

[189] 衝撃的载荷による鉄筋コンクリート構造物の変形、破壊の特性

正会員○竹田 仁一（熊本工業大学）

正会員 高本 秀幸（熊本工業大学）

谷川 達彦（熊本工業大学）

1. はじめに

堅固な物体の衝突または爆発などのいわゆる衝撃的载荷に対しても安全を確保しなければならないいくつかの構造物がある。原子力発電所施設、重化学工業施設等である。これらの構造物（耐爆、耐衝撃構造物）を対象とした衝撃実験は、最近、わが国でも行なわれるようになった。しかし、諸外国も含めこの分野の研究状況を見ると、ようやく研究は第2段階に進み、実用化への道を歩みはじめたようである。もっとも従来も実用化への試みはいくつかなされたが、それらは何れも臨時、応急策の色彩が強い。

構造物の耐爆、耐衝撃設計は当然のことながら衝撃的载荷による構造物の応答の特性にもとづいて行なう必要がある。この論文は従来の研究をとりまとめ、衝撃応答の特性について述べたものである。

2. 衝撃及び衝撃現象の特徴

衝撃は極く短時間に終了する加力現象であり、通常の場合多数回繰り返えられることは少い。衝撃をうける物体をいま構造物とすると衝撃を与えるものは衝突する運動体であり、落石であり、時には土石流のような流動体である。また、空中爆発のように衝突するものが気体である場合もあるが、このときは同時に熱的な作用も加わる。¹⁾

衝撃研究の歴史は長く、ニュートンも実験を行なって、いくつかの材料の反発係数を求めたことが伝えられている。¹⁴⁾しかし、以下に述べる現在問題になっている事項についての研究はそれ程長くはない。以前の研究では、力の作用時間が短いことから、力の効果を力積と考え、積分形で表現した。運動方程式の解はその力積及び初期条件を含む形で求められ、構造物の全体的な弾塑性応答（第2次応答）が得られる。これについては Goldsmith²⁾が詳しく述べている。

ところが研究が進むにつれて、衝撃による構造物の破壊は衝撃の作用時間中にも発生することが明らかとなり、その解明のためには力積という考え方を捨てて、衝撃の作用時間を細分化することが必要になった。このことは計測装置及び計測技術の最近における急速な進歩によって可能となり、従来、応力波理論によって推定しただけであった微小時間内の応答を実験的にも検証できるようになった。このようにして、もうひとつの衝撃応答、局部的応力波応答（第1次応答）の具体的取扱いが可能になるとともに、次の二つの事柄が明らかになった。そのひとつは、上述の第1次、第2次応答はそれぞれ外力の衝撃性と高速性を別々に反映して独立に消長し、これらの混合した複雑で多様な衝撃応答が形づくられることである。もうひとつはこれら二つの応答は速度効果の影響で変化した構成方程式によって支配されることである。⁴⁾これらの結果を基礎として、衝撃応答の構成内容とその支配要因がすべて明らかになれば、任意の衝撃に対する構造物の応答を定量的に予測し、衝撃を対象とした構造物の設計を行なうことができる。

ところで構造物に被害を与える衝撃には種々のものがあり、荷重がゆるやかに増加するものから急激に増加する（荷重の高速性が大きい）もの、または荷重増加の傾向（荷重の衝撃性）が激しいものからそうでないものまで存在する。設計はこれらすべてに対処する必要がある。従って、そのために必要な材料定数等は二つの応答の何れにも、また広範囲のすべての衝撃に有効に適用出来るものでなければならない。逆にいえばそのようなものでなければ衝撃に関連する真の材料定数とはなり得ないことになる。また、衝撃応答が二つの応答の混在したものであることから、これらの何れをも満足する相似則をつくることは殆ど不可能であることも理解される。以前よく行なわれたように、衝撃による構造物の応答を作用荷重の最大値（衝撃荷重とよばれた）だけで推定することは、力積で評価することが十分でないと同様、必ずしも正しい答は与えない。また、衝撃実験では通常試験体を含む系の振動は避けられないので、実験結果の評価にはその影響の検討が必要であることもこの種の実験の特徴としてあげることができる。なお、実用的な設計方法を研究する過程で、もうひとつ解決しなければならない問題がある。それは衝撃に対する構造物の抵抗要素が静的なものと同一でない場合があることである。このことについては別に報告する。

