

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—

FORMULATION OF THE EFFECTS OF STRAIN RATE ON CONCRETE STRENGTH

-Application of the Split Hopkinson Pressure Bar Method to Impact Test and the Compressive Strength Test Results-

白井 孝治*, 島村 和夫**, 實 晃司***, 伊藤千浩****, 大沼 博志*****

Koji SHIRAI, Kazuo SHIMAMURA, Koji JITSU, Chihiro ITO and Hiroshi OHNUMA

* 工博 主任研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 バックエンドプロジェクト (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

** 工修 研究員 石川島播磨重工業 (株)技術研究所 構造研究部 (〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-1-15)

*** 主任研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 バックエンドプロジェクト (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

**** 工博 主任研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 バックエンドプロジェクト (〒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 社会基盤工学 (〒060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

An impact test apparatus for concrete material was developed with both hydraulic loading system and Split Hopkinson Pressure Bar type (SHPB) loading system. A data processing method to distinguish an incident wave and a reflected wave was developed in the SHPB type system to be capable of precise traces of average stresses at the both ends of the test specimen by strain gauges. In this apparatus, 10cm diameter bars were used taking account of the maximum aggregate size of the concrete. To mitigate the calculation error in the inversion method due to the stress wave dispersion and radial effect, a shock absorbing material was used to omit the high frequency components of the incident wave and deform the test specimen uniformly. As a result, the estimated errors as to the longitudinal stress distribution were acceptable during the impact loading and the strain rate effect on the compressive concrete strength from 0.001/sec to 100/sec was made clear.

Key Words : concrete, compressive strength, strain rate effect, split hopkinson pressure bar

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物が偶発的な飛来物や重量物の落下事故等の衝撃による外力を受けた場合、その応答解析において、構成材料の力学的性質の載荷速度による時間依存性、すなわちひずみ速度効果の影響を的確に考慮する必要がある¹⁾。特に、コンクリートはひずみ速度が大きくなると材料の破壊現象が複雑になるため、試験装置や測定方法も慣性力や応力波の伝播等の影響を考慮して構築する必要がある。このため、広範囲なひずみ速度領域において、十分に信頼できる動的データは少ないのが現状である。

Bishoff 等²⁾は、1985 年頃までに得られたコンクリートの圧縮強度のひずみ速度依存性のデータを整理し、図-1 で表示した。ひずみ速度の範囲は、 $10^{-8} \sim 10^2/\text{sec}$ であり、動的強度倍率がひずみ速度に応じて増加しているが、そのばらつきが非常に大きいことがわかる。Reinhardt³⁾は、ひずみ速度依存性に関する簡便な評価式を提案し、CEB/FIP コード⁴⁾ではこの提案式に基づき、コンクリート強度や弾性係数の動的倍率を応力速度あるいはひずみ速度の関数として定式化を図っている。さらに、Ross 等⁵⁾は、Split Hopkinson Pressure Bar 法 (以下 SHPB 法と呼ぶ) の原理⁶⁾を利用した試験方法によりひずみ速度依存性の検討を行い、Reinhardt の提案式の有用性

について述べている。

SHPB 法は、主に金属材料を対象として高ひずみ速度を受ける材料特性試験として古くから利用されている⁷⁾。この試験方法の原理は、試験体を入力棒と出力棒の間に設置し、打撃棒と入力棒の衝突により矩形応力波を発生させ、試験体に動的な負荷を与える方法である。

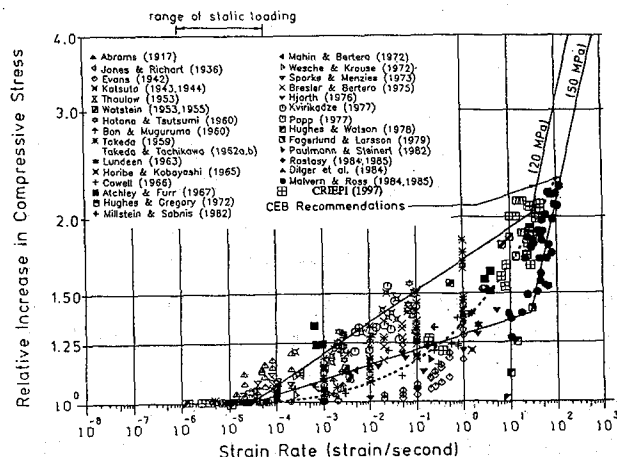


図-1 コンクリート圧縮強度のひずみ速度依存性²⁾

SHPB 法は一元波動論を基礎としているため、波動伝播時の 3次元分散効果により試験片寸法を極端に大きく

できない欠点がある⁶⁾。さらに、コンクリートが脆性的であるために、測定対象が矩形応力波の立上りで破壊しないような高強度コンクリートに限られる。例えば、Ross 等⁵⁾は、試験体寸法（直径 51mm×高さ 51mm）や粗骨材寸法（10mm）が比較的小さい高強度コンクリート（静的強度 48MPa）に対し、 $10^2/\text{sec}$ 付近の測定に成功している。

筆者等は、設計基準強度が 25MPa 程度の普通コンクリートを対象に、比較的寸法の大きな試験体（直径 100mm）を用いて、油圧載荷式による動的試験や SHPB 法による高速載荷試験を行い、ひずみ速度が $10^{-3} \sim 10^2/\text{sec}$ の範囲における圧縮強度のひずみ速度依存性の検討を行った。

2. 高速載荷試験装置

図-2 に、高速載荷試験装置の概要を示す。この装置は、比較的ひずみ速度の小さい領域（ $10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ ）を対象とした油圧式載荷装置と、より大きなひずみ速度（ $10^0 \sim 10^2/\text{sec}$ ）を得るために、SHPB 法の原理を利用した方式の載荷装置（以下、SHPB 法式載荷装置と呼ぶ）の 2 種類の載荷方式を有している。

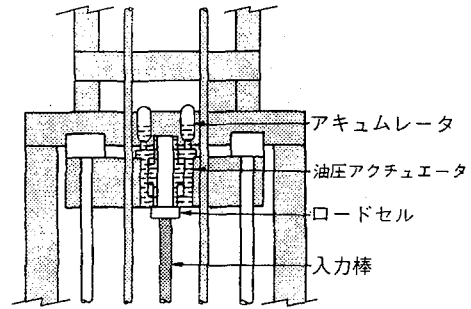
本体フレームの概略寸法は、幅 3m×奥行き 3m×高さ 12m である。油圧式載荷部、SHPB 法式載荷部等、全ての本体要素を組み上げるための機台であり、構造用鋼材による溶接構造及びボルト組立式である。

油圧式載荷装置は、入力棒の最頂部に移動させるため可動式で、アクチュエータにロードセルと耐圧盤を組み込んだ構造であり、作動アクチュエータとバランスアクチュエータが同一のユニットに組み込まれている。載荷機構は、油圧用オイルをアキュムレータに蓄圧し、油圧を作動アクチュエータに作用させる一方、バランスアクチュエータにより油圧をバランスさせる。載荷時には、発射作動弁により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を組み込んだ耐圧盤に送り、入力棒に衝突させる仕組みである。載荷速度は、発射作動弁の開度に応じて制御される。載荷最大荷重は 490kN、載荷最大速度は 3m/sec、載荷ストロークは 100mm である。

