

論文

[1031] 低温下におけるコンクリート桁の衝撃破壊形状と衝撃変形挙動

正会員 ○ 杉山 隆文 (北海道大学大学院)
 // 佐伯 昇 (北海道大学工学部)
 // 藤田 嘉夫 (北海道大学工学部)
 有馬 伸広 (北海道大学大学院)

1. まえがき

本研究の目的は衝撃力を受けるコンクリートの挙動に関して低温下と常温下の違いを調べることである。水セメント比を一定、コンクリートの含水量を飽和状態としたコンクリート桁を試験体とし破壊形状と変形挙動からその違いを考察する。そしてこれまでの衝撃試験結果⁽¹⁾等を参考にコンクリートが破壊に至るまでの衝撃変形挙動を衝撃後、時間的に3段階に分けて低温と常温の場合についてそれぞれ検討を行なう。

衝撃荷重に対する理論解析は種々提案されているが著者らは有限差分法によるモデル解析を試みている。モデルは衝撃力を受けるコンクリート構造物を質点とバネで置き換えたものである。バネ定数の決め方を考慮しながら変位を解析し、実験値と比較してモデル解析の適応性を検討する。

0℃以下でコンクリートの性質が変化しその結果外力に対する応答が常温と比べてどのように異なるかという話題は新しいものではない。しかしながら注目はされていてもそれに対する研究は立ち遅れているのが現状である。特に衝撃力に対するコンクリートの低温脆性に関する研究は十分行われていない。

また近年、北極圏およびその周辺の極寒冷地域の開発計画は盛んに進められているがこれらの地域に構築されるコンクリート構造物の設計にあたり低温下コンクリートの挙動に関する研究は今後一層必要となってくると思われる。

複合材料であるコンクリートの性質は-100℃までの温度低下で大きく変化し外力に対する応答は温度、水セメント比、湿潤状態に大きく関係している。⁽²⁾例えば、飽和状態のコンクリートの圧縮強度は-70℃の強度は20℃の2倍以上になるのに対して乾燥状態のコンクリートではほとんど増加しない。⁽²⁾また動的荷重に対する飽和状態のコンクリートの耐力も温度低下に従って増加すると考えられるが衝撃力を受けたコンクリートは低温下でより脆弱性を示したと報告されている。⁽²⁾

2. 実験概要

使用した試験体はD10, D13の鉄筋を一本ずつ配筋した鉄筋比がそれぞれ0.95%, 1.69%の単鉄筋はりとなす鉄筋コンクリートはりである。図-1

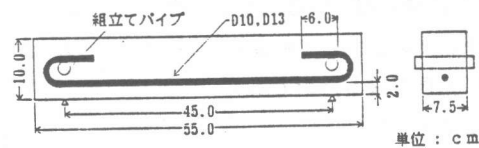


図-1 試験体形状

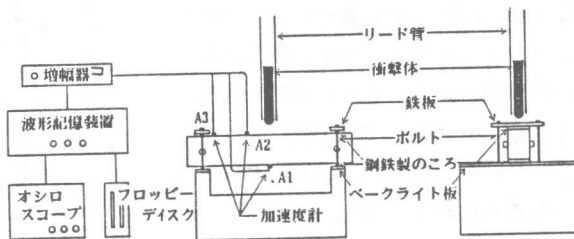


図-2 衝撃試験装置

に試験体の形状を示した。コンクリートの配合は単位水量 $174\text{kg}/\text{cm}^3$ 、水セメント比45%、空気量5%で早強ポルトランドセメント、最大骨材寸法 25mm の川砂利、川砂を用いたAEコンクリートである。

