

論文

[1042] 低温下における RC 版の衝撃破壊挙動

正会員 ○杉 山 隆 文 (北海道大学大学院)

正会員 佐 伯 昇 (北海道大学工学部)

正会員 藤 田 嘉 夫 (北海道大学工学部)

§ 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。本論では衝撃荷重を受けたコンクリートが低温下でどのように挙動するかを検討し、衝撃力に対するコンクリートの低温脆性について考察を行なった。

衝撃試験は鋼柱による自由落下方式で行い、RC版を試験体とした。また考慮した試験体温度は $+10^{\circ}\text{C}$ ～ -70°C である。そして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⁽¹⁾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

衝撃試験は外的要因を2つに大別して行なった。Part 1は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。そして衝撃後の試験体の損傷状態を調べ、破壊パターンを温度によってそれぞれ分類した。Part 2では衝撃変形挙動の温度低下による影響を調べるために衝撃速度をさらに遅くして2通りの場合を各温度(表-1)で行なった。そして衝撃による試験体の加速度を3点で加速度計(1000G, 7500Hz)から測定し、各点の衝撃力を求める。また加速度波形を2回時間積分して時間と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。

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

表-1 外的要因

Part 1

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)	7.0	7.0	9.5	9.5	11.2	11.2
E(N・m)	49	98	90	180	125	250

Part 2

No	7	8
h(m)	0.6	0.8
m(Kg)	2	2
V(m/s)	3.5	4.0
E(N・m)	12	16

h: 落下高さ

m: 衝撃体質量

V: 衝撃速度

E: 衝撃体の運動エネルギー

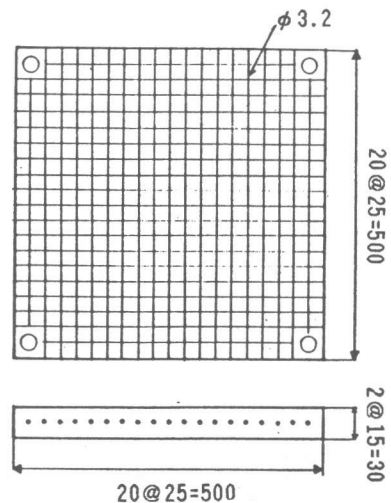
T: $\{+10, -2, -20, -40, -70\}^{\circ}\text{C}$ 

図-1 試験体の配筋図

mm

うに耐力が変化するかを調べ、TWO-MASSモデルの数値計算で重要な要素となるバネ定数 R_1 を求めた。また無筋のコンクリート供試体を用いて押し抜き試験を行い、局部的変位挙動を調べ、もう一つのバネ定数 R_2 を求めた。

(1) 試験体

図-1に示す厚さ3cmのRCスラブで、鉄筋比は1.07%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。

(2) 衝撃体

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。

(3) 試験温度

水中養生後試験体を冷凍室に移し $+20^\circ\text{C}$ 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出して各試験を行なった。

(4) 試験方法

a. 衝撃試験 試験体は $400\times 400(\text{mm})$ 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。そして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 $20\mu\text{sec}$ である。

b. 静的試験 試験体の支持条件を衝撃試験と同じにして、変位変換器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。また押し抜き試験においても同様に試験を行なった。押し抜きコーンの大きさは上円内径40mm、下円内径70mm、高さ30mmの半円錐形のコーンである。

