

論文 剛体の衝突による鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答解析

牛島 忠史*1・大沼 博志*2・出雲 健司*3・白井 孝治*4

要旨：多軸応力下における応力-ひずみ関係式の非線形性ならびに引張領域におけるひび割れ発生を考慮できる白井らのコンクリートモデルに、強度のひずみ速度依存式として、CEB - FIP Model Code を用いて、剛な飛来物が、鉄筋コンクリートスラブに衝突した場合の衝撃応答解析を行った。その結果、本解析手法は、衝突直後の応力波の伝播状況を概ねシミュレートできることが明らかになった。

キーワード：ひずみ速度依存性、有限要素法、衝撃応答解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が偶発的な飛来物の落下、衝突によって過酷な外力を受けた場合、その構成材料であるコンクリートは多軸応力状態となり、また載荷速度が速いことから、ひずみ速度依存性を示す。そのため、衝撃応答解析に用いるコンクリートの物性モデルは、多軸応力状態下の応力-ひずみ関係式と破壊基準およびひずみ速度依存性に関する特性を考慮する必要がある。

白井らは、従来の多軸応力下における非線型等方性モデルに加え、引張領域におけるひび割れの発生や偏差成分の非線形性状、およびひずみ速度依存性を考慮したモデルを提案し、すでに鉄筋コンクリート梁の衝撃応答解析において良好な結果を得ている¹⁾。

本論文は、白井らのモデルを用いて、剛な飛来物が鉄筋コンクリートスラブに衝突した場合の衝撃応答解析を行い、衝突直後の過渡応答時における応力伝播状況を実験結果と比較・検討したものである。

2. 鉄筋コンクリートスラブの衝撃実験

2.1 衝撃荷重載荷方式

衝撃実験における載荷方式は、図-1 に示す載荷装置により、圧搾 N₂ ガスを用いて、模擬飛来物を鉄筋コンクリートに衝突させた。模擬飛来物は、銅製の円柱（直径 9.8mm）で、質量 70kg、先端の形状は平坦である。衝突速度は、N₂ ガスの圧力により制御し、光電式速度計により計測した。

2.2 鉄筋コンクリートスラブ

今回解析対象とした鉄筋コンクリートスラブは、寸法が 1500mm×1500mm、厚さ 100mm で、鉄筋（SD295A、主鉄筋径:6mm）は、複鉄筋断面とし、鉄筋比を片側およそ 1% とした。上部鉄筋、下部鉄筋それぞれ 5 箇所、2mm の箔ひずみゲージを貼ってひずみ履歴を計測した。鉄筋の配筋図およびひずみ計測位置を図-2 に示す。

スラブの試験体の四辺は剛製支持台に固定されている。固定方法は試験体の端から 125mm の位置に固定用孔をあらかじめ配置しておき、これにボルトを通して、幅 150mm、厚さ 12mm の鋼板と支持台を締め付けた。

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(正会員)

*2 北海道大学教授 大学院工学研究科 工博(正会員)

*3 北海道大学助手 大学院工学研究科 工博(正会員)

