

## (23) コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化 — 圧縮強度試験結果と引張強度試験結果 —

FORMULATION OF THE EFFECTS OF STRAIN RATE ON CONCRETE STRENGTH  
-TEST RESULTS OF THE COMPRESSIVE STRENGTH AND THE TENSILE STRENGTH-

實 見司\*, 白井 孝治\*\*, 伊藤千浩\*\*, 大沼 博志\*\*\*  
Koji JITSU, Koji SHIRAI, Chihiro ITO and Hiroshi OHNUMA

- \* (財) 電力中央研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
- \*\* 工博 (財) 電力中央研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
- \*\*\* 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

キーワード：ひずみ速度依存性、圧縮強度、引張強度、ホプキンソン棒法  
(strain rate effect, compressive strength, tensile strength, split hopkinson pressure bar method)

### 1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物が衝撃による外力を受けた場合、その応答解析において、構成材料の物性に対する載荷速度による時間依存性(ひずみ速度効果)の影響を適切に考慮する必要がある<sup>1)</sup>。コンクリート材料の動的強度に対するひずみ速度依存性に関する研究は、いままでに多く行われている<sup>2),3),4),5)</sup>。しかし、広範囲なひずみ速度にわたって、同一の条件のもとで取得されているコンクリートの動的データは少ないのが現状である。既に、寸法の大きいコンクリート試験体に対する Split Hopkinson Pressure Bar 法(以下 SHPB 法と呼ぶ)の原理を利用した試験法の適用とコンクリート圧縮強度のひずみ速度依存性に対する検討の一部を報告した<sup>6)</sup>。

本論では、コンクリートの動的な圧縮強度に及ぼす材令、温度およびコンクリートの配合の影響を検討した。また、ひずみ速度が $10^{-6} \sim 10^2$ /secの範囲における圧縮強度データを蓄積し、コンクリートの圧縮強度に対するひずみ速度依存性を検討した。さらに、ひずみ速度 $10^{-6} \sim 10^0$ /secの範囲において、引張強度試験を実施し、コンクリートの引張強度のひずみ速度依存性を検討した。

### 2. 試験方法

#### 2.1 圧縮強度試験

動的な圧縮試験には、比較的ひずみ速度が小さい領域( $10^{-3} \sim 10^{-1}$ /sec)を対象とする油圧式載荷装置と、より大きなひずみ速度( $10^0 \sim 10^2$ /sec)を得る SHPB 法の原理を利用した方式の載荷装置を有する高速載荷試験装置を使用した。試験装置は、同心軸上に並んだ油圧式載荷部または SHPB 方式載荷部、載荷を受ける入力棒(直径 100mm × 長さ 3000mm)、試験体受け部に位置する出力棒(直径 100mm × 長さ 3000mm)およびその下層の出力吸収棒と、それらを支持する本体フレームから構成されている。コン

クリート試験体は、入力棒と出力棒の間に設置される。

SHPB 方式載荷部は、入力棒の端部に衝突する打撃棒(直径 100mm × 長さ 1000mm)をゴムばねの張力で加速させる機構である。打撃棒の載荷最大速度は、20m/sec である。

SHPB 法を適用した圧縮強度試験の概要を図-1に示す。打撃棒を入力棒へ衝突させ、その衝突で入力棒内に発生する応力波により、試験体に動的な負荷を与える。矩形応力波によるひずみは、入力棒と出力棒に取り付けられたひずみゲージにより計測され、これにより、試験体の応力等が求められる。試験体の平均応力、平均ひずみ速度および平均ひずみは、一次元波動論に基づき、式(1)~(3)で表される。

$$\bar{\sigma}(t) = \frac{E}{2} \{ \epsilon_1(L_2, t) + \epsilon_R(L_2, t) + \epsilon_T(L_2 + L_S, t) \} \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}(t) = \frac{c}{L_S} \{ \epsilon_1(L_2, t) - \epsilon_R(L_2, t) - \epsilon_T(L_2 + L_S, t) \} \quad (2)$$

$$\epsilon(t) = \frac{c}{L_S} \int_0^t \{ \epsilon_1(L_2, t) - \epsilon_R(L_2, t) - \epsilon_T(L_2 + L_S, t) \} dt \quad (3)$$

