挙動は、境界条件は自由端である

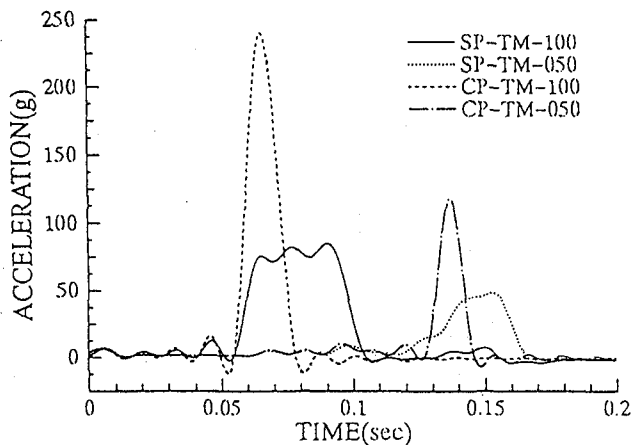


図-14 時間-加速度関係(円形断面鋼製橋脚)

表-6 加速度ピーク値と衝撃継続時間
(円形断面鋼製橋脚)

解析モデル	加速度ピーク値 (g)	衝撃継続時間 (msec)
SP-TM-050	48	47
SP-TM-100	84	51
CP-TM-050	117	19
CP-TM-100	240	24

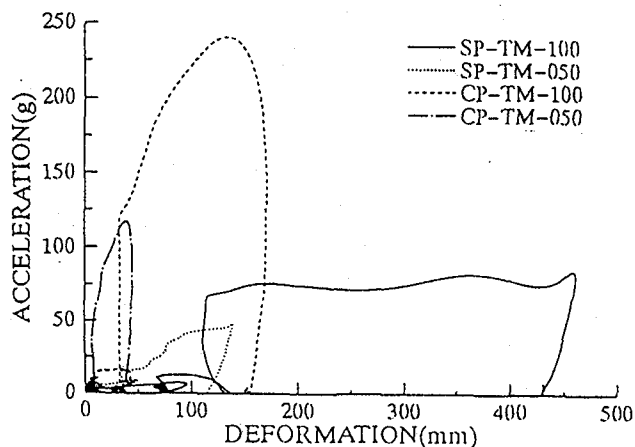
が、橋脚の載荷上部荷重が衝突車両重量よりもかなり大きいこと(約71:1)から、応答変形は衝突位置付近の局部的な変形にとどまり、柱としての全体的な変形モードは見られなかった。

衝突速度50km/hのトラックモデルが円形断面鋼製橋脚に対し衝突角度40°で衝突した場合、トラックは橋脚に接触した後、車両進行方向が変化するため、橋脚本体に与える衝撃の影響は小さくなった。また、衝突後の速度も90°の衝突前後速度比(衝突後の速度/衝突前の速度)が0.805であるのに対し、斜め衝突の場合は0.303と衝突後も速度は約15km/hのみの減少にとどまった。このように、斜め衝突においては橋脚に与えるエネルギーや橋脚の応答変形量は90°の衝突の時よりも小さくなり、正面衝突を考える場合が橋脚側に最も危険になることが分かった。

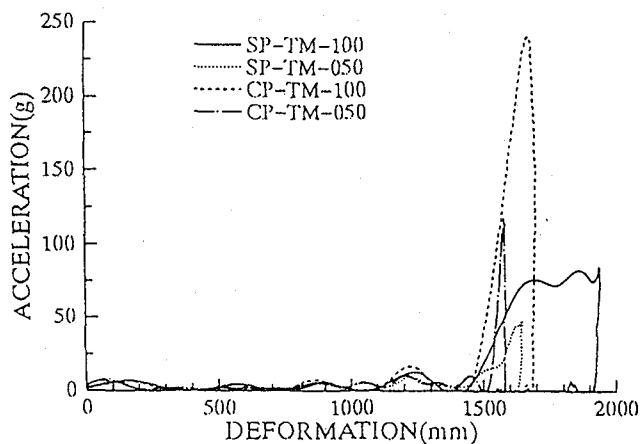
(2) 衝撃力の大きさ

円形断面鋼製橋脚への衝突速度50km/hおよび100km/hの衝突時の時間-加速度関係を図-14に示す。なお、図中の線種については図-13(a)と同様である。また、表-6に発生した加速度ピーク値と衝撃継続時間を示す。