*4(財)電力中央研究所 主任研究員 工博

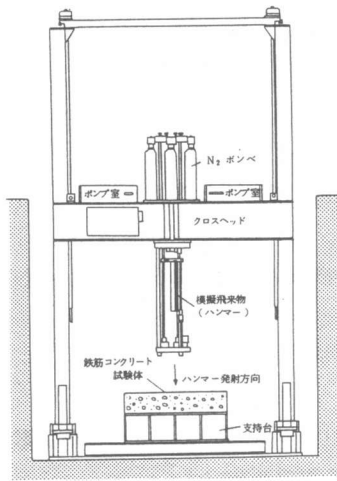


図-1 衝撃荷重載荷装置

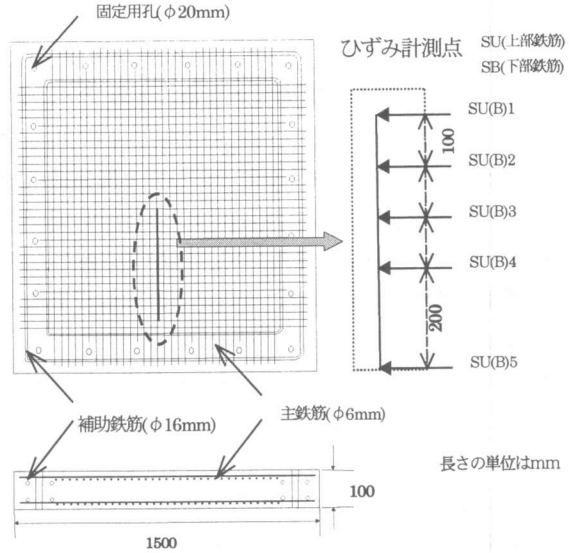


図-2 スラブの配筋図およびひずみ計測位置

3. 物性モデル

3.1 コンクリートの物性モデル

(1) 応力-ひずみ関係式

コンクリートの応力-ひずみ関係は、静水圧成分と偏差応力成分に分けて式(1)で表示した。

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} K \varepsilon_v + 2G \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

δ_{ij} : クロネッカーのデルタ

ε_v : 体積ひずみ ε_{ij} : 偏差ひずみ

各成分は、非線型になるものとし、式(2)および(3)を用いて算定した。

山口らの提案式²⁾

$$\frac{K_T}{K_0} = 0.118 \times \exp(-65.15 \times \varepsilon_{oct}) + 0.882 \times \exp(532.05 \times \varepsilon_{oct}) \quad (2)$$

ここで、 K_T は接線体積弾性係数、 K_0 は初期体積弾性係数、 ε_{oct} は八面体直ひずみである。

Kupfer らのモデル³⁾

$$\frac{G_T}{G_0} = \frac{\left[1.0 - 0.645 \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_c} \right)^{1.553} \right]^2}{1.0 + 0.357 \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_c} \right)^{1.553}} \quad (3)$$

ここで、 G_T は接せん断弾性係数、 G_0 は初期せん断弾性係数、 τ_{oct} は八面体せん断ひずみ、 σ_c は一軸圧縮強度である。

(2) 破壊基準

コンクリートの破壊基準は、コンクリートを等方、均質性であると仮定し、応力の多軸性を考慮した。純圧縮領域における終局強度破壊面は、Rendulic 応力面上における2本の終局強度包絡線および偏差応力面上における終局強度包絡線により形成される。Rendulic 応力面の終局強度包絡線は、式(4)、(5)のように与える⁴⁾。また、偏差応力面上の終局強度包絡線は楕円線分として式(6)で与えた。

$$\frac{\tau_{oc}}{\sigma_c} = 0.0689 + 0.6868 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right) - 0.0964 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{oc}}{\sigma_c} = 0.2040 + 0.8424 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right) - 0.1204 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5)$$

$$\tau_{oct}(\theta) = \frac{2\tau_{oc}(\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cos \theta + \tau_{oc}(2\tau_{oc} - \tau_{oe}) \sqrt{4\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2} \cos^2 \theta + 5\tau_{oe}^2 - 4\tau_{oc}\tau_{oe}}{4(\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cos^2 \theta + (\tau_{oc} - 2\tau_{oe})^2} \quad (6)$$

ここで、 σ_{oct} および τ_{oct} はそれぞれ八面体直応力および八面体せん断応力、 τ_{oe} および τ

σ_{oc} はそれぞれ $\theta = 0^\circ$ および 60° の時の八面体せん断応力, σ_c は一軸圧縮強度である。

純引張領域における終局強度は多軸応力状態の影響をほとんど受けないため, 1 軸引張強度を 1 辺とする立方体で終局強度破壊面を定義した。なお, 引張と圧縮が混在する領域では, 1 軸圧縮強度と 2 軸引張強度, および 2 軸圧縮強度と 1 軸引張強度を含む平面で定義し, 閉じた終局強度破壊面を定義した。