3. 鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答の特徴

3. 1 衝撃応答

図-1は鉄筋コンクリート造擁壁の鋼球（重量 1230 kgf）による衝撃実験で測定した水平鉄筋の歪（引張歪を上方にとって）の時間的変化で、擁壁平面図のゲージを貼り付けた位置に描いている。図のゲージG1

とG6及びG3とG8はそれぞれ表、裏の位置にあり、G1、G6とG3、G8とはそれぞれ75cm隔っている。衝撃点はG1より下5cm、3cm側方の表面の位置である。この図で衝撃点に近いG1、G6は衝撃直後から大きな歪を記録し、応答が始まることが知られる。実験後、衝撃位置には直径約29cm、深さ約3cmのめりこみが見られたがこのめりこみの大部分は衝撃直後の応答で発生したと考えられる。また、衝撃位置に発生したこの応答が減衰しながらG3、G8の位置まで伝播していることが記録から知られる。しかし、これらの位置の変形が大きくなるのはかなり時間が経過した後であることもわかる。G3、G8のこの大きな振動は鋼球の速度

(着速約 10m/s) を考えると、衝撃面(既にめりこみの大部分は終了している)を介して運動中の鋼球が擁壁を強制的に変形させた結果であることがわかる。この変形で表面、裏面にともに引張り歪が生じていることは擁壁が既に膜変形に入っていることがわかる。しかし、G3、G8の初期の記録は表、裏面それぞれ異符号の歪(G3の歪は小さいが)を示しており、僅かに曲げ振動をしていることが知られる。このことは図-2でより明瞭に見ることができる。これは無筋及び鉄筋コンクリート梁模型(8cm(衝撃面)×12cm×55cm, スパン 50cm)の上面中心に鋼柱(4cm×4cm×120cm)の一端を石膏で接着し、鋼柱の他端に衝撃を加えて行った実験の、中心から12.5cm隔った表面及び裏面の位置における材軸方向の歪を示している。G1は表面(載荷面)、G5は裏面で、歪は上方を引張りとしている。なお、この図は鉄筋コンクリート梁の場合である。

図から衝撃直後の極く短時間を除いて、その後は明らかな曲げ振動を生じていることが知られる。この振動は鋼柱の押し出しによって生じており、波形は複雑であるが、周期は梁の固有周期(1.93ms)に概 近い。

このように衝撃点から離れた位置では全体的な曲げ振動(第2次応答)の発生が認められる。一方、この実験の衝撃点近傍の応答(参考文献5)の図3の参照)はこれと明らかに異なっており、衝撃点真裏のゲージG3は衝撃による応力波が到達した直後、急激に増大する引張り歪(クラックの発生を示している)を記録している。このことは鉄筋の有無にかかわらず全試験体で認められたが、何れの場合も、図示したように鋼柱の移動開始以前に起きており、鋼柱から伝達される応力波だけによる応答(第1次応答)であることがわかる。この応答にともなう裏面の変形(裏面剥離の発端)と鋼柱移動の開始時点の測定例も図-2に示した。前述のG1、G5の頭初の振動は衝撃点で発生した応力波の伝播によると考えられる。

第1次、第2次の二つの応答の存在は現在までのすべての衝撃実験で認められた。^{6,7)}これらの応答の理論的解析もいくつか行なわれ、実験値をかなりよく説明している。しかし、このような解析を一般的に行なうにはいくつかのデータが必要である。それは、これらの応答を支配する材料の構成方程式(応力・歪曲線)及びコンクリート中の応力波減衰に関する資料等である。まず、構成方程式に影響を与える速度効果について述べよう。

3. 2 速度効果

図-1中のG1の波形は衝撃点に近い水平鉄筋(SD-35-10D)の歪であり、明確な降伏を記録している。しかし、その降伏歪は3400 μ に達しており、静的降伏歪をはるかに超過している。鉄筋のヤング