ここで、E：入力棒・出力棒のヤング率、 $\epsilon_1$ ：入射波によるひずみ、 $\epsilon_R$ ：反射波によるひずみ、 $\epsilon_T$ ：透過波によるひずみ、t：時間、c：応力波の伝播速度、その他の記号は、図-1に示すとおりである。入力棒には、ひずみゲージを

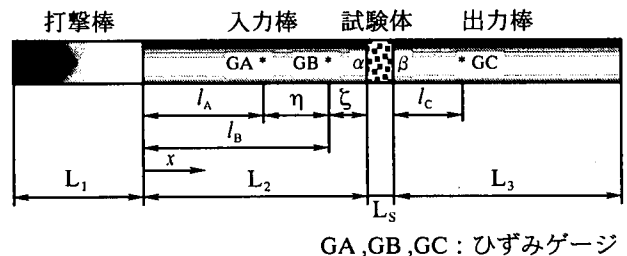


図-1 Split Hopkinson Presseure Bar 法による試験の概要

試験体の近傍に2枚貼り、両者の計測値を用いて入射波と反射波に分離する手法を使用した。

油圧式載荷部は、作動アクチュエータ、バランスアクチュエータ、ロードセルおよび耐圧盤で構成されている。載荷時には、バランスアクチュエータ側の油圧を解放し、作動アクチュエータの油圧をロードセルに組み込んだ耐圧盤に送り、入力棒の端部に衝突させる。載荷最大荷重は490kN、載荷最大速度は3m/secである。

比較的ひずみ速度が小さい領域 ( $10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ ) では、応力波の影響を無視できるので、圧縮強度の最大値は、入力棒および出力棒で測定されたひずみの応答の最大値に鋼棒のヤング率を乗じて算出した。

## 2.2 引張強度試験

一般に、コンクリートの静的な引張試験として割裂試験が実施されるが、ひずみ速度依存性を考慮した引張試験では、割裂試験の妥当性は明確になっていない。そこで、引張強度に及ぼす試験方法の影響を検討するために、引張強度試験として、割裂試験と Chen が提案した Double Punch Test<sup>7)</sup> (以下、押抜き試験と称す) の2種類の試験方法を採用した。

引張強度試験のうち、押抜き試験の概要を図-2に示す。押抜き試験は、圧縮強度試験と同じ形状のコンクリート試験体に、その中心軸が一致するように上下に設置された鋼製ポンチを介して荷重を与える方法である。押抜き試験による引張強度は、Chen の完全塑性の極限解析理論<sup>8)</sup>を用いて、外力による仕事率と内部散逸仕事率を等価と置くことにより、次式で求められる<sup>7)</sup>。

$$f_{tp} = \frac{1}{\pi(1.20RL - a^2)} P \quad (4)$$

ここで、 $f_{tp}$ : 押抜き試験による引張強度、P: 破壊時の荷重、R: 試験体の半径、L: 試験体の長さ、a: ポンチの半径である。

ひずみ速度  $10^{-2}/\text{sec}$  以下の引張強度試験では、変位制御型サーボ式アクチュエータを有する引張強度試験装置を使用した。ひずみ速度が  $10^{-2}/\text{sec}$  より速い試験では、2.1節に述べた高速載荷試験装置を使用した。

