

衝撃工学の最前線

5. 土木建築における最近の衝撃問題について†

梶谷 浩* 藤掛 一典**

The Front Line of Impact Engineering V : Recent Impact Problems in Civil Engineering

by

Hiroshi MASUYA* and Kazunori FUJIKAKE**

Key words : Impact loading, Performance-based impact resistance design, Rockfall protection

1 緒 言

我が国の国土の約70%は山地であり、急峻な山も多く、豪雨や地震等の発生も影響して落石や岩盤崩落が発生し易い状況にある。例えば、1989年7月に福井県越前町の国道305号線で発生した落石事故では17名もの犠牲者をだしている。また、1996年2月に国道229号線の豊浜トンネル坑口付近で発生した岩盤崩壊事故では20名の尊い命が犠牲になっている。

我々の現代社会は高度に発達したものの、自然災害に対しては、非常にぜい弱な面をもっていることは否めない。2005年8月末に米国南東部を襲ったハリケーンカトリーナは死者・行方不明者2000名以上、被害総額約1000億ドルという甚大な被害を及ぼしている。我が国においても異常気象に起因して発生したと思われる竜巻等の突風により列車の脱線・転覆や家屋の倒壊、飛来物により死者・負傷者をだすなど被害規模が増加している。

さらに、2001年9月11日の米国における同時多発テロでは2機の旅客機が世界貿易センタービルに激突し2,700名以上の犠牲者を出す大惨事となったことは記憶に新しい。

このように、近年、大規模な自然災害や事故の増加、あるいはテロの頻発により、社会の安全・安心は極めて脅かされているのが現状である。大規模な自然災害や事故、あるいはテロに起因して、社会基盤としての土木・建築構造物には衝撃荷重が作用する。こうしたことから人命や財産を守り安全・安心な社会を構築するためには、衝撃荷重を受ける構造物の安全性を合理的に検討するための耐衝撃設計法を確立することが強く望まれている。^{1)~3)}

そこで本講座では、土木建築工学分野における衝撃問題について概説するとともに、最近、注目されている性能照査型耐衝撃設計法について説明し、その確立に向けた著者らの研究を主としたいくつかの取り組みを紹介する。

2 土木建築工学分野における衝撃問題

国際標準化機構 (International Organization for Standardization, ISO2041) によると衝撃現象とは、ある物体の他の物体への衝突、あるいは系に瞬間的な乱れを生じさせる力、位置、速度あるいは加速度の突然の変化と定義されている。⁴⁾物理学では、極めて短時間に物体衝突などによりエネルギーの授受が行われ、慣性力や材料特性が構造物の挙動を複雑にする現象、瞬時に運動量が変化する現象、急激な負荷が作用し系全体の運動変化が生じる前に負荷が終了する現象のように説明される場合が多い。

土木や建築構造物の設計に際して考慮すべき衝撃荷重は、表1に示すように人為的要因あるいは自然的要因に起因して発生する。¹⁾人為的要因によって生じる衝撃現象としては、橋桁や橋脚への車両や船舶の衝突(写真1⁵⁾や写真2⁶⁾、高層建築物への航空機の衝突(写真3⁷⁾、重化学工業プラントにおける爆発事故(写真4⁸⁾、また最近では爆破テロなども挙げられる。一方、自然的要因によって生じる衝撃現象としては、落石防護構造物への落石の衝突(写真5)、砂防ダムへの土石流の衝突等が挙げられる。このように事故や災害によって発生する土木建築分野で対象とする衝撃現象の中には、発生確率は小さいものの一度発生すると甚大な被害を及ぼすことが懸念されるものが多い。

表2に土木建築工学分野の衝撃外乱の事象ならびに載荷速度とそれによって被衝突体である構造物中の構成材料(コンクリートや鉄筋など)に生じるひずみ速度を概略関連付けたものを示す。この表から、土木・建築分野において対象となる衝撃問題に対応するひずみ速度は概ね $10^{-1} \sim 10^2$ (1/sec) 程度の範囲にあることがわかる。このような大きなひずみ速度がコンクリートや鉄筋に作用するとそれらの力学的特性は静的載荷で得られた特性とは異なる、いわゆるひずみ速度効果が生じることになる。^{9)~12)}