コンクリート充填の有無において加速度ピーク値および衝撃継続時間に違いが見られた。加速度ピーク値ではコンクリート充填橋脚の場合、非充填の鋼製橋脚よりも約2.5倍大きくなった。また、衝撃継続時間では約40%短くなった。これは、コンクリートを充填することによって橋脚本体の剛度が大きくなり、衝突体であるトラックモデルの破損が大きくなるためであると考えられる。



(a) 橋脚の最大変形点の応答



(b) トラックのクラッシュストローク応答

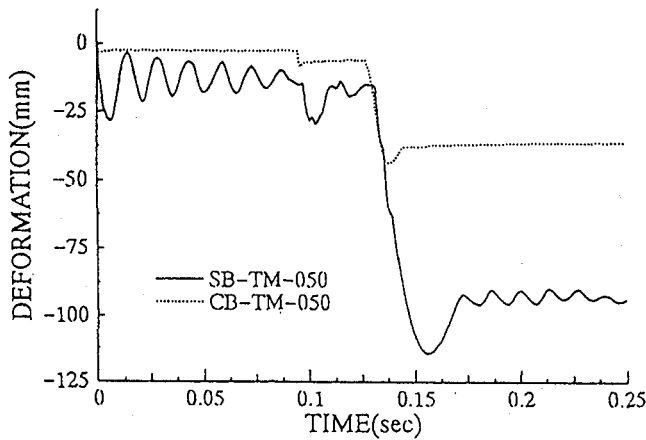
図-15 変形量-加速度関係(円形断面鋼製橋脚)

表-7 エネルギー吸収能(円形断面鋼製橋脚)

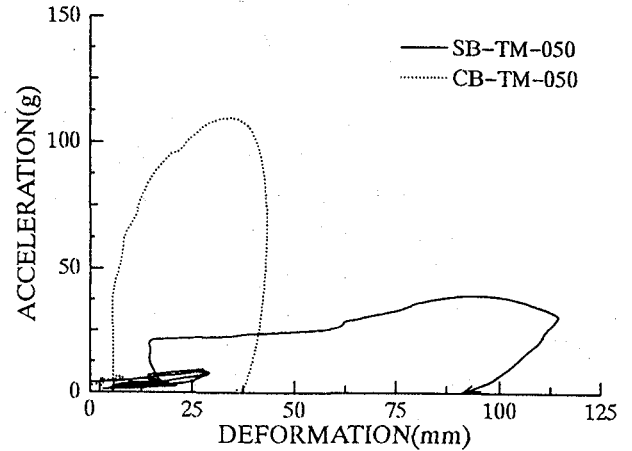
	橋脚の変形量 との関係		トラックの変形量 との関係	
衝突速度(km/h)	50	100	50	100
鋼製橋脚	1	8.02	3.04	10.83
コンクリート充填鋼製橋脚	1.03	8.44	3.11	10.20

(3) 変形と衝撃の大きさとの関係

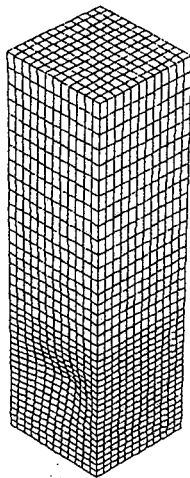
ここでは、トラックの変形量および橋脚の変形量と衝撃の大きさとの関係を示す。衝撃の大きさは変形しないトラックの荷台後端の加速度履歴を用いて示している。図-15(a)に円形断面鋼製橋脚の最大応答変形量を示した節点での変形量-加速度関係を示し、図-15(b)にトラックのクラッシュストローク(相対変形量)とその加速度の関係を示す。なお、図中の線種については図-13(a)と同様である。また、図-15の変形量と加速度に囲まれた面積(エネルギー吸収能)を求めて、衝突速度50km/hにおける鋼製橋脚に衝突した時のエネルギー吸収能を1とした、各衝突速度に対する相対比を表-7に示す。