衝撃試験は先端が半径 2cm の球状をした鋼柱を衝撃体とする自由落下方式で行なった。試験体は両端をローラで支持し反動で上方方向に移動するのを防ぐために上部にもローラを置き鋼板とボルトで締めた。しかし軸方向に自由に移動できる可動支承とした。図-2に試験装置の概略を示した。試験体は2週間水中養生後冷凍室に移し $+20^\circ\text{C}$ から1時間に 10°C 温度を下げ各実験温度(-2°C 、 -20°C 、 -80°C)で6時間その温度を保ち、その後取り出し室温($+23^\circ\text{C}$)でただちに実験を行なった。ただし常温試験は養生後室温で行なった。先ず無筋コンクリート試験体を使い各温度で試験体が丁度一打撃で曲げ破壊を起こす落下高さを調べた。(衝撃体質量 $m=2.0\text{kg}$)次に鉄筋コンクリート試験体を使い衝撃体の落下高さ(h)、質量(m)を $h_1=6.15\text{m}$ 、 $m_1=4.0\text{kg}$ で試験体の破壊形状を調べた。そして変形挙動を調べるために $h_2=0.5\text{m}$ 、 $m_2=2.0\text{kg}$ で実験を行なった。

変位を求めるために試験体の上縁と下縁に合わせて3個の加速度計(1000G 、 750Hz)を取り付けた。(図-2)そして衝撃力による試験体の加速度の経時変化をローパスフィルターを内蔵した増幅器を介して波形記憶装置に取り込みマイクロプロセッサ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。

3. 実験結果

表-1はコンクリートの各温度におけるシリンダーによる圧縮、引張試験の結果を示している。また図-3は無筋コンクリートを使って衝撃試験と同じ条件のもと各温度で静的載荷試験を行い、その時の耐力と破壊時の支間中央の変位量を示している。温度低下に従い耐力は増加しているが変位量はほとんど変化していない。これは弾性係数が大きくなるためである。

3-1. 最小落下高さ

図-4は各温度でそれぞれ5本の無筋コンクリート試験体を使い曲げ破壊を起こす落下高さを調べた結果である。 -20°C までは明らかに衝撃力に対する吸収エネルギーの増加がみられるが -80°C では逆に減少する傾向がある。この試験結果より無筋コンクリートに曲げひび割れが生じない最小の落下高さ H_{min} を決定した。

3-2. 破壊形状

図-5は試験体温度が $+23^\circ\text{C}$ と -80°C の

表-1 低温下の圧縮・引張強度

	(N/mm ²)			
	$+23^\circ\text{C}$	-2°C	-20°C	-80°C
f_c	41.2	45.2	59.2	81.1
f_t	3.12	3.21	5.38	8.27

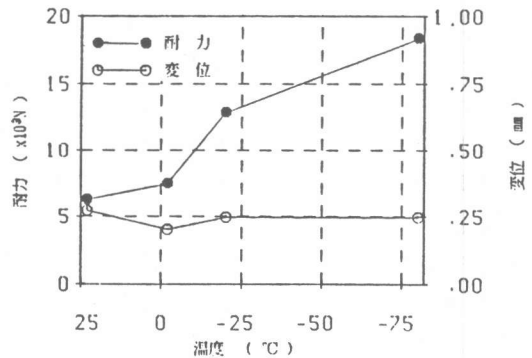


図-3 静的載荷による耐力と破壊時の支間中央のたわみ

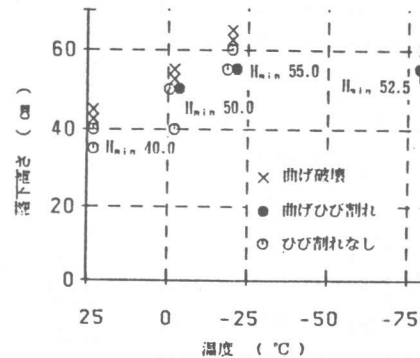


図-4 曲げひび割れが生じない最小落下高さ

ときの衝撃試験による破壊形状を静的荷重による最終的な破壊形状と比較して示したものである。D10の鉄筋を使用した試験体では温度低下にかかわらず最終的に衝撃、静的荷重に対して曲げによる破壊を示した。一方D13の鉄筋を使用した試験体では+23°Cで静的荷重でせん断破壊を起こし衝撃荷重では曲げひび割れと斜めひび割れによる破壊を生じていた。それに対して-8

