

## 【特別講演】

### (2) 衝撃問題に対する基本的な考え方 —耐衝撃設計方法の確立をめざして—

熊本工業大学 竹田 仁一

#### 1 はじめに

構造力学の分野で特に進歩が遅れているのは衝撃的载荷を対象とする動的構造学である。この分野は構造と材料の両方にかかわる領域であることがそのひとつの理由と考えられる。チェルノブエリ原子力発電所事故以来、この分野の急速な進展が望まれている。ここでは基本的な考え方について述べる。

#### 2 衝撃研究抄史

##### 2.1 フリスとレンとホイヘンスの論文

ロンドン王立協会（英国学士院）は1668年衝撃に関する研究論文を会員から募集した。後に長く会長を勤めたニュートンはそのときまだ28才、しかし、有名な重力理論は既に2年前に発見していた。<sup>1)・2)</sup> 応募論文は当時一流の研究者であったfris、ren、ホイヘンスから提出された。renはセントポール寺院の設計者としても有名で、ニュートンによると当時最大の科学者であった。renとホイヘンスは弾性体間の衝突を、frisは非弾性体間の衝突を取り扱ったが、既に、今



図-1 ホイヘンスが衝突実験の説明に使用した衝突図

日の運動量、力積、反発係数等については完全に理解しており、また、彼等の間では正確に一致していた。図-1はホイヘンスの著書<sup>3)・4)</sup>中の衝突図で、等質、等重量の2球が衝突すると、それぞれの速度を交換することを説明している。これはいわゆるガリレイの相対運動（絶対時間のもとで等速運動体間に成り立つ関係）の説明にもしばしば用いられる。<sup>5)</sup> これら3編は、おそらく衝撃に関する最初の論文であると考えられている。

その後は、既に得られた諸法則の体系化だけで、新しい法則は第2次大戦後まで殆ど見られていない。ただ関連分野では弾性接触理論<sup>6)</sup>、応力波理論<sup>7)</sup>等の進展がある。その中に、後に衝撃と深い関係をもつようになる材料高速载荷実験が、コンクリートについてはアブラムス<sup>8)</sup>によって始められ、勝田<sup>9)</sup>、エバンス、ワットシュティン、竹田、立川<sup>10)</sup>等によって進められた。

構造力学の分野で、後に多くの影響を与えた論文に武藤清博士の「力積破壊の世界」<sup>11)</sup>がある。これは今日の言葉でいえば、「爆発衝撃波による弾性系の振動応答スペクトル」の研究であるが、爆発衝撃波の作用継続時間が系の固有周期より短い場合、系の応答が衝撃波の力積に概ね比例することを述べたものである。しかし、これは弾性理論にもとづく振動応答だけを取り扱っている。

第2次大戦中、多くの衝撃、爆発実験が各国で行われたが、当時はまだ、弾性理論が主流であり、実験結果から実験式を作って、それによって設計する以外に方法はなかった。

## 2.2 新しい衝撃研究

大戦後、衝撃研究には僅かながら変化が見られるようになったが、その動機となったのは測定器材の進歩であった。3編の応募論文以来、衝撃をひとまとめの作用(力積)として取り扱うことが伝統となり時間を更に分解することは考えなかった。時間の分解が可能となり、その装置を使って衝撃実験を行うと衝撃がまだ継続している間に試験体の破壊が始まる(図-2)。<sup>1,2)</sup>従って、このような破壊を防止する研究ではどうしても衝撃を細分する必要が生じて来た。そしてこのような研究を行っている間に、関連するいろいろな問題、例へば速度効果、クラック高速伝播などが生じて来た。次にこれらについて述べよう。

## 3 衝撃の基本的性質

### 3.1 運動量と運動エネルギー

衝撃では運動量は保存される。もし非弾性変形が生じ、またはいくつかは破碎されても、そのために大きなエネルギーが消費されなければ全体として運動量は保存される。しかし、衝突前後の相対速度は保存されるとは限らない(図-3)。反発係数は両者の比から計算される。

衝突によって相対運動エネルギーは反発係数の2乗に比例する分だけを残し、その他は失われる。しかし、共通重心の並進運動エネルギー、そのまわりの回転運動エネルギー及び個々の回転運動エネルギーは、摩擦がなければ保存される。もし衝突が高速におきれば運動エネルギーの一部は内部エネルギーに変化する。