## 2.3 縦波の三次元分散性の低減

コンクリートは骨材とセメントの複合材料であるため、試験体は、ある程度の大きさが必要となる。一方、入力棒および出力棒の直径を太くした場合、棒を伝播する縦波の三次元分散効果 (Pochhammer-Chree 効果) を考慮しなければならない。この効果では、入力棒を伝播する縦波に高周波成分が重畳したり、半径方向の慣性力による入力棒面内の変位分布が様でなくなる現象が生じる。そのため、SHPB 法による試験結果に影響を与える。この問題を解決するために、打撃棒と入力棒の間に緩衝材を挿入し、縦波の三次元分散効果の低減を図った<sup>6)</sup>。

図-3に緩衝材 (厚さ3mmのポリプロピレン板) を使

用した入力棒面内のひずみ分布の時刻歴波形を示す。棒面内のひずみ分布は、試験で計測された入力棒表面のひずみに、Pochhammer-Chree の式の解から得られる任意の棒半径におけるひずみ分布の比を乗じて求めた。なお、図中の  $(r_0/a)$  は、棒面内の径方向位置を示す。負荷の立ち上がり時刻 0.2msec~0.4msec の入力棒面内のひずみ分布は、最大差が3%以内に緩和され、ひずみに含まれる高周波成分が低減された。

次に、図-4に試験体内に発生する応力の時刻歴波形を示す。緩衝材の使用した場合、試験体の応力が、コンクリート試験体内を縦波 (応力波) が数回往復した後にほぼ一様に収束しており、試験データとして有効な波形を示した。また、試験体応力のピークは、負荷開始後の約0.15msecで発生し、図-3で示された入力棒面内のひずみ分布が一様な負荷継続時間の0.2msec以内となった。

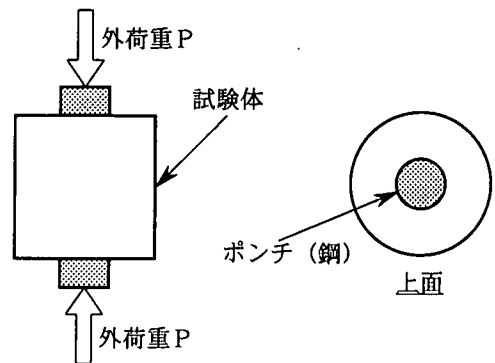


図-2 Double Punch Test (押抜き試験) の概要

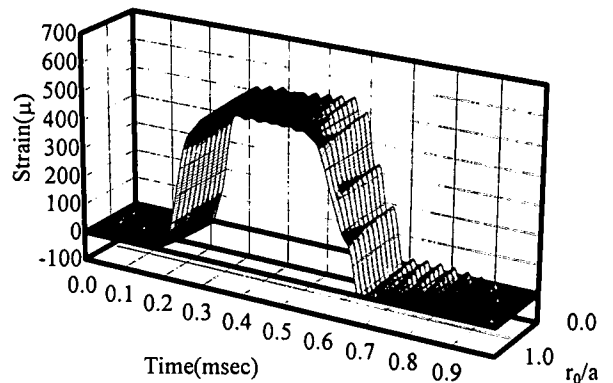


図-3 入力棒の面内ひずみ分布の時刻歴波形 (緩衝材使用)