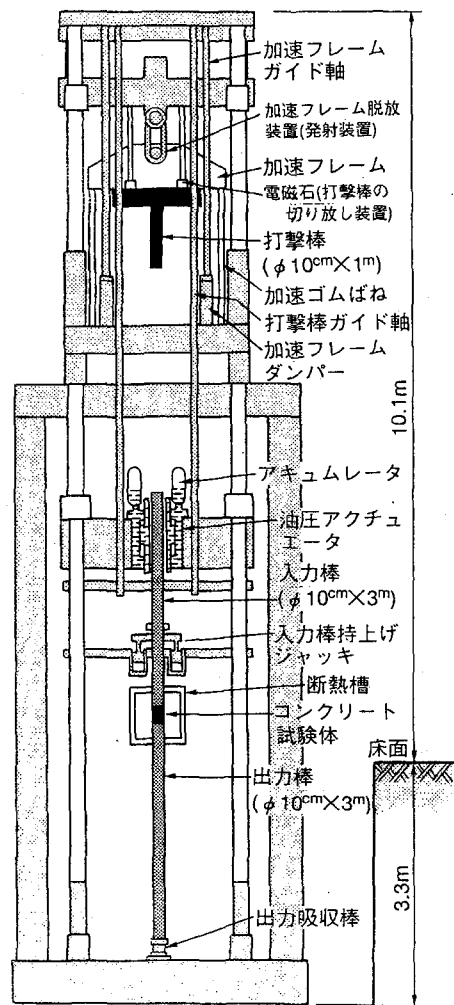
SHPB 法式載荷装置では、本体中間部フレームベースと加速フレーム間を加速ゴムばねで連結し、加速フレームを強制上昇させて、ゴムばねに張力を発生させる。発射速度は、この張力により調節される。発射動作は、油圧作動による加速フレーム脱放装置と同時作用の衝突棒クランプ装置の解放を行い、加速フレームを加速落下させる。この後、ダンパーにて停止した加速フレームから離脱した打撃棒が単独で落下し、入力棒の頭部を打撃する仕組みである。打撃棒最大衝突速度は 20m/sec、加速フレームの可動距離は 1.2m、加速フレームの質量は 150kg である。

衝突伝達部は、衝突部の打撃を受ける入力棒と試験片

受け部に位置する出力棒、およびその下層の吸収棒から構成される。入・出力棒は、メタルガイドにてステータ昇降用ネジ柱に保持される構造である。また、試験片の出し入れ作業のため、入力棒は油圧ジャッキにより昇降できる構造となっている。入・出力棒寸法は、直径 100mm×長さ 3,000mm である。



(油圧式載荷装置)



(SHPB 法式載荷装置)

図-2 高速載荷試験装置の概要

3. データ処理

3.1 SHPB 法の原理

SHPB 法は、主に金属材料の高速荷荷時の材料構成式を求める材料試験方法として利用されている⁸⁾。この試験方法は、図-3 に示すように、打撃棒、及びひずみゲージを貼付した入力棒と出力棒で構成される。試験体は入力棒と出力棒の間に設置され、打撃棒が入力棒へ衝突することにより発生する矩形応力波により動的な負荷を受ける。試験体の平均応力、平均ひずみ速度、平均ひずみは、各々一次元波動論に基づき式(1)~(3)で表される。

$$\bar{\sigma}(t) = \frac{E}{2} \{ \varepsilon_I(L_2, t) + \varepsilon_R(L_2, t) + \varepsilon_T(L_2 + L_S, t) \} \quad (1)$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}}(t) = \frac{c}{L_S} \{ \varepsilon_I(L_2, t) - \varepsilon_R(L_2, t) - \varepsilon_T(L_2 + L_S, t) \} \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c}{L_S} \int_0^t \{ \varepsilon_I(L_2, t) - \varepsilon_R(L_2, t) - \varepsilon_T(L_2 + L_S, t) \} dt \quad (3)$$

ここで、 E : 入・出力棒のヤング率、 ε_I : 入力波のひずみ、 ε_R : 反射波のひずみ、 ε_T : 透過波のひずみ、 t : 時間、 c : 応力波の伝播速度、その他の記号は、図-3 に示すとおりである。

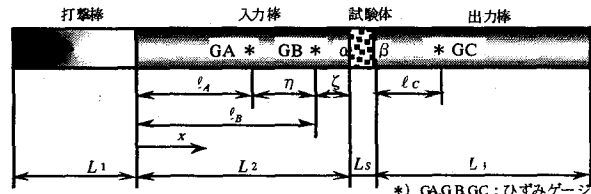


図-3 Split Hopkinson Pressure Bar 法の原理

3.2 計測システム

図-4 に、試験計測システムのフローを示す。打撃棒の衝突により入・出力棒に発生する応力波は、入・出力棒に貼付したひずみゲージ（ゲージ長 2mm）により計測する。ひずみゲージは、計測各断面軸方向に 4 枚貼付し、打撃棒衝突時の片当たり等に起因する曲げ成分を除去するため、4 枚のゲージ出力の加算平均の時刻歴波形を測定した。測定信号は、シグナルコンディショナーを介して AD 変換される。サンプリングタイムは、シグナルコンディショナーの応答周波数（500kHz）を考慮して 1 μ sec とし、計 8 点の同時サンプリング計測を実施した。

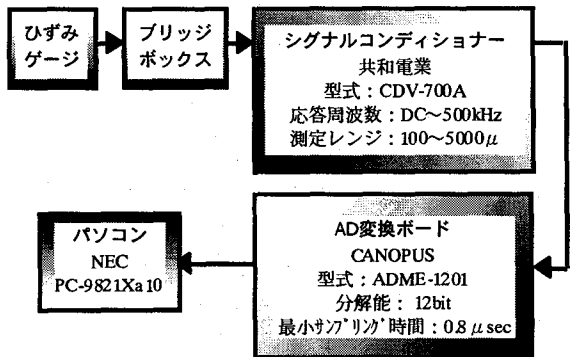


図-4 試験計測システムのフロー

3.3 油圧式荷荷試験におけるデータ処理

比較的ひずみ速度の小さい領域（ $10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ ）を対象とした油圧式荷荷試験では、応力波の影響は無視しえる。したがって、圧縮強度の最大値は、入・出力棒で測定されたひずみ応答の最大値に鋼棒のヤング率を乗じて算出した。ひずみ速度は、コンクリート試験体の軸方向に貼付した 2 枚のひずみゲージ（ゲージ長 60mm）の出力の加算平均値を微分して算出した。

3.4 SHPB 法式荷荷試験におけるデータ処理

SHPB 法では、通常、入力棒と出力棒に各々 1 枚のひずみゲージを貼る。入力棒に貼付したひずみゲージの役割は 2 つあり、一つは入射波の計測であり、もう一つは反射波の計測である。一枚のひずみゲージでこれらの役割を果たすためには、入射波が伝搬した後に反射波が観測されることが必要であり、そのためには入力棒のひずみゲージは試験体からかなり離れた位置に貼らなければならない。しかしながら、ひずみ計測位置から試験体端部へ応力波が伝播する間の減衰、あるいは棒を支えるためのガイドによる乱れを考えると、試験体近傍でひずみを計測することが望ましい。このような相反する要求を満たすため、入力棒にひずみゲージを 2 枚貼り（図-3 参照）、両計測値を用いて入射波と反射波を分離する手法を考案した。ただし、この 2 枚のゲージ間で減衰は無いものと仮定する。

まず、ひずみゲージ GA、GB、GC で計測されるひずみを $\varepsilon_A(t)$ 、 $\varepsilon_B(t)$ 、 $\varepsilon_C(t)$ とする。 $\varepsilon_C(t)$ は、出力棒の端部（試験体と反対側）からの反射波が到達するまでは、GC 位置の時刻 t における透過波そのものであり、位相をずらすことによりそのまま ε_T となる。一方、 $\varepsilon_A(t)$ と $\varepsilon_B(t)$ は入射波と反射波が重畳しているため、式(4)で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_A(t + \eta/c) - \varepsilon_B(t) \\ &= \varepsilon_I(l_A - \eta - ct) + \varepsilon_R(l_A + \eta + ct) \\ &\quad - \varepsilon_I(l_A + \eta - ct) - \varepsilon_R(l_A + \eta + ct) \\ &= \varepsilon_I(l_B - 2\eta - ct) - \varepsilon_I(l_B - ct) \\ &= \varepsilon_I\{l_B - c(t + 2\eta/c)\} - \varepsilon_I(l_B - ct) \\ &= \varepsilon_I(l_{B,t+2\eta/c}) - \varepsilon_I(l_{B,t}) \end{aligned} \quad (4)$$

上式において、 $t + 2\eta/c$ を t と置き換えれば、GB 位置での入射波は式(5)で表される。

$$\varepsilon_I(l_{B,t}) = \varepsilon_A(t - \eta/c) - \varepsilon_B(t - 2\eta/c) + \varepsilon_I(l_{B,t-2\eta/c}) \quad (5)$$

