

高速载荷及び衝撃载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3 事前解析

Study on Effects of Strain Rate on Concrete under High Speed and Impact Loading Part3 Pre-parsing

○横瀬秀行¹, 石渡晶悟¹, 小川翔平², 白井孝治³, 南波宏介³,
川口昇平⁴, 小川勤⁵, 中西三和⁶, 安達洋⁶, 北嶋圭二⁶
Hideyuki Yokose¹, Syogo Ishiwata¹, Shohei Ogawa², Koji Shirai³, Kosuke Nanba³,
Shohei Kawaguchi⁴, Tsutomu Ogawa⁵, Mitsukazu Nakanisi⁶, Hiromi Adachi⁶, Keji Kitajima⁶

This paper shows a pre-parsing the effects of strain rate on the concrete under high-speed Loading and Impact Loading.

1. はじめに

コンクリート材料や部材に動的な外力が作用した際、その破壊性状は静的な外力が作用した場合と異なる事が既往の研究^[1]より知られている。しかし、この分野における研究データ及び資料(特に衝撃レベルでのひずみ速度と材料強度の関係をまとめた研究)は乏しく、国内において未だ衝撃的な外力に対する建築物の評価指針は確立されていないのが現状である。

既報の試験^[2]では、ひずみ速度 10^4 [1/s] レベル(ホプキンソン棒法(以後、SHPB 法) 载荷試験)において、打撃棒の長さが足りず、配合 H・標準養生試験体を破壊するのに十分な応力波の継続時間が確保できなかったため、破壊することができなかった。

そこで本報(その3)では、既報の試験で破壊することのできなかった配合 H・標準養生試験体を破壊できる試験装置を作製することを目的とし、非線形構造解析ソフト LS-DYNA^[3]を用いて、まず破壊できた試験結果(配合 H・気中養生)との整合性を確認した。その後、破壊できなかった試験体に対し、打撃棒を 1.0[m] から 1.5[m] にすることで、破壊できる可能性があること検証した。

2. SHPB 法

Fig.1 に SHPB 法 载荷試験装置概要を示す。本試験装置は、入力棒と出力棒の間に試験体を設置し、入力棒上端に打撃棒を衝突させることで応力波が発生する。その応力波が棒中を他端に向かって伝播し、試験体に動的負荷を与える試験方法である。計測したひずみを一次元波動方程式に適用することで、入射波によるひずみ(ϵ_I)、反射波によるひずみ(ϵ_R)、透過波によるひずみ(ϵ_T)をそれぞれ算出し、Fig.1 中の理論式(1)、(2)、(3)より試験体に作用する平均応力、ひずみ、ひずみ速度を得ることができる。

3. 解析概要

本数値解析(以後、解析)には非線形構造解析ソフト LS-DYNA を使用し、解析モデルを作成した。Fig.2 に打撃棒 1.0[m] 及び 1.5[m] の SHPB 法 载荷試験装置の解析モデルを、Fig.3 に入・出力棒上の変位を計測する点の拡大図を示す。打撃棒に衝突速度を与え入力棒に衝突させる。入・出力棒上の各計測点に生じる変位を解析結果より抽出し、A~C 点のひずみ($\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$)を算出する。得られたひずみを式(1)~(3)へ適用し、試験体の応答を得る。

Fig.4 に試験体の離散化モデルを示す。Fig.5、Fig.6 にそれぞれ配合 H・標準養生及び気中養生試験体のコンクリート圧縮域における応力-ひずみ関係を示す。コンクリートは弾塑性モデルとし、材料試験から得られた応力-ひずみ関係を多直線近似して入力する。また、コンクリートのひずみ速度依存性を考慮するために、材料試験から得られた強度をあらかじめ割り増し、試験体の応力-ひずみの関係として入力する。また、動的圧縮強度式は