† 原稿受理 平成22年10月18日 Received Oct. 18, 2010 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 金沢大学環境デザイン学系 〒920-1192 金沢市角間町, Fac. of Environ. Des., Kanazawa Univ., Kakumamachi, Kanazawa, 920-1192

** 正会員 防衛大学校建設環境工学科 〒239-8686 横須賀市走水, Dept. of Civ. & Environ. Eng., Nat. Def. Acad., Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686

表1 土木建築分野における衝撃問題の分類

	衝撃外乱 (衝突体)	対象構造物 (被衝突体)		衝撃 の 種類	衝突体		被衝突体	衝撃 の 区分	発生 の 頻度
					柔/剛	速度の オーダー			
自然的	土石流	砂防ダム		繰返し	柔	10^1 m/s	剛	ソフト	大
	落石, 流木, 雪崩	覆道, トンネル 道路, 橋脚	緩衝材有り 緩衝材無し	繰返し	剛	10^1 m/s	柔 剛	ソフト ハード	大
	波浪, 氷塊	防波堤, 港湾施設, 海岸・海洋構造物		繰返し	柔	10^0 m/s	剛	ソフト	中
	地震動	建物		繰返し		10^0 m/s	柔/剛	ソフト	中
	竜巻	構造物, 建物		単一		10^1 m/s	柔/剛	ソフト	小
人為的	危険物の爆発 (石油, LNG, 火薬, ガス類)	工場, 倉庫建物		単一	柔	10^3 m/s	柔/剛	ソフト	小
	重量物の落下	工場, 倉庫の床		単一	剛	10^0 m/s	剛	ハード	中
	車両の衝突	車両, 道路橋橋脚, 高欄		単一	柔	10^1 m/s	柔	ソフト	大
	船舶の衝突	船舶, 橋脚, 海岸・海洋構造物		単一	柔	10^0 m/s	柔/剛	ソフト	中
	航空機の墜落	原子力関連施設ほか重要構造物		単一	柔	10^2 m/s	剛	ソフト	極小
	タービンサイルの衝突	原子炉建屋		単一	剛	10^2 m/s	剛	ハード	極小
キャスクの落下	道路		単一	剛	10^0 m/s	剛	ハード	小	



写真1 大型車両の衝突により崩壊した橋梁

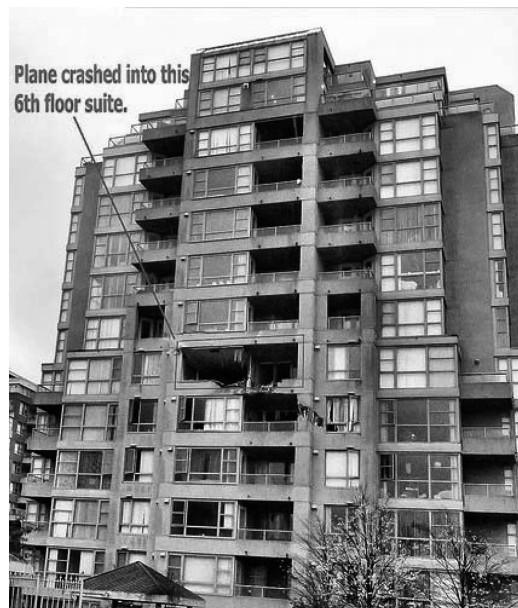
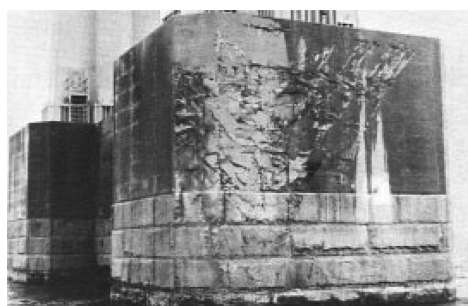


写真3 小型航空機が衝突した建物 (カナダ)



(a) 船の受けた損傷



(b) 橋脚基礎の受けた損傷

写真2 船舶の衝突を受けた橋脚基礎の損傷 (米国)



