

## 16. 衝撃問題

とりまとめ: 岸 徳光 (室蘭工業大学)

論文題目: “粒子法による鋼およびRCはりの弾塑性衝撃応答解析に関する基礎的研究”

著者: 別府万寿博, 園田佳巨, 玉井宏樹  
掲載: Vol.52A, pp.1179-1188, 2006年3月

## ◆討議 [本山恵一 (エムエスシーソフトウェア株式会社)]

1. 流体等への適用でよく知られている粒子法をコンクリート構造へ適用されたということで今後の成果に期待しています。ところで、本解析法は流体等への適用では解析結果の表現力が豊かで価値があると理解しておりますが、コンクリート構造を対象とした場合には如何でしょうか?

2. 本手法に関して、計算の安定性に関するコメントを頂きたい。

## ◆回答:

1. ご指摘のとおり、本研究で着目した MPS 法は、流体の解析に数多く適用されております。しかし、本来、粒子法を含めたメッシュレス法は構造解析への適用を念頭に開発されたものです。本研究では、このような観点から MPS 法を固体の解析へ適用できるように改良を加えたものです。その結果、固体の弾性解析では理論解と一致することを確認しました。また、コンクリート構造に関しましても、適切な構成モデルを用いることで、その破壊挙動を表現することに成功しております。

2. 計算の安定性につきましては、空間の離散化と時間の離散化の精度を同時考慮することが重要であると考えています。まだ詳細な検討を行っておりませんが、時間の離散化についてはクーラン条件を満足させるように決定しており、ほぼ安定した結果となっております。今後、空間と時間の離散化の条件についても検討していく予定です。

## ◆討議 [榎谷 浩 (金沢大学)]

1. 実験結果と比較して解析法の妥当性を検討しているのであればご説明願いたい。

2. DEM と本手法の違いをご説明願いたい。

3. 粒子の大きさを変化させた精度検討も可能であるが、もし検討しているのであればご説明願いたい。

4. RC 梁の衝撃応答解析には種々の解析法があるが、本手法はこの種の解析に有効な手法か否かをご説明願いたい。特にコンクリートのひび割れの発生を効率よく表現できるのかをご説明願いたい。

## ◆回答:

1. 公開されている、衝撃荷重を受ける RC はりの挙動に関する実験および解析データとの比較を行っています。その結果、本粒子法による結果は、これらとほぼ同様の結果

となっております。

2. DEM の問題点の一つは、弾性解を解析するときでさえ、粒子モデルの配列によってバネ定数を変化させないといけません。粒子法は、ある領域内の重みつき平均化を行いますので、空間を適切に離散化すれば配列に関係なく等しい剛性となります。すなわち、配列を意識することなくモデル化できる点が大きな違いです。

3. 検討しておりません。しかし、原理的には、例えばいろいろな直径の粒子を混合して解析することも可能ですので、このような方法の適用性についても、今後検討していきたいと思っております。

4. 本研究結果によると、衝撃荷重下のコンクリートのひび割れ破壊には十分適用可能と考えられます。ただし、クラックのひび割れ進展などを追跡する場合には、粒子数を増加させる必要がありますので、計算時間の観点からは厳しい条件になると思います。

論文題目: “各種緩衝材を設置したRCはりの衝撃応答と性能に関する実験的研究”

著者: 橋紗代子, 中村佐智夫, 榎谷浩  
掲載: Vol.52A, pp.1189-1199, 2006年3月

## ◆討議 [三上 浩 (三井住友建設株式会社)]

本研究では衝撃力波形を平均化して評価・検討しております。しかしながら、直接衝突の場合には第1波目の急激な立ち上がりははりの耐衝撃性に大きな影響を与えますので、衝撃力は平均化することによって適切に評価できないものと考えられます。どのようにお考えかご説明願いたい。

◆回答: ご指摘のように、直接衝突の第1波目の急激な波形の立ち上がりは衝突点近傍には大きな影響があります。しかしながら、全体的な構造物の挙動を考える上では、むしろ平均化した波形や力積が重要と考えられます。またここでは平均化した波形で直接衝突と緩衝材の場合で有意な比較ができたと考えています。

