

V-14

低温下におけるRC版の衝撃破壊パターン

北海道大学 学生員 杉 山 隆 文
 北海道大学 正 員 佐 伯 昇
 北海道大学 正 員 藤 田 嘉 夫

§ 1. 序

本研究は脆性材料であるコンクリートの物質性状が低温下でどのように変化してゆくかを調べる研究の一つである。ここでは衝撃荷重を受ける、凍結したコンクリートがどのように挙動するかを検討し、コンクリートの低温下での挙動について考察を行なった。

これまでセメントモルタルを使いシャルピー試験機で衝撃試験を行ない、実験的に低温下における衝撃曲げ強さの基礎的性状を調べ、低温脆性について評価⁽¹⁾したが、今回はRCスラブを試験体とし、衝撃体のエネルギー、および速度の差異による破壊パターンを調べ、さらにスラブ上に取り付けた加速度計からのデータを分析して衝撃変形の検討を行なった。また衝撃を受けるコンクリート構造物をTWO-MASSシステムを用いてモデル化⁽²⁾し弾性理論の範囲以内で動的応答を解析し実験との比較検討を試みた。

§ 2. 実験概要

今回の衝撃試験で外的要因として衝撃体の運動エネルギー、衝撃速度を合わせて6通り変化させ、試験体温度を5段階に変えて(表-1)行なった。そしてそれぞれについて衝撃による試験体の加速度を3つの加速度計(1000G, 7500Hz)で測定し、加速度波形を2回時間積分して時間と各点の変位の関係を求めた。本論では衝撃荷重直下に一番近い点の最大変位を版の最大変位と仮定して静的試験結果、理論による数値計算と比較した。また同時に損傷状態を調べ、破壊パターンを分類した。

静的試験では衝撃試験と同様にそれぞれの温度で試験し、試験体が静荷重および動荷重に対してどのように耐力が変化するかを調べ、他方TWO-MASSモデルを使った数値計算による解析で重要な要素となるバネ定数 R_1 を求めた。また今回のモデルを使った解析で必要なもう1つのバネ定数 R_2 を決定するために、各5段階の温度でコンクリート供試体を静荷重で押し抜き試験を行いこれから R_2 を求めた。

(a) 試験体

図-1に示すRCスラブで、鉄筋比は0.08%である。コンクリートは単位水量 $174\text{Kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比45% 空気量5%で早強ポルトランドセメントを使用し川砂、川砂利で最大骨材寸法は5mmのものをを用いた。なお 2週間水中養生後の試験体の含水量は約5%である。

(b) 衝撃体

表-1 外的要因

No	1	2	3	4	5	6
H(m)	2.5	2.5	4.6	4.6	6.4	6.4
m(Kg)	2	4	2	4	2	4
V(m/s)	7	7	9.5	9.5	11.2	11.2
E(N・m)	49	98	90	180	125	250

$$T = \{ 10, -2, -20, -40, -70 \} ^\circ\text{C}$$

H: 落下高さ V: 衝撃速さ m: 試験体質量
 E: 衝撃体の運動エネルギー T: 試験温度

3. 2

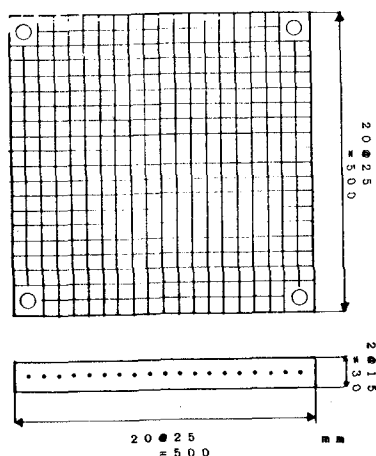


図-1 試験体の配筋図

質量は2および4Kgでそれぞれの長さは20,40cmで頭部が半径2cmにshapeされた鋼柱を使用した。

(c) 試験温度

水中養生後試験体を冷凍室に移し+20°Cから1時間に10°Cの割合で温度を下げる。そして所定の試験温度で1時間保ちその後直ちに取り出して各試験を行なった。

(d) 試験方法

試験体は400×400(mm)で4辺単純支持である。ただし4角をボルトで締め付けている。衝撃試験ではその中心に衝撃体を自由落下で衝突させる(図-2)。このとき衝撃荷重直下の地点より6cm毎に置かれた加速度計で、試験体の加速度の経時変化をローパスフィルタを内蔵した増幅器を介して波形記憶装置に取り込み、オシロスコープ上で操作しディスクに出力した。サンプリングタイムは20μsecである。

