

論文

[1050] コンクリートの破壊過程に關与する速度効果

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. まえがき

この研究は地震、爆発、落石衝突等の衝撃的外力を対象とする鉄筋コンクリート構造物の安全設計に關する筆者等の継続研究として行われたものである。この研究の緊急に解決しなければならない問題のひとつは、鉄筋コンクリート構造物に発生してしばしば大被害をもたらす脆性破壊の防止であり、筆者等はこれを動的破壊力学上の問題としてその性質、発生メカニズム等について考察を行った〔1〕。脆性破壊について、もうひとつ知らなければならないのはその発生の可能性の予測である。この論文はそのための試みであり、次の観点にもとづいている。

衝撃的外力によって構造物に発生する応答の共通の特徴は速度効果 (rate effects) が発生することであり、上述の脆性破壊も鉄筋コンクリート構造物の破壊過程に出現する速度効果のひとつである。破壊過程の開始を応力が最大応力に到達した時点とすれば、その応力と歪は既にその後の過程を決定している筈である。従って、以前報告〔2〕した、コンクリートの歪速度効果のうちの第2の速度効果 (破壊限界に対する速度効果) を詳細に再検討する必要がある。もちろん第1の速度効果 (応力上昇過程に影響を与える速度効果) も破壊過程に接続する過程として検討を加えなければならない。このような検討の結果、以下に述べる脆性破壊の発生可能性予測のためのひとつの方法が見出された。

2. コンクリートに発生する速度効果

静的載荷と動的載荷の最もはっきりした違いは、前者は荷重の増加が極めてゆるやかであり、従って載荷体と試験体との間では熱力学的な等温平衡状態を保ったまま載荷され、外力の仕事はすべてヘルムホルツの自由エネルギーの変化に転化する。内部にはもちろん応力波は存在しない。

しかし、衝撃的載荷では構造物の変形はもはや等温的ではなく断熱的であり、振動と応力波をとまなう。構造物が爆発に遭遇すると更に加熱と場合によっては化学反応が加わる。

構造物のこのような動的変形で認められる構造材料の力学的性質の変化 (速度効果 rate effects) は、明らかに熱力学的な効果である。この立場からかつて Freudenthal〔3〕は統計力学によつて速度効果の物性的な説明を与えた。それによると、材料の塑性変形は構成分子の平衡位置からの移動であり、それを生ずるためには分子は課せられたポテンシャルエネルギー障壁 Q を飛び越さなければならない。従って、載荷で与えられた活性化エネルギー ϵ_s によって加力方向へ移動する分子の単位時間あたりの数 u は統計力学によつて次のように表される。

$$u = C_1 (kT/h) \exp(-Q/nRT) \sinh(\epsilon_s/nRT) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで C_1 は常数、 k はボルツマン定数、 h はプランクの定数、 R は気体定数、 T は絶対温度、 n はモル数である。

そこでこの理論をコンクリートの高速圧縮実験〔2〕に適用する。実験中载荷によって加えられた仕事のうち、弾性歪エネルギーだけが回復可能なエネルギーとして蓄積され、その ξ 乗が上述の活性化エネルギーになると仮定すると、コンクリートの初期コンプライアンスを C_i 、応力を σ として、 $\varepsilon_e = (C_i V \sigma^2 / 2)^\xi$ となるから、これと式(1)の $\sinh$ を近似化して次式が得られる。

$$u = C (\sigma^2)^\xi, \quad C = (C_i C_i^\xi V^\xi / 2^{\xi+1} n h N) \exp(-Q/nRT) \dots (2)$$

ここで V は容積、 N はアボガドロ数である。(2)式の単位時間当たりの分子移動数 u と圧縮歪の増加速度(歪速度) $\dot{\varepsilon}$ は直接的に関係し、それが線型であるとする(2)式から $\dot{\varepsilon}$ と σ は両対数座標軸上の直線で表される筈である。実際に実験の結果を描いた図-1では、歪の小さい範囲及び歪は大きいが歪速度の比較的小さい範囲では、バラツキは大きいが上述の関係が概ね認められる。しかし、歪と歪速度の大きな領域では直線関係から大きく外れてしまう。このことは上述の説明に使用された統計力学が熱的平衡状態を基礎としているのに対し、高速载荷実験ではこの条件が満たされないためであると考えられる。