## ◆討議 [岡田 慎哉 (寒地土木研究所)]

緩衝材と試験体間にロードセルを設置しているが、その影響を考慮しているか、また、緩衝材による空間的な衝撃分散効果を考慮しているか、についてご説明願いたい。

◆回答: 1) 実構造物では、一般的に構造物の上に直接緩衝材が置かれます。しかし、本研究では、砂層全体としての緩衝効果の検討が目的でしたので、あえて、このような設置方法としました。2) 詳細な圧力分布の測定を行っていないが、当然3次元的に分散していると考えており、伝達衝撃力の測定を行ったこととなります。

論文題目：“積層繊維補強ゴム緩衝材の衝撃破壊特性に関する解析的考察”

著者：下菌征史，園田佳巨，玉井宏樹，西本安志  
 掲載：Vol.52A, pp.1201-1208, 2006年3月

◆討議 [梶谷 浩 (金沢大学)]

1. ゴムの速度硬化は、常に式(3)の定数に静的載荷時の値を2倍することにより表現可能かについてご説明願いたい。
2. 載荷板とゴムとの滑り等の接触条件がどのようなになっているかをご説明願いたい。

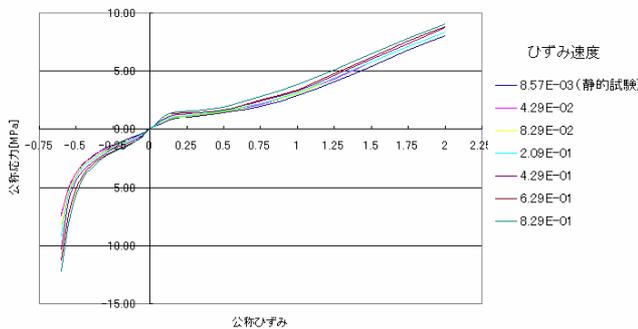
◆回答：

1. ゴムの速度効果については、現在、材料試験および数値解析などで検討を行っている最中ですが、その結果を踏まえると、常に式(3)の定数を静的載荷時の2倍で表現できるわけではなく、以下のようなひずみ速度とひずみの2変数で表すことを検討しています。

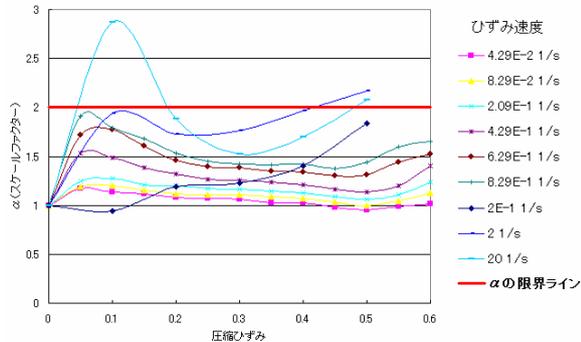
$$\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}, \epsilon) = \alpha(\dot{\epsilon}, \epsilon) \sigma_{static}$$

上式中の速度効果を表す係数 $\alpha$ について、試験等で得られた結果は下図のように概ね上限値が2.0~3.0程度に収まるようです。このことから、ゴムの1個の緩衝材とみなすラフな試算であれば、速度効果を2倍程度と考えることは定量的に妥当な線だと考えています。

ゴム緩衝材の公称応力-公称ひずみの関係



ひずみ速度の違いによる $\alpha$ (スケールファクター)-圧縮ひずみの関係



2. 載荷板とゴムとの接触解析は、汎用解析ソフト Marc の接触機能を用いて行っている。具体的には、載荷板とゴ

ム両方を変形体として定義し、両者の変形に応じた法線方向接触力を求め、接線方向の摩擦力は実験時の変形モードを適切に再現できる摩擦係数(一定値と仮定)を与えて行っている。

◆討議 [三上 浩 (三井住友建設株式会社)]

1. ゴムのひずみ速度硬化を考慮されておりますが、繊維に関しては考慮しなくても良いのでしょうか、ご説明願いたい。
2. 仮に考慮する必要がないとすると、高速載荷時には繊維はほとんど効果がないという理解で良いかを、ご説明願いたい。

◆回答：

1. 過去に著者の一部が実施した緩衝ピン(鋼製ピンの周囲に繊維ゴムを巻き、落橋防止連結板装置に用いた)に関する実験的研究の結果から、繊維の剛性・強度には速度効果はあまりないと考えてゴムのひずみ速度効果のみを考慮することにしました。

2. ゴムと繊維で静的載荷時の剛性を比較すると2桁以上の強度の相違があり、ゴムのひずみ速度効果は2倍程度しかないことから、高速載荷時の繊維補強ゴムの耐力に繊維が占める役割には変わらないものがあると考えています。繊維の剛性・強度には速度効果はあまりないと考えられますが、伸び能力に対する影響は今後の検討が必要であると考えています。