写真4 化学プラントの爆発事故で崩壊した建物



写真5 落石により破壊したロックシェッド (石川県)

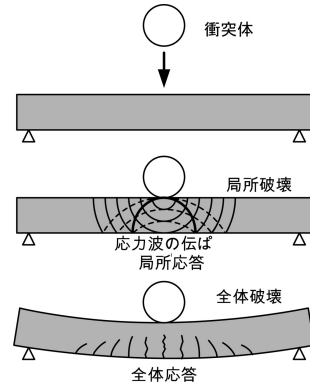


図1 衝撃荷重を受ける部材の応答

衝突体と被衝突体である構造物の衝突によって発生する衝撃荷重は、それらの質量、形状、大きさ、速度、剛性、材料のひずみ速度効果等によって大きく異なるのに対して、爆発荷重は発生源（爆薬量と離隔距離）によって一義的に決まる特徴を有している。¹³⁾ 衝撃荷重を受ける構造物の応答は、図1に示すように動的効果を伴った概ね二つの応答からなると考えられている。一つは衝撃荷重作用直後の比較的短時間内に荷点近傍で起こる応力波の伝ばに関係した局所応答であり、もう一つは比較的長時間に渡る部材全体の弾塑性応答に関係した全体応答である。¹⁴⁾ 局所応答では図2のような表面破壊、貫入、裏面はく離、貫通等の局所的な破壊が問題にされるのに対して、全体応答では曲げ破壊やせん断破壊のような部材全体に渡る破壊が問題になる。¹³⁾

3 性能照査型設計法とは

性能照査型設計法とは、想定される外乱に対して構造物に要求される性能を明示し、設計された構造物が要求性能さえ満足していれば、どのような構造形式、構造材料、設計手法、工法を用いても良いとする設計法である。このような考え方は、1995年にSEAOC（カリフォルニア技術者協会）から出されたVision2000の中で提案され

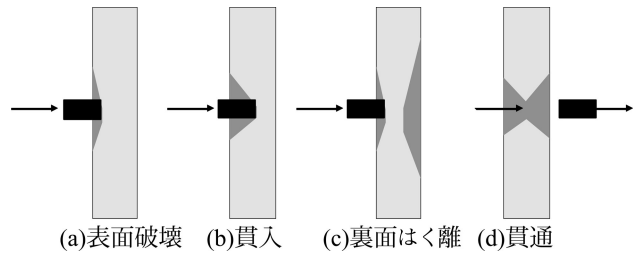


図2 局部破壊の区分

たのが始まりとされる。¹⁵⁾

Vision2000では、構造物の重要度を考慮して想定される地震動レベル毎に構造物に要求される耐震性能を、表3に示す性能マトリクスという形で表わしている。ここで、性能マトリクス中の想定地震動レベルは対象とする地域の地震の再現期間や発生確率により定義されており、要求性能は、構造物の機能性、供用性、安全性等から完全機能維持、機能維持、人命の保護、崩壊寸前の4段階で規定されている。構造物の重要度は、構造物が被災した場合の影響の大きさに応じて最重要構造物、重要構造物、一般構造物に分類している。この性能マトリクスが示すように、同じ地震動レベルでも構造物の重要度が異なれば、当然、構造物に要求される性能は異なる。

表2 衝撃現象と構成材料中に発生するひずみ速度の関係

載荷・衝突速度 (m/sec)	0	10 ⁰	10 ²	10 ³	10 ⁵										
衝撃現象 (衝撃外乱)		波浪・地震動 船舶の衝突 キャスク・重量物の落下 土石流・落石 車両の衝突 タービンミサイルの衝突 航空機の衝突			危険物の爆発 (油, LNG, 火薬, ガス)										
ひずみ速度 (1/sec)	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
試験法	油圧式急速載荷装置		重錘落下衝撃載荷装置		シャルピー試験装置		SHPB装置								