式(5)を行列表示すると、式(6)で示される。ここでは、時間 t の代わりに $t = n\Delta t$ （ Δt : データサンプリングタイム）で表し、 n を変数として表示している。また、ひずみゲージ GB 位置の時刻 t における入射波を $\varepsilon_I(l_{B,t} = n\Delta t) = \varepsilon_I^n(n)$ で表示した。

4.2 3次元分散効果 (Pochhammer-Chree 効果)

コンクリートは骨材とセメントの複合材料であるため、極端に試験体寸法を小さくすることは適切でない。一方、棒の直径を太くした場合、波動伝搬時の3次元分散効果 (Pochhammer-Chree 効果) が問題となる。すなわち、入力棒の縦波の分散性によって高振動数成分が重畳したり、試験片の半径方向の慣性力により、入力棒の面内の変位分布が一様でなくなるため、測定誤差が大きくなる恐れがある。そこで、本節では、太い棒 (直径 10cm) を用いた場合の Pochhammer-Chree 効果について考察する。境界を持つ弾性媒質中を伝播する応力波に対して三次元の運動方程式を解析的に評価するのは非常に煩雑である。ここでは、縦波の伝播に対して、無限長棒を伝わる調和波を対象として、Pochhammer-Chree の解について検討を進めることとする。

半径 a の円柱側面が自由表面である条件、すなわち表面で応力が 0 である条件より、式(12)で表示される $r = a$ における境界条件式、いわゆる Pochhammer-Chree の式が得られる。

$$4\mu k^2 \frac{\partial J_0(h'a)}{\partial a} \frac{\partial J_1(k'a)}{\partial a} + \left(\frac{\rho p^2}{\mu} - 2k^2 \right) J_1(k'a) \cdot \left\{ 2\mu \frac{\partial^2 J_0(h'a)}{\partial a^2} - \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \rho p^2 J_0(h'a) \right\} = 0 \quad (12)$$

$$h' = \frac{\rho p^2}{(\lambda + 2\mu)} - k^2, k' = \frac{\rho p^2}{\mu} - k^2, \frac{\partial(\quad)}{\partial a} = \frac{\partial(\quad)}{\partial r} \Big|_{r=a}$$

ここに、 λ, μ はラメの定数、 p は角振動数、 k は波数、 J_0, J_1 はそれぞれ 0 次と 1 次のベッセル関数である。である。また、式(12)において、波長 ($\Lambda = 2\pi/k$)、位相速度 (C_n) を用いて、複数の伝播モードに関する位相速度と波長の関係を求めると、図-6 で示される。なお、ポアソン比は 0.29 を仮定した。

モード 1 において、波長の長さが十分長くなる ($a/\Lambda \approx 0$) と、波の伝播速度は式(13)で示される。

$$C_0^2 = \frac{p^2}{k^2} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)\rho} = \frac{E}{\rho} \quad (13)$$

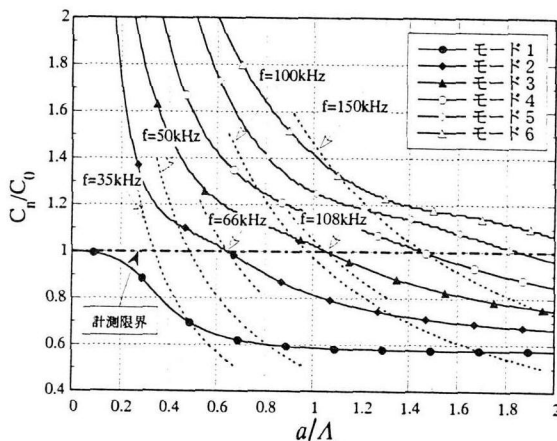


図-6 位相速度と波長の関係

ここで、 E は縦弾性係数である。棒を伝わる縦波の伝播速度が式(13)で与えられるのは、波長が棒の半径 a に比べて十分に長い場合だけであって、一般に縦波は分散性を示すことがわかる。

図-7 に、モード 1 及びモード 2 における波長が軸方向変位 u_z の半径方向分布に及ぼす影響を示す。なお、軸方向変位は、円柱棒の中心における軸方向変位で無次元化したものである。モード 1 では、波長が短くなるにつれて、半径方向の変位分布が一様でなくなる様子が理解される。

4.3 Pochhammer-Chree 効果による縦波の分散性

本節では、前節で述べた Pochhammer-Chree 効果による縦波の分散性が打撃棒との衝突により負荷される応力波に与える影響について述べる。なお、ここではモード 1 の波動のみを考慮する。

打撃棒との衝突により、入力棒の端面に図-8 に示す台形形状の応力波が負荷されたと仮定する。この波動は、フーリエ級数の形で、式(14)で表示される⁷⁾。

$$\frac{(u_z)_z}{(u_z)_0} = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2 S} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^2} \sin(\pi n S) \cos(n \omega_0 t) \quad (14)$$

ここで、 S 及び ω_0 の定義は、図-8 に示す通りである。

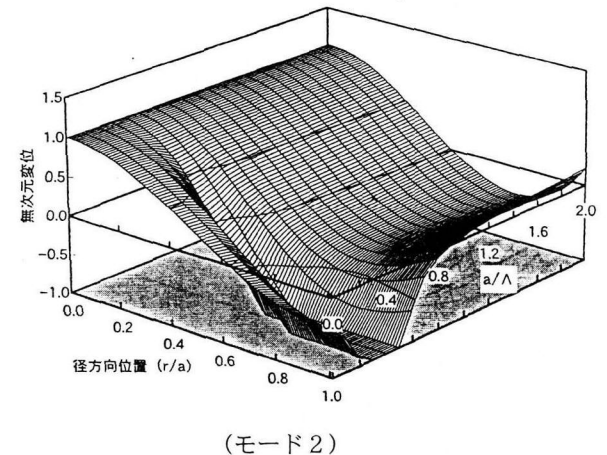
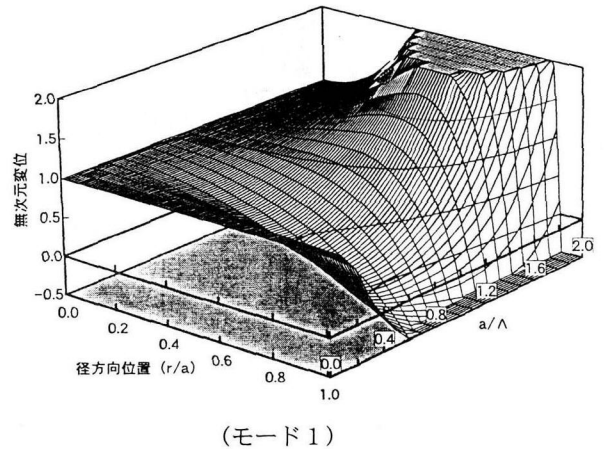


図-7 波長が軸方向変位 u_z 分布に及ぼす影響

これらの波動は、端面から棒内を伝播するに従い、図-6で示される Pochhammer-Chree 効果により、位相速度が波長によって影響を受ける。すなわち、端面から距離 z において観測される波動は、フーリエ級数の形で式(15)で表示される。

$$\frac{(u_z)_z}{(u_z)_0} = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2 s} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^2} \sin(n\pi s) \cos\left\{n\omega_0\left(t' - \frac{z}{C_n}\right)\right\} \quad (15)$$

ここで、 C_n は n 次の角振動成分 $n\omega_0$ に対する位相速度であり、式(16)で表示される。

$$C_n = \frac{n\omega_0 \Lambda}{2\pi} \quad (16)$$

式(16)を変形して、式(17)を得る。

$$\frac{an\omega_0}{C_0} = 2\pi \frac{C_n}{C_0} \frac{a}{\Lambda} \quad (17)$$

式(17)に、半径 a 、縦弾性波速度 C_0 、角振動数 ω_0 を与えれば、図-6を用いて式(15)により距離 z における波動が求められる。

図-9に、Pochhammer-Chree 効果が台形状の応力波に及ぼす影響の計算例 ($\omega_0 = 3217 \text{ rad/sec}$, $s = 0.00512$, 0.02560) を示す。 s が小さくなり台形波形の立ち上がりが鋭くなるほど、位相速度の分散性により高周波数成分による擾乱が大きくなることがわかる。また、伝播する距離が長くなるに従い、擾乱が台形応力波に及ぼす影響範囲が大きくなることがわかる。