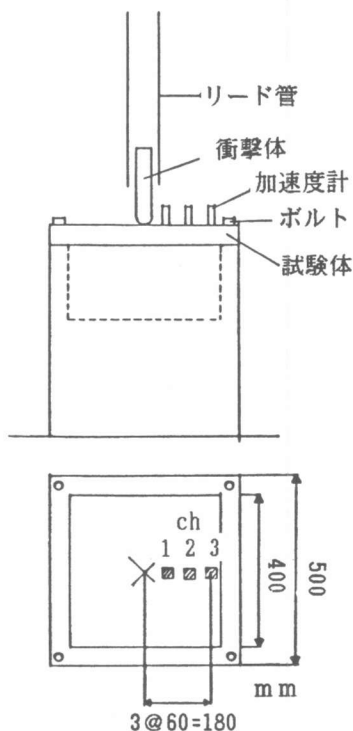


図-2 衝撃試験装置と
加速度測定位置

§ 3. TWO-MASS モデルによる数値計算

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物が2つのバネで衝撃に抵抗すると仮定する。そしてこれをTWO-MASSシステムを用いてモデル化(図-3)し衝撃荷重と変形の関係を理論解析した。本論では時間的要素を考慮せずに線形バネ定数を実験から求めた。バネ R_1 は全体的応答(Global Response)による抵抗で、静的試験より求めたバネ定数を使用した。バネ R_2 は局部的応答(Local Response)による抵抗を表わす。今回は押し抜き試験で仮定した、破壊線内のコーンが局部変形を起こす直前の、強度と変形量から R_2 のバネ定数を求めた。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($m_2=2\text{Kg}$)である。またNo7($V=3.5\text{m/s}$)、No8($V=4.0\text{m/s}$)を想定して初期条件で落下高さをそれぞれ $h=0.6\text{m}$ 、 0.8m とした。

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。

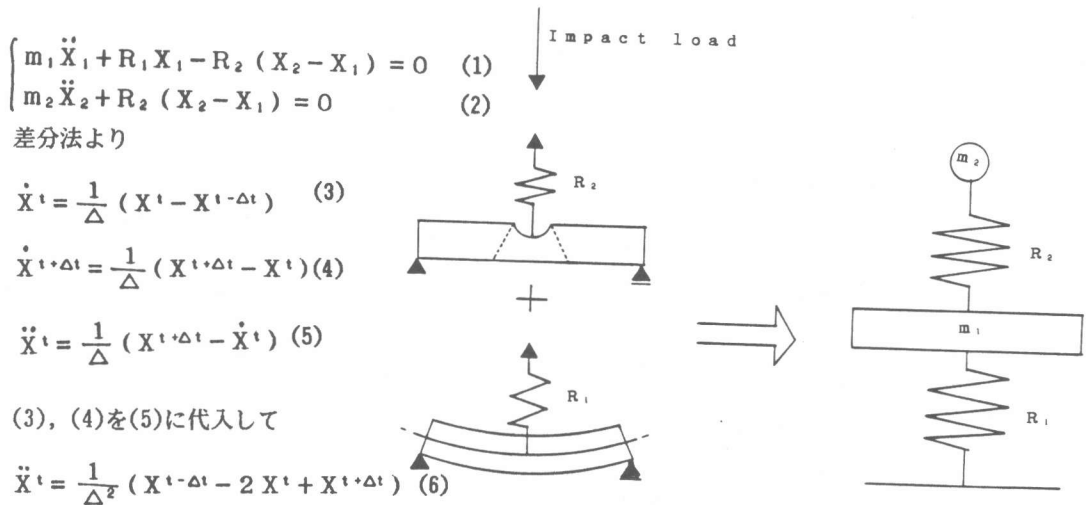


図-3 TWO-MASSシステムによるモデル化

(1), (2)式を(6)で展開して整理すると次式を得る。

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

二つの式から繰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 $\Delta t = 2.0 \mu\text{sec}$
$\dot{X}_1^0 = 0$	$\dot{X}_2^0 = \sqrt{2gh}$	
$\ddot{X}_1^0 = 0$	$\ddot{X}_2^0 = g$	

§ 4. 実験結果

(1) 衝撃破壊パターン (Part 1)

写真1 (No2, -40°C) は表面で放射状のひび割れ, 裏面で円形状のひび割れ
 写真2 (No3, -40°C) は表面で微細ひび割れ, 裏面で円形の剥離を表わしている. そして写真3 (No6, +10°C) は最も局部的損傷が激しくコンクリートの