静的試験、押し抜き試験は、変位変換器TCLを使って荷重点の変位を測定した。載荷体の形状として衝撃体のものと同じものを使用した。

§3. TWO-MASS モデルによる数値計算

衝撃荷重を受ける試験体は強度特性としての曲げ強さと質量特性としての慣性抵抗力とによって衝撃力に抵抗する⁽³⁾。本論では時間的要素を考慮せずに線型のパネ定数を実験によって求めTWO-MASSモデル(図-3)によって衝撃荷重と変形の関係を解析した。質点 m_1 は試験体の質量($m_1 = 20\text{Kg}$)、質点 m_2 は衝撃体の質量である。

モデルの微分方程式は次式となりこれを差分法を使って解き、変位 X_1, X_2 を求める。そして X_1 の最大変位を版の最大変位とし、実験との比較対象とした。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 + R_1 X_1 - R_2 (X_2 - X_1) = 0 & (1) \\ m_2 \ddot{X}_2 + R_2 (X_2 - X_1) = 0 & (2) \end{cases}$$

差分法より

$$\dot{X}^t = \frac{1}{\Delta} (X^t - X^{t-\Delta t}) \quad \ddot{X}^t = \frac{1}{\Delta} (\dot{X}^{t+\Delta t} - \dot{X}^t) \quad (5)$$

$$\dot{X}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta} (X^{t+\Delta t} - X^t)$$

(3), (4)を(5)に代入して

$$\ddot{X}^t = \frac{1}{\Delta^2} (X^{t+\Delta t} - 2X^t + X^{t-\Delta t}) \quad (6)$$

(1), (2)式を(6)で展開して整理すると次式を得る

$$\begin{cases} \frac{1}{\Delta^2} X_1^{t+\Delta t} = -\frac{1}{\Delta^2} (-2X_1^t + X_1^{t-\Delta t}) - \frac{R_1}{m_1} X_1^t + \frac{R_2}{m_1} (X_2^t - X_1^t) & (1)' \\ \frac{1}{\Delta^2} X_2^{t+\Delta t} = -\frac{1}{\Delta^2} (-2X_2^t + X_2^{t-\Delta t}) - \frac{R_2}{m_2} (X_2^t - X_1^t) & (2)' \end{cases}$$

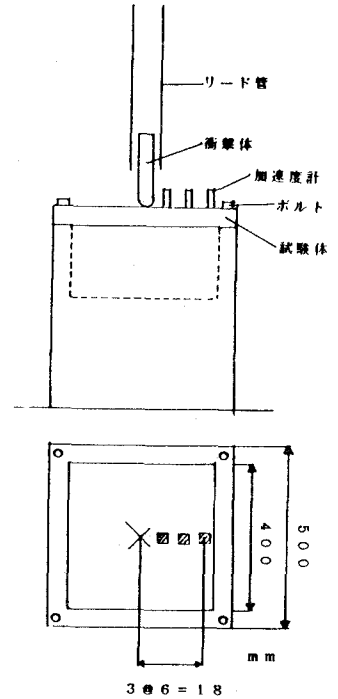


図-2 衝撃試験装置と加速度測定位置

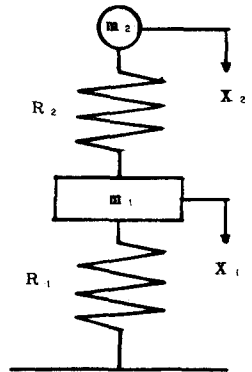


図-3 TWO-MASS モデル

ここで $t = 0$ で

$$\ddot{X}^0 = \frac{1}{\Delta^2} (X^{-\Delta t} - 2X^0 + X^{\Delta t})$$

$$\dot{X}^0 = \frac{1}{2\Delta} (-X^{-\Delta t} + X^{\Delta t}) \quad \text{となる}$$

そして(1)' は

$$\frac{1}{\Delta^2} X_1' = -\frac{1}{\Delta^2} (-2X_1^0 + X_1^{-1}) - \frac{R_1}{m_2} X_1^0 + \frac{R_2}{m_1} (X_2^0 - X_1^0) \quad \text{となる}$$

これから繰り返し計算を実行して X_1 , X_2 を求める.