コンクリートは、金属材料に比べて脆性的であるため、 s が小さく高振動数成分が重畳した矩形応力波を負荷すると、応力波の立上りで試験体が局所的に破壊し、ひずみが一樣とならない恐れがある。したがって、負荷応力の形状については、できるだけ立ち上がりが滑らかな波形が望ましい。また、端面から離れるにしたがい、擾乱が大きくなることから、波動の計測もできるだけ試験体の端面に近い方が望ましいといえる。

4.4 打撃方法の検討

前節で述べた縦波の分散性の影響を把握するため、SHPB 法式載荷装置を用いて、打撃棒を自由落下させて空打ち試験を行い、入力棒を伝播する波動について考察を行った。

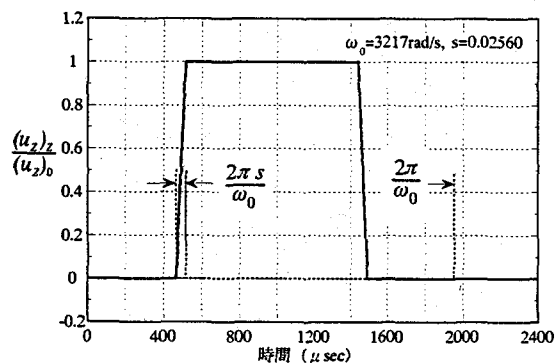
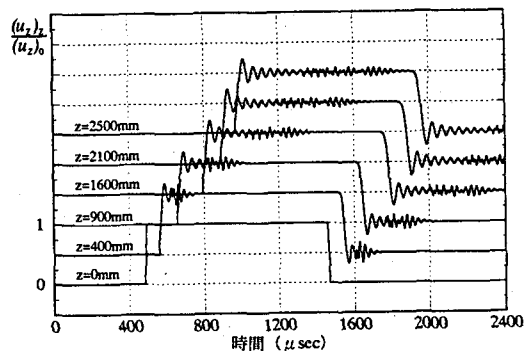


図-8 台形状の応力波

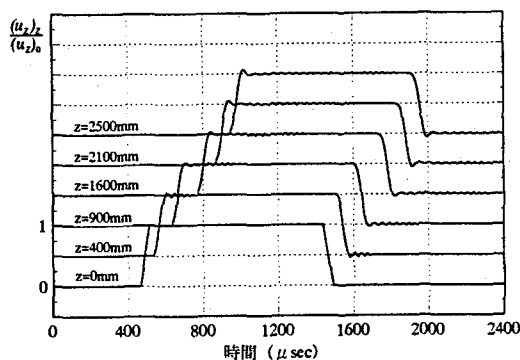
図-10に、自由落下による空打ち試験の概要を示す。入力棒の衝突面から 600, 800, 1000, 1200 mm の距離にある断面に、軸方向に4枚ひずみゲージを貼り付け、その加算平均を計測した。ひずみゲージのゲージ長は 2 mm であり、サンプリングタイムは 1 μ秒である。

一般に、式(13)で示される伝播速度 C_0 は、炭素鋼 ($\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$, $E = 205.8 \text{ GPa}$) の場合で 5000 m/sec 程度であり、図-4で示した計測システムでは、この付近の伝播速度が検出限界となり、図-6において $C_n/C_0 \leq 1.0$ の領域のみが計測可能となる。したがって、1次モードについては全波長域において計測可能であるが、2次以上のモードでは波長の長い波動の伝播速度が 5000 m/sec の数倍に達するため、物理的に計測不能となる。例えば、現状の計測システムでは、モード2の場合で 66 kHz 以上、モード3の場合で 108 kHz 以上の周波数を持つ波動の計測のみが可能となる。

さらに、高周波数領域の波動を取り扱う際には、計測機器や計測センサー、あるいは接続ケーブルの絶縁性能や電源の安定性に起因するノイズが問題となる。そこで、計測された波動に重畳するノイズについて考察を加えた。図-11に、空打ち試験で計測されたひずみ波形を示す。打撃棒が衝突する以前の波形に既にノイズが存在していることがわかる。また、衝突面から離れるに従い、波の分散性に起因する高周波数成分の影響が次第に大きくなることがわかる。



($\omega_0 = 3217 \text{ rad/sec}$, $s = 0.00512$)



($\omega_0 = 3217 \text{ rad/sec}$, $s = 0.02560$)

図-9 Pochhammer-Chree 効果の影響の計算例

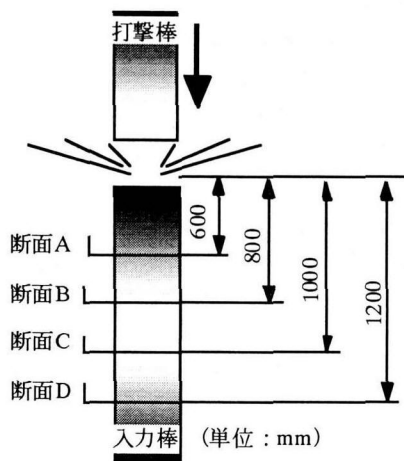
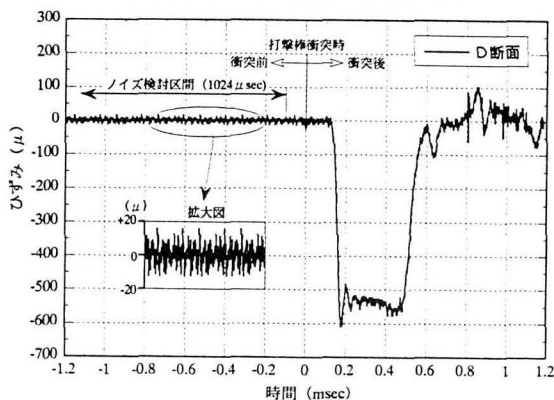
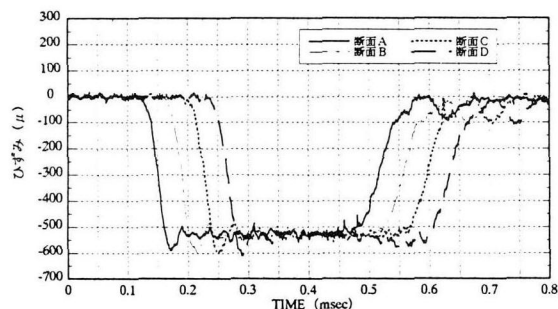


図-10 自由落下による空打ち試験の概要



(断面Dにおけるノイズの影響)



(各断面で計測されたひずみ波形)

図-11 空打ち試験で計測されたひずみ波形

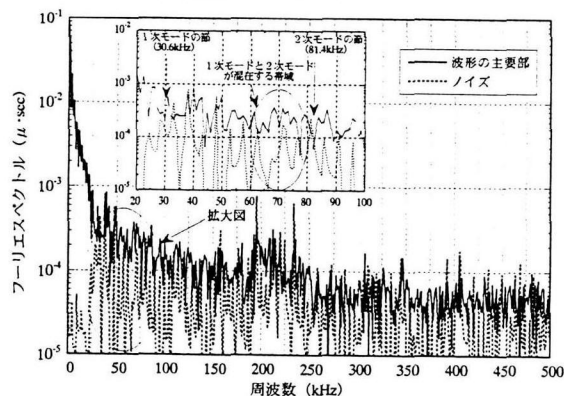


図-12 空打ち試験で計測された波形のフーリエスペクトル (断面D)

図-12 に、図-11 で示した断面Dにおける計測波形のフーリエスペクトルを示す。実線は計測波形の主要部におけるフーリエスペクトルであり、破線は打撃棒衝突以前のノイズのフーリエスペクトルである。計測に用いたシグナルコンディショナー (図-4 参照) については、測定レンジに対する直線性は $\pm 0.01\%$ まで保証されている¹⁰⁾。試験時の測定レンジは $\pm 1000 \mu$ に設定したので、コンディショナーの非直線性に起因するノイズは $\pm 0.01 \mu$ 程度となる。このノイズは、図-12 のフーリエ振幅に換算して $5 \times 10^{-5} \mu \cdot \text{sec}$ に相当し、周波数全域に $10^{-4} \sim 10^{-5} \mu \cdot \text{sec}$ 程度のノイズが存在することが理解される。計測波形主要部の 100kHz 以上の周波数帯域におけるフーリエ振幅は $10^{-4} \mu \cdot \text{sec}$ 以下であり、これらの信号はノイズに起因するものと考えられる。