### 3.2 衝突と波

例えば図-4のようにハンマーでコンクリート角柱の左端に秒速1mの衝撃を加えたとしよう。われわれの傍らには100万分の1秒(1 $\mu$ s)刻みの時計がある。衝突してひと目盛り刻んだとき、ハンマーと角柱の接触端は1ミクロン( $\mu$ m)だけ変位している。なぜならば端部に加わった衝撃で角柱の端部に近い粒子はすべて右方向に動いており、ハンマーの動きをとめる力は備かない

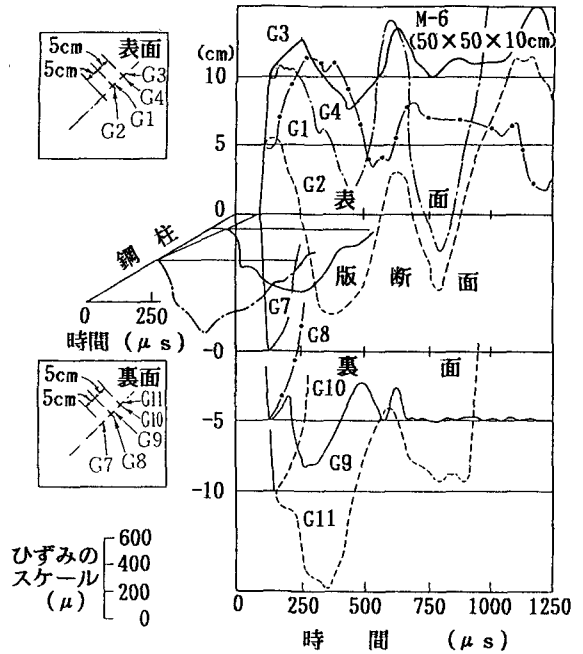


図-2 モルタル平板(50×50×10cm) 衝撃実験における歪波測定例 (衝撃速度 8.9m/s の場合)。真裏のゲージ G8, G9 が歪波先端が入射した直後応答し、裏面が急速に変形することを示す。

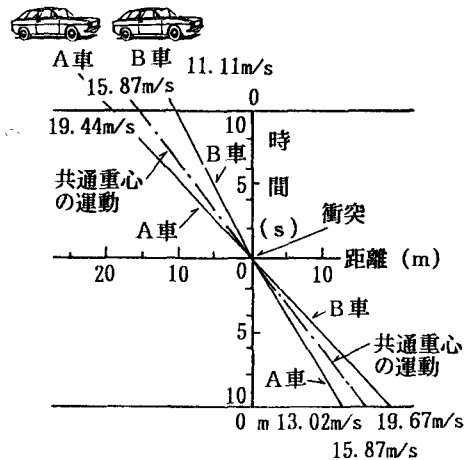


図-3 2物体の衝突前後の速度の変化。反発係数を 0.8としている。

からである。この時点で端部に衝撃が加わったことを伝える波は端から約  $(3000 \text{ m/s} \times 10^{-6} \text{ s}) = 3 \text{ mm}$  まで伝えられている（コンクリート角柱の応力波伝播速度は約  $3000 \text{ m/s}$  であるから）が、ここでもハンマーを停める抵抗力は生じない。支えるものがないからである。むしろ逆に動いて更に右隣に次々と圧力が加わったことを伝えることになる。このとき角柱左端の厚さ  $3 \text{ mm}$  の部分は  $1 \mu\text{m}$  だけ圧縮されているのであるから、ヤング係数を  $2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  とすると、 $(1 \mu\text{m} / 3 \text{ mm}) \times 2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 = 70 \text{ kgf/cm}^2$  の圧縮応力が生じていることは確かである。

いま角柱内の粒子の動きに注目するとそれは  $(1 \mu\text{m} / 1 \mu\text{s}) = 1 \text{ m/s}$  の速度をもつが、これを粒子速度といっている。これに対し応力波の伝わる速さを伝播速度という。応力波の応力の大きさと粒子速度の比を力学的インピーダンスといい、この例では  $70 \text{ kgf/cm}^2 / 1 \text{ m/s} = 0.7 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}^3$  である。

コンクリート、岩石等の中を伝わる応力波はかなり急速に減衰する。<sup>13)</sup> またコンクリート等では塑性応力波の発生も考える必要がある。応力波の発生を考えると衝撃実験にロードセルを使用することの難しさが理解できる。測定を困難にするのは応力波だけではなく、他にも試験体を含む装置系の振動の影響及び測定器の周波数応答性がある。<sup>17)</sup>