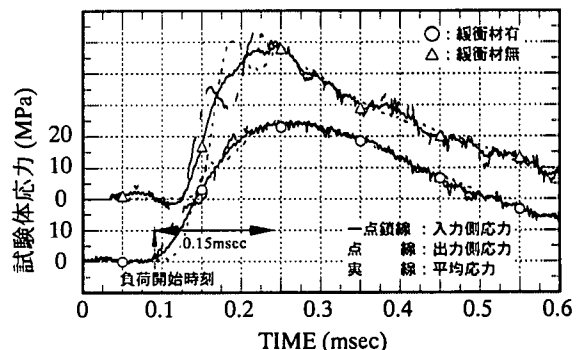


図-4 緩衝材が試験結果に与える影響

この結果から、棒内を伝播する縦波の分散性を低減して動的な試験データを得るために、緩衝材の使用が有効であることが確認された。

## 2.4 試験体

コンクリート試験体は、3種類の配合より作製した。コンクリートの配合および骨材の諸元を表-1ならびに表-2に示す。コンクリートの配合は、材令28日における圧縮強度が呼び強度となるように定めた。セメントには、秩父小野田(株)製の普通ポルトランドセメント(比重3.16)を使用した。また、混和剤には、減水剤としてポリリス No.70-250を使用した。圧縮強度試験の試験体は、直径80mm×長さ80mm、直径100mm×長さ100mmおよび直径100mm×長さ200mmの円柱とした。割裂試験では、直径150mm×長さ200mmの円柱を使用し、押抜き試験では、直径100mm×長さ100mmの円柱を使用した。

試験体は、コンクリート打設24時間後に脱型した。室温下で試験を実施する試験体は、試験前日まで水中20℃で標準養生(以下、標準養生試験体と称す)した。温度が高い試験体は、恒温恒湿器内に置き、温度および湿度(65%RH)を試験直前まで保持した。なお、試験体は、試験体端面の平行度が0.1mm以下となるように平滑に研磨した。

## 3. 試験結果と考察

### 3.1 圧縮強度

標準養生試験体について、ひずみ速度に対するコンクリートの圧縮強度を図-5に示す。図中の動的強度倍率は、コンクリートの配合、材令、温度、含水率を同一とした条

表-1 骨材の諸元

配合	骨材の種類	比重	吸水率	粗粒率
A	細骨材	2.58	1.61%	2.63
	粗骨材(25mm)	2.69	0.73%	6.62
B	細骨材	2.58	1.61%	2.63
	粗骨材(10mm)	2.65	1.19%	5.83
C	細骨材	2.60	1.56%	2.76
	粗骨材(25mm)	2.70	0.76%	6.62

表-2 コンクリートの配合

配合	呼び強度 MPa	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
A	24	63	48.4	18±2.5	4.5
B	24	65	50.5	18±2.5	5.0
C	35	65	50.5	10±2.0	4.0

配合	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
A	276	174	867	963	2.95
B	271	176	903	909	2.71
C	249	162	947	940	2.66

件における静的圧縮強度に対する動的圧縮強度の比である。コンクリート試験体の動的強度倍率は、ひずみ速度 $10^{-5} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ において緩やかに増加し、ひずみ速度 $10^0 \sim 10^1/\text{sec}$ を超えると、急激に増加することが確認された。また、動的強度倍率にコンクリートの配合の違いによる影響はみられなかった。

既に、筆者らは、コンクリートの圧縮強度のひずみ速度依存性として、次式を提案した<sup>6)</sup>。

$$\frac{f_{cd}}{f_{cs}} = 0.9783 + 0.0217 \times \left( \frac{\dot{\epsilon}}{3 \times 10^{-5}} \right)^{0.277} \quad (5)$$

ここで、 $f_{cd}$ :動的強度、 $f_{cs}$ :静的強度、 $\dot{\epsilon}$ :ひずみ速度である。ところが、式(5)の提案式は、本論で取得したひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ の動的強度倍率に対し、過小評価を与えている。そこで、ひずみ速度に対するコンクリートの動的強度倍率の回帰式を式(6)に修正した。

$$\begin{aligned} \frac{f_{cd}}{f_{cs}} &= 0.37 \times \log \dot{\epsilon} + 1.332 \quad \text{for } \dot{\epsilon} > 1.2/\text{sec} \\ \frac{f_{cd}}{f_{cs}} &= 0.07 \times \log \dot{\epsilon} + 1.355 \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 1.2/\text{sec} \end{aligned} \quad (6)$$

修正回帰式は、動的強度倍率の増加率が大きく変化するひずみ速度 $10^0/\text{sec}$ 付近を境に、2つの式で表した。なお、式(5)および式(6)の回帰曲線を図-5に示す。

