

V-8

低温下におけるRC部材の衝撃荷重による変形と破壊

北海道大学大学院 学生員 有馬 伸広

北海道大学工学部 正 員 三上 隆

北海道大学工学部 正 員 佐伯 昇

北海道大学工学部 正 員 藤田 嘉夫

1. はじめに

低温下におけるコンクリートは、水セメント比と湿潤量に大きく影響を受けて、性質が変化する¹⁾。また複合材料であるコンクリートが衝撃荷重を受けた場合、その変形から破壊に至るまでを正確に捉えることは、現在の段階でも困難なことでとされている。

著者らは、寒地に建設されたコンクリート構造物に及ぶ、様々な衝撃荷重の影響の解明を試みている。本論文は、水セメント比が一定で、間隙がほとんど水で満たされているRC単純梁に、常温(+20℃)もしくは低温(-65℃)下において、静的荷重または衝撃荷重を載荷し、鉄筋の軸方向ひずみの測定値から梁の変形を推定するとともに、破壊のパターンを把握しようとするものである。

2. 実験概要

実験に使用した供試体は、引張鉄筋として SD30-D10, SD35-D13, SD35-D16 のいずれか1本が配筋された、3種類の矩形単鉄筋断面RC単純梁(寸法: $b=7.8\text{cm}$, $d=12.5\text{cm}$, $l=100.0\text{cm}$ 鉄筋比: 0.732%, 1.299%, 2.037%)である。コンクリートの配合は単位水量 175kg/m^3 、水セメント比0.45、空気量5.0%とし、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。2週間の水中養生後、直ちに実験を行なったので、間隙は自由水によってほぼ飽和状態にあると見なした。含水比は測定の結果、約6.0%である。また低温下における実験については、養生後冷凍庫で所定の温度に冷却した後、実験室内(+20℃)に運搬し、直ちに実験を開始した。

載荷は中央1点載荷とし、衝撃試験においては、先端が半球状をした鋼柱(直径10cm)を衝撃体とし、これを自由落下させることにより衝撃力を与えた。支点部は、供試体の上下面に直径5cmの鋼製ころを配置し、ボルトで全体を押えつけることにより、上下両方向の鉛直反力を確保した。載荷点と支点を4等分する4点において、それぞれ引張鉄筋下縁の軸方向ひずみを、ひずみゲージを用いて経時測定している(サンプリングタイム: 0.02msec)。また実験装置の都合から、衝撃力を直接測定することはできなかった。なお、衝撃体質量は10kg, 20kg, 衝撃体落下高さは 0.5m, 1.5m, 2.5m (衝撃体衝突速度は計算上 3.13m/s, 5.42m/s, 7.00m/sとなる)である。

静的試験は、支点部上面のころを外し、上記と同じ鋼柱を用いて載荷した。衝撃試験と同位置のひずみに加えて、載荷点における供試体の鉛直方向変位を測定している。また衝撃試験終了後の供試体は、静的耐力の低下を調べるために静的試験を行なった。

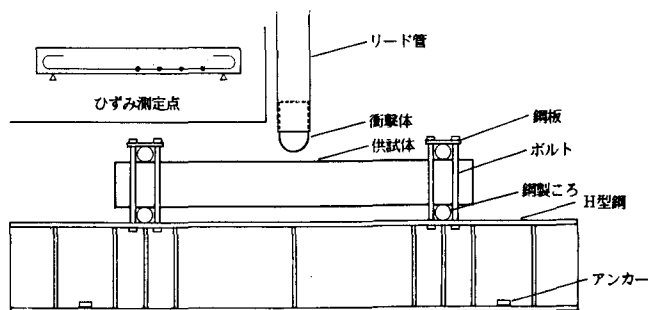


図-1 衝撃試験装置

Deformation and Failure of RC Member under Impulsive Loading at Low Temperature

by Nobuhiro ARIMA, Takashi MIKAMI, Noboru SAEKI and Yoshio FUJITA

3. 低温下のコンクリート強度特性

水分がほぼ飽和状態にあるコンクリートは、低温下で強度が増加する。これは、組織中の自由水の凝固が大きな要因になるからである¹⁾。図-2に本実験における温度の相違による各強度の変化を、常温に対する比で示した。圧縮および引張強度は、水の凝固点よりも低い領域でほぼ温度の低下に比例して増加するが、曲げ強度に関しては-65℃前後で最大値をとる傾向を示した。またヤング率も、-65℃において1.4倍程度増加した。