(a) 時間-応答変形量関係



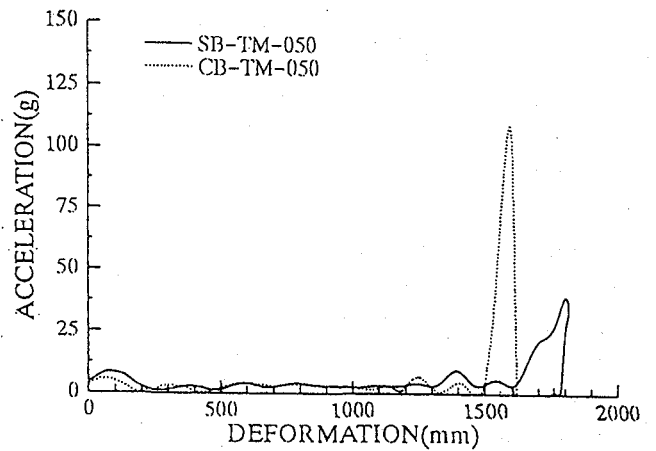
(a) 橋脚の最大変形点の応答



(b) 変形モード

解析モデル	最大応答変形量 (mm)	残留応答変形量 (mm)
SB-TM-050	115	92
CB-TM-050	43	36

(c) 橋脚の応答変形量



(b) トラックのクラッシュストローク応答

図-18 変形量-加速度関係 (矩形断面鋼製橋脚)

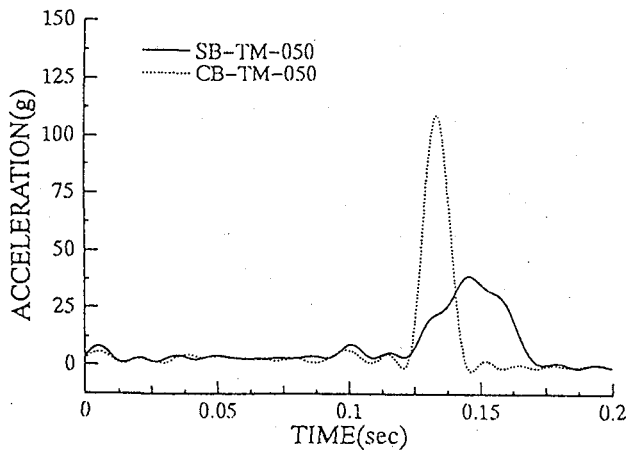


図-17 時間-加速度関係 (矩形断面鋼製橋脚)

表-8 加速度ピーク値と衝撃継続時間
(矩形断面鋼製橋脚)

解析モデル	加速度ピーク値 (g)	衝撃継続時間 (msec)
SB-TM-050	39	50
CB-TM-050	110	24

表-9 エネルギー吸収能 (矩形断面鋼製橋脚)

	橋脚の変形量 との関係	トラックの変形量 との関係
衝突速度 (km/h)	50	50
鋼製橋脚	1	2.58
コンクリート充填鋼製橋脚	1.24	3.45

6.3 矩形断面鋼製橋脚への衝突解析結果

(1) 橋脚の変形挙動

トラックモデルが衝突速度50km/hで衝突した時の矩形断面鋼製橋脚の最大応答変形を示した節点での橋脚の時間-変形量関係を図-16(a)に示し、橋脚の変形モードの一例を図-16(b)に示す。図中の実線は鋼製橋脚への、また、点線はコンクリート充填鋼製橋脚への衝突解析結果である。また、橋脚の最大応答変形量および残留応答変形量を図-16(c)に示す。

解析結果では、コンクリート充填によって残留応答変形量は約60%抑制され、円形断面鋼製橋脚と同様にコンクリート充填による効果が現れていることが分かる。また、変形モードは、縦リブの影響は小さく、ダイヤフラ

ムより下部の板全体で変形する様子が分かる。一方、橋脚の上端部の挙動は、円形断面鋼製橋脚と同様に、境界条件が自由端であるが、載荷上部荷重が衝突車両重量よりもかなり大きいこと(約59:1)から、変形は衝突部の局部的な変形にとどまり、柱部材としての変形モードは見られなかった。また、円形断面鋼製橋脚の変形モードとの違いは、板パネル全体が変形しているため、局部変形を示した範囲は矩形断面鋼製橋脚の方が大きくなったことである。

(2) 衝撃力の大きさ

矩形断面鋼製橋脚にトラックモデルが衝突速度50km/hで衝突した時の時間-加速度関係を図-17に示す。また、表-8に発生した加速度のピーク値と衝撃継続時間を示す。なお、図中の線種については図-16(a)と同様である。加速度ピーク値および衝撃継続時間は、ほぼ円形断面鋼製橋脚と同じ傾向が見られた。円形断面鋼製橋脚とは同一条件で設計されたものでないため一概に比較はできないが、加速度ピーク値に限っては矩形断面鋼製橋脚への衝突時の方が小さくなった。これは、トラックの前面部と橋脚の衝突部面積が矩形断面鋼製橋脚の場合の方が大きく、衝突エネルギーを伝達する範囲が大きいためと考えられる。