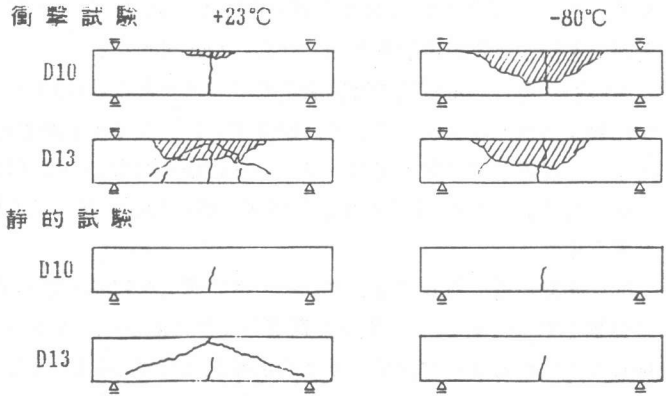


図-5 RC試験体の破壊形状

0°Cでは衝撃、静的荷重に対して曲げによる破壊であった。

衝撃試験ではすべての試験体で衝撃荷重点上縁の表面剥離が起こっていた。しかし温度による剥離の度合の違いは明確にはなかった。

3-3. 変形挙動

図-6は無筋、D10、D13の試験体を用いて各測定点での変位を求めその中で測定点A1が最大変位に達した同じ時刻におけるA2、A3の変位を表わしている。ただしそれぞれ+23°C、A1の変位を1としてそれに対する比で表わした値である。そして特に表中より+23°Cと-80°Cの時の各測定点の変位分布を示した。なお無筋コンクリートの場合は各温度で落下高さ H_{min} の時の変位である。

低温になるに従ってA1の変位が小さくなり逆にA2、A3の変位が大きくなる傾向がある。また低温でA1の変位よりもA2、A3の変位が大きくなっているのは測定点がA1は試験体下縁、A2、A3が上縁であり衝撃荷重に対して2つの境界線での変位量が異なるためだと考えられる。

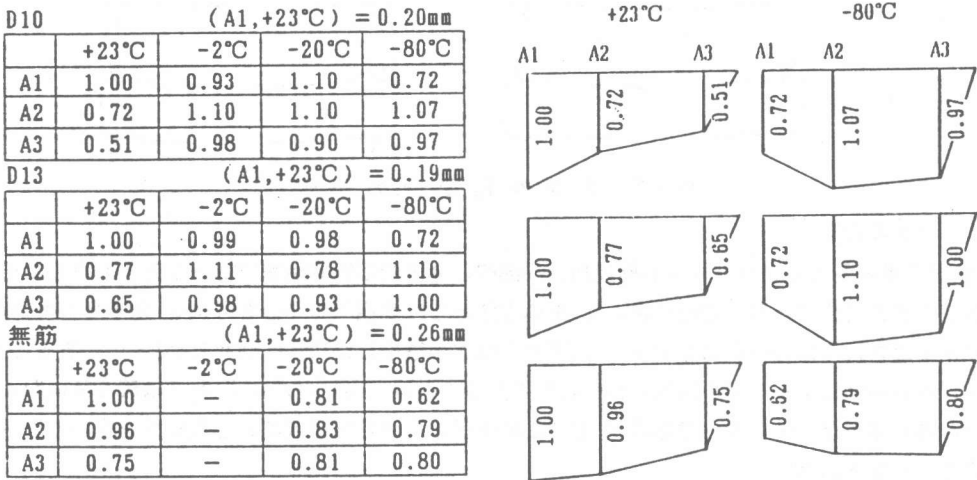


図-6 各測定点の変位の比

4. 実験考察

無筋コンクリート試験体が各温度について丁度一打撃で曲げ破壊を起こす落下高さを調べた衝撃試験結果から-20°Cまで試験体の吸収エネルギーは増加しているが-80°Cでは逆に減少する傾向