一方、同じ実験の応力ゼロの時点から最大応力の時点までの平均応力増加速度 $\bar{\sigma}$ と平均歪速度 $\bar{\varepsilon}$ との関係を描いた図-2から明らかなように、両者の関係は実験の全歪速度の範囲($10 \mu/s \sim 3 \times 10^6 \mu/s$)にわたって直線関係が保たれている。従って、この図の示す関係(3)式)こそコンクリート高速圧縮実験の結果を表現するより基本的な速度効果の関係式と考えられる〔2〕。この実験に引き続いて行った多くの実験で同様の関係式が得られた〔4〕こともこの見解を支持している。その式は

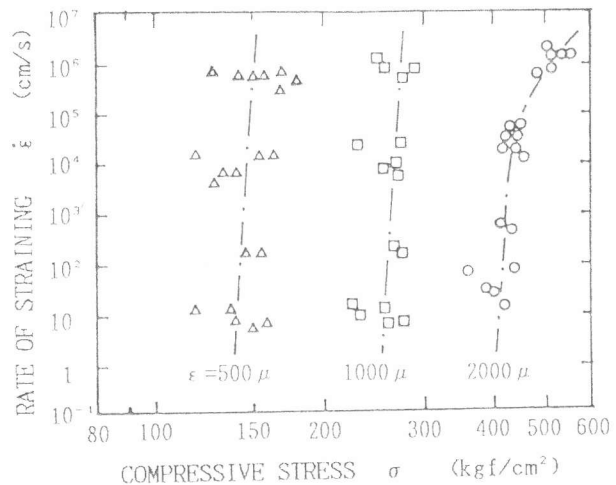


図-1 コンクリート圧縮実験における一定歪量(ε)の応力度(σ)と歪速度($\dot{\varepsilon}$)の関係(普通コンクリート W/C=0.55の場合)

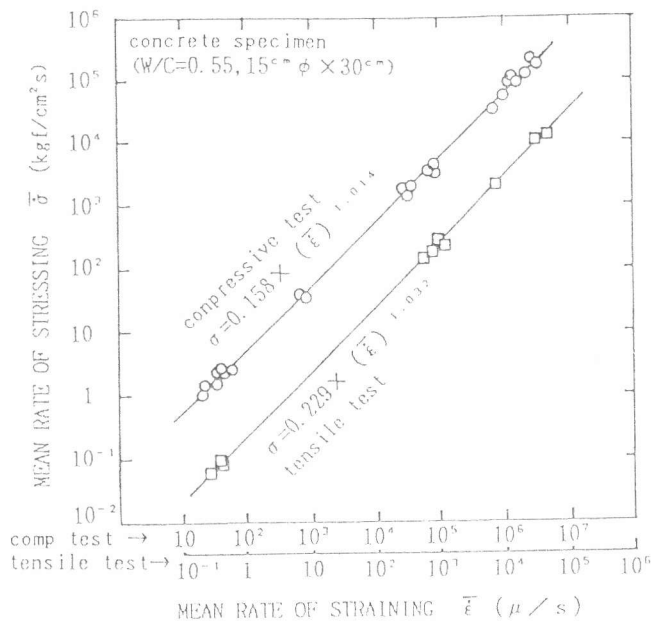


図-2 普通コンクリート圧縮実験及び直接引張り実験における平均応力増加速度 $\bar{\sigma}$ と平均歪速度 $\bar{\varepsilon}$ の関係(普通コンクリート W/C=0.55 の場合)

$$\bar{\sigma} = \alpha (\bar{\epsilon})^{\beta} \dots (3)$$

表1 各種実験より求めた係数 β の値

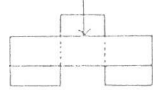
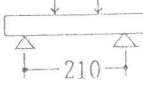
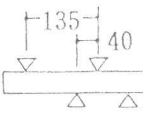
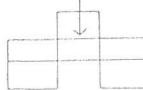
ここで α , β は係数で、 β は通常 1.0 より僅かに大きい (表1)。種々の実験で得られた係数 β の値を表1に掲げた。