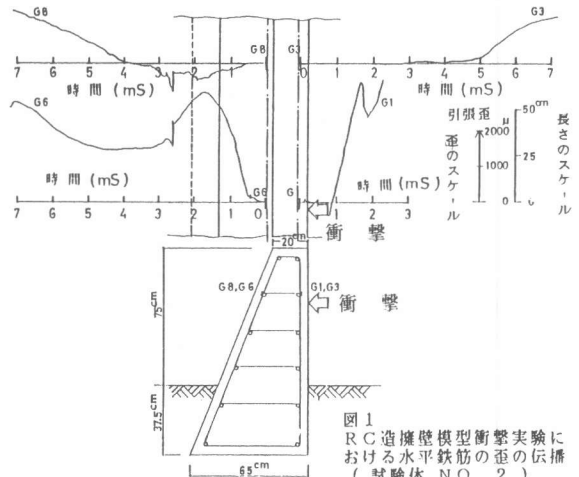


図1 R C造擁壁模型衝撃実験における水平鉄筋の歪の伝播(試験体 NO. 2)

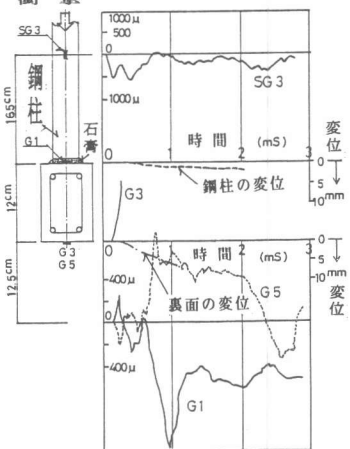


図2 鉄筋コンクリート梁模型衝撃曲げ実験で測定した歪波

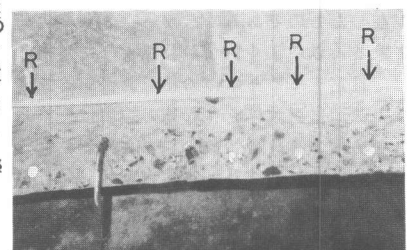


写真1 下方の爆発によって高速にせん断された鉄筋コンクリート床スラブ Rはせん断された鉄筋の位置を示す

係数は高速変形の場合も静的な値と殆ど変わらないから、降伏応力（上位降伏点応力）もまた、静的な値を超過していることが知られる。このことは構造物に発生する衝撃変形が静的な値と異なる構成方程式、つまり速度効果をうけた構成方程式によって支配されることを明確に示している。

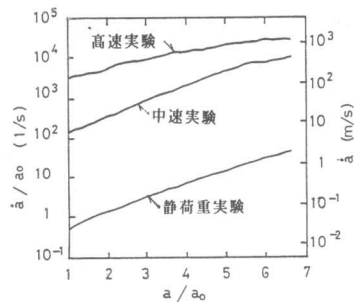
速度効果は材料の変形速度による物性の変化であり、クリープは変形速度の小さい範囲の同種の現象である。ここで取扱うのは変形速度の大きな範囲であるが、以前は時として、材料の弾性的性質による動的応答と混同されたこともあった。しかし、全く別の現象である。材料の速度効果は（i）応力・歪曲線に対する速度効果及び（ii）破壊限界に対する速度効果の二つに分けられる。これらについては既に報告した。^{(10), (4)}

多くの材料の応力・歪曲線に対する速度効果は通常、変形速度が大きな程、ある歪に対応する応力も大きく、構造設計にはむしろ有利な性質と考えることができる。これに反し、もうひとつの破壊限界に対する速度効果は衝撃的载荷をうける構造物にときとして致命的な被害を与えることがある。例えばコンクリート高速せん断実験でせん断速度が 20cm/sec を超過した場合、破壊時の歪が静的载荷時の値の 1/2 程度まで減少し、脆性的に破壊する。⁽⁴⁾ これはコンクリートだけでなく、鉄筋⁽¹¹⁾でも、また鉄筋コンクリートでも発生する。写真-1 は下部におけるガス爆発により鉄筋コンクリート床スラブが上載間仕切（ブロック造）の端部で高速せん断された例である。写真の白い点列はせん断された鉄筋のなめらかな切口を示している。