100kHz 以下の周波数帯域で計測可能な高次モードは 2 次モードのみである。2 次モードには $a/\Lambda=0.95$ において鋼棒表面にモードの節が発生し、この節における周波数は 80kHz 程度である。したがって、図-12 で示されるスペクトルにおいて、 $66\text{kHz} \sim 100\text{kHz}$ 付近の 2 次モードの寄与率を算定することは困難であるが、これら付近の振幅は計測波形主要部の DC 成分の値と比較して 0.1% のオーダーであることから、波形主要部において 2 次以上の高次モードによる擾乱は少ないものと判断される。一方、1 次モードについては、 30kHz 付近において鋼棒表面にモードの節が発生するため、波形主要部のフーリエ振幅が落ち込んでいることがわかる。また、 40kHz 付近においてピークが存在するが、その信号の多くはノイズであり、有為な値ではないと推察される。

4.5 縦波の分散性が鋼棒面内ひずみ分布に及ぼす影響

前節では、縦波の位相速度の分散性により負荷応力に高周波数成分が重畳することを示した。これらの高周波数成分は、波長が短いために図-7 に示されるように面内のひずみ分布が一様でない恐れがある。そこで、本節では、縦波の分散性が鋼棒面内のひずみ分布に及ぼす影響について検討を行った。なお、縦波の分散性は 30kHz 以下の 1 次モードのみを考慮する。

空打ち試験で得られた入力棒表面のひずみ波形をフーリエ級数に展開し、式(18)で表示する。

$$\varepsilon(t)_{r=a} = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos(n\omega_0 t - \delta), \quad \delta = \frac{n\omega_0 z}{C_0} \left(\frac{C_0}{C_n} - 1 \right) \quad (18)$$

一方、図-7 で与えられる入力棒面半径 r_0 における軸方向ひずみ分布の比 α を式(19)で定義する。

$$\frac{(u_z)_{r=r_0}}{(u_z)_{r=0}} = \alpha(r_0, a/\Lambda) = \frac{\varepsilon_{r=r_0}}{\varepsilon_{r=0}} \quad (19)$$

半径 r_0 における軸方向のひずみは、式(20)により求められる。

$$\varepsilon(t)_{r=r_0} = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha(r_0, a/\Lambda)}{\alpha(a, a/\Lambda)} D_n \cos(n\omega_0 t - \delta) \quad (20)$$

図-13 に、式(20)より求められる面内ひずみ分布の時刻歴を示す。負荷の立上り付近での面内のひずみ分布が

一様でなく、鋼棒中心と端部で 8%程度の誤差が存在している。また、負荷終了付近では、約 10%程度の誤差が生じている。これらの問題点を解決するため、衝突速度に応じて、打撃棒と入力棒の間に緩衝材を試行錯誤的に挿入し、入力波形の立上りが滑らかな凸な波形とした。

図-14 に、緩衝材（厚さ 3mm のポリプロピレン板）を使用した場合の鋼棒面内のひずみ分布の時刻歴を示す。負荷応力の立上り時刻 0.2msec から 0.4msec 付近までは、鋼棒中心と端部で 3%以内の誤差に緩和されており、負荷立上り後 0.2msec まではほぼ一様なひずみ分布が発生していることがわかる。

次に、緩衝材が入力波形と試験結果に与える影響を示す。図-15 に、コンクリート試験体を用いて SHPB 方式載荷試験を実施した際の負荷応力と、式(1)~式(10)より算出される試験体内の応力波の時刻歴を示す。緩衝材を使用することにより、入力棒側と出力棒側の応力がほぼ等間隔で数回交差していることから、コンクリート試験体内で応力波が数回往復した後、ほぼ一様に収束する様子がわかる。また、試験体強度のピークは、負荷載荷後約 150 μ sec で発生しており、面内のひずみ分布がほぼ一様な負荷継続時間内である。したがって、Pochhammer-Chree 効果に起因する縦波の分散性が試験結果に与える誤差の程度は 3%程度であり、本来コンクリートが複合材料として有する誤差のばらつきにくらべて、無視できる誤差と判断される。

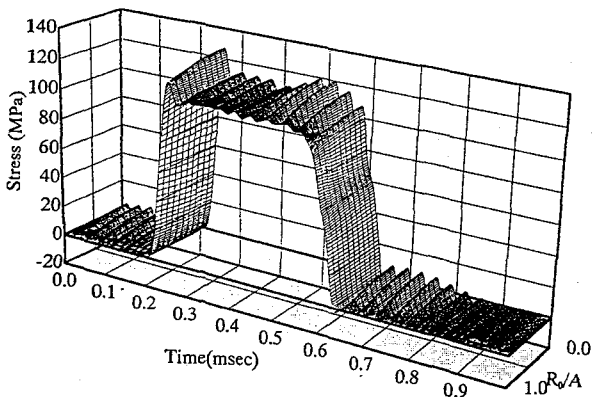


図-13 面内ひずみ分布の時刻歴（緩衝材無）

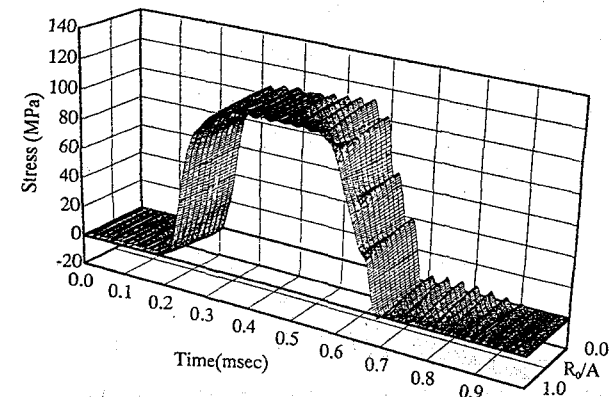


図-14 面内ひずみ分布の時刻歴（緩衝材有）

5 動的圧縮強度試験

5.1 コンクリートの配合及び試験体の製作

実験には、秩父小野田株式会社製の普通ポルトランドセメント（比重 3.16）を使用した。表-2 に、骨材の諸元を示す。実験に使用した細骨材は千葉県富津市横山産、粗骨材は栃木県栃木市尻内町産のものである。細骨材は、5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3 及び 0.15mm のふるいでふるい分けを行った後、粗粒率が 2.63 となるように混合したものであり、その比重及び吸水率は、それぞれ 2.58 及び 1.61% である。また、粗骨材の最大寸法は 25mm であり、その比重及び吸水率は、それぞれ 2.69 及び 0.73% である。混和剤は、減水剤としてポゾリス No.70-250 を使用し、セメント重量に対し 1.07% 混入した。表-3 に、コンクリートの配合を示す。材令は 28 日におけるコンクリートの圧縮強度が 24MPa ととなるように配合を定めた。また、表-4 に、フレッシュコンクリートの試験結果を示す。

試験体の寸法は、直径 10cm×高さ 10cm（試験体数 100 体）、直径 10cm×高さ 20cm（試験体数 50 体）、直径 8cm×高さ 8cm（試験体数 50 体）の 3 種類の円柱とした。コンクリート打設 24 時間後に試験体を脱型し、試験日の前日まで水中（20℃）で標準養生した。なお、養生槽から取り出し後、試験体端面の平行度（許容精度 0.1mm）に留意し、端面をダイヤモンドカッターで平滑に研磨した。また、試験体中に含まれる水分がひずみ速度依存性に与える影響を把握するため、105℃の乾燥炉中で試験体の重量変化が 2 日で 1g 以下となるまで乾燥させ、乾燥試験体を製作した。