があった。これより今回行った諸条件では衝撃力に対するコンクリートは -20°C と -80°C の間で最大耐力を示す臨界温度があるのではないかとと思われる。

破壊形状を調べる試験では実験結果で述べたように $+23^{\circ}\text{C}$ と -80°C の破壊形状を比べた場合明らかに異なった形状を示していた。低温下でコンクリートがせん断破壊を生ずる前に曲げ破壊を起こすのは温度低下に従ってコンクリートのせん断耐力の増加は曲げ耐力の増加よりも大きくなるためだと考えられる。そのために低温下で最終的な破壊はせん断破壊を伴わない曲げ破壊を起こすと考えられる。

次に衝撃荷重に対してコンクリートは時間的な要素も含めてはじめに荷重を受けた上縁にそって引張力で抵抗する⁽³⁾。従って荷重を受けた直後のコンクリートの挙動は上縁にそった境界上が押しつぶされるように変形し下縁の境界上は変化しない。そして徐々に全体的な変形で荷重に抵抗してゆく挙動を示す。特に低温下で上縁(A2, A3)の変位が下縁(A1)よりも大きくなっていったのはこのように上縁と下縁でそれぞれ変位量が異なるために上縁の変位が大きくなったと思われる。

最後に前回行ったRC版の衝撃試験で常温では衝撃エネルギーを局部的に吸収する割合が大きいのにに対して低温では全体的にそれを吸収する傾向があることを述べた⁽¹⁾。

以上のことからを参考に衝撃荷重を受けたコンクリートが破壊に至るまでの変形挙動は常温と低温ではそれぞれ図-7に示すようになることが予想される。

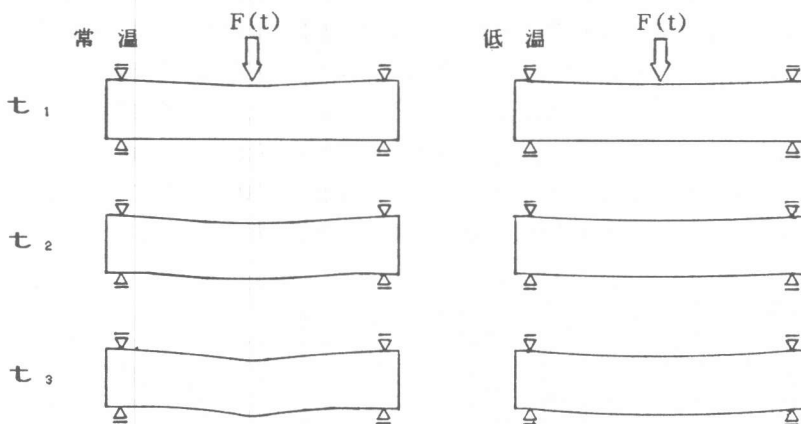


図-7 衝撃変形挙動の予想

5. モデル解析

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物は局部的と全体的応答で衝撃に抵抗すると仮定してその応答システムを質点とバネで置き換えた。その方法として2通りの場合を考える。先ず2つの質点とバネで置き換えたTwo-Massモデル⁽⁴⁾と更に1つずつ増やしたThree-Massモデル⁽⁵⁾である。図-8はThree-Massによるモデル化をシミュレーションしたものである。このうちTwo-Massでは質点2(m_2)とバネ(R_2)を考慮しないモデル化である。そしてこのモデルを微分方程式におき差分法を用いて解き各質点の変位を求めた。

その中で各モデルの質点3の最大変位 X と最小落下高さを調べる衝撃試験から得られた各 H_{min} における試験体A1の最大変位を比較してその適応性を検討した。また質点の質量、バネ定数を一定として初期条件のうち高さを変えることにより最大変位 X はThree-MassとTwo-Massモデルではどのように変化するかを調べた。

