

B-23

高速載荷及び衝撃載荷を受けるコンクリートのひずみ速度依存性に関する研究  
その1 試験概要

Study on Effects of Strain Rate on Concrete under High Speed and Impact Loading  
Part1 Outline of the Test

○横瀬秀行<sup>1</sup>, 宇田川晃司<sup>1</sup>, 佐藤壮大<sup>1</sup>, 川口昇平<sup>2</sup>, 白井孝治<sup>3</sup>, 高柳秀秋<sup>4</sup>, 小川勤<sup>5</sup>, 中西三和<sup>6</sup>, 安達洋<sup>6</sup>  
Hideyuki Yokose<sup>1</sup>, Koji Udagawa<sup>1</sup>, Sota sato<sup>1</sup>, Syohei Kawaguchi<sup>2</sup>, Koji Shirai<sup>3</sup>  
Hideaki Takayanagi<sup>4</sup>, Tsutomu Ogawa<sup>5</sup>, Mitsukazu Nakanisi<sup>6</sup>, Hiromi Adachi<sup>6</sup>

This paper shows an examination summary for investigating the effects of strain rate on the concrete under high-speed Loading and Impact Loading.

1. はじめに

材料や部材に動的な外力が作用した際、それらの挙動や破壊性状は、静的な外力を受けた時と異なることは既往の研究からよく知られている。特に衝撃レベルのひずみ速度範囲( $10^0 \sim 10^2$ [1/s])では、材料強度の増加傾向は静的レベル(ひずみ速度  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ [1/s])及び地震動レベル(ひずみ速度  $10^{-3} \sim 10^0$ [1/s])と異なり大きくなることが報告されており、ひずみ速度が強度や破壊性状に影響を及ぼすことが明らかになりつつある。しかし、動的な外力下におけるコンクリートの挙動は未だ十分な解明には至っておらず、材料レベルでの挙動や特性を把握し、地震動及び衝撃レベルに対する建物の安全性の合理的な評価手法を確立することが重要である。

そこで本研究では高速載荷及び衝撃載荷を受けるコンクリートのひずみ速度依存性を把握することを目的とし、動的圧縮材料試験を行った。本報(その1)では試験概要について述べる。

2. 試験方法

2.1 静的載荷試験装置

Table.1 に各試験装置の主な仕様を示す。静的載荷試験装置は油圧サーボ式アクチュエータを利用した装置である。本実験ではひずみ速度が目標値の  $1.2 \times 10^{-5}$ [1/s] となるように試験を行った。また、静的試験は各動的試験の基準となるため、動的試験に合わせて実施した。

2.2 高速載荷試験装置

Fig.1 に高速載荷試験装置概要図を示す。高速載荷試験は載荷速度による影響を調べるために用いられており、今回の試験では地震動レベルの内、ひずみ速度  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ [1/s] を目標として試験を実施した。

2.3 衝撃載荷試験装置(ホプキンソン棒法)

Fig.2 にホプキンソン棒法(以下、SHPB 法)試験装置を示す。SHPB 法は古くから金属の衝撃材料試験に広

く用いられており、コンクリートに適用した SHPB 法試験装置では白井ら<sup>[1][2][3]</sup>が比較的寸法の大きい試験体でデータの取得に成功している。本試験における衝撃レベルを想定した試験はこの試験機を用いて行った。

Table.1 The main specifications of each test equipment

装置名	静的載荷試験	動的載荷試験	
		高速載荷試験	衝撃載荷試験
試験機の性能	油圧サーボ式	油圧サーボ式	SHPB法式
載荷方式	油圧サーボ式	油圧サーボ式	SHPB法式
ひずみ速度 [1/s]	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^1$	$10^0 \sim 10^2$
最大荷重 [kN]	1000	静的 1200 動的 800	—
載荷速度	$0.01 \sim 10$ [mm/s]	$0.1 \sim 1000$ [mm/s]	$4 \sim 7$ [m/s] (衝突速度)
目標ひずみ速度範囲 [1/s]	静的レベル $1.2 \times 10^{-5}$	地震動レベル $10^{-3} \sim 10^0$	衝撃レベル $10^0 \sim 10^2$