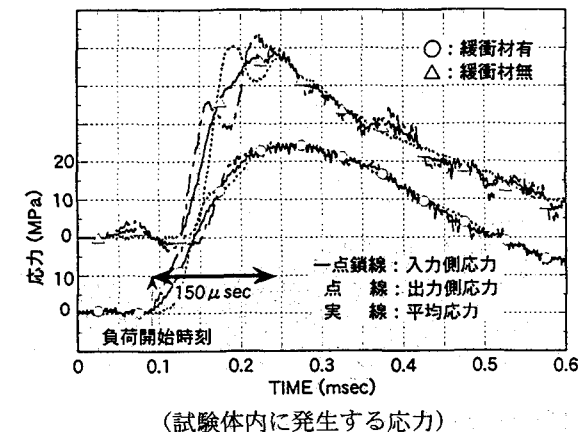
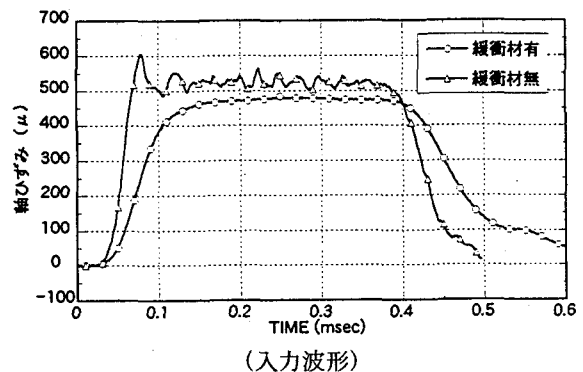


図-15 緩衝材が入力波形と試験結果に与える影響

コンクリートの強度は、材令・温度・含水率等により異なるため、動的強度試験条件と同一条件の試験体を用いて静的強度試験（各試験毎に3体）を行った。静的強度試験に使用した試験体は、直径10cm×高さ10cm、直径10cm×高さ20cmの2種類である。図-16に、材令と静的圧縮強度の関係を示す。高さ10cmの試験体の圧縮強度は、端面拘束の影響により端面の応力が多軸状態となるため、高さ20cmの試験体の圧縮強度に比べて15%~20%程度上昇していることがわかる。

5.2 試験データの有効性の検討

本試験では、有効なデータを見極める判断基準として、以下の点を考慮した。

- ・ 負荷応力波の急激な立上がりにより、負荷開始直後に試験体入力棒側端面が局所的に破壊せず、試験体に発生する面内のひずみ分布が一樣である。→試験体の入力棒側と出力棒側の応力が、ほぼ等間隔で数回交差し、各々の最大値が発生する時刻に時間差が生じない。
- ・ 打撃棒と入力棒の中心軸のずれによる曲げ応力成分が顕著でない。→試験体に貼付したひずみゲージの立上りがそろっている。
- ・ 試験体の入力棒側と出力棒側の応力に、環境条件や計測時に発生する電気的なノイズに起因する大きな擾乱がない。→入力側応力と出力棒応力の最大値に顕著な差が生じない。

図-17に、上述の判断基準に基づき選別した有効な波形と、棄却した波形の例を示す。

5.3 端面拘束が動的強度に与える影響

静的強度は、試験体の高さが低く細長比の小さい場合には、鋼棒の端面と試験体との間の摩擦抵抗により著し

表-2 骨材の諸元

骨材の種類	産 地	比 重	吸水率	粗粒率
細骨材	千葉県横山産	2.58	1.61%	2.63
粗骨材(25mm)	栃木県尻内町産	2.69	0.73%	6.62

表-3 コンクリートの配合

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 (%)
24	63	48.4	18±2.5	5±1

単位量 (kg/m ³)				
セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
276	174	867	963	2.95

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

スランプ (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)	フロー値 (mm×mm)	28日材令圧縮 強度 (MPa)
18.5	4.5	25	310×285	25.5

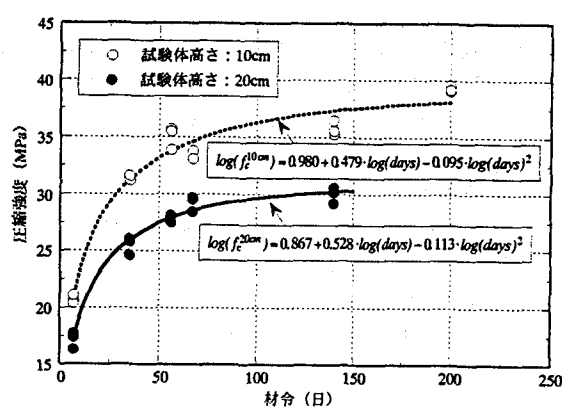


図-16 材令と静的圧縮強度の関係

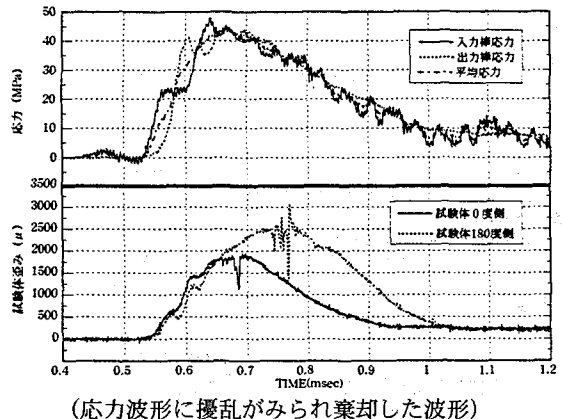
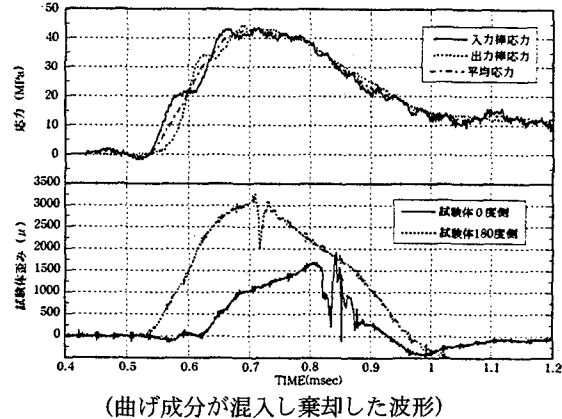
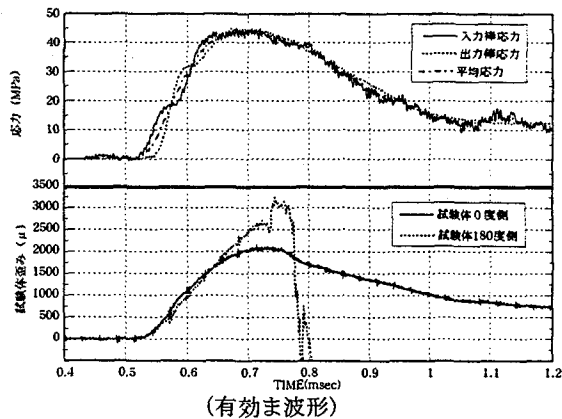


図-17 有効な波形と棄却した波形の例

く影響を受けることが明らかとなった。本節では、この端面拘束が動的強度に与える影響を把握するため、減摩材料を用いた試験を実施した。なお、減摩材料として、シリコングリスとテフロンシート（厚さ 0.1mm）2 枚を使用した。

図-18 に、減摩材料を使用した場合と使用しない場合の動的強度の比較を示す。高さが 20cm の試験体の場合、端面拘束の影響を受けないことがわかる。一方、高さが 10cm の場合、静的試験では拘束の影響が著しいが、動的試験では減摩材料の有無に拘わらず、ほぼ同程度の強度が得られている。これらの結果より、動的強度倍率で無次元化する際に使用する静的強度は、図-16 に示される試験時材令の影響を考慮した高さ 20cm の試験体の圧縮強度のデータを用いた。

5.4 破壊モード

図-19 に、油圧式载荷（試験体高さ 20cm×直径 10cm）及び SHPB 方式载荷（試験体高さ 10cm×直径 10cm）による動的圧縮試験後の試験体の破壊状況を示す。試験体の破壊状況より、破壊モードは、試験体の高さが小さくなるに従い、せん断破壊から圧壊の様相を呈してくることが理解される。

5.5 動的強度試験結果

図-20 に、SHPB 法式载荷試験で計測された波形と 3.4 節で述べたデータ処理方法に従い算出した応力・ひずみ速度・ひずみ波形を示す。SHPB 法における応力の計算には、入・出力棒側応力の平均値を用いる方法と出力側応力を用いる方法がある。本法の原理では前者を採用すべきであるが、現実的には後者^{11),12)}が用いられることがある。5.2 節で示したように、得られた波形の有効性を見極める基準を適用することにより、数値的にはどちらを採用しても大きな差異はない。したがって、破壊応力は、SHPB 法の原理に従い、入・出力棒側応力の平均値とし、ひずみ速度やひずみも入力側の応力を用いて算出した。