試験体(配合B)の材令に対するコンクリートの動的

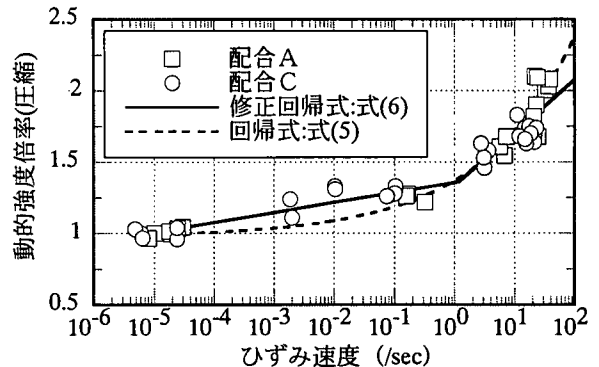


図-5 ひずみ速度と動的強度倍率の関係

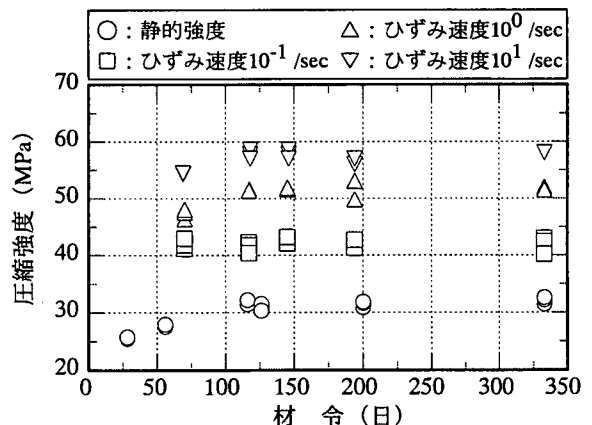


図-6 材令が動的圧縮強度に及ぼす影響

圧縮強度の変化を図-6に示す。材令約120日以降の各々のひずみ速度において、圧縮強度はほぼ一定となる。これより、動的圧縮強度に材令による顕著な影響がみられないことが明らかになった。

次に、配合Cのコンクリート試験体について、コンクリート試験体温度に対する動的圧縮強度を図-7に示す。高温下の試験体の動的強度倍率は、標準養生試験体（室温）の動的強度倍率より小さい。また、高温下のコンクリート試験体の動的強度倍率は、ひずみ速度  $10^{-1}/\text{sec}$  以下ではほぼ1.0であり、ひずみ速度  $10^0/\text{sec}$  を超えると、急激に増加した。さらに、 $90^\circ\text{C}$ のコンクリート試験体の動的強度倍率は、 $65^\circ\text{C}$ のものとはほぼ同等であった。

図-7には、コンクリートの動的強度に関するCEB/FIP Code<sup>4)</sup>の提案式および式(6)の回帰式も併せて示す。CEB/FIP Codeの提案式は、標準養生試験体で得られた動的圧縮強度の下限を包絡していることがわかる。

### 3.2 引張強度

配合Cの標準養生試験体について、ひずみ速度に対するコンクリートの動的引張強度を図-8に示す。図中の引張強度倍率は、コンクリートの材令、含水率および試験方法を同一とした条件における静的引張強度に対する動的引張強度の比である。また、図中には、CEB/FIP Code<sup>4)</sup>の提案式を併せて示した。ひずみ速度が速くなるにつれて、

動的引張強度倍率は増加することがわかる。特に、ひずみ速度  $10^1/\text{sec}$  を超えると、動的引張強度倍率は急激に増加する。また、ひずみ速度  $10^{-1}/\text{sec}$  以下において、試験で得られた動的引張強度倍率は、CEB/FIP Codeの提案式とほぼ一致している。さらに、試験で得られた動的引張強度倍率は、試験方法に依存しないことが明らかになった。

### 4. 結論

コンクリートの圧縮強度および引張強度のひずみ速度依存性に関する基礎データを取得した。また、圧縮強度に関して、ひずみ速度依存性を考慮した回帰式を修正し、コンクリートの配合、材令およびコンクリート温度の影響を検討した。