(3) 破壊後の挙動

圧縮破壊後の挙動は, 作用応力の八面体せん断応力 τ_{oct} と終局強度曲面上の八面体せん断応力 τ'_{oct} を求め, 偏差破壊関数 ϕ を式 (7) によって定義した。

$$\Phi = \tau'_{oct} / \tau_{oct} \quad (7)$$

ϕ が 1 より小さい場合, 圧縮破壊後の各ステップにおいて, 静水圧成分を保持したまま, この ϕ だけ偏差応力を減少させるものとした。

引張破壊後の挙動は, 主応力方向の要素座標系 l, m, n において, l 方向の主応力 σ_l が引張強度 σ_t に達したとすると, 破壊後の応力計算は, l 方向応力 σ_l がある指定したステップ数で線形に減少させるものとした。 σ_l が 0 になった後は, $\tau_{lm} = \tau_{nl} = 0$, $\sigma_l \leq 0$ とし, σ_m , σ_n , τ_{mn} に平面応力状態を仮定して, 式(8), (9) で表示する。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_n \\ \tau_{mn} \end{Bmatrix} = [D(\varepsilon_v)] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_m \\ \varepsilon_n \\ \gamma_{mn} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\varepsilon_v = \frac{1}{3} \{ (\varepsilon_l - \varepsilon_{crack}) + \varepsilon_m + \varepsilon_n \} \quad (9)$$

ここで, D は平面応力状態の剛性マトリックス, ε_v は体積ひずみ, ε_{crack} はクラックひずみを表す。

3.2 鉄筋の物性モデル

応力-ひずみ関係式は, 図-3 に示す Bilinear 型の弾塑性モデルを用い, また, 降伏条件は, 式(10)に示すような静水圧に依存しない Von-Mises 型を適用し, 等方硬化するものとした。

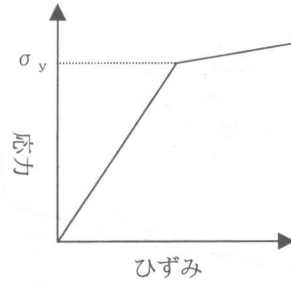


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y \quad (10)$$

ただし, σ_y は一軸降伏応力である。

3.3 強度のひずみ速度依存性

コンクリートおよび鉄筋の強度は, ひずみ速度に依存するものとした。今回の解析では, 動的強度の増加率の式として CEB-FIP Model Code 1990⁵⁾ を用いた。この式は, 本解析の範囲であるひずみ速度 10^0 以下に対して, その妥当性が実験により検証されている⁷⁾。強度の増加率は, ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の関数とし, 動的圧縮強度, 静的圧縮強度および動的引張強度, 静的引張強度それぞれ σ_c , σ_{co} , σ_t , σ_{to} すると, 式(11)~(14)のようになる。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{co}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1.026\alpha_s} \quad (\dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1}) \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{co}} = \gamma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1/3} \quad (\dot{\varepsilon} > 30 \text{ s}^{-1}) \quad (12)$$

ここで, $\alpha_s = 1 / [5 + 9(f'_c / f'_{co})]$

f'_c : 28 日圧縮強度, $f'_{co} = 10 \text{ N/mm}^2$

$$\log_{10} \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2, \dot{\varepsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{to}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1.016\delta_s} \quad (\dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1}) \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{to}} = \beta_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1/3} \quad (\dot{\varepsilon} > 30 \text{ s}^{-1}) \quad (14)$$