表3 Vision2000による耐震性能マトリクス

地震動レベル (再現期間)	耐震性能レベル			
	完全機能維持	機能維持	人命保護	崩壊寸前
しばしば (43年)	●			
時々 (72年)	■	●		
稀 (475年)	★	■	●	
非常に稀 (970年)		★	■	●

●：一般の構造物, ■：重要な構造物, ★：非常に重要な構造物

ISOによる国際規格が性能設計を標準として採用したために、2002年10月には国土交通省から「土木・建築にかかる設計の基本」が示され、性能照査型設計の概念に基づいた設計への移行が要望されている。¹⁶⁾

4 落石防護構造物に対する性能照査型耐衝撃設計法

土木学会構造工学委員会では、世界的な性能設計への移行の流れを踏まえて、2004年には構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する小委員会（委員長：榎谷 浩金沢大学教授³⁾を、2008年には構造物の耐衝撃性能評価研究小委員会（委員長：園田佳巨九州大学教授）を設置し、性能照査型の耐衝撃設計法の確立に向けた活動を行っている。

土木・建築構造物の設計で考慮すべき衝撃荷重には種々あることは既に前章で述べた。ここでは、特に我が国においては重要と考えられる落石防護構造物に対する性能照査型耐衝撃設計法について言及することにする。落石防護構造物とは、道路や鉄道において落石が問題となる区間に設置され、落石から道路や鉄道を防護するための構造物である。落石防護構造物にはロックシェッド、落石防護柵、落石防護柵、落石防護壁、落石防護網等がある。¹⁷⁾

4・1 落石防護構造物における要求性能

性能照査型の耐震設計では、想定される地震動レベルごとに要求性能が設定されているように、落石を受ける落石防護構造物の要求性能を考えるためには、まずは想定される落石レベルを決定する必要がある。表4に落石レベルの一例を示す。ここでは、落石の発生頻度により3つの落石レベルを設定している。

また、落石防護構造物に求められる性能としては、人命の保護はもちろんであるが損傷、供用および補修の程度から、例えば表5に示すような性能規定が考えられる。ここでは要求性能を4つのレベルに分類した。これらの分類の妥当性については、今後検討すべき課題であると考えられるが、このような損傷程度に応じた分類は性能設計を行う上で必要なものである。

これらの落石荷重のレベルと防護構造物の要求性能レベルに従えば、構造物の重要度を考慮して表6に示すように性能マトリクスが設定できる。

各種落石防護構造物と対応可能な落石エネルギーの概略の範囲を図3に示す。¹⁷⁾ロックシェッドは比較的広範な落石エネルギーレベルに対応できるのに対して、落石防

表4 落石荷重のレベル設定例

落石レベル	確率（発生頻度）による説明
落石レベル1	数年に1回程度発生するような頻りに発生する落石
落石レベル2	供用期間中に1回程度発生する可能性の高い落石
落石レベル3	発生する確率は極めて低い規模の大きな落石

表5 要求性能レベル

性能レベル	損傷	供用	補修
性能レベル1	無損傷	支障なし	補修不要
性能レベル2	軽微な損傷	支障なし	小規模補修
性能レベル3	中程度の損傷	規制が必要	中規模補修
性能レベル4	重大な損傷	通行止め	大規模補修

表6 落石防護構造物の要求性能

落石レベル	要求性能		
	最重要構造物	重要構造物	一般構造物
落石レベル1	性能レベル1	性能レベル1	性能レベル1
落石レベル2	性能レベル2	性能レベル3	性能レベル4
落石レベル3	性能レベル3	性能レベル4	性能レベル4

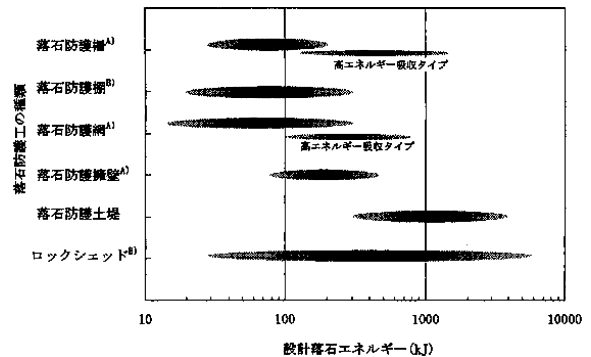


図3 落石防護工の適用範囲

護柵、落石防護柵、落石防護網等は比較的小規模な落石を対象にしている。したがって、このように対象とする落石エネルギーレベルが大きく異なる各種の落石防護工に対して、表6に示した統一的な要求性能の設定には、統一すべきかも含め、さらなる検討が必要であると考えられる。また、現場の状況によっては、複数の対策工を組み合わせて表6に示した要求性能を満たすようにするのも一つの合理的な方法と考えられる。