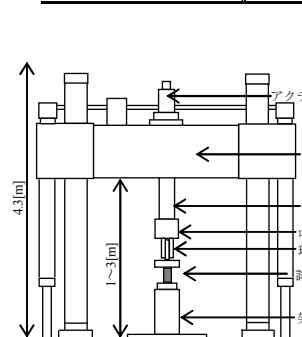


Figure.1 High-speed Loading test equipment

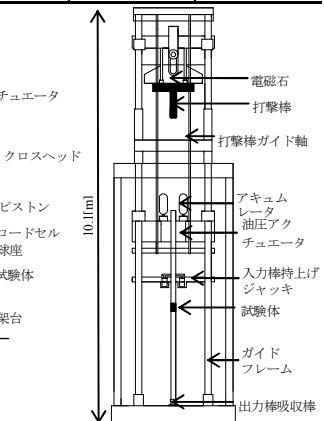


Figure.2 Impact-speed Loading test equipment

3. 測定方法

3.1 静的載荷試験

静的載荷試験では、圧縮強度はロードセル、試験体に生じるひずみはコンプレッションメータ及びコンクリート面に軸方向にひずみゲージ(全長 70[mm])と周方向にひずみゲージ(全長 50[mm])を貼付し、計測を行った。

3.2 高速載荷試験

高速載荷試験では、静的試験と同様に圧縮強度はロードセル、試験体に生じるひずみは試験体の軸方向に貼付した 2 枚のひずみゲージより計測した。

1 : 日本大学・院・海建 Graduate Student, Nihon Univ. 2 : 株式会社奥村組 Okumura Corporation

3 : 財団法人電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry 4 : 株式会社メイテック Meitec Corporation

5 : 日本原子力発電株式会社 The Japan Atomic Power Company 6 : 日本大学・教員・海建 Pro.Nihon Univ. Dr Eng

3.3 SHPB 法載荷試験

Fig.3 に SHPB 法概略図を示す。SHPB 法は打撃棒、及び入力棒、出力棒で構成される。試験体を入力棒と出力棒の間に設置し、打撃棒を入力棒に衝突させることで応力波を発生させ、発生した応力波が棒中を伝播することで試験体に動的な負荷を与える試験方法である。打撃棒から入力棒に伝わる応力波を入射波、入力棒終端で反射するものを反射波、入力棒終端から試験体及び出力棒に伝わるものを透過波とする。SHPB 法では試験装置の性能上、ロードセルから応力等を計測することができないため、図中の A, B, C 点にひずみゲージを貼り、それぞれの点で計測したひずみを理論式に代入し、試験体に伝播する応力等を算出する。

平均応力：

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

平均ひずみ速度：

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

平均ひずみ：

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

ここで、E：入・出力棒のヤング率、 $\varepsilon_i$ ：入力波のひずみ、 $\varepsilon_R$ ：反射波のひずみ、 $\varepsilon_T$ ：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 Fig.3 に示すとおりである。

入・出力棒の各点(A, B, C)に軸方向に 4 枚ずつ貼付けたひずみゲージ(ゲージ長 5[mm])より、応力波によるひずみを計測し、A, B 及び C 点で計測されるひずみをそれぞれ  $\varepsilon_A(t)$ ,  $\varepsilon_B(t)$  及び  $\varepsilon_C(t)$  とする。入力棒側の  $\varepsilon_A(t)$ ,  $\varepsilon_B(t)$  には入射波と反射波が重畳しているため、計測したひずみを一次元波動方程式に適用することで入射波と反射波に分離し、(4), (5)式を得る。

$$\varepsilon_i(l_B, t) = \varepsilon_A(t - \eta/c) - \varepsilon_B(t - \eta/c) + \varepsilon_B(l_B, t - 2\eta/c) \quad (4)$$

$$\varepsilon_R(l_B, t) = \varepsilon_B(t) - \varepsilon_i(l_B, t) \quad (5)$$

出力棒上の C 点より計測されたひずみ  $\varepsilon_C(t)$  はそのまま透過波となり、入射、反射、透過波を試験体側端部( $\alpha, \beta$ )に位相をずらすことで(6), (7), (8)式を得る。