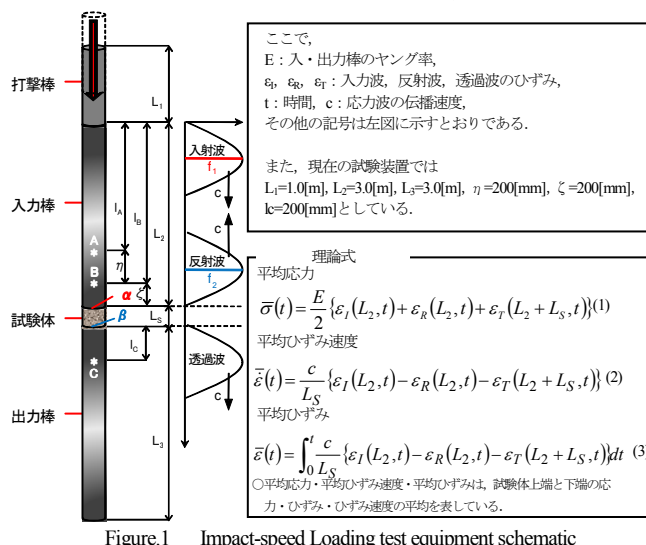


Figure.1 Impact-speed Loading test equipment schematic

1 : 日本大学・院・海建 Graduate Student, Nihon Univ. 2 : 日本大学・学部・海建 Student, Nihon Univ.
3 : 一般財団法人電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry 4 : 株式会社奥村組 Okumura 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

SHPB 法試験結果に基づき Tang ら^[4]により提案された式 (4)を適用する。ただし、 f'_{cd} : コンクリートの動的圧縮強度、 f'_c : 静的圧縮強度、 $\dot{\epsilon}_0$: ひずみ速度[1/s]とし、 $\dot{\epsilon}_0 : 1[1/s]$ とする。

$$f'_{cd} = f'_c \cdot 1.155 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{0.12} \quad (4)$$

境界条件として、SHPB 法載荷試験装置、試験体共に 1/4 対称モデルとし、対称境界面は x, y 方向を拘束する。また、出力棒下端の x, y, z 方向を拘束する。

4. 解析結果

Fig.7 に配合 H ・ 気中養生試験体の試験結果及びシミュレーション解析結果より得られた平均応力・ひずみ・ひずみ速度の時刻歴波形を示す。Fig.7 より、試験体の各応答は最大応力時までは概ね整合していることが確認できた。Fig.8 に配合 H ・ 標準養生試験体の試験結果及びシミュレーション解析、打撃棒を 1.5[m]とした解析結果より得られた平均応力、ひずみ、ひずみ速度の時刻歴波形を示す。Fig.8(a)より打撃棒が 1.0[m]の解析結果では試験体が十分に降伏していないのに対し、打撃棒 1.5[m]の解析結果では十分に降伏していることが確認できるため、配合 H ・ 標準養生試験体を破壊できる可能性があることを検証した。

5. まとめ

以上、本報(その 3)では事前解析について示した。次報(その 4)で試験概要について示す。

6. 参考文献

[1] 小谷俊介：鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響、コンクリート工学 Vol.21, No.11, 1983.11
 [2] 佐藤社大・宇田川晃司・横瀬秀行・川口昇平・白井孝治・高柳秀秋・小川勤・中西三和・安達洋：「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」、日本大学理工学部学術講演会論文集、2011
 [3] LS-DYNA User's Manual Version 971, Linermore Software Technology Corporation
 [4] Tianxi Tang, Lawrence E.Malvern, David A.Jenkins : Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete

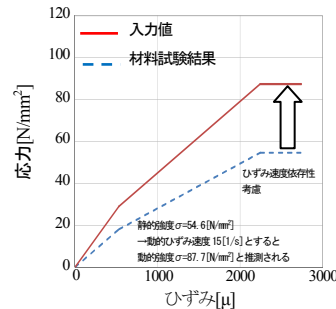


Figure.5 Stress-strain relationship (Mixture H curing in air)

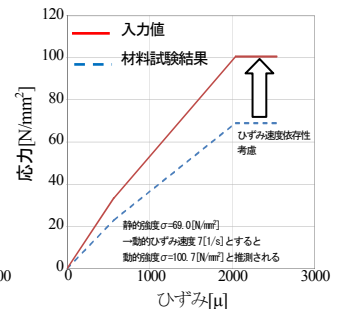
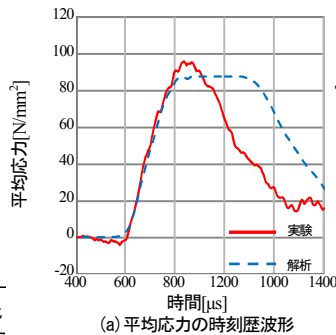
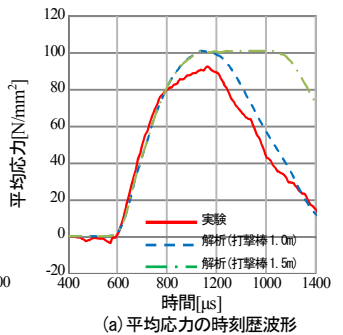


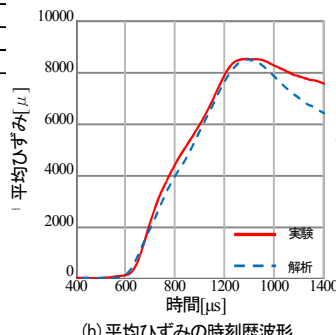
Figure.6 Stress-strain relationship (Mixture H standard curing)