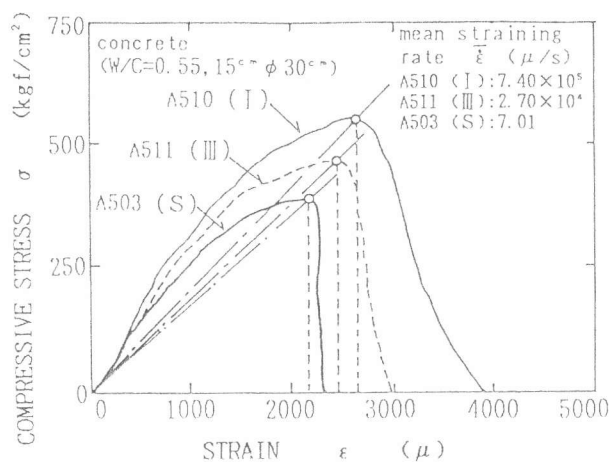
3. 破壊過程に關与する速度効果
式 (3) から

$$\bar{\sigma} / \bar{\epsilon} = \alpha (\bar{\epsilon})^{\beta-1} \dots (4)$$

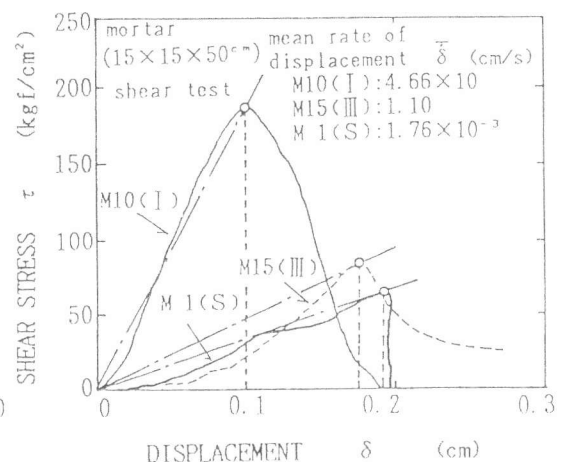
が得られるが、この式は実験の応力・歪曲線上の最大応力点と原点を結ぶ割線の勾配を与えている。従って、試験体の破壊は応力上昇過程で応力と歪の比がこの式で表される値に到達したときはじめて開始されることが知られる。また、 $(\beta-1)$ は正であるから、式 (4) から上記の割線勾配が ϵ の増加とともに大きくなることも知られる。

しかし、勾配が大きくなり、応力・歪曲線が変化してもその変化には図

実験の種類	試験体	係数 β	備考
普通コンクリート圧縮実験	W/C=0.40	1.018	川砂、川砂利
	W/C=0.55	1.014	川砂、川砂利
	W/C=0.70	1.007	川砂、川砂利
	W/C=0.59	1.020	川砂、碎石
普通コンクリート引張実験	W/C=0.55	1.032	川砂、川砂利 直接引張
普通コンクリートおよびモルタルせん断実験	W/C=0.55	1.037	15×15×50cm 
鉄筋コンクリート梁	W/C=0.55 (3-16φ) (3-16φ)	1.017	15×20×230cm 
	W/C=0.55 (3-16φ) (3-16φ)	1.035	15×20×230cm 
鉄筋せん断	SS-34 9φ	1.038	



(a)



(b)