$$\varepsilon_i(l_2, t) = \varepsilon_i(l_B, t - \zeta/c) \quad (6)$$

$$\varepsilon_R(l_2, t) = \varepsilon_B(l_B, t + \zeta/c) \quad (7)$$

$$\varepsilon_T(L_2 + L_S, t) = \varepsilon_C(l_C, t + l_C/c) \quad (8)$$

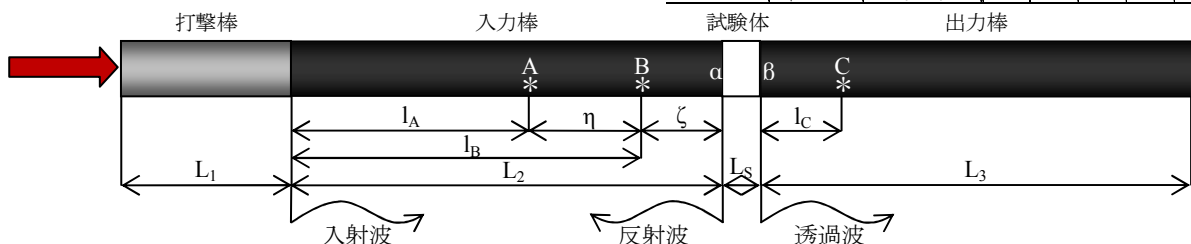


Figure.3 SHPB method schematic

今回の試験では、ひずみは試験体の軸方向に貼付した 2 枚のひずみゲージ(全長 50[mm])より計測を行い、圧縮強度は前述した理論式(1), (2), (3)より算出した。  
4. 静的・高速・衝撃載荷試験に用いた試験体

Table.2 にコンクリートの配合表を示す。コンクリートに用いた材料は普通ポルトランドセメント(密度 3.16[g/cm<sup>3</sup>])及び JASS5<sup>[4]</sup>の品質管理規定を満たす骨材を使用した。設計基準強度 21[N/mm<sup>2</sup>], 42[N/mm<sup>2</sup>]の 2 種類の配合(配合 L, H)で試験体を製作し、標準養生及び気中養生の 2 種類の方法で養生を行った。試験体はコンクリート打設 24 時間後に形枠から脱型し、標準養生試験体は試験の前日まで水中(20±2℃)で養生を行い、気中養生試験体は試験当日まで 20±2℃, 60[%]R.H の恒温槽で養生を行った。試験体端面は平滑度が ±0.1[mm]となるように研磨を行った。

Table.3 に試験体寸法及び試験体本数一覧を示す。試験体本数はパラメータ毎に 3 体の有効なデータを取ることを目標としている。高速載荷試験は直径 100[mm]×高さ 200[mm]の円柱試験体を使用し、安定して試験データを得ることができるところから予備を含めて 60 体用意した。SHPB 法は試験体内での応力波の収束性を考慮し、直径 100[mm]×高さ 100[mm]の円柱試験体とした。また、有効データを得られる割合が 1 割程度であることから各 40 体の計 160 体の試験体を用意した。

5. まとめ

以上、本報(その 1)では試験概要を示した。次報(その 2)では試験結果について示す。

【参考文献】  
[1]白井 孝治, 伊藤 千浩, 實 晃司, 島村 和夫, 大沼 博志; コンクリート強度ひずみ速度依存性の定式化(その 1) - ホーキングン棒法衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果 -, 電力中央研究所 研究報告書, U97046  
[2]川口 昇平, 白井 孝治, 高柳 秀秋; 原子力施設で使用される高強度コンクリートの力学的特性に及ぼすひずみ速度依存性の評価, 電力中央研究所 研究報告書, N10047  
[3]白井 孝治, 伊藤 千浩, 實 晃司, 島村 和夫, 大沼 博志; 有限要素法による鉄筋コンクリート構造物解析手法 - コンクリートの破壊モデルの提案とその検証 -, 電力中央研究所 研究報告書, U93053  
[4]建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2003(第 12 版)  
【謝辞】  
試験を行うにあたって、多大な協力をして頂いたエンター電子工業(株)の加藤 政志氏, 佐竹 信也氏, 北川 禰清氏, カワシマ計測の大塚 仁氏に深く感謝の意を表し、ここに記します。

Table.2 Concrete mixing table

配合	呼び強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	水セメント 比 W/C [%]	細骨材率 S/a [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	単位量					
						セメント	水	細骨材	粗骨材		混和材
L	21	64	45.8	8	4.5	251	160	856	524	524	2.51
H	42	41	42.8	8	4.5	391	160	749	518	518	2.35

Table.3 A list of specimen size and number

動的試験方法	試験体寸法 [mm]	目標ひずみ速度 [1/s]	試験体本数				
			配合 L		配合 H		合計
			気中	標準	気中	標準	
高速載荷試験	φ100×200	10 <sup>3</sup>	5	5	5	5	60
		10 <sup>2</sup>	5	5	5	5	
		10 <sup>1</sup>	5	5	5	5	
SHPB法試験	φ100×100	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>2</sup>	40	40	40	40	160