

重錘落下を受ける PC はりの限界落下高さ推定法に関する一考察

AN ESTIMATION OF LIMIT DROPPING HEIGHT OF PRESTRESSED CONCRETE BEAM
UNDER WEIGHT DROPPING LOAD

石川信隆*, 竹本憲介**, 彦坂 熙***

Nobutaka ISHIKAWA, Kensuke TAKEMOTO, Hiroshi HIKOSAKA

*工博 防衛大学校 建設環境工学科 教授(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**工修 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229-0006 相模原市淵野辺 2-9-54)

***工博 九州大学大学院工学研究院 教授(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

キーワード: PC はり, 重錘落下実験, 限界落下高さ

(prestressed concrete beam, weight dropping test, limit dropping height)

1 はじめに

近年、構造物の性能照査型設計法へと移行する機運にあり¹⁾、衝撃設計においても構造物や構造部材の限界耐力(限界吸収エネルギー量)を調べる必要がある。重錘落下実験において、しばしば問題になるのが供試体の大きさと重錘の落下高さとの関係である。重錘の重量は、衝撃実験装置の制約からある一定の大きさが決められるが、どれだけの落下高さ(衝撃エネルギー)を与えれば供試体が破壊するか、換言すれば、供試体の衝撃限界耐力(限界吸収エネルギー量)がどれだけあるのか、当初見当がつかない。

この衝撃限界耐力を実験的に求めるには、通常、一つの供試体に対して落下高さを除々に上げていく「漸増繰返し衝撃実験」と、たった一回の落下でその供試体の破壊挙動を調べる「単一衝撃実験」の2種類がある。前者は、破壊までの動的挙動を逐次追跡し、最後に終局限界と思われる落下高さで実験を終了する方法である。これに対し、後者の「単一衝撃実験」では、たった一回の落下高さではりの終局限界つまり破壊するか否かを判定する必要があり、通常、前者の「漸増繰返し衝撃実験」による終局限界よりも途中の損傷がないためやや高い落下高さで破壊する

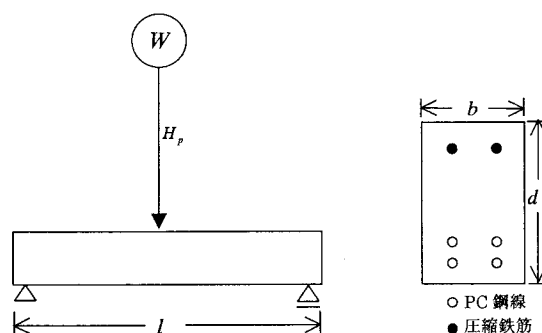


図-1 PC重錘落下を受けるPCはり

場合が多い。

本研究は、重錘落下を受けるPCはりを対象として、単一衝撃実験によって破壊するときの限界落下高さをエネルギー保存則とはりの曲げ崩壊メカニズムにより簡易に推定することを試み、実際の衝撃実験によってその妥当性を検証しようとしたものである。なお、ここではPCはりそのものの衝撃限界耐力を評価するものとし、サンドクッションなどの緩衝材の影響は無視している。