コンクリート標準示方書において、引張強度ならびに曲げ強度の設計値として、圧縮強度の2/3乗を0.5もしくは0.9倍した値を用いている。しかし-15℃より低い領域では、示方書式で算出される引張および曲げ強度よりも、2~3倍大きい実験値を示し、この領域では示方書式が適用できない。

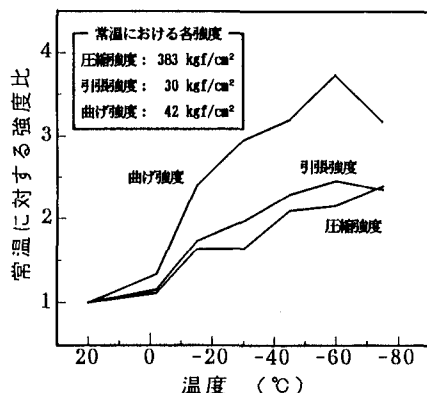


図-2 温度によるコンクリート強度の変化

4. 静的試験

4. 1 鉄筋のひずみ分布

引張鉄筋の支間中央部が降伏点に達したとき、そのひずみ分布は鉄筋比の違いにより異なるのはもちろん、供試体の温度の違いによっても顕著に現れた(図-3)。低温下ではコンクリート強度が増加するために、ひび割れの発生する荷重が大きくなるので、載荷点下縁にひび割れが発生すると、その付近の鉄筋が高いレベルの応力を受ける。ところが鉄筋の応力-ひずみ関係は温度による相違がないので、その部分の鉄筋がほどなく降伏に至るパターンとなる。

4. 2 静的耐力

低温下では、梁の静的耐力は常温のそれに比べて増大する結果を示した(表-1)。これは温度の低下にともなうコンクリート強度の増加が、梁の耐力に著しく影響を及ぼしたものと予想される。さきに示した低温下におけるコンクリートの各強度の実験値を用い、さらに鉄筋のひずみ効果を考慮して耐力の計算をした結果、計算値が実験値をやや下回るもののほぼ等しい値を得た。

4. 3 破壊形状(図-4上)

鉄筋比の低い梁の場合(a)は、温度に関係なく、ともに曲げ引張破壊を起こした。しかし、常温でせん断破壊を起こすように鉄筋比を高くした場合(b)は、低温下で若干せん断力の影響によるひび割れが発生するものの、最終的に曲げ引張によって破壊した。これにより、温度の低下にともない、せん断耐力の増加が、曲げ耐力の増加よりも大きくなると推測できる。

また低温下での供試体は、ひび割れが載荷点付近のみに現われ、ひび割れ幅が比較的大きくなっていた。

さらにD10の鉄筋を用いた供試体は、温度の低下により、コンクリートのひび割れ発生荷重が鉄筋の降伏荷重を上回り、ひび割れ発生と同時に鉄筋が降伏し破壊に至る特殊なケースとなった。

表-1 静的耐力(実験値) (kgf)

	常温(+20℃)	低温(-65℃)
D10	1500 (曲げ引張破壊)	1990 (曲げ引張破壊)
D13	2300 (曲げ引張破壊)	3110 (曲げ引張破壊)
D16	2800 (せん断破壊)	4255 (曲げ引張破壊)

5. 衝撃試験

5. 1 最大ひずみ

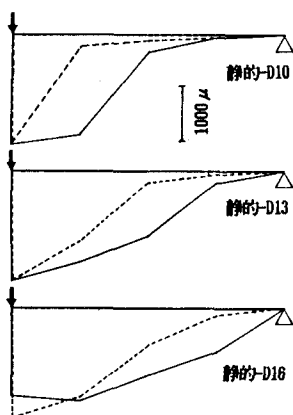


図-3 静的試験ひずみ分布

* 支間中央が2000 μに達したときのひずみ分布
 * — : 常温載荷 : 低温載荷
 * 常温-静的-D16については、2000 μに達する前にせん断破壊を起したため、支間中央が、最大値に達したときのひずみ分布を描いた。