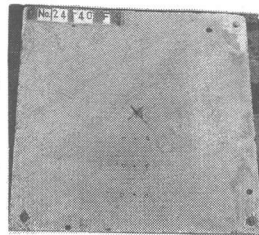


写真 1

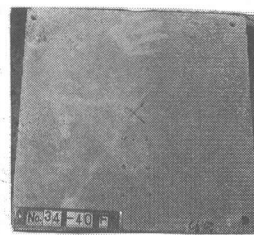


写真 2

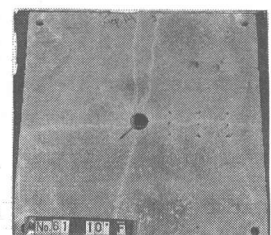


写真 3

完全貫通の状態を表わしている。図-4は試験体表面の衝撃荷重点のくぼみ深さを示している。衝撃エネルギーが比較的大きいNo4, No6は、くぼみ深さから調べた局部損傷は低温下で明らかに小さくなっている。中程度の衝撃エネルギーNo2, 3, 5は、くぼみ深さは低温下で小さくなっているが裏面の損傷状態は、No2で円形状のひび割れ、No3, 5は円形状の剥離が温度低下にかかわらず生じていた。No1の損傷形状は低温下でもほぼ同じで、裏面では放射状のひび割れを起こしていた。

(2) 衝撃変形挙動 (Part 2)

図-5はNo7($V=3.5\text{m/s}$)で各測定点の最大衝撃力 $F_{\max}$ をそれに達するまでに要した時間 T_f で割った値($F_{\max}/T_f$)つまり単位時間に対する衝撃力の大きさ、衝撃力伝播速度(Stress rate)を各温度について示している。温度低下によって各点でStress rateは増加する傾向がある。1chで T_f の平均は約0.4msecであった。図-6はNo7, No8($V=4.0\text{m/s}$)の版の最大変位 $D_{\max}$ をそれに達するまでに要した時間 T_d で割った値($D_{\max}/T_d$)つまり単位時間に対する変位量、変位伝播速度(Displacement rate)を示している。低温になるほどDisplacement rateは増加傾向にある。 T_d の平均はNo7, No8とも約1.8msecであった。また T_f (1ch)と T_d の差は低温下で減少する傾向がある。今回の実験では光学式変位形等による変位の検証は特に行なわなかった。

(3) 静的試験による耐力とバネ定数

図-7は試験体のひび割れ限界荷重 P_{cr} と破壊荷重 P_u 、またその時の荷重点の最大変位 δ_{cr} , δ_u を示したものである。 δ_{cr} は温度低下にかかわらずほぼ一定となって