2. 限界落下高さの推定式

(1) 重錘落下を受けるPCはり

いま、図-1のようなある矩形断面をもつPCはりの中央に重錘重量 W が落下するときの限界落下高さ H_p を求める。

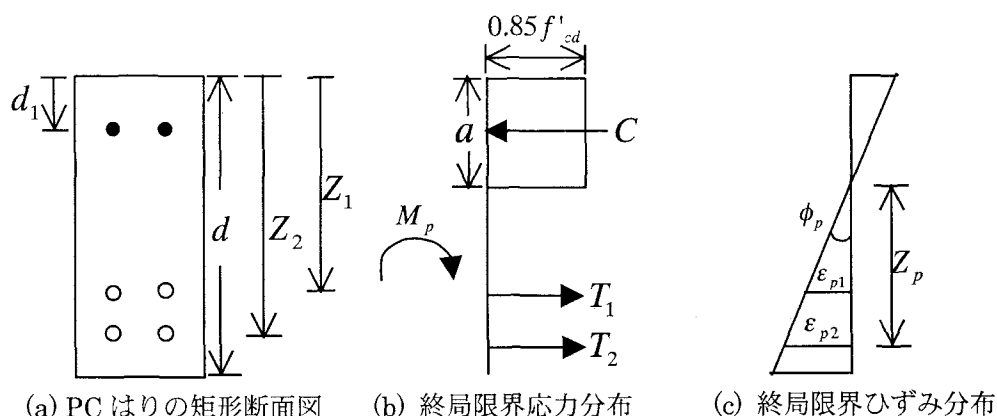


図-2 PC はり断面の終局限界状態

(2) PCはり断面の終局限界状態

ここでは、まずPCはり断面の曲げ終局限界状態を図-2のように仮定する²⁾。ここで、図-2中の記号は以下のとおりである。

$$C = 0.85f'_{cd} ba$$

$$T_1 = 2A_{p1}f_{pyd}$$

$$T_2 = 2A_{p2}f_{pyd}$$

a : 応力ブロックの高さ

A_{p1} : 上端より1段目PC鋼線の断面積

A_{p2} : 上端より2段目PC鋼線の断面積

f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度

f_{pyd} : PC鋼線の引張強度

ϵ_{p1} : 上端より1段目PC鋼線の引張ひずみ

ϵ_{p2} : 上端より2段目PC鋼線の引張ひずみ

b : PCはり断面幅

d : PCはりの断面高さ

d_1 : 上端より圧縮鉄筋までの高さ

Z_1 : 上端より1段目PC鋼線までの高さ

Z_2 : 上端より2段目PC鋼線までの高さ

図-2(b)で水平方向の力の釣り合いより

$$C - T_1 - T_2 = 0 \quad \dots \quad (1)$$

式(1)より、

$$a = \frac{2(A_{p1} + A_{p2})f_{pyd}}{0.85f'_{cd}b} \quad \dots \quad (2)$$

また、曲げモーメントの釣り合いより

$$\frac{Ca}{2} - T_1Z_1 - T_2Z_2 + M_p = 0 \quad \dots \quad (3)$$

よって、

$$\begin{aligned} M_p &= T_1Z_1 + T_2Z_2 - \frac{Ca}{2} \\ &= T_1\left(Z_1 - \frac{a}{2}\right) + T_2\left(Z_2 - \frac{a}{2}\right) \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 M_p = 終局限界曲げモーメント