ここで, $\delta_s = 1 / [10 + 6(f'_c / f'_{co})]$

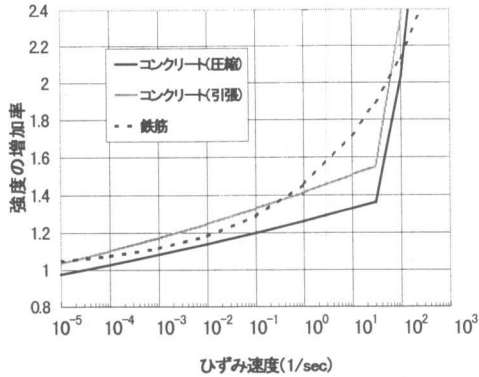


図-4 動的強度の増加率とひずみ速度の関係

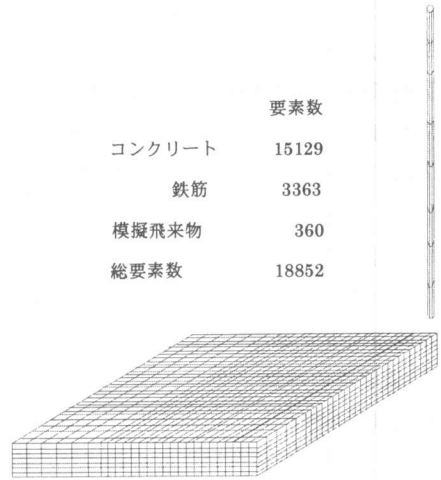


図-5 要素分割図

要素数

コンクリート	15129
鉄筋	3363
模擬飛来物	360
総要素数	18852

表-2 材料物性値

	質量密度 (kg/mm ³)	初期体積弾 性係数 (kN/mm ²)	初期せん断 弾性係数 (kN/mm ²)	一軸圧縮 強度 (N/mm ²)	一軸引張 強度 (N/mm ²)
コンクリート	2.17×10 ⁻⁶	9.8	12.04	27.6	2.24
	質量密度 (kg/mm ³)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm ²)	硬化係数 (N/mm ²)
鉄筋	7.85×10 ⁻⁶	205.8	0.3	332.2	2058
模擬飛来物	5.21×10 ⁻⁶	94.6	0.3	-	-

$$\log_{10} \beta_s = 7.112\delta_s - 2.33$$

$$\epsilon_o = 3 \times 10^{-6} s^{-1}$$

鉄筋については、Symonds-Ting タイプの表示式(15)を用いた。なお、定数 D, P は、Lindholm の材料試験結果⁶⁾に基づき、それぞれ 53.908, 5.043 とした。

$$\frac{\sigma_{yd}}{\sigma_{ys}} = 1.0 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \quad (15)$$

ここで、 σ_{yd} は動的降伏強度、 σ_{ys} は静的降伏強度である。

図-4 に動的強度の増加率とひずみ速度の関係をコンクリートの圧縮および引張強度と鉄筋の降伏強度についてあわせて示す。数値計算においては、各要素および各時間においてひずみ速度を計算し、計算されたひずみ速度に相当する動的強度を用いて終局強度破壊面を構成し、圧縮および引張破壊の有無を照査した。

4. 有限要素法による衝撃応答解析

4.1 解析モデル

解析モデルは、鉄筋コンクリートスラブおよび模擬飛来物の対称性を考慮し、1/4 断面对称モデルを用いた。また、飛来物は多角柱に置き換えている。コンクリートは 8 節点ソリッド要素、飛来物は 6 および 8 節点ソリッド要素、鉄筋はビーム要素でモデル化した。コンクリートと鉄筋は、完全附着を仮定し、節点を同一とした。図-5 に要素分割図を示す。スラブと模擬飛来物の接触要素は、リバウンドを考慮できるようにした。対称面についてはローラー支持、支持台および鋼板の取付位置に相当する節点には、ピン結合で、高さ方向の移動を拘束した。また、解析に用いた物性値を表-2 に示す。