図-3 コンクリート圧縮実験における応力・歪曲線 ((a) 図)。モルタルせん断実験における応力・変位曲線 ((b) 図)。載荷速度による違いを示す。

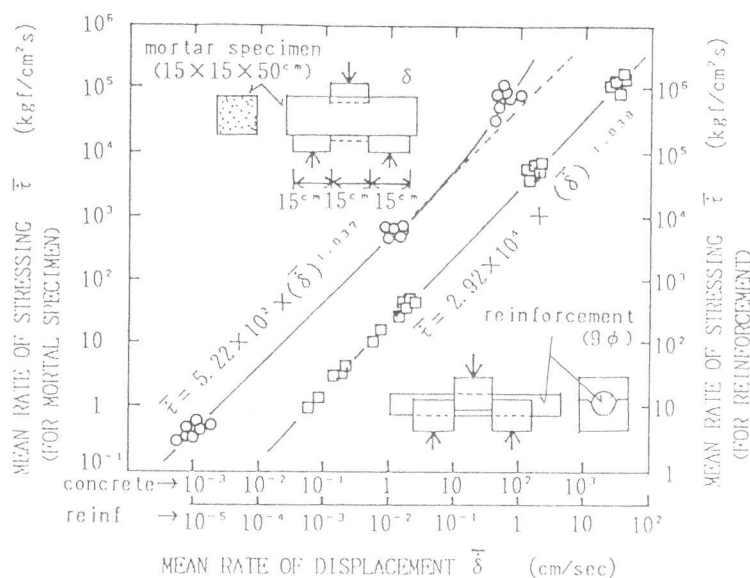
—3のように二つの場合がある。(a)図は最大応力(σ_m)に対応する歪(最大歪とよぶことにする。

ε_m で表す)が ε の増加とともに大きくなる場合(この例はコンクリート圧縮実験である)と、(b)図は逆に減少する場合(コンクリート及びモルタルせん断実験)である。(b)図は既に報告[4]したように脆性破壊を生じた場合であり、構造設計上大きな問題となる。

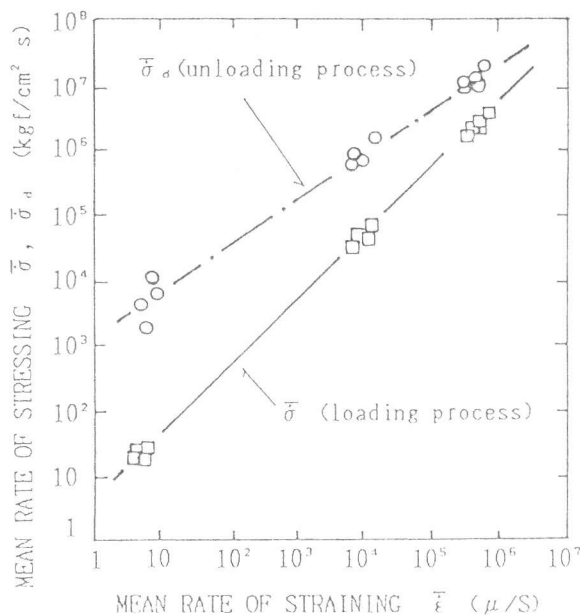
このとき $\bar{\sigma}$ と $\bar{\varepsilon}$ の関係は、上述の圧縮実験の関係(図—2)と異なり、図—4のように平均歪速度 $\bar{\varepsilon}$ の大きな領域で直線関係から外れてしまう。そして、このような場合の係数 β の値は常に大きく、1.03以上である。この図には鉄筋のせん断実験[4]も描いている。この場合も高速載荷で脆性破壊が発生したが、この図では直線関係を保っている。更に高速に載荷されたとき直線関係を外れるものと予想される。

また、図—3中の速度記号[S]と[I]では載荷速度が概ね $1:10^5$ であり、著しい違いがあるにもかかわらず応力・歪曲線が類似していることを考えると、それぞれの応力上昇過程における平均応力増加速度と下降過程(破壊過程)における平均応力減少速度との間には符号を別にして大差ないことがわかる。高速載荷の場合、破壊開始から破壊終了ま

での時間は当然短くなるが、このとき平均応力上昇速度 $\bar{\sigma}$ と平均応力減少速度の絶対値 $\bar{\sigma}_d$ はともに大きくなる(図—5)。ここで $\bar{\sigma}_d$ は最大応力に到達した時点から応力ゼロになる時点までの平均減少速度(絶対値をとる)である。高速載荷の場合、クラック拡大速度も大きくなることは動的破壊力学からも説明することができる[5]が、コンクリート及びモルタルせん断実験の高速載荷の場合 σ_m の増加は更に大きく、 ε_m の増加はいっそう小さくなって図—3(b)のようになるこ