初期条件は $X_1^0 = 0$ $X_2^0 = 0$ なお $\Delta t = 20 \mu\text{sec}$

$$X_1^0 = 0 \quad X_2^0 = \sqrt{2gh}$$

$$X_1^0 = 0 \quad X_2^0 = g$$

§ 4. 実験結果

(a) 衝撃破壊パターン (図-4, 5)

試験体表面

図-4は運動エネルギーの差異による破壊パターンの特性を示したもので、表-1に示したようにNo3以下(運動エネルギーが100 N・m以下程度)では微細ひび割れが多数発生

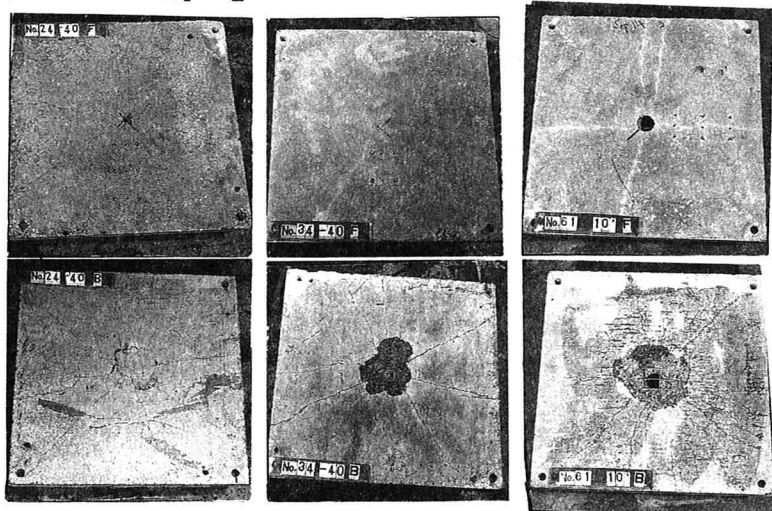


写真 1

写真 2

写真 3

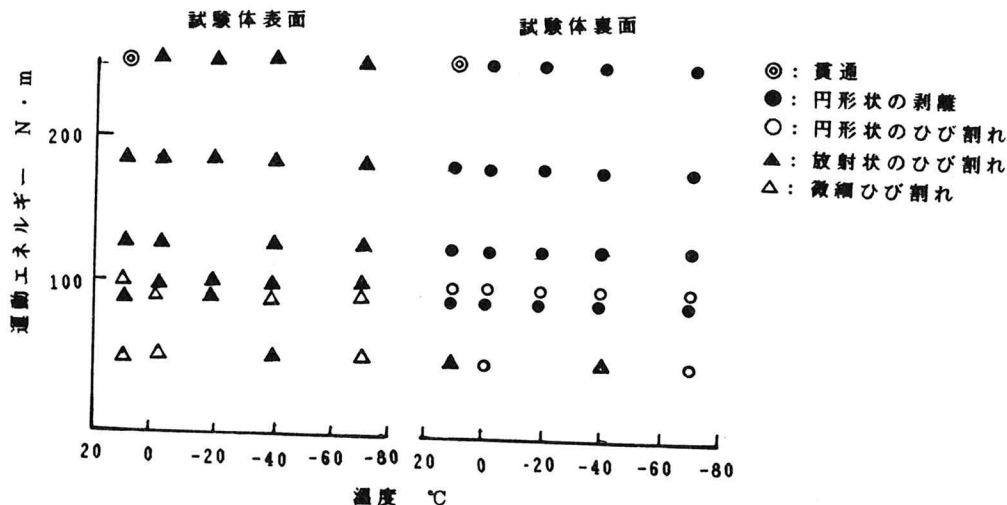


図-4 衝撃破壊パターン

しその中でNo 2とNo 3を比較すると運動エネルギーが小さく、速度が大きい後者において多く微細ひび割れ見られる。No 4以上（運動エネルギーが100～250N・m程度）ではすべての試験体で放射状のひび割れが生じている。図-5は、衝撃荷重直下のくい込み深さを示したもので温度低下による影響を受けており、低温になるほどくい込み深さは小さくなっている。また運動エネルギーが大きくなるとその差が明確である。その中でNo 4とNo 5では運動エネルギーが大きく速度は小さい前者が各温度で約2倍その深さが大きくなっている。