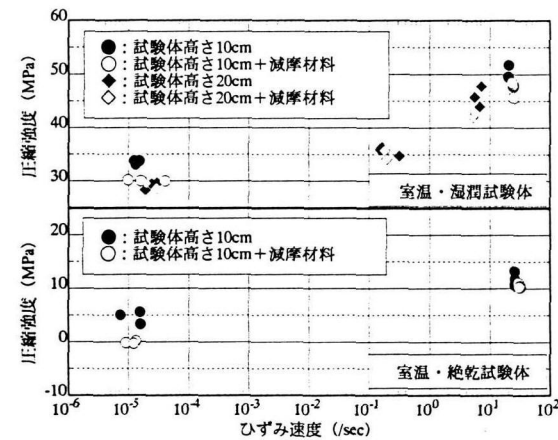
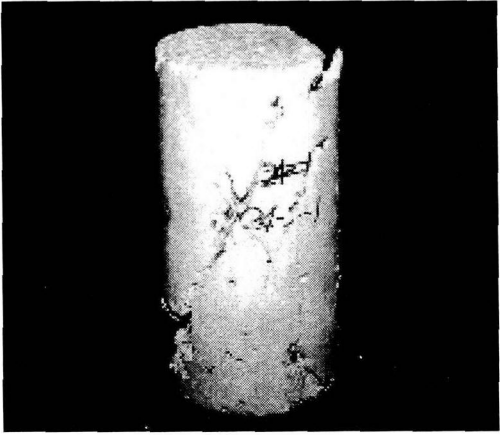
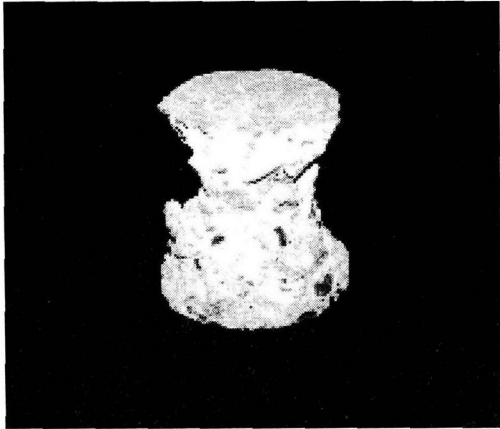


図-18 減摩材料の有無が動的強度に与える影響



(油圧式载荷：試験体高さ 20cm・直径 10cm)



(SHPB 方式载荷：試験体高さ 10cm・直径 10cm)

図-19 動的圧縮試験後の試験体の破壊状況

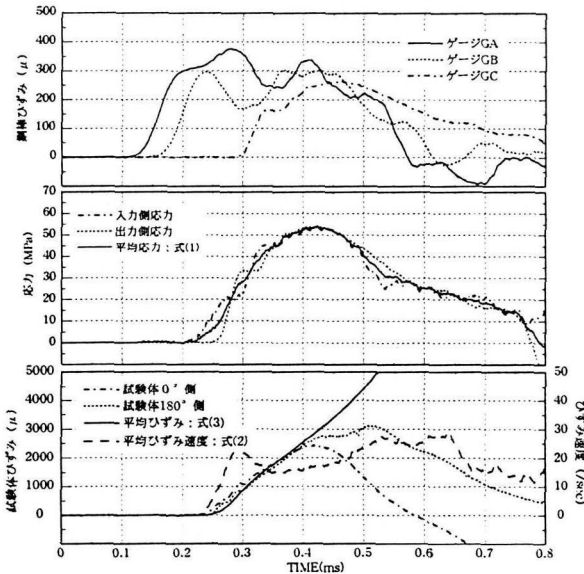
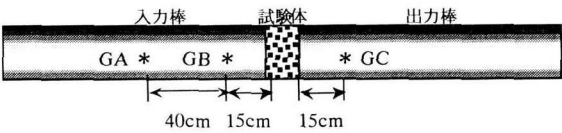


図-20 SHPB 法式载荷試験で計測された波形

図-21 に、油圧式載荷試験で計測された波形を示す。高さ 20cm の試験体を用いた油圧式載荷試験では、波動伝播の影響は無視し得るので、ひずみ速度やひずみは試験体側面に貼り付けたひずみゲージ波形より算出した。

図-22 に、ひずみ速度の絶対値と動的強度倍率の関係を示す。図中の回帰式の関数は、式(21)で表示した。なお、これらのデータは、5.2 節で述べた判断基準に従い、不良なデータを除去したものである。

$$f_d/f_s = 0.9783 + 0.0217 \times (\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{c0})^{0.277} \quad (21)$$

ここで、 f_d は動的強度、 f_s は静的強度、 $\dot{\epsilon}_{c0}$ は基準ひずみ速度 ($3 \times 10^{-3}/\text{sec}$) である。標準養生試験体の場合、ひずみ速度が 10^0 - $10^1/\text{sec}$ 付近を超えると、急激に強度倍率 f_d/f_s が増加することが判る。一方、乾燥試験体の強度倍率は、湿潤状態の強度増加に比べると明らかに小さくなっている。このことは、コンクリート中の空隙を満たす物質の性質が強度増加に大きく影響を及ぼすことが判る。図-1 に、本試験で得られた実験値と式(21)で示される回帰式を既往の実験結果と比較して示した。

CEB⁴⁾は、Reinhardt 等の研究成果を基に、コンクリートの圧縮強度として式(22)を提案している。

$$\begin{aligned} f_d/f_s &= (\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{c0})^{1.026\alpha_s} \quad \text{for } |\dot{\epsilon}_c| \leq 30\text{sec}^{-1} \\ f_d/f_s &= \gamma_s (\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{c0})^{1/3} \quad \text{for } |\dot{\epsilon}_c| > 30\text{sec}^{-1} \quad (22) \\ \alpha_s &= 1/5 + 9 f_{cs}/f_{c0}, \log \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2 \end{aligned}$$

ここで、 f_d は基準強度 (10MPa) である。式(22)中の f_{cs} を 30MPa として、CEB の提案式を図-22 中に併せて表示した。CEB の提案式は、ひずみ速度が 30/sec を超えると急激に動的倍率が増加する式となっているが、本研究で得られた標準養生試験体の試験結果によれば、 $10^0/\text{sec}$ 付近において動的倍率の上昇が認められる。

5.4 動的強度に影響を及ぼす要因の考察

前節で述べたように、試験体の高さが小さくなるに従い、破壊モードがせん断型から圧壊型へ変化することが示された。本節では、せん断破壊型と圧壊型の2つの破壊モードを対象に、Chen¹³⁾の完全塑性の極限解析理論を拡張して、破壊モードが破壊強度に及ぼす影響について述べる。

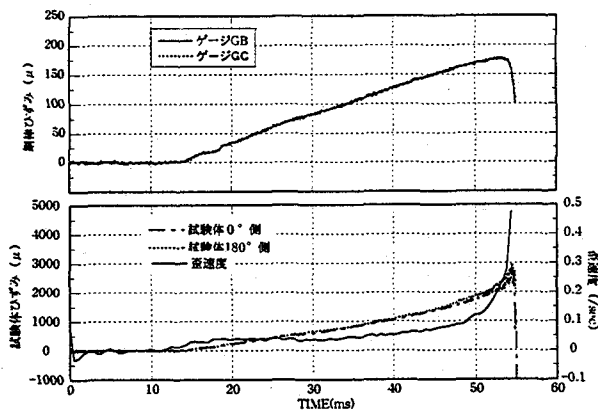


図-21 油圧式載荷試験で計測された波形

図-23 (a)に、圧壊型破壊モードの分離破面を示す。終局状態を上下2個の円柱付きくさびと無限個の側面要素に分離して想定する。ここで、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、式(23)が得られる。

$$\frac{Q_u}{\pi a^2} = \frac{f_c(1-\sin\phi)}{2\sin\alpha\cos(\alpha+\phi)} + \frac{f_t \tan(\alpha+\phi)}{\tan\alpha} \quad (23)$$