図—4 普通コンクリートおよびモルタルせん断実験及び鉄筋せん断実験における平均応力増加速度と平均せん断変位速度の関係



図—5 普通コンクリート圧縮実験における荷重上昇過程及び降下過程の平均応力速度と平均歪速度との関係

とは図-4の関係からも知られる。従って、 $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}$ の関係における係数 β の値によって脆性破壊発生の可能性を予測することができる。

4. コンクリート破壊力学実験に現れる速度効果

上述の破壊限界に影響を与える第2の速度効果は式(3)、(4)で表されるが、最大荷重に到達した直後に始まる破壊過程では、試験体に既に発生している小クラックが急速に不安定拡大し、もし、積極的にこれを拘束する機構がない限り、自動的に全体の破壊を引き起こすのであるから、式(3)、(4)は上述の最大応力以降の破壊過程全体の条件を与えると考えることができる。またこれらの式は破壊力学上の破壊靱性と同様の条件を与えるものと考えることができる。

筆者等が以前行ったモードⅠの動的破壊力学実験[5]の結果について、クラック不安定拡大直前の時点までの平均荷重増加速度 $\bar{P}$ と載荷方向の歪の平均増加速度 $\bar{\epsilon}$ の関係 sought

(図-6)。歪速度 $\bar{\epsilon}$ は試験体に予め設けた初期クラック線上のクラック先端より8 mm隔った位置にクラック線に垂直に貼り付けたゲージの出力から求めたものである。図から概ね図-2と同様の傾向(特に試験体Bの場合)が認められる。しかし、試験体Aの最大歪速度の場合は図-4のコンクリート及びモルタルせん断実験の場合のように、低歪速度で成立する傾向

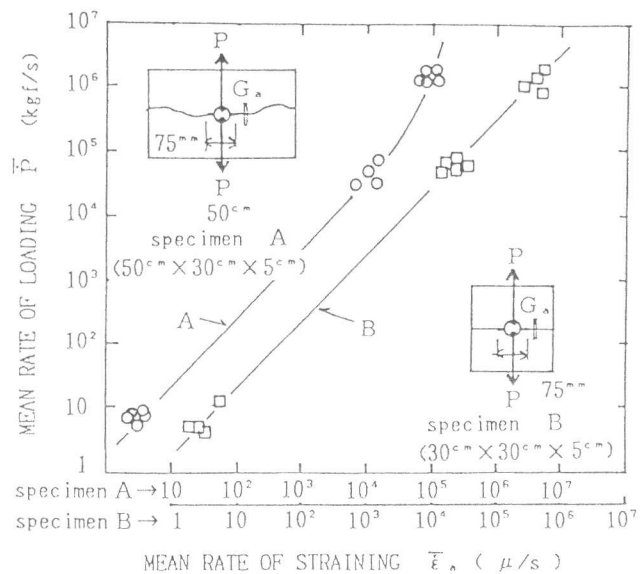


図-6 モードⅠモルタル試験体によるクラック拡大実験の平均荷重増加速度 $\bar{P}$ と平均歪速度 $\bar{\epsilon}$ の関係(最大歪速度の実験で拡大したクラックの形状も示す)