4・2 落石防護構造物の設計で考慮すべき落石荷重

表4に示した想定される落石レベルに対応する落石の発生位置およびその規模を事前に予測することは、現状では非常に困難なことである。したがって、今後は実際の現場で発生した落石の位置、大きさ、頻度等といったデータの蓄積を行うとともに、落石の発生メカニズムを明らかにすることや落石の発生位置やその規模を予測する手法を開発することが求められる。

実際には、落石の発生位置やその規模は、斜面調査結果や過去の事例に基づいて経験を積んだ技術者の判断による。落石の速度は、実験結果に基づく次式で与えている。

$$V = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) H} \quad (1)$$

ここで、 V ：落石速度、 g ：重力加速度、 μ ：等価摩擦係数、 θ ：斜面勾配、 H ：落下高さ。等価摩擦係数の値は、斜面性状により異なり、植生のない凹凸の少ない岩盤での0.05から植生のある凹凸が大きな涯推斜面での0.35までの値を取るとされている。

しかしながら、実際の斜面では、個々に岩盤、地質などの性状、斜面の凹凸、植生等の条件が異なるため、実際の現象と経験的な予測とが一致しない場合も少なくない。このように経験則の適用範囲外の場合、合理的な落石の危険度予測手法として落石シミュレーションが用いられる。数値シミュレーションによる予測方法は、質点系シミュレーション手法と非質点系シミュレーション手法の2つの手法に大別されいろいろな手法が提案されている。¹⁸⁾手法の有効性は、モデルの正確さと緻密さだけではなく各手法が有するパラメータの経験値と実現象の再現性とを合わせて判断される。なお、用いられるパラメータは、現場状況から逆算的に求められる場合が多い。シミュレーションにおける実斜面のモデル化では、図4に示すように立木も考慮されるようになっている。石川県の能登半島の珠洲市真浦地区の斜面に対して行われた落石シミュレーション結果を一例として図5に示す。¹⁹⁾この図は、5か所の落石発生源からの3次元シミュレーショ

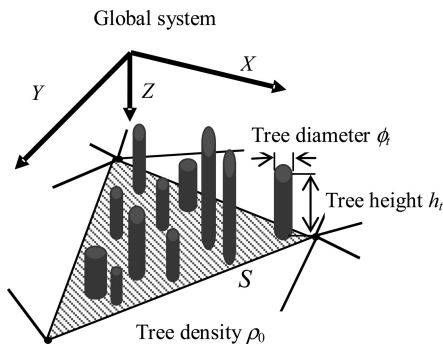


図4 植生のモデル化

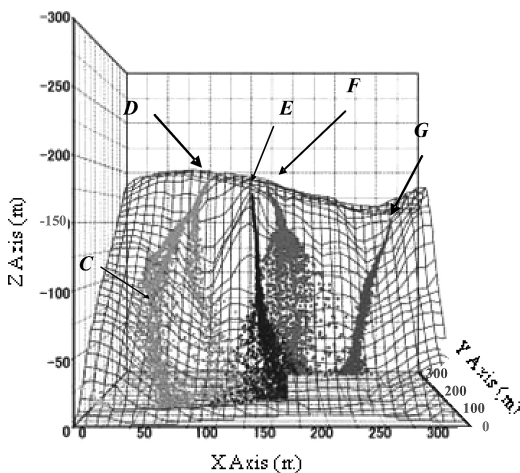


図5 シミュレーションによる落石の軌跡図

ンによる軌跡を示したものである。より現実的に落石現象を表現できていることがわかる。このシミュレーション例では、複数の落石が道路上に到達することが判明したため、現在では防護土堤が建設されている。このような落石運動シミュレーションは性能照査型耐衝撃性法の中で、落石防護構造物に対して考慮すべき落石荷重を設定する上で非常に有効なツールになると考えられる。