◆討議 [別府 万寿博 (防衛大学校)]

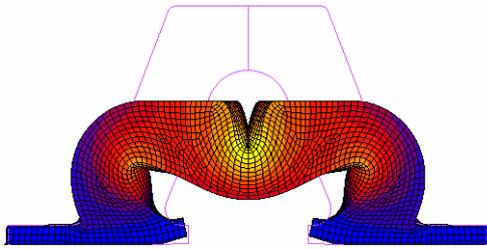
1. ゴムの5パラメータの決定法を教えてください。
2. 5個のパラメータの中で解析結果に最も影響を与えるパラメータを教えてください。

◆回答：

1. ゴムの5パラメータについては、汎用解析ソフト Marc が提供している材料定数決定のためのカーブフィッティング機能を利用しています。具体的には、使用するひずみエネルギー密度関数式を選択した上で、ゴム材の圧縮・引張領域の単軸試験結果を入力データとして与えることで決定されます。

2. 常識的に考えると、右 Cauchy-Green 変形テンソルの1次、2次不変量  $I_1, I_2$  のオーダーに応じて大きな影響を与えやすいと判断したい(この場合には第1項にかかる  $c_{10}$ ) ところですが、体積変化が殆ど生じないゴムの特性を考えると、必ずしもそうではないようです。

特に、下図のようなV字型のゴム防舷材のように脚の座屈をとまなう場合には、体積変化とせん断変形が混在した複雑なひずみ場になりますので、各パラメータの感度を一概に論じることはできないようです。本件に関しては、現在行っているゴム材のひずみ速度効果に関する研究をまとめる時点で、回答を提供したいと考えております。



V字型のゴム防舷材脚の座屈変形例

論文題目：“剛飛翔体の高速衝突によって生じるコンクリート板の貫入深さに関する理論的考察”

著者：三輪幸治，別府万寿博，大野友則  
掲載：Vol.52A, pp.1209-1218, 2006年3月

◆討議 [三上 浩 (三井住友建設株式会社)]

エネルギー保存則を用いて検討されておりますが、胴体部は破壊しております。この破壊によってエネルギーが吸収されると、エネルギー保存則が成立しなくなるのではないのでしょうか？ご意見をお聞かせ願いたい。

◆回答：胴体部は飛翔体を発射するために必要な保持具であり、剛性が非常に小さいMCナイロン製としています。飛翔体がコンクリート板に衝突する瞬間を高速カメラで撮影すると、胴体部の衝突と同時に粉々に破壊しており、コンクリート板の破壊そのものへの影響は非常に小さいものと考えています。

◆討議 [梶田 幸秀 (九州大学)]

実験による経験式の信頼性が高いにもかかわらず理論式を定式化しようと考えられた理由について、ご説明願いたい。

◆回答：既存の実験式の中には、飛翔体の速度、質量、形状、直径やコンクリート強度等をパラメータとして、コンクリート板の局部破壊の程度（表面破壊深さ、裏面剥離限界板厚、貫通限界板厚）をよく予測することができる式もありますが、局部破壊現象のプロセスを追うことはできません。理論解では、飛翔体がコンクリート中に貫入するときに受ける抵抗力や速度の変化等の現象のプロセスを表すことができますので、高速衝突によるコンクリートの局部破壊のメカニズムを考察するために必要であると考えています。

論文題目：“走行振動疲労荷重を受けるRC床版の動的影響および残存耐力”

著者：阿部忠，木田哲量，澤野利章，徐銘謙  
掲載：Vol.52A, pp.1227-1235, 2006年3月

◆討議 [三上 浩 (三井住友建設株式会社)]

実験で4万回の走行が、等価繰り返し回数で1,000万回や2,000万回として評価され、実験回数と等価繰り返し回数の差があまりにも大きい。荷重振幅を小さくし実験回数を大