このような衝撃による脆性破壊は载荷中に生じたクラックのいくつかが全断面を高速に伝播した結果発生すると考えられるので、コンクリート中の先在クラックの高速伝播実験を行なった。⁽¹²⁾ これは材軸の中央に軸に垂直な先在クラックを設けたコンクリート版に種々の速さの引張荷重を加え、荷重、クラック長さ、クラック近傍の歪の時間的変化及びクラックが拡大を開始する時点と測定したものである。この実験から载荷速度が増加するに従ってクラックの伝播速度も増大し、高速载荷実験（载荷速度 $5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^6$ kgf/s）では 1000m/s にも達する伝播速度が測定された（図-3）。この実験結果はコンクリート中のクラック伝播速度にもまた速度効果が生ずることを示しているが、このことは若干の仮定は入っているものの、動的破壊理論の結果にも支持されることを次のように示すことができる。上述の実験によると、先在クラックが拡大を開始する時点の荷重は载荷速度とともに増大することが認められたので、先在クラックが拡大を開始する直前の静的応力拡大係数 K_s もまた、载荷速度の大きな場合程、大きな値になると結論することができる。一方先在クラックが突然動的に拡大し始める時点におけるエネルギー解放率比 $g(v)$ の値は Freund⁽¹³⁾ の理論的研究によると、

$$g(v) = \frac{G(\ell, v)}{G(\ell, 0)} = \frac{E\Gamma}{(1-\nu^2)K_s^2} \dots (1)$$

で与えられる。ただし、平面歪の場合である。ここで、 ℓ はクラック長さ、 V はクラック拡大速度、 $G(\ell, V)$ は動的エネルギー解放率、 $G(\ell, 0)$ は静的エネルギー解放率、 E はヤング係数、 Γ は単位破壊エネルギー、 ν はポアソン比である。 $g(v)$ は理論的に図-4 で与えられ、クラック拡大速度が大きい程小さな値になることが知られている。従ってもし E 、 Γ 及び ν が载荷速度によってあまり変化しないとすると上に述べた K_s の傾向と式（1）から高速载荷時の $g(v)$ の値は小さくなり、従って図-4 からクラック拡大速度も大きくなることになる。



2a: クラック長さ

2a₀: クラックの初期長さ

$\dot{a} = da/dt$

図3 コンクリート中のクラック高速拡大実験におけるクラック長さ a とクラック拡大速度 $\dot{a}$ の関係

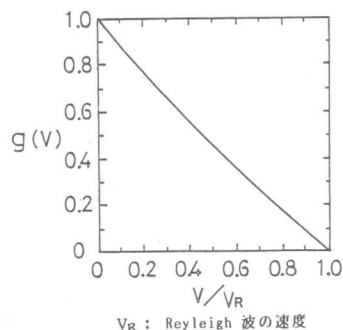


図4 クラック拡大速度 V による動的エネルギー解放率比 $g(v)$

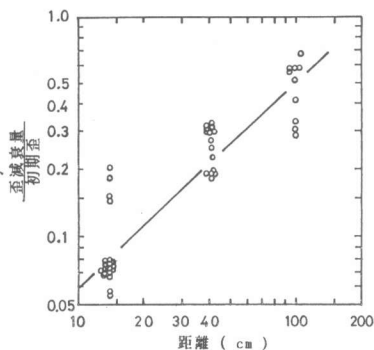


図5 コンクリート角柱衝撃実験から求めた歪波の減衰

このようにコンクリート中のクラック拡大速度もまた速度効果をうけるとすると、前述の破壊限界に対する速度効果の、効果を与えるメカニズムは速度効果によってコンクリート中のクラック拡大速度が変化することであると考えることができる。この破壊限界に対する速度効果についてはまだ多くの問題が残されているが、耐爆、耐衝撃設計方法開発のためには是非解決しなければならない問題である。このようなことから昨年12月、ボストンにおいてこのためのMRSシンポジウムが開かれた。

なお、前述のように速度効果は第1次、第2次の両方の応答に現われるが、これを実験的に求めるには応力波の発生を極力抑制した高速載荷重によらなければならない。変動荷重または応力波が混在する場合は速度効果だけを分離することは殆ど不可能だからである。

3.3 応力波減衰

第1次応答は衝撃によって構造物中に発生する応力波の伝播、反射重複等によって発生するが、その予測にはコンクリート中の応力波の減衰に関するデータが必要である。しかし、これを実験的に求めるのはかなり困難である。それは測定用ピックアップに問題があることと、反射波の混入する以前の応力波だけから求めなければならないからである。コンクリート角柱(4cm×4cm×40cm~120cm)の軸方向衝撃実験の結果から求めると、角柱中の歪波(はじめの歪を $\epsilon(\mu)$ とする)が $\Sigma(\mu)$ 伝播するときに生ずる減衰 $\Delta\epsilon(\mu)$ は、