(3) 変形と衝撃の大きさとの関係

矩形断面鋼製橋脚の最大応答変形量を示した節点での変形量-加速度関係を図-18(a)に示し、トラックのクラッシュストロークとその加速度の関係を図-18(b)に示す。なお、図中の線種については図-16(a)と同様である。また、円形断面鋼製橋脚と同様に、変形量と加速度に囲まれたエネルギー吸収能の算定結果を表-9に示す。解析結果からは、エネルギー吸収能はコンクリート充填鋼製橋脚の場合の方が鋼製橋脚に比べて橋脚およびトラックの両方ともにおいて約1.2~1.3倍上回った。

6.4 エネルギー伝達

円形断面鋼製橋脚にトラックモデルが衝突速度50km/h、衝突角度90°で衝突した時のエネルギー伝達時刻歴を図-19に示し、また、矩形断面鋼製橋脚における同様な関係を図-20に示す。また、衝突後のエネルギー比率を表-10に示す。ここではエネルギーの単位はN・mを用いている。なお、図-19、図-20中の実線はトラックの運動エネルギー、破線はトラックの内部エネルギー、点線は鋼製橋脚部の運動エネルギー、一点鎖線は鋼製橋脚部の内部エネルギー、二点鎖線はコンクリート部の内部エネルギーの時間変化をそれぞれ示している。

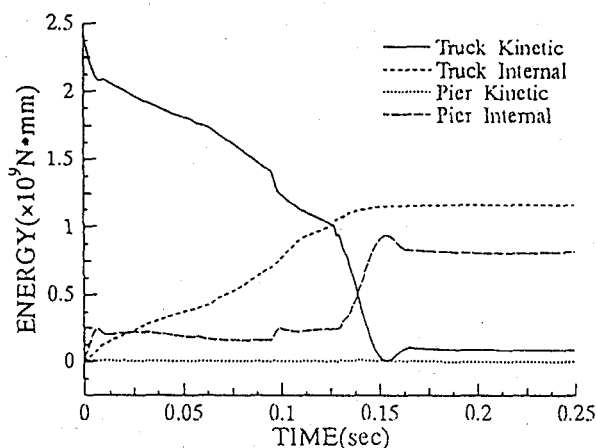
図-19、図-20では、コンクリート充填の有無あるいは衝突角度によってエネルギーの分担率が大きく異なることが分かる。また、コンクリートを充填した場合、鋼製橋脚に吸収されていたエネルギーがコンクリート部にも分担吸収され、同時に車体へのエネルギー吸収も大きくなる事が分かる。このように、衝突前後のエネルギー

吸収の観点から見ても、衝突時の衝撃エネルギーは鋼製橋脚のみで吸収している衝撃エネルギーをコンクリート充填によってコンクリート部が分担吸収するために、局部変形を抑制できると思われる。