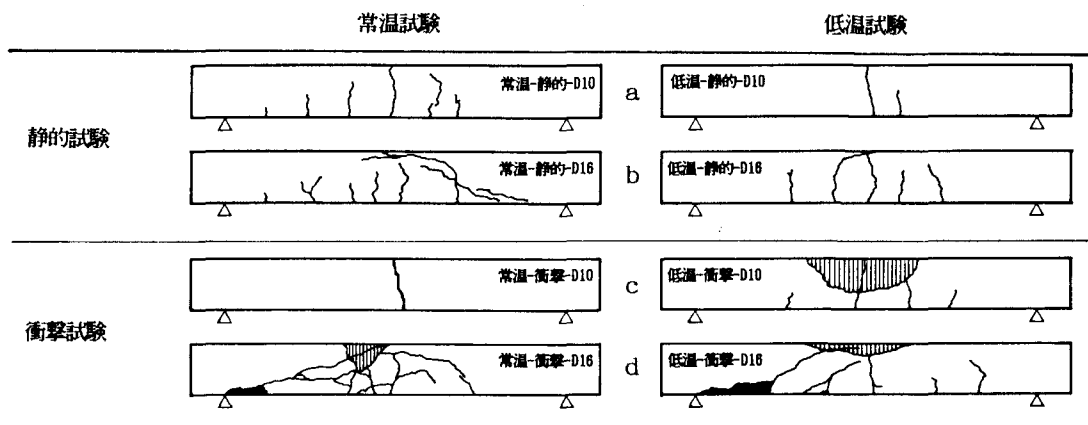


図-4 供試体破壊形状

* 衝撃荷重は、衝撃体質量20kg、落下高さ2.5m

* : 側面の剥離 : コンクリートの欠損

梁が完全な弾性体で衝撃体の質量が一定ならば、衝撃荷重による梁の最大ひずみは、衝撃体の衝突速度に比例する²⁾。本実験においても、衝突速度が比較的小さく鉄筋が弾性域内にある場合は、引張鉄筋の最大ひずみが衝撃体の衝突速度に比例する結果を示した。しかし鉄筋比が小さく(D10)、またコンクリート強度が高くない常温での試験において、ある衝突速度よりも速い衝突速度で衝撃力が作用したとき、鉄筋のひずみは塑性域まで達し、もはや衝突速度に比例するものではなくなる(図-5)。さらに、この場合の供試体はひび割れが目視により容易に確認でき、かなりのひずみが残留していた。低温下で、同一の供試体がこのように激しく変形しないことを考えると、衝撃荷重下においても、温度の低下によるコンクリート強度と剛性(ヤング率)の増加が、梁の変形に大きく影響を及ぼすようである。

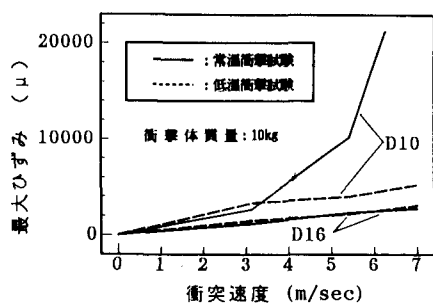


図-5 最大ひずみ(支間中央)

5. 2 鉄筋のひずみ分布

一般に衝撃体の衝突速度が一定で、鉄筋比が小さいもしくは常温であるときのように梁の剛性が低い場合は、ひずみが全体的に大きくなり、最大ひずみに到達する時刻が遅れる傾向を示した。

・ 衝撃体衝突速度が遅いとき

常温の場合、衝突直後は、載荷点近傍のみで応答するが、時間の経過とともに徐々にひずみの分布が広がってゆく。しかし低温では、ひずみが全体に広がってゆくことなく、支間中央が最大ひずみに達した(図-6)。

・ 衝撃体衝突速度が速いとき

温度による違いはあまり認められず、中央が最大値のとき、

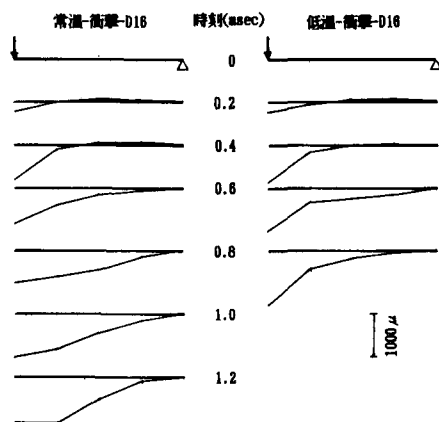


図-6 衝撃試験ひずみ分布
(衝突速度が遅いとき)