試験体表面

No 6, +10° でコンクリートが完全貫通しており今回の試験で一番コンクリートの損傷が大きい。No 3以上（衝撃速度が9.5, 11.2m/s）ですべての試験体で円形状の剥離が起こっている。No 2はすべて円形状のひび割れ、No 1は半数が放射状のひび割れが生じている。

写真（1～3）はNo 2, No 3で温度が-40℃およびNo 6, 温度10℃の試験体表面と裏面の損傷状態である。写真1は表面では放射状のひび割れ、裏面は円形状のひび割れ、写真2は表面で微細ひび割れ、裏面で円形状の剥離、写真3は貫通の状態をそれぞれ示している。

(b) 衝撃変形挙動（図-6, 7）

低温の影響による変位挙動について調べるため、最大変位量 δ_{max} とその時の単位変位量に対する時間、 t/δ_{max} について検討してみた。図-6は各温度での δ_{max} 、図-7は各温度の t/δ_{max} を示している。 δ_{max} は低温下にかかわらずそれぞれでほぼ一定となっている。

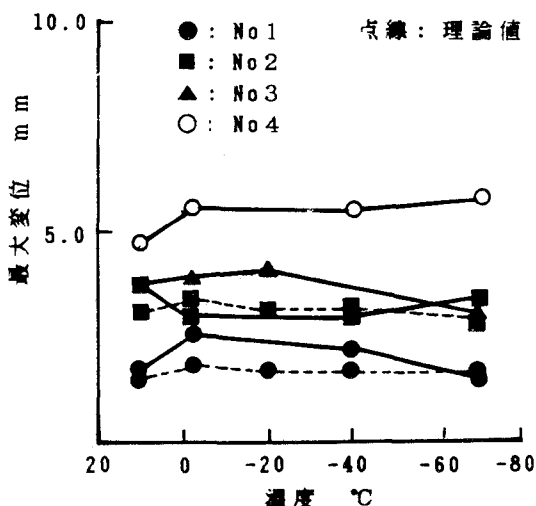
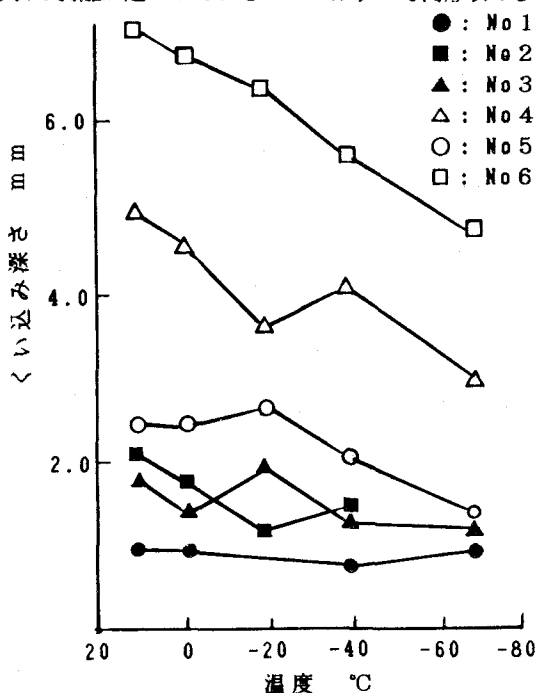


図-6 衝撃試験による最大変位

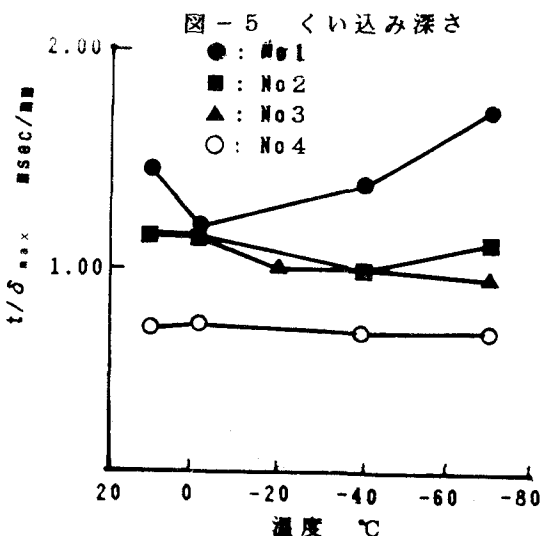


図-7 t/δ_{max}

t/δ_{max} はNo1で低温下において大きくなっているが、それ以外ではほぼ一定である。

(c) 静的試験による耐力とバネ定数(図-8, 9)