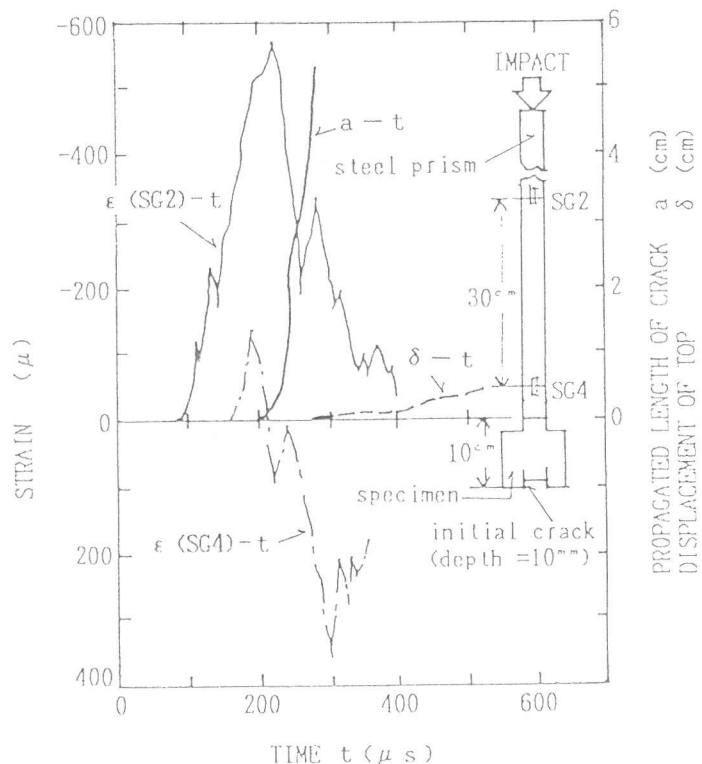


図-7 モードⅡモルタル試験体によるせん断クラック拡大実験測定記録例(衝撃実験の場合)。

から外れてしまう。この場合は図-6中に示したように拡大したクラックが曲がるが、これはE. H. Yoffe [6] によって既に明らかにされているように、クラックの高速拡大において試験体の変形加速度が無視できなくなるからであると考えられる。

図-6の示す関係は上述の破壊靱性を与える関係であるから、この図はコンクリートの破壊靱性が載荷速度によって大幅に変化することを示しているといえることができる。

筆者等の行ったモードⅡの実験[1]及び梁状試験体によるモードⅠの実験[7]は静荷重及び衝撃の二種の載荷速度だけで行っており、上述の場合と同様の検討を行うことはできない。しかし衝撃載荷の場合、クラック伝播は極めて速く、図-7上の、クラック拡大長さ a と時間 t の関係から拡大速度は1000 m/sに近付くことが知られる。なお、このクラック拡大が衝撃体の運動によって強制されたものでないことは図中の衝撃体の変位 δ と時間 t との関係から確かめることができる。現在のところ、これらの実験ではまだ確かめることはできないがおそらく図-6の試験体Aと類似の関係が見られると推定される。

5. 結論

1. コンクリート及び鉄筋コンクリート部材の各種載荷方法の高速載荷実験及び衝撃実験（動的実験）の結果によると、速度効果は必ず発生し、応答及び破壊は静的な場合と著しく異なったものとなる。動的破壊力学実験でも例外ではない。
2. 速度効果は熱力学的効果であるが、熱的安定状態を前提とする統計力学によって動的載荷実験の全領域の速度効果を説明することはできない。
3. コンクリートに発生する速度効果は2つに分かれ、第1は破壊発生以前の、第2は破壊発生から以後の応答に関係する。これらには鉄筋コンクリート構造物の設計に不利な速度効果もある。
4. 平均応力速度と平均歪速度との関係から第2の速度効果をうけた破壊限界の値が求められる。この式の係数 β の値から動的設計に不利な速度効果（脆性破壊）が発生する場合（ $\beta \geq 1.03$ のとき）を予測することができる。

〔参考文献〕

- 1) Takeda, J. et al.: Rate effects on crack extension in Model II specimens of mortar, Int. Workshop, Sendai, 386-392. 1988
- 2) Takeda, J. et al.: Deformation and fracture of concrete subjected to dynamic load, ICMI, 4, 267-277. 1971
- 3) Freudenthal, A. M.: The inelastic behavior of engineering materials and structures, John Wiley and Sons, 109-140. 1950
- 4) Takeda, J. et al.: Basic concept on the responses of structural members and structures under impact or impulsive loading, and other papers, RILEM-CFB-IABSE-IASS Int. Sym. Berlin, S1:13-18, S2:83-91, S3:185-187, S4:293. 1982
- 5) Takeda, J. et al.: Strain rate effects on concrete and reinforcements and their contributions. MRS Sym. Boston, 64, 15-20. 1985
- 6) Yoffe, E. H.: The Moving Griffith Crack, Phil. Mag. Vol. 42, 739-750, 1951
- 7) 高本, 竹田, 谷川: モードⅠモルタル供試体のクラック拡大に与える速度効果, コンクリート工学年次論文報告集 12-1, 179-184, 1990