圧縮強度のひずみ速度依存性の指標とした静的圧縮強度に対する動的圧縮強度の比は、材令および配合に影響されず、コンクリート試験体の温度に影響を受ける。同じひずみ速度において、高温下の圧縮強度は、室温下の圧縮強度より低下する。また、ひずみ速度  $10^{-1}/\text{sec}$  以下では、高温下の動的圧縮強度は、静的圧縮強度とほぼ等しいことが明らかになった。

室温下における静的引張強度に対する動的引張強度の比は、圧縮強度と同様に、ひずみ速度が速くなるにつれて、増加し、ひずみ速度  $10^{-1}/\text{sec}$  以下でCEB/FIP Codeの提案式と一致した。

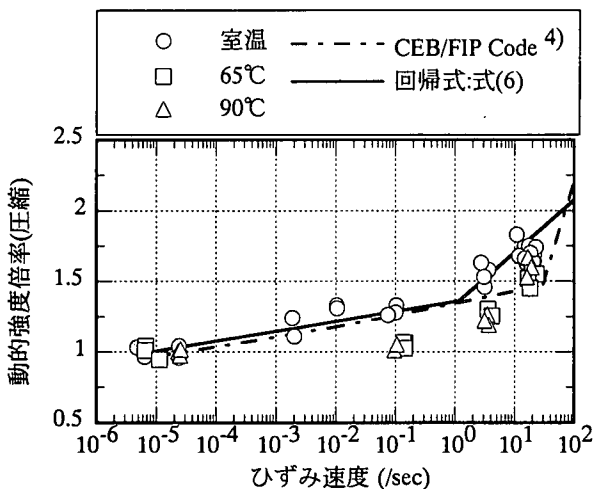


図-7 温度が動的圧縮強度に及ぼす影響

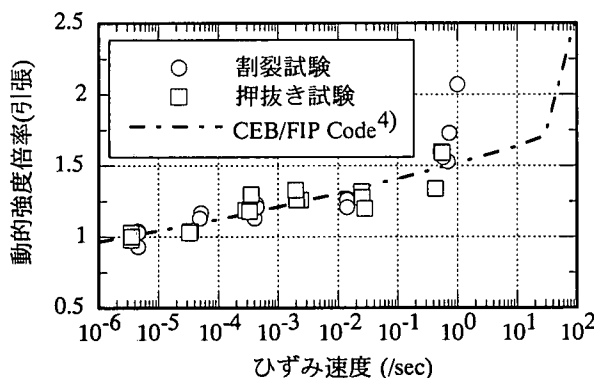


図-8 ひずみ速度に対する引張強度(標準養生試験体)

### 参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会: 構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法, 1993年1月
- 2) Bischoff, P.H. and Perry S.H., "Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rate", Materials and Structures, Vol.24, No.144, 1991, pp.425-450.
- 3) H.W. Reinhardt, "Simple Relations for the Strain Rate Influence on Concrete," Darmstadt Concrete, Vol.2, 1987, pp.203-211.
- 4) CEB/FIP, "CEB/FIP Model Code for Concrete Structures", 1990, pp.48-51.
- 5) Ross, C.A., Tedesco, J.W. and Kuennen, S.T., "Effects of Strain Rate on Concrete Strength", ACI Materials Journal, Vol.92, No.1, 1995, pp.37-47.
- 6) 白井孝治、島村和夫、實晃司、伊藤千浩、大沼博志: コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化 - ホプキンソン棒法式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果 -, 構造工学論文集 Vol.44A, 土木学会, 1998, pp.1793-1804.
- 7) Chen, W.F., "Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete", ACI Journal, Proceedings Vol.69, No.12, 1970, pp.993-995.
- 8) Chen, W.F., "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw-Hill Int. Book Company, New York, 1982, pp.295-346.