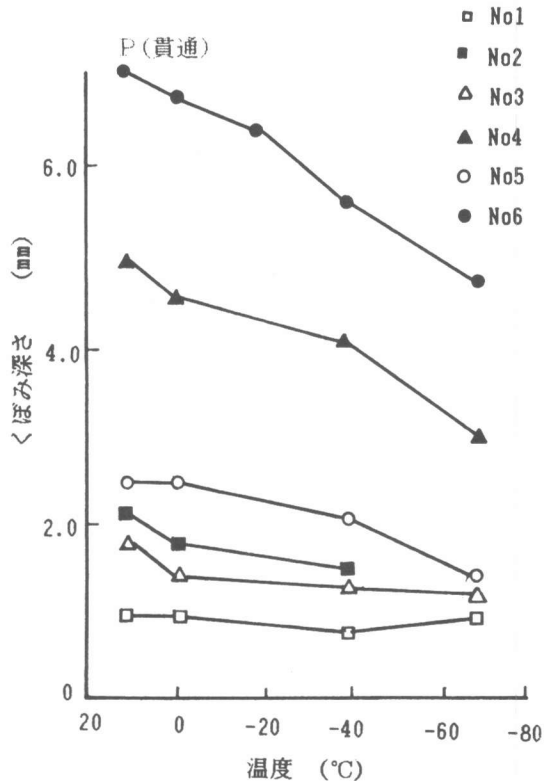


図-4 くぼみ深さ

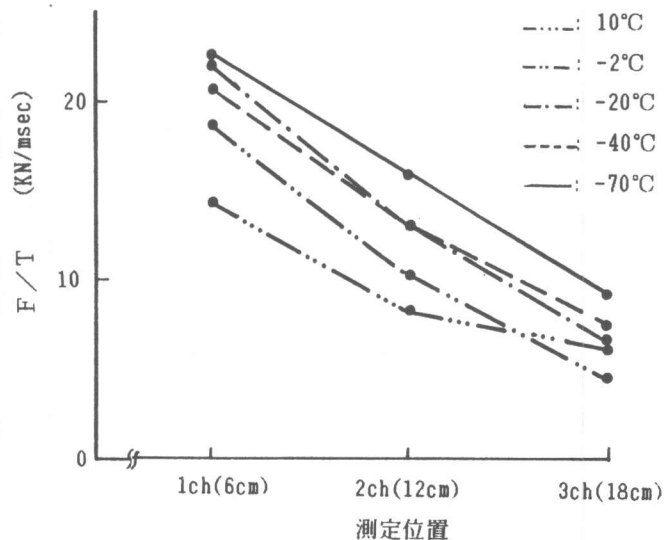


図-5 $F_{\max}/T_f$ (Stress rate)

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-8は理論解析で用いるバネ定数を示しており、各温度で P_{cr} を δ_{cr} で除した R_1 ($=P_{cr}/\delta_{cr}$) また同じ方法で押し抜き試験より求めた R_2 を表わしている。 R_1, R_2 は温度低下で増加している。

(4) TWO-MASSモデルによる解析

図-9は理論計算から求めた版の最大変位 X_1 を衝撃試験から求めたNo7, No8の版の最大変位 D_{max} と比較して示している。 R_1 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_1 は若干減少している。一方 D_{max} は温度低下による変化の傾向は明瞭ではない。(T_d は約2.3msec)

§ 5. 実験考察

静的試験で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版の最大変位も大きくなっている。一方ひび割れ荷重も温度低下で大きくなっているが、その時の変位はほとんど変化していないこれはコンクリートの弾性係数が低温になるに従って大きくなるからである。すなわち静荷重に対するコンクリートの耐力は低温下で増している。

今回行なった衝撃試験の中で衝撃エネルギーが大きいNo4($E=180N\cdot m$)とNo6($E=250N\cdot m$)の場合で表面のくぼみ深さが低温になるほど明らかに小さくなっている。これは衝撃エネルギーが一定の場合、衝撃を受けた試験体は常温では局部的にそのエネルギーを吸収する割合が多いのに対

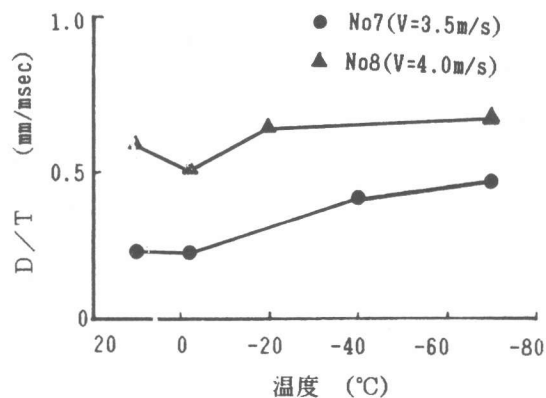


図-6 D_{max}/T_d (Displacement rate)