図-8は温度低下による試験体のひび割れ限界荷重 P_{or} と破壊荷重 P_u 、またその時の荷重点の最大変位 δ_{or} 、 δ_u の変化を示したものである。 δ_{or} は温度低下にかかわらずほぼ一定となっている。しかし鉄筋コンクリートとしての機能が失われる状態の最大変位 δ_u は、温度が低下するに従い徐々に大きくなっている。図-9は各温度で P_{or} 、 P_u を δ_{or} 、 δ_u で除した R_{1or} と R_{1u} 、また同じ方法で押し抜き試験より求めた R_2 を示したものである。なおこの値(R_{1or} 、 R_{1u} 、 R_2)を理論計算のバネ定数として使った。 R_{1or} と R_2 は温度低下で大きくなるが R_{1u} はほぼ一定である。試験後の試験体の損傷は裏面で円形状のひび割れが発生していた。

(d) TWO-MASSモデルによる解析(図-10)

図-10で理論計算から求めた X_1 の最大変位と各温度の関係を示した。 X_{or} は実験より求めたバネ定数 R_{1or} と R_2 を使い、 X_u は R_{1u} と R_2 を使って計算した。 R_{1or} と R_2 は低温になるほど大きくなっておりそれに伴って X_{or} は若干減少している。 X_u も減少傾向にある。 X_{or} と X_u の差は運動エネルギーが増すほど大きくなっており、またNo2とNo3では衝撃速度が小さく運動エネルギーが大きいNo2で変位は大きくなっている。 $+10^{\circ}\text{C}$ で変位は全体的に -2°C より小さくなっているが、これは 10°C で R_{1or} 、 R_{1u} の値が両方とも -2°C よりも大きくなっており逆に R_2 は小さくなっているためと考えられる。なお、図-6でNo1とNo2の X_u の値を実験値と比較して示している。

8.5. 実験考察

静荷重に対しては温度低下によって試験体の破壊荷重は大きくなっておりそれに伴って最大変位も増し、明らかに試験体の耐力は温度の影響を受けている。衝撃荷重の増加による損傷の特徴は、小さい衝撃エネルギーでは放射状のひび割れが発生し次に円形状のひび割れに移り、さらに円形状の裏面剥離に発達していく。裏面剥離までの挙動は弾性～弾塑性状態にあると考えられる⁽⁴⁾。今回の衝撃試験では運動エネルギー、衝撃速度を変えて試験体の破壊パターンを一通り網羅できた。試験体表面は運動エネルギーに、また裏面は衝撃速度に損傷