今回解析に用いた衝突速度は、4.58 および 7.95 m/sec であり、ともに破壊形態はひび割

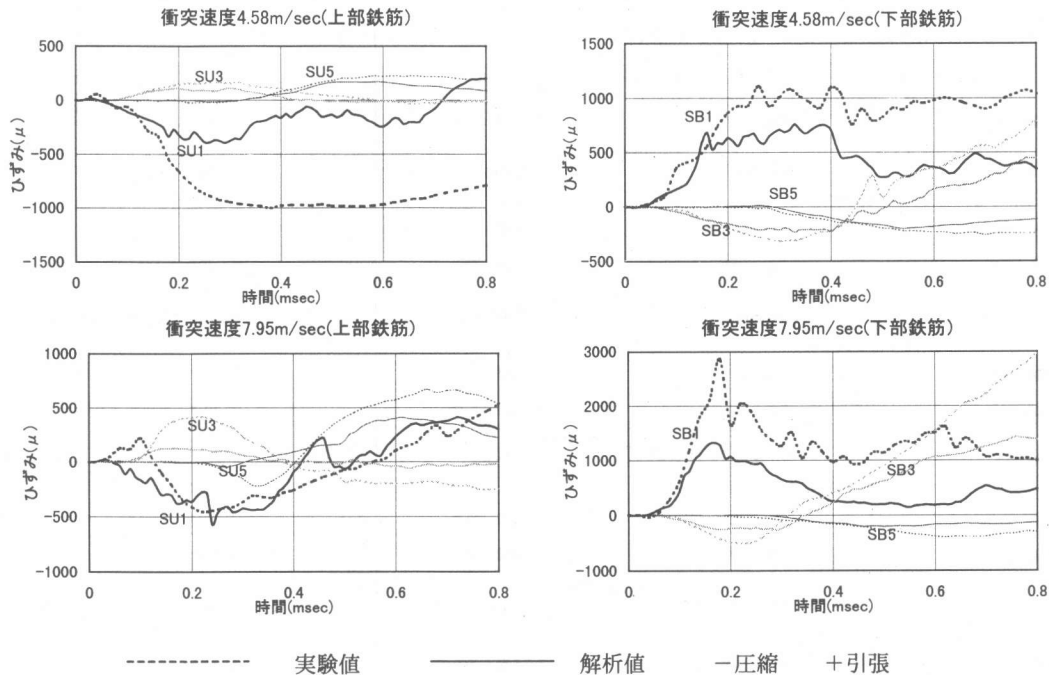


図-6 鉄筋ひずみ履歴の実験値と解析値の比較

れ発生にとどまり、裏面剥離は生じなかった。解析は、模擬飛来物がスラブに衝突した瞬間から開始し、飛来物の各節点に初速度を入力した。

4.2 実験結果との比較・検討

本解析手法が、衝撃応答をシミュレートできるか検討するために、衝撃荷重を受けたスラブが自由振動をはじめる以前の過渡的状态、すなわち、衝撃荷重第1波の载荷時間範囲(約0.8msec)について、実験結果との比較を行った。図-6に、衝突速度4.58および7.95m/secの衝撃実験で得られた上部および下部鉄筋のひずみ履歴を解析結果と比較して示す。この図から、解析結果は、過渡応答時の応力波伝播状況を概ねシミュレートできていると思われる。また、応力波の伝播速度はせん断波の速度(約2120m/sec)と等しく、解析結果は、各計測点の応力波が立ち上がる時間を良く捉えている。さらに、曲げ引張りひび割れの発生によって下部鉄筋には大きな引張りひずみが生じている。

図-7に、各計測点における鉄筋のひずみ分布

の時間的变化を示す。図-6で示した計測点以外でも、応力伝播状況を概ねシミュレートできていると思われる。

5. まとめ

鉄筋コンクリート梁において、その有用性が認められている多軸応力下の非線形等方性モデル、ひずみ速度依存性を考慮したモデルを用いて鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答解析を行った。その結果、破壊形態がひび割れ発生の場合には、本解析手法は、衝突直後の応力波の伝播状況を概ねシミュレートできることが明らかになった。

参考文献

- 1) 白井孝治, 伊藤千浩, 大沼博志: 有限要素法による鉄筋コンクリート構造物の衝撃解析手法, 電力中央研究所研究報告, U93053, 1994.3
- 2) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3