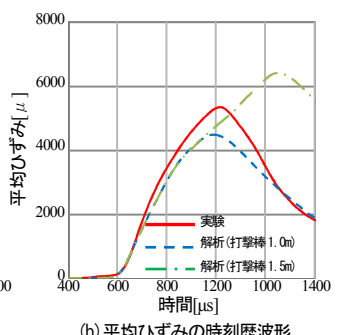
(a) 平均応力の時刻歴波形



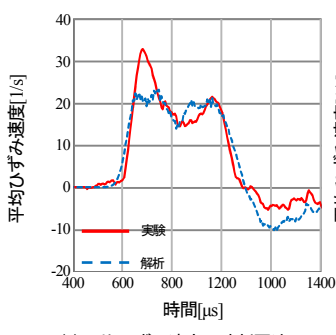
(a) 平均応力の時刻歴波形



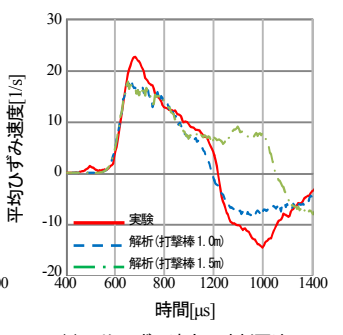
(b) 平均ひずみの時刻歴波形



(b) 平均ひずみの時刻歴波形



(c) 平均ひずみ速度の時刻歴波形



(c) 平均ひずみ速度の時刻歴波形

Figure.7 Each time history waveform of the test specimen Mixture H curing in air

Figure.8 Each time history waveform of the test specimen Mixture H standard curing

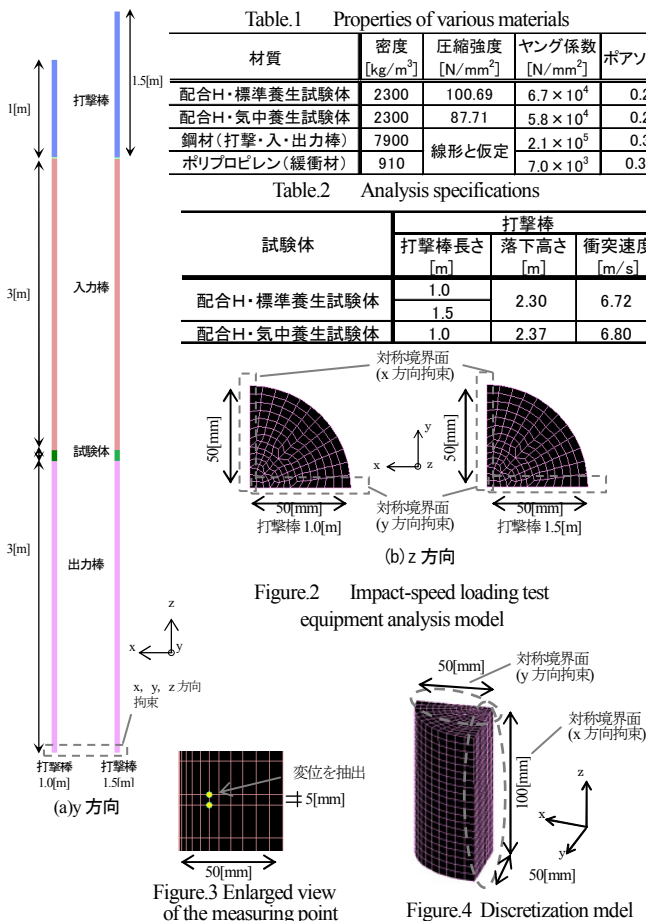


Table.1 Properties of various materials

材質	密度 [kg/m³]	圧縮強度 [N/mm²]	ヤング係数 [N/mm²]	ポアソン比
配合H・標準養生試験体	2300	100.69	6.7×10^4	0.2
配合H・気中養生試験体	2300	87.71	5.8×10^4	0.2
鋼材 (打撃・入・出力棒)	7900	線形と仮定	2.1×10^5	0.3
ポリプロピレン (緩衝材)	910	線形と仮定	7.0×10^3	0.35

Table.2 Analysis specifications

試験体	打撃棒		
	打撃棒長さ [m]	落下高さ [m]	衝突速度 [m/s]
配合H・標準養生試験体	1.0	2.30	6.72
配合H・気中養生試験体	1.5	2.37	6.80