5-1. 質点とバネ

質点1は衝撃体でその質量 m_1 は2kgである。質点2は押し抜きコーンで質量 m_2 は0.2kgと仮定した。そして質点3はコンクリート試験体でその質量 m_3 はTwo-Massでは10kgとしThree-Massでは m_2 を差し引いて9.8kgとした。

バネ1は表面変位による抵抗を表わしバネ定数はHertzの衝突理論⁽⁶⁾より求めた。この理論では塑性変形を起こす現象を弾性変形と仮定して解いたもので最大衝撃力 P_{max} 、最大めり込み深さ y 、比例係数 k とすると一般に次式で表わされる。

$$P_{max} = ky^{3/2}$$

k, y をそれぞれ計算して最大衝撃力を求める。今回は時間の要素を考慮せず線形的に衝撃力に対して変形すると仮定しバネ定数を決定した。

バネ2は押し抜きコーンが起こす局部変形による抵抗を仮定した。バネ定数 R_2 はこれまで行なった押し抜き試験の結果より求めた⁽¹⁾。

バネ3は全体的応答による抵抗を仮定した。バネ定数 R_3 はけたのたわみから計算した。

$$R_3 = \frac{P}{\delta} = \frac{48EI}{l^3}$$

以上より本解析に用いたバネ定数の値を求めた。表-2に計算結果を示した。

5-2. モデルの微分方程式

モデルの微分方程式は次式で与えられる。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 + R_1 (X_1 - X_2) = 0 \\ m_2 \ddot{X}_2 + R_2 (X_2 - X_3) - R_1 (X_1 - X_2) = 0 \\ m_3 \ddot{X}_3 + R_3 X_3 - R_2 (X_2 - X_3) = 0 \end{cases}$$

差分法を使って上式は次式のように展開される。

$$\begin{cases} X_1^{t+\Delta t} = (2 - \frac{R_1}{m_1} \Delta t^2) X_1^t + \frac{R_1}{m_1} \Delta t^2 X_2^t - X_1^{t-\Delta t} \\ X_2^{t+\Delta t} = (2 - \frac{R_1}{m_2} \Delta t^2 - \frac{R_2}{m_2} \Delta t^2) X_2^t + \frac{R_1}{m_2} \Delta t^2 X_1^t + \frac{R_2}{m_2} \Delta t^2 X_3^t - X_2^{t-\Delta t} \\ X_3^{t+\Delta t} = (2 - \frac{R_2}{m_3} \Delta t^2 - \frac{R_3}{m_3} \Delta t^2) X_3^t + \frac{R_2}{m_3} \Delta t^2 X_2^t - X_3^{t-\Delta t} \end{cases}$$

初期条件は

$$\begin{aligned} X_1^0 &= 0 & X_{2,3}^0 &= 0 \\ \dot{X}_1^0 &= \sqrt{2gH_{min}} & \dot{X}_{2,3}^0 &= 0 \\ \ddot{X}_1^0 &= g & \ddot{X}_{2,3}^0 &= 0 \end{aligned}$$

なお $\Delta t = 20 \mu\text{sec}$

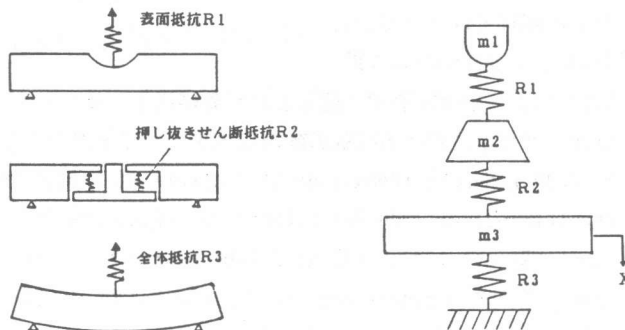


図-8 Three-Massによるコンクリート構造物のモデル化

5-3. 計算結果と考察

図-9は各モデルの計算結果と実験値をグラフに表わしたものである。各モデル解析とも実験値と比較的よく一致している。表面変位と桁の全体変位だけを考慮したTwo-Massモデルの方が押し抜きせん断力による局部変位の抵抗を加えたThree-Massモデルよりも実験値に比較的近い値になっている。図-10は落下高さの変位の関係を計算して各モデルを比較したものである。Three-Massの方が常に大きい値を示しているが各モデルとも高さに対する変位の増加率はほとんど変化していない。