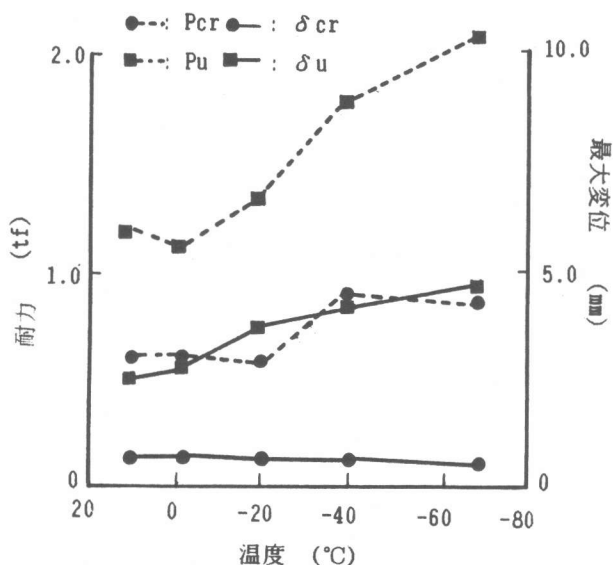


図-7 静荷重による耐力, 最大変位

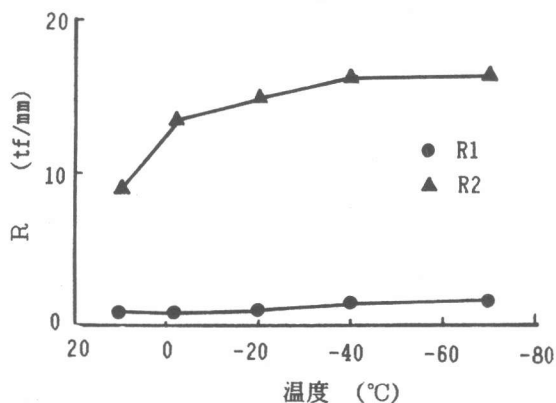


図-8 バネ定数

して、低温下では衝撃エネルギーを全体的に分散して吸収する、つまりGlobalに反応するためと考えられる。また衝撃エネルギーをさらに小さくして衝撃変形挙動を調べたPart2の衝撃試験結果からも同様なことが考えられる。Part2の衝撃試験結果では衝撃荷重点に一番近い点で調べた変位伝播速度(Displacement rate)および各点の衝撃力伝播速度(Stress rate)が

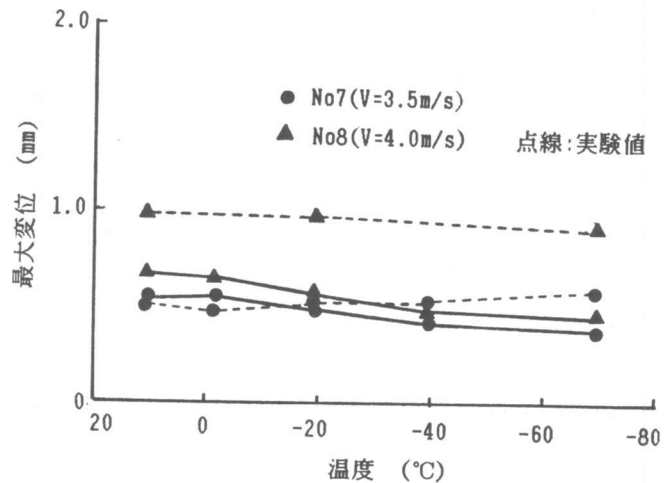


図-9 TWO-MASS モデル

温度低下によって増加する傾向がある。つまり低温下で局部的な破壊よりもむしろ全体的な破壊を起こす、と考えられる。これはコンクリートの衝撃力に対する低温脆性的な挙動を示唆している。

TWO-MASSモデルを使った理論解析では X_1 の最大変位は実験値 D_{max} にほぼ対応しており、仮定したモデルと実験との適合性が今後の衝撃挙動を研究する上で役立つものと思われる。しかしバネ定数の求め方は時間的な考慮も含めて更に検討する必要がある。

§ 6. 結び

今回行なった実験をまとめると次のようになる。

- (1) 比較的大きい衝撃エネルギーでは常温下で試験体は貫通していたが低温下では裏面の剥離を起こしていた。中程度の衝撃エネルギーの場合、試験体表面のくぼみ損傷は低温下で小さく、裏面の損傷形状は温度低下にかかわらず同じ形状を表わしていた。
- (2) 損傷をあまり受けない小さい衝撃エネルギーの実験(Part2)では、衝撃時に発生する応力波の伝播速度は、低温下で増加する傾向があった。
- (3) TWO-MASSモデルを使って計算した最大変位は実験値とほぼ対応し低温下であまり変化していない傾向を示した。

本研究は文部省科学研究費補助金〔試験研究(2)〕で行なったものの一部である。

参考文献 (1) Professor Dr. Ing J. Eibl of Karlsruhe University, W.Germany "Model Analysis as a Design Tool" (2) 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 (3) 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 (4) James G. MacGregor University of Alberta, CANADA. "Design and Behavior of Composite Ice-Resisting Walls" (5) S.H. PERRY. Imperial College of Science and Technology, London, UK. "Factors Influencing The Response Of Concrete Slabs To Impact" (6) K.G. KUFUOR and S.H. PERRY. Imperial College of Science and Technology, London, UK. "Hard Impact of Shallow Reinforced Concrete Domes"