きくすることによりその差を小さくすることも考えられるが、如何お考えか、ご意見をお聞かせ願いたい。

◆回答：RC床版の疲労実験における等価繰り返し回数は、疲労損傷がマイナー則に従うと仮定し、 $m$ を用いた次式を基に推定されております。

$$D_1 = S(P_i / P)^m n_i \quad (1)$$

ここに、 $D_1$ ：疲労損傷、 $P_i$ ：荷重、 $P$ ：基準荷重、 $m$ ：S-N線図の傾きの逆数、 $n_i$ ：荷重 $P_i$ の回数

式(1)における押抜きせん断破壊に対する $m$ に関しては、松井式の $S = (P/P_{sx})$ を基にした $m = 12.7$ が提案されております。また、土木学会式における $V_{ped}$ をもとに使用限界状態を破壊時の25%レベルと仮定して求めた結果では $m = 10$ であるとの報告もなされておりますが、RC床版に関する $m$ については、松井式が良く採用されております。走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合の荷重は設計活荷重の1.3倍の荷重(上限荷重78kN)で40000回走行の疲労実験を行い、式(1)より等価繰り返し回数を算出しました。ご指摘のように、荷重振幅を小さくすることで等価繰り返し回数は減少すると考えられますが、本研究は、荷重と疲労荷重を受けた場合の動的影響の評価を目的とした実験ですので40000回走行としました。今後は、ご指摘のとおり疲労実験を行い $m$ についても研究を進めて行きたいと考えております。

◆討議 [栗橋 祐介 (寒地土木研究所)]

松井先生が採用している方法とは異なる実験法を採用しているのにもかかわらず、松井先生の提案式を採用することの妥当性についてご説明頂きたい。

◆回答：RC床版の疲労実験における疲労損傷がマイナー則に従うと仮定して疲労損傷が推定されております。マイナー則におけるS-N線図の傾きの逆数( $m$ )に関しては、松井らによる疲労実験から評価され、RC床版に関しては松井式が良く適用されております。本実験は走行一定荷重による疲労実験と走行振動荷重に疲労実験を行い、等価繰り返し回数を算出しました。ご指摘のとおり、走行振動荷重による疲労実験は走行一定荷重による疲労実験と異なりますが、走行振動荷重の場合も荷重が走行することから、等価繰り返し回数は妥当性があるものと考えております。今後は、走行振動荷重による疲労実験を行い妥当性についても評価したいと考えております。

論文題目：“せん断破壊型軽量コンクリート製RC梁の耐衝撃性に及ぼすPVA短繊維混入率の影響”

著者：三上浩，岸徳光，栗橋祐介，竹本伸一  
掲載：Vol.52A, pp.1237-1248, 2006年3月

◆討議 [別府 万寿博 (防衛大学校)]

1. PVA短繊維を混入することによってせん断耐力が向上するメカニズムについて、ご説明願いたい。
2. PVA短繊維はどの程度(何%)まで混入可能かについて、ご説明頂きたい。

◆回答：

1. PVA 短繊維を混入することで、コンクリートの引張靱性能は大きく向上します。具体的には、直接引張試験の結果から明らかなように、普通コンクリートでは、ひび割れ発生後に強度が零になるのに対して、PVA 短繊維を混入することで、有限の引張強度を有するようになります。本論文では、これを残存引張強度と称しています。これは、短繊維の混入によって、ひび割れ幅の開口が抑制されることを示しており、この作用が RC 梁のせん断耐力を構成する、インターロッキング（骨材のかみ合せ）作用やダウエル作用を向上させることに寄与したものと考えられます。

なお、論文中に示しているように、これらの効果を数値的に表現する方法としては、トラス理論を基に残存引張強度をせん断耐力増分とすることで、比較的精度良く実験結果を評価できることが明らかになっています。

2. 最大の PVA 短繊維混入率は、主として練り混ぜ性状やコンクリートのフレッシュ性状によって決定されます。すなわち、普通の配合で、高性能減水剤などの使用量を通常程度としますと、混入率が 3% 程度でファイバーボールができやすくなることから、練り混ぜ上は 3% がほぼ上限と考えられます。また、混入率を大きくすることでスランブは小さくなる傾向にあり、混入率 3% 程度で打設できる限界のスランブ（6 cm 程度以下）となります。

なお、ポンプ圧送性も混入率で大きく変化し、3% でポンプ圧送するには特殊な機械装置が必要となります。一方、2% 程度であれば、通常のポンプ圧送が可能であることを確認しています。以上から、現状では混入率 3% を上限として検討しています。

◆討議 [秋山 充良 (東北大学)]

桁高を一定としたときの、軽量コンクリート梁と普通コンクリート梁の耐力を等しくするための PVA 短繊維混入率を検討されておりますが、桁高の増減が耐力を等しくするために必要な PVA 短繊維混入量に及ぼす影響について、ご説明頂きたい。