(3) 崩壊メカニズム

いまPCはりが重錘落下荷重を受けて図-3のような崩壊メカニズムを形成したとすると、エネルギー保存則(外力エネルギー=内力エネルギー)より次式が成立する。

$$WH_p = 2M_p\theta_p \quad \dots \dots \dots (5)$$

ただし、

W : 重錘の重量

H_p : 限界落下高さ

θ_p : 塑性ヒンジ回転角

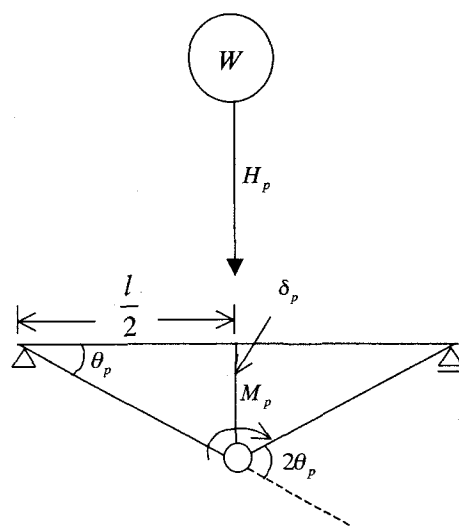


図-3 PC はりの崩壊メカニズム

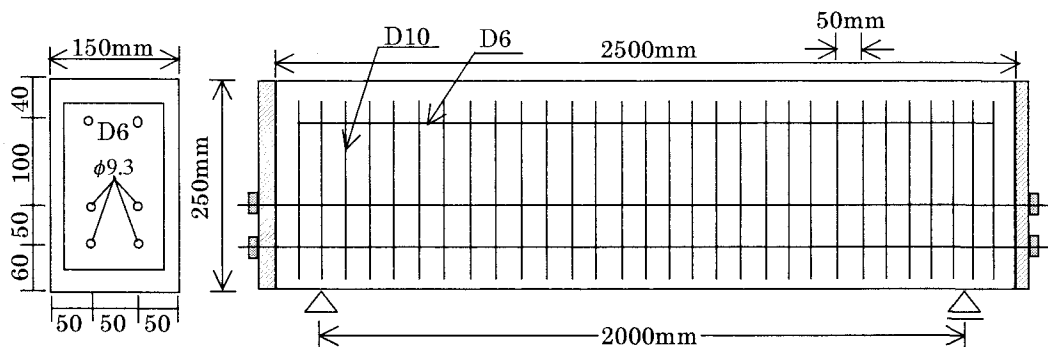


図-4 単一重錘衝撃実験で使した PC はり

(4) 塑性ヒンジ回転角の算定

いま PC はりの終局限界を PC 鋼線の破断 (破断ひずみを ε_p) と定義すると、図-2(c) より限界曲率 ϕ_p は平面保持の仮定が成り立つものとして、次式により求められる。

$$\phi_p = \frac{\varepsilon_{p2}}{Z_p} \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 $\varepsilon_{p2} = \varepsilon_p$ (PC 鋼線の破断ひずみ)

Z_p : 中立軸から 2 段目 PC 鋼線の位置までの距離

よって、塑性ヒンジ回転角は、塑性ヒンジ長を有効高さの 2/3 と仮定^{3), 4)}すると、次式のように算定される。

$$\theta_p = \frac{2}{3} d_p \phi_p \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 d_p : 断面の有効高さ ($d_p = Z_2$)

よって、限界落下高さ H_p は、式(5)より次式のように求められる。

$$H_p = \frac{2M_p \theta_p}{W} \dots \dots \dots (8)$$

3. 計算例

(1) 限界落下高さの算定

いま、図-4 および表-1 に示すような単一衝撃実験で使した PC はりの限界落下高さを求める。まず式(2)より、

$$a = \frac{2 \times 67.9 \times 1451 \times 2}{0.85 \times 49.4 \times 150} = 62.6 \text{ mm} = 6.3 \text{ cm} \dots (9)$$

次に、式(3)より

$$M_p = 2f_{ypd} A_{p1} \left(Z_1 - \frac{a}{2} \right) + 2f_{ypd} A_{p2} \left(Z_1 - \frac{a}{2} \right)$$

表-1 材料緒元

材料	項目	数値
全般	幅	15cm
	高さ	25cm
	長さ	250cm
	スパン	200cm
コンクリート	圧縮強度	49.4N/mm ²
スタ-ラップ	径	D10
	間隔	5cm
	高さ	21cm
	幅	11cm
鉄筋	径(圧縮)	D6
	降伏点	370N/mm ²
	引張強度	530N/mm ²
	破断時伸び	26.50%
PC 鋼材	径(より線)	φ9.3mm
	初期プレストレス力	66.6kN
	0.2%永久伸びに対する荷重	90.9kN
	引張荷重	98.7kN
	破断時伸び	7.90%

$$= 2f_{ypd} A_p (Z_1 + Z_2 - a)$$

$$= 2 \times 1451 \times 68 \times (140 + 190 - 63)$$

$$= 52688712 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$= 52.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

さらに、式(7)より

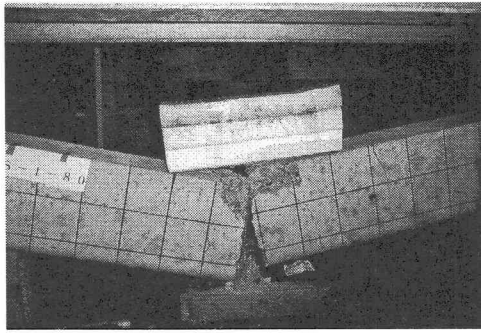
$$\theta_p = \frac{2}{3} d_p \phi_p = \frac{2}{3} \times 190 \times \frac{0.079}{190 - 63} = 0.08 \dots (10)$$