ここに、 Q_u は上界荷重、 f_c は圧縮強度、 f_t は引張強度、 ϕ は内部摩擦角、 α はくさびの発生角度である。 α を最小化することにより、式(23)で示される上界荷重は最終的に式(24)で示される。

$$\frac{Q_u}{\pi a^2} = f_c \left\{ 1.0 + \frac{f_c}{f_t} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right\} \quad (24)$$

例えば、 $\phi = 30^\circ, f_c/f_t = 1/10$ とすると、式(25)となる。

$$Q_u/\pi a^2 = 1.3 \cdot f_c \quad (25)$$

したがって、みかけの圧縮強度は、真の圧縮強度よりも30%大きいことがわかる。

図-23 (b)に、せん断型破壊モードの分離破面を示す。圧壊型の破壊モードと同様に極限解析を適用すれば、最終的に式(26)が得られる。

$$Q_u/\pi a^2 = 1.0 \cdot f_c \quad (26)$$

したがって、せん断型の破壊モードについては、荷重を断面積で割る通常の方法で真の圧縮強度が求められる。

さらに、動的な荷重に対する慣性力の影響を把握するため、上述した圧壊型の破壊モードに対して慣性力の検討を行った。動的な仕事率のつりあい式から上界荷重を求めると、最終的に式(27)が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{Q_u}{\pi a^2} &= \frac{f_c(1-\sin\phi)}{2\sin\alpha\cos(\alpha+\phi)} + \frac{f_t \tan(\alpha+\phi)}{\tan\alpha} \quad (27) \\ &+ \rho \left[\left(\frac{h}{2} - \frac{2a\cot\alpha}{3} \right) + \left(\frac{h}{2} + \frac{2a\cot\alpha}{3} \right) \frac{\tan(\alpha+\phi)}{2} \right] \Delta D \end{aligned}$$

ここで、 ΔD は軸方向変位である。式(27)において、 α を最小化するのは困難なので、数値的なオーダーを評価する。第3項は密度と加速度と高さの積であり、ひずみ速度を $10/\text{sec}$ 、試験体の高さを 10cm 、載荷時間を 0.1msec とすると、式(28)で計算される。

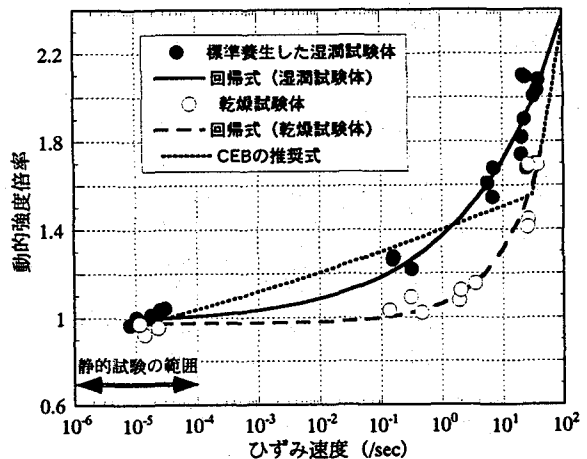


図-22 ひずみ速度と動的強度倍率の関係

$$\rho \Delta \dot{D} = \frac{2400}{9800 \cdot 10^9} \cdot 100 \cdot \frac{10 / \text{sec} \cdot 100 \text{mm}}{0.1 \text{m sec}} = 2.5 \text{MPa} \quad (28)$$

したがって、圧縮強度を 30MPa とすると、約 8% 程度の強度増加につながることになる。試験結果によれば、ひずみ速度が 10^1 付近になると、60% 程度の強度上昇倍率を示しており、破壊モードの上昇分を考慮しても、30% ~ 40% が慣性項として作用していると推測される。また、図-22 で理解されるように、乾燥試験体は湿潤養生された試験体に比べて強度上昇倍率が小さくなっている。これは、コンクリート中の空隙を満たす物質の性質が強度増加に大きく影響を及ぼすことを示しており、モルタル等の粘性に加えて、空隙中の水あるいは空気の流れを考慮する必要があることも示唆される。これらについては、今後データを蓄積しつつ、さらに検討していきたい。

6. 結 論

コンクリートのひずみ速度依存性のデータを取得することを目的として、コンクリートの動的強度試験装置を製作し、圧縮強度のひずみ速度依存性に関する基礎的データを取得した。

得られた成果を要約すると、以下のとおりとなる。

- ・ 比較的ひずみ速度の小さい領域 ($10^{-3} \sim 10^{-1} / \text{sec}$) を対象とした油圧式載荷方式と、より大きなひずみ速度 ($10^0 \sim 10^2 / \text{sec}$) を得るために SHPB 法の原理を利用した SHPB 法式載荷方式を有する高速載荷試験装置を製作した。
- ・ SHPB 法の動的強度試験において、試験体近傍でのひずみ計測を可能とするため、入射波と反射波を分離する手法を考案した。また、SHPB 法では、細い棒を使用することが望ましいが、コンクリートが複合材料であることを勘案し、太い棒 (直径 100mm) を使用した。この場合、応力波伝播時の Pochhammer-Chree 効果により、測定誤差の増大を招く恐れがある。この分散効果による誤差を低減するため、緩衝材を用いて入射波を凸状の滑らかな波形とした結果、鋼棒面内のひずみ分

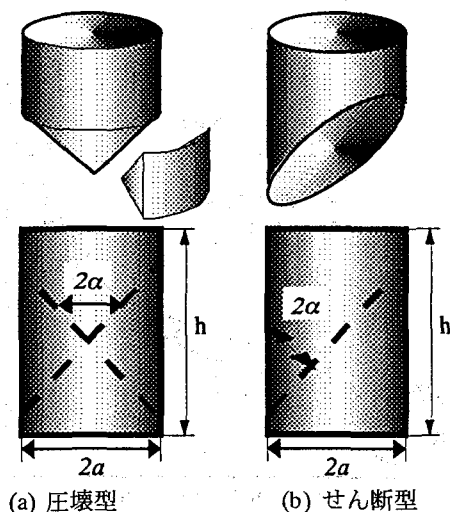


図-23 破壊モードの模式図

布の誤差は 3% 以内であった。

- ・ 標準養生した湿潤コンクリート (24 日材令強度: 25MPa) の静的強度に対する動的強度の倍率は、ひずみ速度の増加とともに大きくなり、CEB の推奨式に比べひずみ速度が $10^0 \sim 10^1 / \text{sec}$ 付近で急激に増加することが判明した。
- ・ コンクリートの動的強度倍率は、コンクリートの含水率に大きく依存する。乾燥試験体の場合、ひずみ速度が $10^1 / \text{sec}$ 以下では強度倍率の顕著な増加は見られない。

[謝 辞]

高速載荷試験装置の設計・製作に当たっては、(株)前川試験機製作所の宮野二郎氏、動的強度試験の準備・計測・データ整理にあたっては、(株)シー・アール・エスの飯塚静男氏、エンター電子工業(株)の加藤政志氏の方々に多大なご協力があったことを記し、ここに、これらの方々に感謝の意を表します。

[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) Davies, R.M. "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar", Philosophical Transactions A, Vol.240, 1948, pp.375-457.
- 7) Follansbee, P.S. and Frantz, C. "Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar", ASME J. of Eng. Mat. and Tech., Vol.105, 1983, pp.61-66.
- 8) 林卓夫, 田中吉之助：衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1987.
- 9) Bertholf, L.D. and Karnes, C.H. "Two Dimensional Analysis of the Split Hopkinson Pressure Bar System," J. Mech. Phys. Solids, Vol.23, 1975, pp.1-19.
- 10) 共和電業：共和電業計測機器総合カタログ, 1987, pp.180-181.
- 11) 吉田進ら：棒の衝突を利用した高速変形実験装置について, 金属材料技術研究所報告, 第 8 巻, 第 3 号, pp.57-64, 1965.
- 12) 村上碩哉ら：金属材料の縦衝撃によるひずみ速度効果の測定精度, 日本機械学会論文集, 第 39 巻, 318 号, pp.556-564, 1973.
- 13) W.F. Chen：コンクリート構造物の塑性解析, pp.305-358, 丸善, 1982.

(1997 年 9 月 26 日受付)