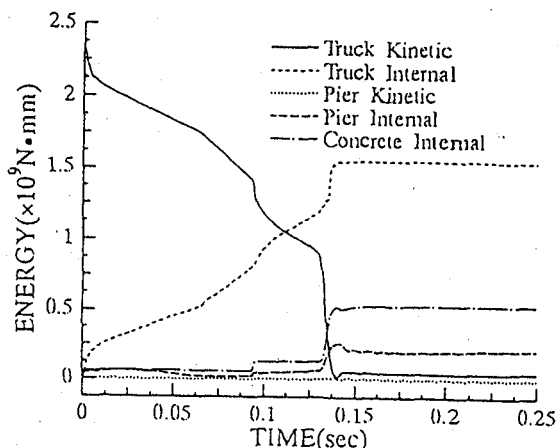
7. 結論

本研究では、トラックモデルおよび乗用車モデルを利用して、高速道路鋼製橋脚について衝突解析を行った。また、得られた結果より、衝突による応答変形量、残留応答変形量および衝撃の大きさ、衝突前後のエネルギー伝達などの検討を行った。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- ①鋼製橋脚およびコンクリート充填鋼製橋脚に車両が衝突した時の応答変形を定量的に評価することによって、橋脚基部へのコンクリート充填の有効性を応答変形量、残留変形量およびエネルギー吸収の観点から評価した。その結果、車両重量の大きいトラックのような車両が衝突する可能性がある鋼製橋脚の場合、コンクリート充填は必要不可欠であることを定量的に示した。
- ②車両重量の小さい乗用車のような車両衝突では、衝突時の橋脚の局部変形はほとんど見られず、むしろ車両の損傷によって車両の塑性エネルギーに変化し、構造物にはほとんど影響を与えないことを定量的に示した。
- ③橋脚に25tfトラックが衝突した場合、橋脚は衝突部において局部変形を示すが、部材の柱全体モードとしての応答変位は発生しないことを示した。
- ④円形断面鋼製橋脚における衝突時の変形モードと矩形断面鋼製橋脚の変形モードを比較すると、前者が局部変形範囲が狭い領域にとどまるのに対し、後者は板パネル全体で局部変形を示すことが分かった。ただし、コンクリート充填橋脚において同一衝突速度では、このような変形モードが異なっても、残留応答変形量は断面形状に関わらずほぼ同じであることが分かった。
- ⑤車両が構造物に斜めに衝突する場合は、衝突後も進行方向を変えて速度はほとんど減少しないため、構造物に与える衝撃エネルギーは正面衝突よりも小さく、よって構造物の衝突部に生じる局部変形も小さくなることが分かった。
- ⑥コンクリートを橋脚基部に部分充填することによって、鋼製部材のみで吸収していた衝撃エネルギーをコンクリート部分も分担吸収し、その結果、鋼製橋脚の局部変形を抑えることができることを示した。
- ⑦コンクリート充填鋼製橋脚の最大応答変形は、無充填鋼製橋脚の場合と比較して、約1/3.5と小さくなった。また、残留変形は約1/4.5となり、コンクリート充填の効果は最大応答変形より残留変形をより減少させることが分かった。このことは、車両衝突解析だけでなく、地震応答解析においても同様なことがいえることを同じ橋脚モデルを用いて示した。

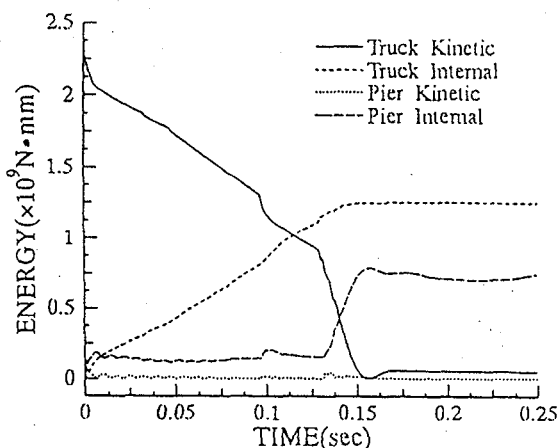


(a) 鋼製橋脚 (SP-TM-050)

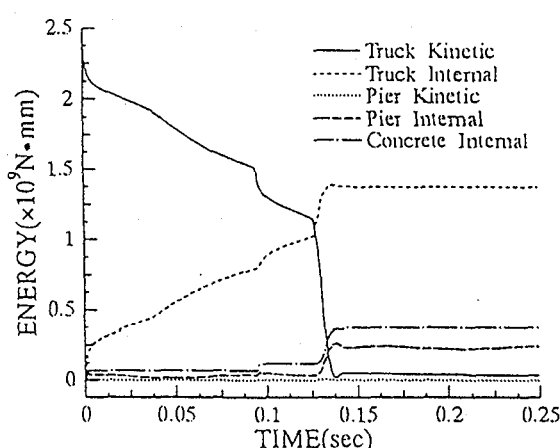


(b) コンクリート充填鋼製橋脚 (CP-TM-050)

図-19 エネルギー伝達(円形断面鋼製橋脚)



(a) 鋼製橋脚 (SB-TM-050)



(b) コンクリート充填鋼製橋脚 (CB-TM-050)

図-20 エネルギー伝達(矩形断面鋼製橋脚)

表-10 衝突後のエネルギー分担率 (%)

解析モデル	鋼製橋脚部 内部エネルギー	コンクリート部 内部エネルギー	トラック 内部エネルギー	トラック 運動エネルギー
SP-TM-050	40	----	56	4
CP-TM-050	9	23	66	2
SB-TM-050	35	----	61	4
CB-TM-050	11	19	68	2

謝辞

本研究において、トラックのモデル化については日野自動車工業株式会社技術研究所の榎本英彦氏にお世話になった。また、設計計算書および衝突事例の提供などに名古屋都市高速道路公社と首都高速道路公団にお世話になり、土木研究所からは種々の資料の提供を受けた。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 式田昌弘, 金山幸雄: 自動車の強度, 山海堂, 平成1年10月。
- 2) Kamal, M.M. and Wolf, Jr. J.A.: Modern Automotive

Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 316-355, 1982.