### 3.3 衝撃と速度効果

時間をものさしとして見ると、衝撃と反対の立場にあるのはクリープ実験であるが、静荷重実験もそれに近い。これらは時間をかけ、実験装置系が一定温度で、平衡状態を保ったまま行われる。これとは対照的な衝撃実験では断熱不平衡のまま行われるので、両者の応答を支配する力学的性質が違うのは当然である。これは、ばらばらな分子の集まりである気体を考えるとわかるように、定温変化と断熱変化では全く違う方程式で支配される。構造材料では分子間に結合力があるから気体程ではないが、その影響は残る。この荷重速度による力学的性質の変化が速度効果<sup>14)</sup> である。しかし、これを測定するには、応力波及び振動応答を出来る限り少なくした、いわゆる高速荷重実験によらなければならない。それぞれの影響を分離できないからである。速度効果が特に問題になるのは、この中に構造設計上極めて有害な効果（例えば脆性破壊など）があるからである<sup>15)</sup>（図-5）。

### 3.4 衝撃と破壊力学

図-6-(a)のように、y方向の一様な引張り応力 $\sigma$ をうける弾性2次元応力場を考える。この中の単位要素に蓄積される歪エネルギーは  $\sigma^2 / 2E$ （Eはヤング係数）である。いま(b)図のように静かに、

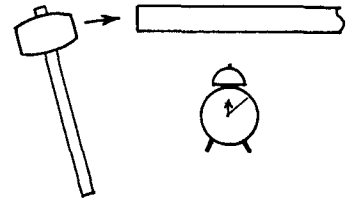


図-4 コンクリート角柱の1軸衝撃の説明図。

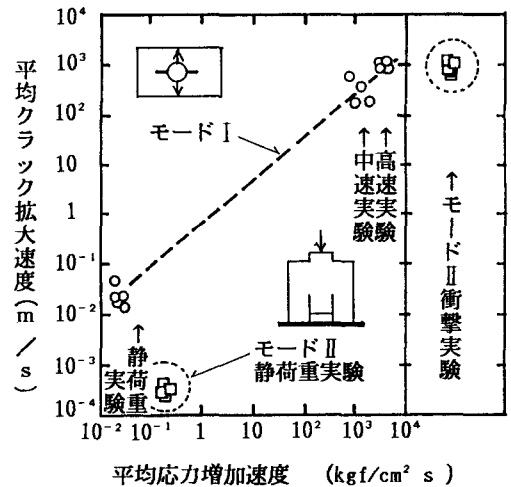


図-5 モードI及びモードIIのクラック拡大実験における平均応力増加速度と平均クラック拡大速度との関係

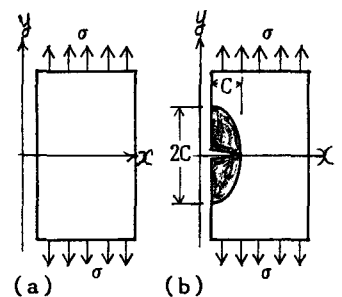


図-6 クラック発生によるポテンシャルエネルギーの変化

巾Cのクラックが発生したと仮定する。かつて、Griffithが行ったように Inglis の解<sup>16)</sup>を使って、単位厚さあたりの歪エネルギー喪失量を計算すると ( $\pi \sigma^2 C^2 / 2E$ ) となる。これは丁度、図中のハッチングした楕円部分のもっていた歪エネルギーに相当する。このエネルギーは明らかにクラックを作るために使われているからクラックにはこれだけのエネルギーが集中していると考えなければならない。構造物あるいは構造部材の破壊は通常、大規模なクラックの発生によって起きるから、それまでに蓄積された歪エネルギーが最終段階でクラック発生部に集中して破壊がおきると考えられる。クラック拡大にも速度効果が発生し、衝撃の場合は静荷重時と異なったクラック伝播が起きる。<sup>20)</sup>

#### 4 耐衝撃設計方法確立のためのスケルトンプラン

われわれは常に二つの方法を準備しなければならない。ひとつは当座応急の建設要求に対処する方策、もうひとつは理論にもとづく精密な設計方法である。後者の確立には当然長い期間がかかる。前者であっても常に関連分野の進歩をとり入れ、改善する必要がある。

前者の当座応急の設計方法には(1) プロトタイプの構造物を作り、なるべく実状に近い条件で実験を行い性能を確かめる。(2) 適用が許される実験式を使って設計する。(3) 近似していると考えられる事例についての結果を援用する。等の方法があるが(1)については相似則に問題がある。<sup>17)</sup> 衝撃では完全な相似則は通常成立しないからである。(2),(3)についても種々の問題がある。ここでは主として後者のためのプランを説明しよう。