今回の解析範囲ではThree-MassとTwo-Massによるモデル解析のどちらが有効であるのか判断することはできないが実験値に対して妥当な値を示しているといえる。

6. 結論

今回の実験結果をまとめると次のようになる

1. 温度低下に伴って飽和状態のコンクリートの静的載荷における曲げ耐力の増加はその引張強度の増加に比例しているのに対して、衝撃耐力は必ずしも引張強度の増加に比例しているとはいえずある温度から減少すると考えられる。
2. 常温と低温ではコンクリートの破壊形状は異なり、常温でせん断破壊を起こしても低温では曲げ破壊に移る傾向がある。
3. コンクリートの衝撃変形挙動は荷重を受ける上縁と下縁では異なる。また常温下で局部的に衝撃エネルギーを吸収し低温下では全体的に変形して衝撃エネルギーを吸収する傾向がある。
4. 質点とバネによるモデル解析ではバネ定数を表面抵抗、押し抜き抵抗、そして全体的たわみ抵抗の組合せで決定することによりほぼ実験値に適応した計算結果を得ることができる。

参考文献：(1)杉山ほか；低温下におけるRC版の衝撃破壊挙動 日本コンクリート工学年次論文報告集 1989.VOL11, No1(2)A.L.Murshll; Behaviour of Concrete at Arctic Temperatures. POAK 1985,9 (3)Comite Euro-International du Beton; Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loadings. Synthesis Report 1988,8 (4)Ing J.Eibl; Design of Concrete Structures to Resist Accidental Impact. The structural engineer/volume 65A/No.1/1987,1 (5)Perry SH.; Assessment of Impact Damage Caused by Dropped Objects on Concrete Offshore Structures. 1985,4 (6)土木学会；振動便覧 P321-325

表-2 バネ定数

	($\times 10^4 \text{N/mm}$)			
	+23°C	-2°C	-20°C	-80°C
R_1	100.9	106.0	115.4	130.0
R_2	8.8	13.1	14.5	15.9
R_3	6.67	7.12	8.01	9.55

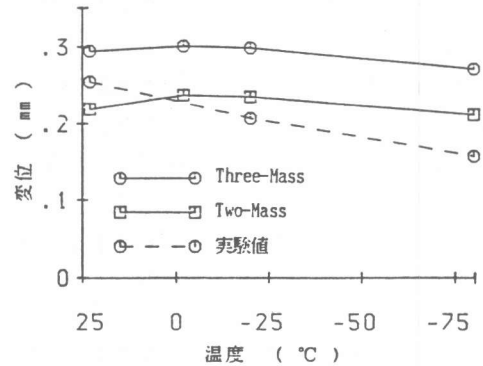


図-9 モデルから計算した最大変位と実験値との比較

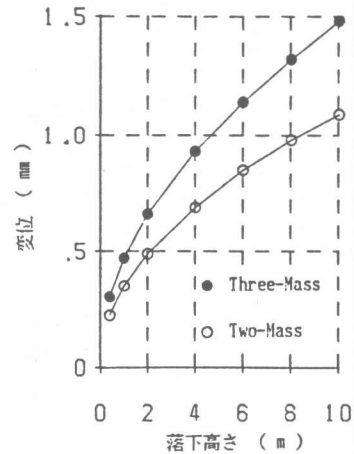


図-10 各モデルによる落下高さの変位の関係