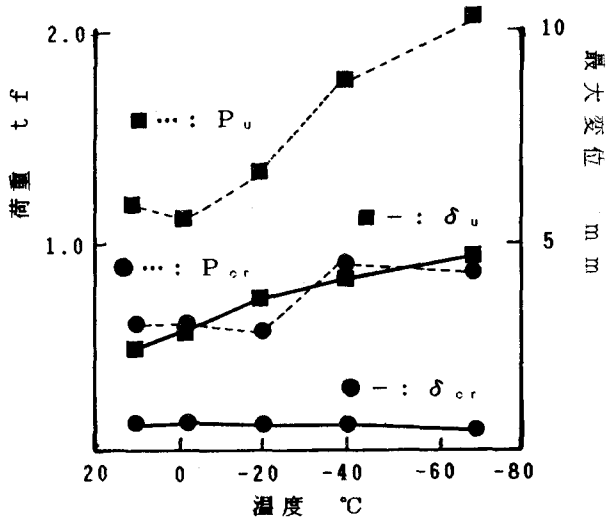


図-8 静的試験による破壊荷重と最大変位

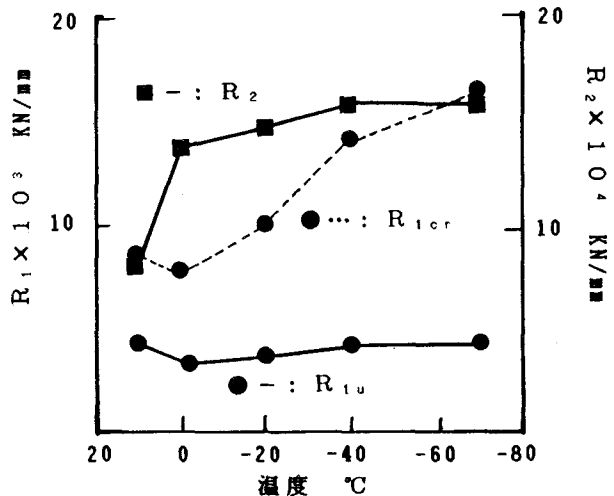


図-9 バネ定数

状態の変化が関係していると考えられる。しかし温度低下だけによる影響では破壊パターンは表面のくい込み深さ以外あまり変化していない。落下試験より求めた版の最大変位 δ_{max} と理論から求めた X_u を比較すると、全体的に δ_{max} より X_u が小さくなっている傾向を示し運動エネルギーが大きくなるほどその差が大きくなっている。また変位から調べた試験体の破壊挙動は温度低下による影響は明確には示されなかった。

§ 6. 結び

損傷状態から分類した試験体の破壊パターンは、表面のくい込み深さが温度低下による影響を受けているが、ひび割れ損傷形状はあまり影響が認められなかった。また変位から調べた試験体の衝撃荷重を受けた後の挙動に関しても低温下による影響はあまりなかった。また今回実験より求めたバネ定数を用いて行なったTWO-MASSモデルによる変位の数値計算は、ほぼ実験値に対応し、低温による大きな変化はなかった。

本研究は文部省科学研究費補助金で行なったものの一部である。

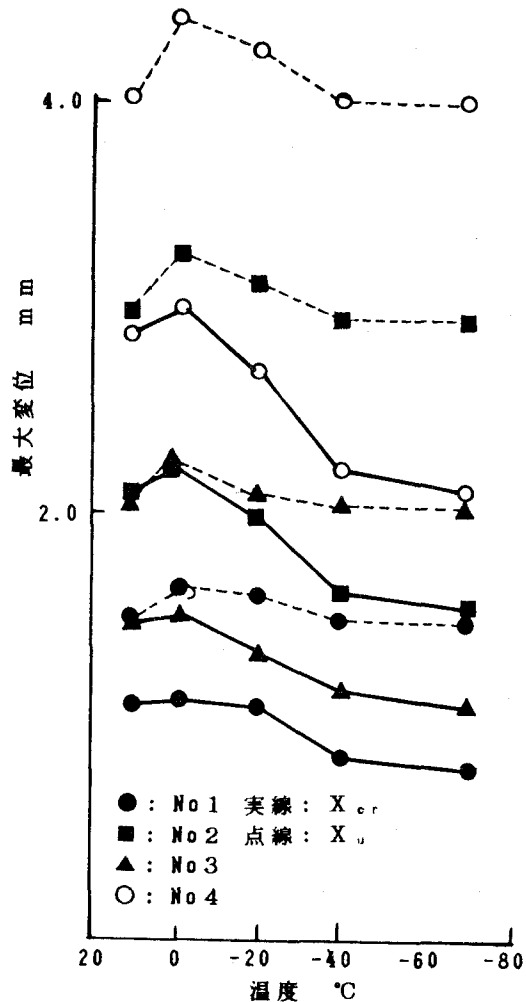


図 - 10 理論による最大変位

参考文献

- (1) 杉山ほか "低温下におけるコンクリートの衝撃強さ" 寒地技術シンポジウム 1986年
- (2) Professor Dr. Ing J. Eibl of Karlsruhe University, W.Germany "Model Analysis as a Design Tool"
- (3) 佐治ほか "脆性材料の衝撃曲げ試験に関する基礎的研究" 建築学会構造系論文集 第361号
- (4) 能町ほか "低速度衝撃力によるコンクリート床版の動的応答" 土木学会構造工学論文集 vol34A
- (5) James G. MacGregor University of Alberta, CANADA. "Design and Behavior of Composite Ice-Resisting Walls"
- (6) S.H. PERRY. Imperial College of Science and Technology, London, UK. "Factors Influencing The Response Of Concrete Slabs To Impact"
- (7) K.G. KUFUOR and S.H. PERRY. Imperial College of Science and Technology, London, UK. "Hard Impact of Shallow Reinforced Concrete Domes"