◆回答：本研究では、せん断破壊が先行するように普通コンクリート梁と軽量コンクリート梁の高さを比較的高くして実験しています。梁の高さが低い場合は曲げ破壊型に移行し、短繊維が無くても、軽量コンクリート梁の静的、動的耐力性状や終局耐力は、普通コンクリート梁とほぼ同様であることが分かっています。これから、梁高さが低い場合は、短繊維を混入しても、終局耐力はほとんど変化しないものと考えられます。一方、せん断破壊型を示すような梁高さの場合は、PVA 短繊維を 0.5% 程度混入することで静的、動的耐力性状や終局耐力が普通コンクリート梁と同程度になることが明らかになりました。すなわち、軽量コンクリート梁に混入した PVA 短繊維の耐力性状や終局耐力に及ぼす効果は、梁高さが低い場合はほとんど出現せず、梁高さが高く、せん断破壊する場合は大きく出現する、と言えます。

論文題目：“PVA短繊維混入による 4 辺支持RC版の耐衝撃性向上効果に関する実験的研究”

著者：栗橋祐介，岸徳光，三上浩，田口史雄  
掲載：Vol.52A, pp.1249-1260, 2006 年 3 月

◆討議 [榎谷 浩 (金沢大学)]

1. 実験に用いた PVA 短繊維の寸法はどのようにして決定したかについてご説明願いたい。

2. 本研究では、PVA 短繊維の引き抜けを期待しているのか破断を期待しているのかを、ご説明願いたい。

◆回答：

1. 施工性と力学特性を考慮して決定致しました。施工性の観点からは、短繊維のアスペクト比（長さ/直径）が大きいとファイバーボールの形成や大きなスランブロスの原因になりますので、短繊維混入後においても施工性に大きな影響を及ぼさないスペックのものとししました。

力学特性の観点からは、ひび割れ発生部の架橋効果を効率的に発揮させるため、粗骨材の最大寸法（20 mm）よりも繊維長が長いものとししました。

2. PVA 短繊維に期待しているのは、ひび割れ発生後に発揮される短繊維の引張強度特性と伸び性能です。これらの性能により、RC 版の耐荷性能や耐衝撃性能が向上しているものと考えております。

なお、PVA 短繊維は、親水性を有しておりますのでモルタルマトリクスとの付着が良く、短繊維が破断するまでの引張性能を期待できる場合もありますが、ひび割れ幅が拡大してくると付着応力が大きくなる一方、ポアソン効果で徐々に細くなり引き抜ける場合もあります。従いまして、最終的には、短繊維の破断と引き抜けが混在する形で終局に至るものと考えられますが、この点に関してましては、短繊維混入コンクリートの引張試験等により別途検討しているところでございます。

◆討議 [大野 友則 (防衛大学校)]

1. 長さ 30 mm の繊維を短繊維と定義しているが、何 mm までを短繊維と呼んでいるのか、これに対して長繊維というものはあるのかについて、ご説明願いたい。

2. 載荷試験に  $\phi 60$  の載荷棒を用いた理由と、もっと載荷面積の大きい載荷棒を使った場合にはどのような性状を示すのかについて、ご説明願いたい。

◆回答：

1. 一般的にコンクリート材料の分野で短繊維と呼ばれているものは、ほとんどがコンクリートに混入して使用するものでございます。特に、繊維長は定義されておきませんが、練り混ぜ等の施工性から、市販されている短繊維の大半は長さが 6 ~ 40 mm 程度となっております。

2. 載荷治具の直径を 60 mm としたのは、押し抜きせん断コーンの形成範囲が支点部まで至り、短繊維混入による押し抜きせん断耐力の向上効果を適切に評価できなくなることを回避するためです。今回の実験結果を見ますと、押し抜きせん断コーンの形成は支点間に収まっておりますの

で、載荷治具の直径をもう少し大きくすることは可能かと思われま。載荷治具の直径を大きくしますと、押し抜きせん断コーンの直径も大きくなり、アーチ作用による反力の一部が支点部で分担される可能性が出てきます。これは見かけ上の耐力が向上することを意味しますので、短繊維の効果が適切に評価されないこととなり、好ましくありません。

論文題目：“重錘落下衝撃荷重載荷時の大型RC桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討”

著者：岸徳光, Abdul Qadir Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉

掲載：Vol.52A, pp.1261-1272, 2006年3月

◆討議 [大野 友則 (防衛大学校)]