4・3 要求性能を満足するための照査方法

性能照査型耐衝撃設計法では、構造物が要求された性能を満足していることを照査することが求められる。その照査法としては、1) 実際の実験を行い確認する方法や、2) 有限要素法をはじめとする数値解析により確認する方法が考えられる。例えば、欧州では防護柵や防護網等の性能を、前者の方法で照査している。²⁰⁾しかしながら、比較的規模が大きいロックシェッドのような防護構造物に対しては、実験により性能を照査するという手法は費用がかさむことになる。したがって、このような防護構造物に対しては、数値解析による性能照査技術を確立することが非常に重要となる。

数値解析により性能照査を行う場合、基本的には構造物の損傷程度が主要な判断基準になると考えられるが、実際には、何を評価指標として選択するかが非常に重要な問題となる。衝撃荷重を受ける部材の破壊には、局所破壊と全体破壊があることは既に述べた。落石のような比較的質量の大きな物体が低速度で衝突する場合には、全体曲げ破壊が問題になることが多いと考えられる。衝撃荷重を受け全体変形する鉄筋コンクリート部材の場合、その損傷の程度と最大応答変位の間には概ね図6のような相関があることが知られている。²¹⁾Forbesは部材の損傷レベルと塑性率の関係を表7のように与えている。²²⁾したがって、このような表に基づけば、要求性能に応じた部材の損傷程度を、最大応答変位を指標として評価することが可能となる。

落石衝突を受ける防護構造物の最大応答変位は、図7に示す比較的簡易な2質点系モデルによっても求めることができる。^{23), 24)}図7中で、 M_1 は防護構造物の等価質量、 M_2 は衝突体の質量、 k_1 は防護構造物の復元力特性、

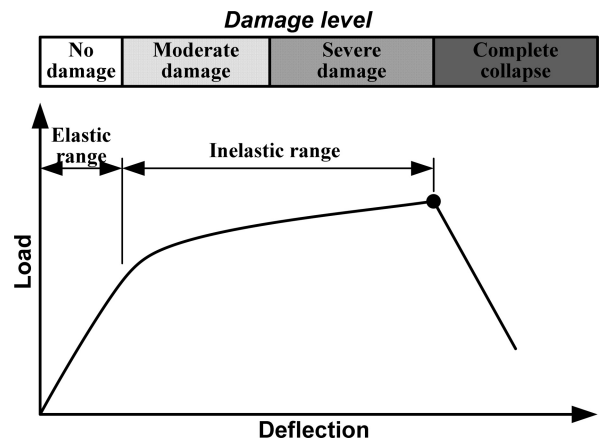


図6 鉄筋コンクリート梁部材の変形と損傷程度の模式図

表7 損傷レベルと塑性率の関係

損傷レベル %	塑性率	結果
0	≤ 1	弾性挙動であり無損傷である.
0~20	1~3	わずかに損傷が生じるが, 場合により補修が必要となることがある.
20~40	3~5	中程度の損傷が生じるため補修が必要であるが, 構造物としての機能上には支障がなく継続使用が可能である.
40~60	5~10	重大な損傷が生じるため補修か建替えの両面からの検討が必要となる. 継続使用するには問題がある.
60~100	10~20	部分的な構造崩壊に至り, 撤去・建替えが必要である. 継続使用は困難であり, 人命や財産等に重大な危害を及ぼす可能性がある.
100	> 20	完全な構造破壊となり, 人命や財産に重大な危害を及ぼす.

k_2 は衝突体と防護構造物の接触点における局所的応答を表す接触ばね定数, $c_1 \cdot c_2$ は減衰係数をそれぞれ表わしている. このモデルは衝撃現象における衝突点近傍の局所的な応答ならびに部材の全体応答を最小の自由度でモデル化したものであるが, 図8に示すように比較的实验結果とも良い一致を示している.²³⁾ただし, 部材は衝撃荷重を受けると瞬時に高速度で変形するために, 構成材料には極めて大きなひずみ速度 (表2に示すように $10^0 \sim 10^1/s$ 程度) が発生することになる. したがって, 衝撃荷重下におけるRC梁の最大応変変位量を計算するためには, 構成材料のひずみ速度効果^{1), 9)~12)}を適切に考慮する必要がある.