##### 4.1 設計手順<sup>12)</sup>

設計手順は図-7に示したように簡単であるが、その流れは通常の手順と変わるところはない。しかし、内容は全く異なり、今後の研究にまたなければならぬ部分が多い。

最初は外的作用を、それによって発生する応答の計算に便利のように定量化し、外的作用ごとに影響の大きなパラメーターを選び(例えば、衝撃では1. 衝撃速度 2. 質量と)、更にそれをいくらにするかを定める手順である。図-8に落石による擁壁の破壊の程度と落石の運動量の関係の調査例を示す。<sup>12)</sup>

最後の手順は計算で求められた応答の大きさが許容範囲にあるかどうかを判定するための許容値を求めることで、ここにも問題が多い。中間は構造物の応答の大きさを計算で求める手順で、後述するように最も重要な部分である。以上の説明からも明らかなように、これらの手順はそれぞれ関連をもち、ひとつづつ独立に解決できない場合が多い。

##### 4.2 構造物の応答計算

構造物に影響を与えると予想される衝撃的载荷は極めて広い範囲の作用速度をもっているが、構造物に与える応答の種類は意外に限られている。おそらく構造物の固有周期によって応答のスクリーニングが行われるためと考えられる。爆発の場合も圧力上昇の急峻さにくらべ、構造物の変形は比較的俊慢である。<sup>18)</sup> しかし、先に「固有周期によって」と述べたのは、構造物に固有周期と直結する全体的な振動応答(第2

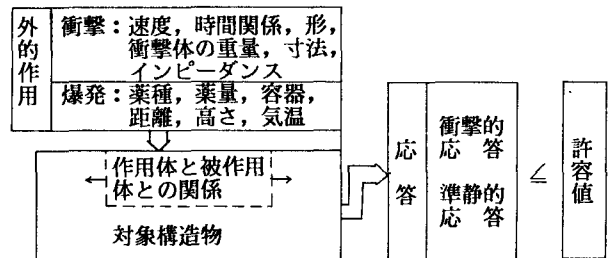


図-7 耐爆、耐衝撃設計の手順

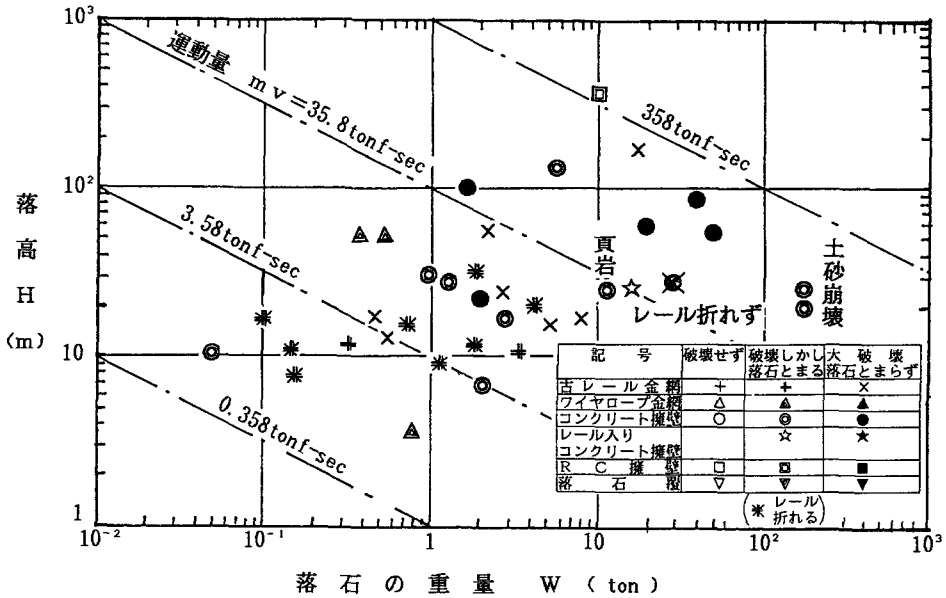


図-8 落石による擁壁の破壊程度と落石の運動量の関係

次応答) だけが生ずると云っているのではない。次に述べるように、もうひとつ載荷位置の近傍に固有振動より較段に速い応答(第1次応答)が生ずる<sup>12), 17)</sup>(図-9)。第1次応答は応力波及び衝撃体の運動にともなう局所的な応答であり、作用速度と質量が小さいときは無視出来る。第1次、第2次応答の発生機構と性質の違いが完全な相似則をつくることを不可能にしているのである。また、これらはそれぞれ異なった速度効果によって変化した力学的性質に支配されることも現象を複雑にしている。