- 3) 自動車工学全集編集委員会: 自動車工学全集16 自動車の安全, S. 55.
- 4) 江守一郎: 自動車事故工学 新版, 技術書院, 1993.
- 5) 阪神高速道路公団: コンクリート高欄破壊実験報告書, 昭和46年12月。
- 6) 阪神高速道路公団: プレキャスト高欄の衝撃破壊実験業務報告書, 昭和62年3月。
- 7) Wekezer, J.W., Oskard, M.S., Logan, R.W., and Zywiec, E.: Vehicle Impact Simulation, Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No. 4, pp. 598-617, 1993.
- 8) 堀内憲治, 小松信夫: 円形構造物の変状に伴う応力解析, 技報第12号, pp. 228-232, 1980.
- 9) 小林一隆, 奥田将樹, 石川信隆, 比留間豊: 緩衝型コンクリート製プレキャストガードフェンスの模型実験に対する衝撃応答解析, 構造工学論文集Vol. 40A, pp. 1531-1542, 1994年3月。
- 10) 小林一隆, 奥田将樹, 石川信隆, 太田俊昭: 土中型プレキャストコンクリートガードフェンスの衝撃模型実験と衝撃応答解析, 土木学会論文集No. 549/I-37, pp. 175-189, 1996年10月。
- 11) 江守一郎: 模型実験の理論と応用 第2版, 技術堂出版, 1988.
- 12) 宮本文穂, KING M.W., 榎井弘樹: 構造物に作用する

- 衝撃力特性のモデル化に関する基礎的研究, 構造工学論文集Vol. 37A, pp. 1555-1566, 1991年3月.
- 13) 宮本文穂, KING M. W., 石橋照久: 多質点ばねモデルに衝撃力特性の再現と設計衝撃力の検討, 構造工学論文集Vol. 38A, pp. 1515-1528, 1992年3月.
- 14) 日本総合研究所: LS-DYNA3D使用の手引き, 1995. 6.
- 15) 日本総合研究所: LS-DYNA3D Ver. 930 USER'S MANUAL, 1994. 10.
- 16) Hallquist, J. O.: LS-DYNA3D Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1991. 6.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, 1992.
- 18) 名古屋都市高速道路公社: 市道高速2号荻野工区上部工事P65橋脚設計計算書, 構造一般図, 昭和60年10月.
- 19) 名古屋都市高速道路公社: 市道高速分岐3号正木工区鋼脚工事P11橋脚設計計算書, 昭和60年10月.
- 20) 伊藤義人, 笹田俊治, 大野 隆: 非線形衝撃応答解析を用いたひずみ速度効果に関する研究, 鋼構造論文集, 第3巻第11号, pp. 47-58, 1996年9月.
- 21) 中井 博, 北田俊行, 河井章好, 酒造敏廣, 吉川 紀: 鋼製ラーメンの橋脚の実績調査(上)(下), 橋梁と基礎82-6, 82-7, pp. 35-40, pp. 43-49.
- 22) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のため新技術, 平成8年7月.
- 23) Zaouk, A. K., Bedewi, N. E., Kan, C., and Schinke, H.: Evaluation of a Multipurpose Pick-up Truck Model Using Full Scale Crush Data with Application to Highway Barrier Impacts, 29th International Symposium on Automotive Technology Automation, Florence, Italy, June 1996.
- 24) 竹田信之: 大型トラックの設計, 山海堂, 平成4年9月.
- 25) 日野自動車工業株式会社: トラックカタログ.
- 26) 川井政男: 自動車工学全書14 トラック, バスの車体構造, 山海堂, 昭和55年2月.
- 27) 日本規格協会: 日本工業規格 自動車構造用熱間圧延鋼板及び鋼帯 JIS G 3113, 平成2年7月.
- 28) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ6, 1993. 12.

(1997年9月26日受付)