5 結 言

本稿では, 土木・建築工学分野における衝撃問題について概説するとともに落石防護構造物を対象として性能照査型の耐衝撃設計について言及した. 本稿中で提示した想定落石レベルや要求性能レベルの設定については, 今後, 多くの議論が必要であると考えている.

実際に性能照査型の耐衝撃設計法により落石防護構造物を設計するためには, 想定される落石レベルに対応す

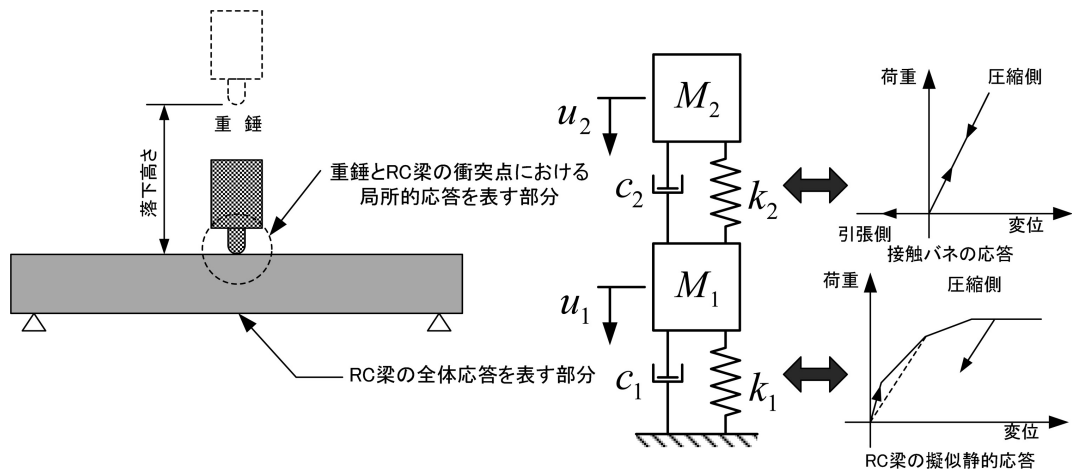


図7 2質点系モデルによる衝撃応答解析

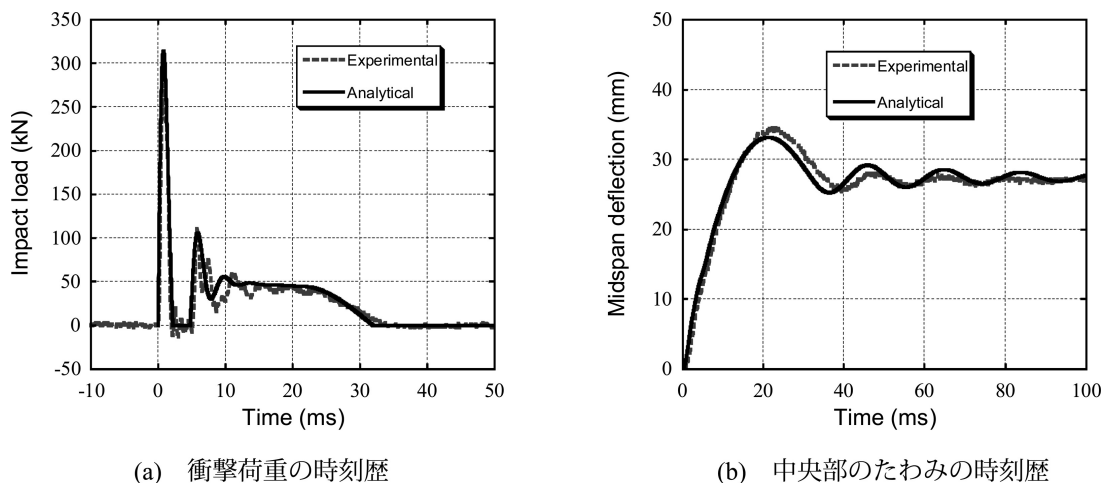


図8 2質点モデルによる解析結果と実験結果の比較

る落石の発生位置およびその規模を適切に予測すること
ならびに要求性能を照査するための照査技術を充実させ
ることが必須である。

また、今後、落石以外の衝撃問題についても性能照査
型の耐衝撃設計や耐爆設計の確立が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "Impact Behavior and Design of Structures", Structural Engineering Series 6 (1993).
- 2) Japan Society of Civil Engineers, "Impact-resistant design of rock-shed structures", Structural Engineering Series 8 (1998).
- 3) Japan Society of Civil Engineers, "Design Method of Structures under Impact Action by Concept of Performance Based Design", Structural Engineering Technical Series 52 (2007).
- 4) ISO2041, "Vibration and shock", 2nd edition (1990).
- 5) <http://www.dor.state.ne.us/big-springs/images/DSC00424.JPG>
- 6) H. Svensson, "Protection of bridge piers against ship collision", Steel Construction, Vol.2, No.1, pp.21-32 (2009).
- 7) <http://www.flickr.com/photos/bluegoose9999/4013771836/>
- 8) U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, "Investigation report T2 LABORATORIES, INC. runaway reaction", REPORT NO. 2008-3-I-FL, Sep. (2009).
- 9) P. H. Bischoff and S. H. Perry, "Compressive behaviour of concrete at high strain rates", Materials and Structures, Vol.24, pp.425-450 (1991).
- 10) K. Fujikake, K. Uebayashi, T. Ohno, J. Mizuno and A. Suzuki, "Formulation of orthotropic constitutive model for concrete materials under high strain-rates and triaxial stress states", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.669/V-50, pp.109-123 (2001).
- 11) C. A. Ross, P. Y. Thompson and J. W. Tedesco, "Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression", ACI Materials Journal, Vol.86, No.5, pp.475-481 (1989).