これら応答計算の理論が整備されるまでは次善の策として従来の実用式に頼らざるを得ない。<sup>19)</sup>

### 5 結論

1. 構造物に衝撃が作用すると通常二つの応答が発生する。そのひとつは載荷位置近傍に発生する応力波及び衝撃体の運動にともなう第1次応答、もうひとつは全体的な振動、第2次応答である。
2. これらの応答はそれぞれの変形速度による速度効果をうけた力学的性質によって支配される。
3. 速度効果は振動及び応力波の発生を極力少なくした高速載荷実験からもとめなければならない。
4. 耐衝撃設計は上記の二種のそれぞれの応答を許容範囲内に留めるように行わなければならない。
5. 当座応急の設計要求に対しては衝撃の性質を考慮し、信頼性のある方法をとる必要がある。

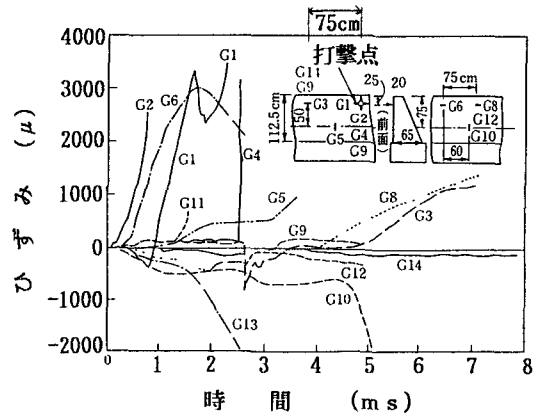


図-9 鉄筋コンクリート擁壁衝撃実験における表面(G9, G14)、裏面(G10, 11, 12, 13)及び内部鉄筋(前面G1~5, 裏面G6~8)の歪, G1, G2, G6は打撃位置, G3, G8, G14は打撃位置より75cm隔たる位置。第1次応答と第2次応答を示す。

[参考文献]

- 1) アイザック・ニュートン (中野訳), プリンシピア, 講談社
- 2) エルンスト・マッハ (伏見訳), マッハ力学, 講談社
- 3) Martinus Nijhoff, The Hague, Netherland, 1940
- 4) A. P. フレンチ (橋高盤訳), MIT物理、力学、培風館
- 5) 藤原邦男, 物理学序論としての力学、東大出版会
- 6) H. Hertz, J. Math, vol. 92, 1881
- 7) N. Cristescu, Dynamic Plasticity, North-Holland
- 8) Duff A. Abrams, Effect of Rate of Application of Load on Compressive Strength of Concrete, ASTM, Vol. 17, P. II, 364, 1917
- 9) 勝田千利, 高速圧縮荷重に対するコンクリートの力学的性質 (第2報) 建築学会論文集33号, 1944
- 10) 竹田仁一, 立川博之, 高速圧縮荷重をうけるコンクリートの力学的性質とその基本的関係式, 建築学会論文集78号, 1962
- 11) 武藤清, 力積破壊の世界, 建築学会大会論文集, 昭和16年 4月, 246
- 12) 竹田仁一, 耐爆、耐衝撃を目的とした鉄筋コンクリート構造物の設計方法, 安全工学 Vol. 23, No. 2, 94, 1980
- 13) J. Takeda, Crashworthiness of Concrete Structures Subjected to Impact or Explosion, Int. Conf. Structural Impact and Crashworthiness, Imperial College, London, 1984
- 14) J. Takeda, H. Tachikawa, Deformation and Fracture of Concrete Subjected to Dynamic Load, ICM 1, Kyoto, Vol. IV, 267, 1971
- 15) J. Takeda, Strain Rate Effects on Concrete and Reinforcements, and Their Contributions to Structures, Mat. Res. Soc. Symp., Vol. 64, MRS, Boston, 15, 1986
- 16) C. E. Inglis, Engineering, 95, 415, 1913
- 17) J. Takeda, K. Fujimoto, Basic Concept on the Responses of Structural member and Structures Under Impact or Impulsive Loadings, RILEM, Int. asso. Symp. S1:13, 1976, Berlin BAM
- 18) 竹田仁一, 高本秀幸, 谷川達彦, 鉄筋コンクリート構造物の大歪を対象とするボンド応力とその耐爆、耐衝撃性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集 9-2, 417, 1987
- 19) 竹田仁一, 河村隆, 爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形、破壊の定量的予測, 工業火災, 46, No. 4, 182, 1985
- 20) J. Takeda, H. Komoto, T. Tanigawa, Rate Effects on Crack Extension in Mode II Specimens of Mortar, Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy, Sendai, 368, 1988