よって、式(8)より

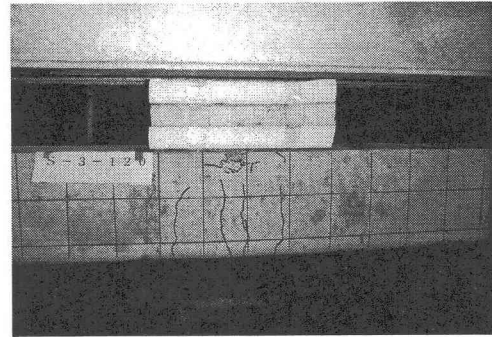
$$H_p = \frac{2 \times M_p \times \theta_p}{W} = \frac{2 \times 52.7 \times 0.08}{9.8} = 0.86 \text{ m} = 86 \text{ cm}$$

(2) 単一重錘落下実験^{5), 6)} との比較

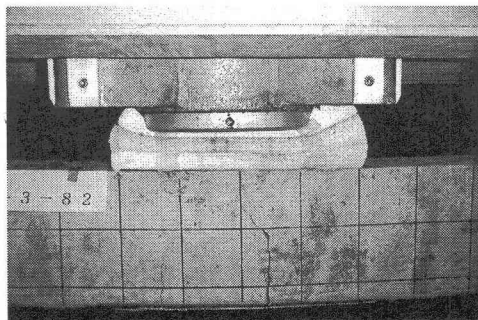
いま $W=9.8 \text{ kN}$ として $H=100 \text{ cm}$ として落下させると写真-1(a) のように破壊し、 $H=70 \text{ cm}$ の場合は写真-1(b) のように破壊しない。また、 $H=82 \text{ cm}$ より落下させると、写真-1(c) のように落下点の下側に曲げひび割れが発生するが、破壊に至っていない。次に、



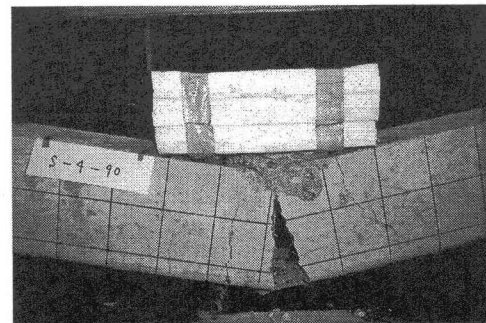
(a)単一載荷 1 回目：落下高さ 100cm



(b)単一載荷 2 回目：落下高さ 70cm



(c)単一載荷 3 回目：落下高さ 82cm



(d)単一載荷 4 回目：落下高さ 90cm

写真-1 PC はりの破壊モード

H=90cm より落下させると、写真-1(d)のように落下点下側の PC 鋼線に破断が生じ、はり終局限界を迎えている。よって、推定限界落下高さ $H_p=86\text{cm}$ はちょうど $H=82\text{cm}$ と 90cm の間にあり⁶⁾、限界落下高さをよく推定していることが認められる。

4 結論

本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) エネルギー保存則と PC はりの終局限界状態および崩壊メカニズムにより、限界落下高さを推定する式を提案した。
- (2) 重錘落下実験により検証した結果、本法は PC はりの限界落下高さをほぼ推定できることを確認した。

謝辞

本研究で使用した PC はりは日本サミコン(株)若林修氏を通して提供を受けたもので、ここに心から謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱコンク

リート橋編，平成 14 年 3 月。

- 2) 加藤清志，河合利滋，加藤直樹：鉄筋コンクリート工学入門，P. 85，産業図書，1994 年。
- 3) 高橋芳彦：高速載荷試験による鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究，九州大学学位請求論文，p. 119，平成 2 年 12 月。
- 4) Corley, W. G.: Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams, ST5, Vol. 92, ASCE, pp. 121-146, 1966. 10.
- 5) 竹本憲介，圓林栄喜，香月智，石川信隆：重錘落下実験による PC はりの衝撃破壊挙動に関する一考察，土木学会論文集，No. 675/I-55, pp. 273-286, 2001. 4.
- 6) N. Ishikawa, S. Katsuki, K. Takemoto: Impact Failure Analysis of Prestressed Concrete Beam Using RBSM-FEM Combined Model, Proc. of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp. 27-37, 2001. 11.