- 12) L. J. Malvar, "Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars", ACI Materials Journal, Vol.95, No.5, pp.609-616 (1998).
- 13) N. Ishikawa, T. Ohno, K. Fujikake and M. Beppu, "Kisokaranoshogekikougaku" (2008) Morikitashuppan.
- 14) Norwegian Defence Construction Service : Precision testing in support of computer code validation and verification, Workshop Report (1996).
- 15) SEAOC, "Vision 2000-Performance based seismic engineering of buildings", Vision 2000 Committee, Final Report (1995).
- 16) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Basis of Structural Design for Buildings and Public Works", <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021/131021.pdf> (2002).
- 17) Nihon-douro-kyoukai, "Rakuseki Taisaku Binran" (2000) Maruzen Publishing.
- 18) Nihon-douro-kyoukai, "Rakusekitaisakubinrannikansuru sankoushiryo" (2002).
- 19) H. Masuya, K. Amanuma and T. Tsuji, "The risk estimation for rock fall by use of the simulation considering vegetation on slope", Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.55A, pp.1304-1312 (2009).
- 20) D. Peila and C. Ronco, "Technical note : Design of rockfall net fences and the new ETAG027 european guideline", Natural Hazards and Earth System Science, Vol.9, No.4, pp.1291-1298 (2009).
- 21) K. Fujikake, T. Senga, N. Ueda, T. Ohno and M. Katagiri, "Study on impact responses of reactive powder concrete beam and its analytical model", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.99-108 (2006).
- 22) D. J. Forbes, "Protecting petroleum process plant buildings from vapor cloud explosions", Concrete and Blast Effects, ACI, SP-175, pp.53-86 (1998).
- 23) K. Fujikake, "Response analysis of RC beams subjected to impact loads", Proceedings of First International Workshop on Performance, Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading, CD-Rom (2007).
- 24) K. Fujikake, B. Li and S. Soeun, "Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.135, No.8, pp.938-950 (2009).