衝撃応答解析に用いているパラメータの一つである減衰定数  $h$  は最終的に何に影響を与えるかについてご説明願いたい。

◆回答：これまでの経験からですと、減衰定数は衝撃力波形や支点反力波形にはほとんど影響を与えませんが、変位波形において衝撃荷重除荷後の残留変位成分に大きく影響を与えることが明らかになっております。

◆討議 [玉井 宏樹 (九州大学)]

衝撃解析法の適用性検討の観点から、小型RC梁に対しても同様なパラメトリックな検討をされていると思うが、小型RC梁を解析する場合と大型RC梁を解析する場合で解析手法のテクニックを変えるべきでしょうか、教えてください。

◆回答：衝突体と被衝突体の幾何形状が類似の倍率で大きくなる場合には同様の解析手法で解析可能と推察されます。しかしながら、構造部材の大きさが大きくなる一方で衝突体が一定の大きさの場合には、コンクリートの拘束効果等が異なって来るものと考えられますので、適用する材料構成則等は異なってくるものと考えられます。

また、要素分割数について考えますと、小型部材で適用した要素を直接大型部材に適用する場合には、部材の大きさによっては解析不可能になる可能性がありますので、分割数を少なくした場合でも同等な弾塑性挙動性状が得られるような効果のある概念の導入が必要と考えます。

論文題目：“ロックシェッドの終局時入力エネルギー量探索に関する数値解析的検討”

著者：岸徳光, 岡田慎哉, 西弘明, 三上浩

掲載：Vol.52A, pp.1273-1283, 2006年3月

◆討議 [梶谷 浩 (金沢大学)]

1. どうして、落石ではあり得ないような大きな落下を用いたかについてご説明願いたい。

2. 衝撃力波形が2つの波形から構成され、2つ目の波形の振幅が大きいのはどうしてかをご説明願いたい。

3. 載荷点直下の変位が復元するのはどうしてかをご説明願いたい。

◆回答：

1. ロックシェッドの健全度を汎用的に評価するためには入力エネルギーを用いるべきと判断されます。しかし、重錘の質量が一定の場合において、載荷面積の大きい場合と小さい場合では損傷の程度が異なり、大きい場合には損傷の程度が小さくなることは自明です。しかし、実現象ではどのような規模の落石があるかは不明です。

ここでは、安全側で設計を行うことを前提に載荷面積を比較的小さく設定し、それを一定にして落下高さのみを変化させ入力エネルギーを変化させることと致しました。入力エネルギーが極端に大きい場合について検討を行ったのは、終局耐力限界状態がどの程度の入力エネルギーレベルの場合であるかを数値解析的に評価するためであります。

2. 第一波目は、重錘が敷砂緩衝材中に貫入している現象を表しており、減速度が小さいために敷砂に生ずる応力も小さく、結果として衝撃力の振幅も小さくなります。

一方、第二波目は、敷砂の構成則式からも明らかのように、重錘の貫入量に対応して敷砂が締め固められひずみ増加率が小さくかつ発生応力が大きくなることより、その反力として評価される衝撃力の振幅も大きくなるものと判断されます。勿論、このような状態になっていることは、重錘からの衝撃力が敷砂を介してロックシェッド頂版に入力していることを示唆しております。

3. 重錘衝突によって敷砂が締め固められ、それを介して衝撃荷重が頂版に作用します。一方、頂版部は載荷点を中心に損傷を受けつつもロックシェッド全体で衝撃力に抵抗します。その場合、版構造であることより衝撃荷重の除荷と共に頂版全体も復元しますので、載荷点部も当然復元することになります。その程度は、入力エネルギーが小さく頂版部の塑性化の程度が小さいほど復元量も大きくなるものと判断されます。

論文題目：“二層緩衝構造と杭基礎を併用した壁式落石防護擁壁の開発に関する数値解析的検討”

著者：川瀬良二, 岸徳光, 今野久志, 鈴木健太郎

掲載：Vol.52A, pp.1285-1294, 2006年3月

◆討議 [大野 友則 (防衛大学校)]

重力式の結果と壁式に対する解析結果を比較していないが、その理由をご説明頂きたい。

◆回答：本論文では、重力式の実験結果と壁式の解析結果を比較しており、重力式の解析結果と比較しておりません。これは、既往の研究により、重力式に関する実験結果と解析結果が良く対応していることに基づき、この種の解析手法の妥当性が担保されていると判断したことによりです。