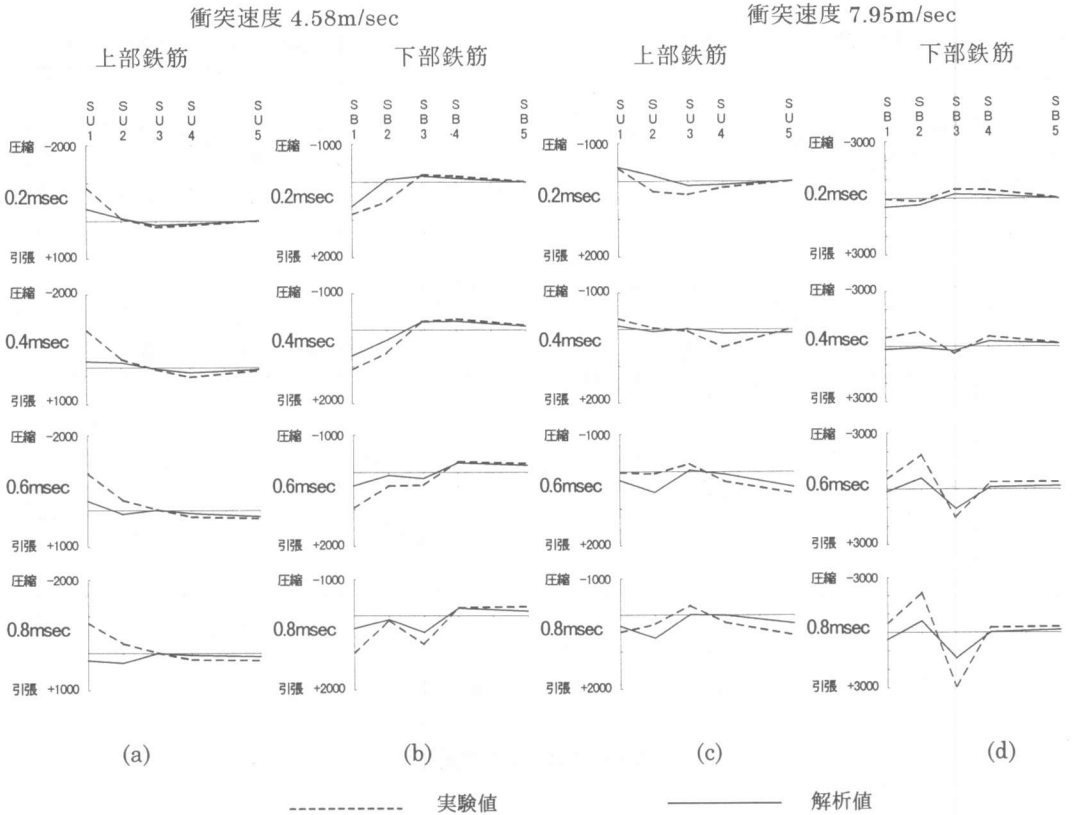


図-7 ひずみ分布の時間的变化

軸圧縮応力におけるコンクリートの
力-ひずみ関係 その 1 静的載荷,
日本建築学会構造系論文報告集 第
389号, 昭和63年7月

- 3) H.B.Kupfer and K.H.Gerstle : Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, Jour. of the ASCE, EM4, pp853-866, Aug.,1973
- 4) 石川徹也, 大沼博志, 名和豊春, 勝山裕之 : 三軸圧縮応力を受ける高強度コンクリートの構成式に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.53, pp.642-649, 1999.12
- 5) CEB/FIP : CEB/FIP Model Code for concrete Structures, 1990,pp.48-51
- 6) Lindholm,U.S.and R.L.Bessey : A Survey of Rate Dependent Strength Properties of Metal, Technical Report AFML-TR-69-119,

Air Force Materials Laboratory, 1969

- 7) K.Shirai, C.Ito, K.Jitsu, T.Yagishita, H.Ohnuma : Compressive and Tensile Strength of Concrete under Impact Loading, Proceedings of the 2nd Joint Symposium on Structural Material Engineering between Japan and Korea, pp.124-131, 1999.7