* 衝撃体質量: 10kg 衝撃体落下高さ: 0.5m
* 支間中央が最大値の直前に達するまでを描いた。

常温による静的試験で見られたような三角形分布をなした。

5. 3 破壊形状 (図-4下)

鉄筋比が低い場合 (c) は、静的試験の破壊形状と同じく、温度に関係なく曲げ破壊を起こした。常温試験では剛性が低いために変形量が大きく、ひび割れ幅も鉄筋位置で、低温2.85mmに対し7.75mmであり、ひび割れの本数も載荷点付近に1本発生するだけで、梁の中央部で大部分の荷重を受けているものと考えられる。さらに、供試体下面に鉄筋に沿ったひび割れが発生していた。

鉄筋比が高い場合 (d) は、静的試験の破壊形状と違い、温度に関係なくせん断破壊を示した。曲げモーメントの影響を受けて発生したひび割れは、その幅が常温0.30mm、低温0.38mmと小さく、曲げモーメントが梁の破壊にほとんど関わっていない。さらに供試体下面に、鉄筋に沿ったひび割れが大きく発生しており、特に支点付近ではコンクリートの欠損が見られるなど、実験終了後における供試体の鉄筋の付着は皆無に等しかった。鉄筋比が高い供試体の破壊パターンを図-7に示す。

静的荷重と衝撃荷重による破壊形状の違いは、衝撃荷重による曲げモーメントとせん断力の大きさおよびその分布が、静的荷重のときと異なり、曲げモーメントに対してせん断力が卓越して現われることに起因している³⁾。

5. 4 衝撃試験後の静的耐力

一度衝撃力を受けた供試体は、そのダメージにより静的耐力が低下することが確認された。しかし衝突速度の比較的低い (衝撃体落下高さ: 0.5m, 1.5m) 場合は梁の損傷が少なく、例えばひびわれが載荷点上縁から下縁に至る場合でも、梁が圧壊していなければ、衝撃力を与えなかった梁の静的耐力に比べて、ほとんど違いが認められなかった。しかし衝撃エネルギーを大きく設定した実験では (衝撃体質量20kg, 衝撃体落下高さ2.5m)、常温で20%、低温で10~20%程度耐力が低下しており、鉄筋比が高いほど、その度合が大きかった。しかし、常温試験でせん断破壊を起こしたD16を用いた供試体については、衝撃体質量10kg, 落下高さ2.5mの衝撃荷重を受けた後の静的試験において、せん断破壊を起こし、1.3倍程度の耐力の上昇が認められた。

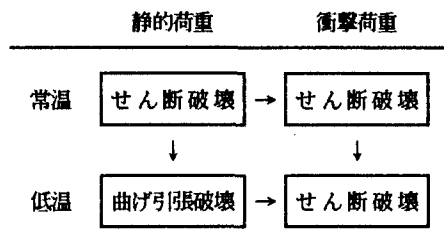


図-7 破壊パターンの変移 (高鉄筋比)

6. まとめ

- (1) 低温下におけるRC梁は、増加したコンクリート強度とヤング率を考慮することにより、その挙動を把握することができると思われる。
- (2) 低温下において衝撃荷重を受けるRC梁の変形は、常温のそれに比べて小さくなり、また応答時間も短くなる傾向にある。
- (3) RC梁の破壊形状は、温度の低下により曲げ破壊に移行する傾向を示し、荷重が静的から動的に移ることによりせん断破壊に移行する傾向を示す。

参考文献

- (1) A. L. Marshall; Behavior of Concrete at Arctic Temperatures, POAC, 1985.9
- (2) Pei Chi Chou and William J. Flis; Design Curve for Beams under Impact Loading, AIAA Journal, 1977.4
- (3) Ing J. Eibl; Design of Concrete Structures to Resist Accidental Impact, The Structural Engineer, 1987.1

本研究を行なうにあたり、北大工学部 都築真人君 の絶大なる助力を得ました。ここに感謝の意を表します。