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = 4.67 \times 10^{-3} \times \Sigma^{1.06} \quad \text{-----} \quad (2)$$

で与えられることが知られた(図-5)。歪波が3次元方向に伝播する場合は減衰は更に大きくなる。

4. 特異な応答

鉄筋コンクリート構造物に特有な衝撃応答のひとつにボンド応力分布の変化がある。図-6はコンクリート角柱(10cm×10cm×40cm)の中心軸に埋込んだ異形鉄筋(SD-35-D10)引抜実験の結果で、引拔力(図の右の方に引抜いた)の増大にともなう鉄筋の歪分布の変化を静的載荷の場合と高速載荷の場合を比較して示している。この図によると高速載荷の場合、ボンド破壊(一点鎖線で示している)に達するまで鉄筋の歪は先端(構造物中の先在クラックに相当する)からせいぜい20cmの間に分布しており、静的載荷の場合と異なる傾向が見られる。このことはボンド応力が最終的には鉄筋のリブとそれに接するコンクリートとの支圧に依存することを考えると、この支圧に対する速度効果と考えることができる。この現象は、衝撃的載荷をうける鉄筋コンクリート構造物が時として脆性的破壊を惹起する原因のひとつと考えられる。

鉄筋コンクリート構造物に見られるもうひとつの特異な応答には、コンクリート中の鉄筋の高速変形がある。高速に変形する鉄筋の上位降伏点応力は、前述のように著しく増大するが、その直後、応力は下位降伏点応力まで急激に低下し、構造物の振動を引き起こすからである。上位降伏点応力と下位降伏点応力との差は変形速度の増加とともに増大することが知られている。

5. 結論

- (1) 以前は衝撃を力積と考え、応答も全体的な弾塑性応答(第2次応答)だけを考えていた。しかし、衝撃直後、衝撃位置に発生する局所的応力波応答(第1次応答)も無視できない。
- (2) これら二つの応答は何れも速度効果をうけた構成方程式に支配される。その効果によって高速せん断等の脆性破壊を生ずることがあり、またコンクリート中のクラックを高速に拡大させることもある。
- (3) 衝撃的載荷を対象とする鉄筋コンクリート構造物の設計はこのような衝撃の特性及び荷重の広範囲の衝撃性と高速性を考慮して行なわなければならない。

【参考文献】

- 1) 竹田外;工業火災協会誌第46巻、NO.4、1985、2) W.Goldsmith; Impact, Edward Arnold Ltd,
- 3), 4) J.Takeda et al.; RILEM Symposium, S1, S2, Berlin, BAM, 1982, 5) 竹田外; 建築大会, 東海, 昭60, P.375~376, 6) 竹田外; セメント技術年報35, 昭56, 7) J.Takeda et al.; ICM-2, Boston, 1976
- 8) J.Takeda et al.; ICM-3, Cambridge, 1979, 9) J.Takeda et al.; ISIDLIE, Beigin, 1986
- 10) J.Takeda et al.; ICM-1, Kyoto, 1972, 11) 竹田外; 建築大会, 北海道, 昭44
- 12) J.Takeda; MRS Symposium on Rate Effect, Boston, 1985, 13) L.B.Freund; J.Mech.Phys.Solids, 20, 1972
- 14) 藤原邦男; 力学, 東大出版

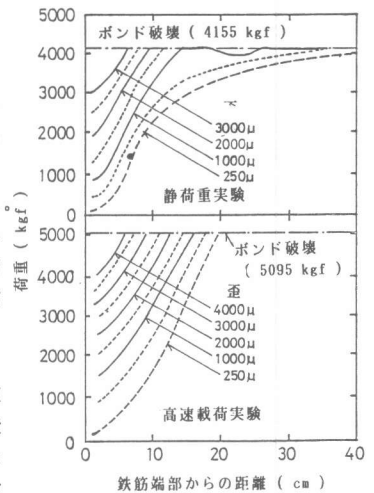


図6 コンクリート中の鉄筋引抜実験における鉄筋の歪分布(載荷速度による変化)