

I-510

RCスラブの動的終局耐力と破壊モードの簡易推定法

防衛大学校 ○学員 首藤誠志
正員 大野友則
(株)小堀鐸二研究所 河西良幸

学員 伊藤隆至
正員 内田 孝

1. まえがき

航空機、船舶等の衝突、落石あるいは爆発などのような事故に起因して発生する衝撃的外力を受ける鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐衝撃性は、局所的な破壊に対するものと部材レベルにおける全体応答に関する検討が必要である。部材の耐衝撃性は、耐荷力や変形性能あるいはエネルギー吸収容量の大きさによって評価することが合理的であり、これらの終局限界性能を定量的に把握するために多くの実験的研究が行われている。一方、RCスラブが破壊に至るまでの挙動を理論あるいは解析的アプローチによって検討する試みも行われているが、一般にこれらの解析方法は複雑である。そこで本研究では、押し抜けせん断破壊が生じて破壊に至るまでのRCスラブの挙動や破壊メカニズムを調べるために、簡便な解析法を提示するものである。すなわち、RCスラブをバネ支承を有するはりモデルに置換して耐荷力や破壊モードを推定する方法である。

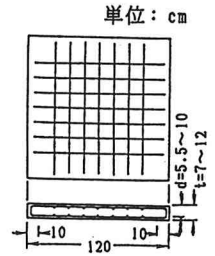


図-1 試験体

2. RCスラブの高速載荷実験

(1) RCスラブ試験体：試験体は、図-1に示すように7~12×120×120cmの正方形複鉄筋コンクリートスラブである。実験では、鉄筋比および板厚の相違が終局耐力や終局変形性能に及ぼす影響を調べることを目的とすることから、鉄筋径あるいは鉄筋の配置間隔が異なる（鉄筋比が0.2~0.5%）試験体を作成した。

(2) 高速載荷実験および実験結果：荷重は、写真-1に示す高速載荷装置を用い、5×15×15cmの正方形鋼板を介して載荷した。試験体の支持は、4辺単純支持とした。載荷速度は、静的、低速（約0.03m/s）および高速（約3m/s）の3種類である。実験で得られた破壊状況および荷重~変形関係の代表的なものを、図-2、3に示す。図-2から、ほとんどの試験体にはスラブ上面のひび割れが無く載荷面積に相当する部分に押し抜け孔が生じている。

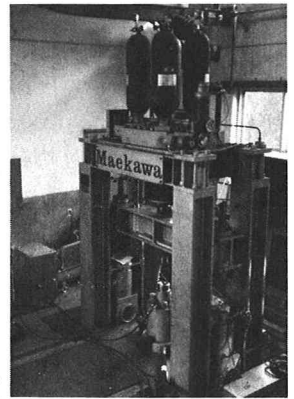


写真-1 高速載荷装置

鉄筋比 : 0.5%
有効高さ : 10cm

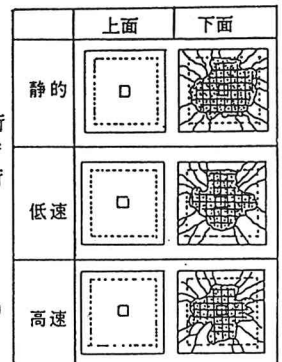


図-2 破壊状況

下面には、かぶりコンクリートの剥離とひび割れが多く見られる。載荷速度の相違による影響は顕著ではないが、高速になるほどコンクリートの剥離面積が小さくなる傾向が認められる。また、図-3をみると、いずれの試験体もある変位段階で曲げから押し抜けせん断へ移行している。

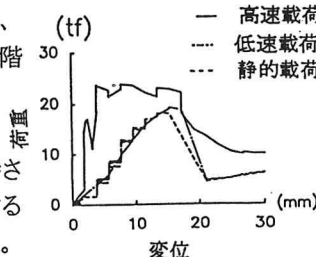


図-3 荷重~変形曲線

3. RCスラブの終局耐力算定法

(1) 算定のための解析モデル：4辺が単純支持されたRCスラブでは、中央部の変位が増大するにともなって4隅が浮き上がる現象が生じた。

そこで図-4に示すように、実際のスラブの4隅部を無視した十字形状に簡略化し、さらにこれを一方向のはり部材に置換した。また、これと直交する他の部分による抵抗力は、バネに置き換えてはりの下部に配置した。

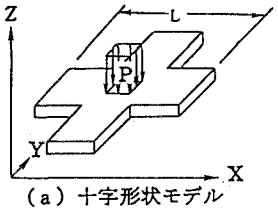
(2) はり下部のバネ定数：ある荷重が作用したとき同一位置での単純はりのたわみ δ_1 と平板弾性理論から

求まるたわみ δ_2 の差 $\Delta\delta$ ($=\delta_1-\delta_2$) を、バネによって補正することを考える。バネに $\Delta\delta$ の変位が生じたときの反力 X は、 $X=K \cdot \Delta\delta$ で与えられる。たわみ δ_1 、 δ_2 はそれぞれ $\delta_1=P(L-A)^3/96EI$ 、 $\delta_2=\alpha L^2(P/D)$ である。したがって、バネ定数 K は次式で表される。

$$K = \frac{48 \{ (L-C)(L^2+4LC-2C^2)/96 - \alpha L^2 EI/D \}}{\{ (L-A)^3/96EI - \alpha L^2/D \} (L-A)(L^2+4LA-2A^2)}$$

ここに、 A はバネ支承はりのバネ間隔、 L はスパン長、 C は載荷荷重の幅、 α は部分荷重係数¹⁾、 EI は曲げ剛性、 D は板の剛度である。

- (3) 支承バネの位置：スラブに押し抜けせん断破壊が生ずる場合、破壊は載荷部分を頂点としたコーン状となるが、設計上の観点からこれを便宜的に矩形状に置換して仮定の破壊面（限界断面）が設定されている（図-5）。限界断面の定め方は、各国で異なるが、本研究では土木学会の規定²⁾に基づく値を採用する。(b) バネ支承はりモデル
このとき、限界断面の幅すなわちバネ支承間隔 A は、 $A(\text{cm})=C+d$ ： $(d$ は有効高さ)で与えられる。



(a) 十字形状モデル

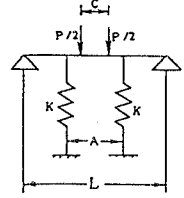


図-4 解析モデル

- (4) RCスラブの耐荷力および破壊モードの決定：スラブの破壊モードは、スラブのせん断耐力および曲げ耐力と断面に生ずるせん断力および曲げモーメントの大きさの相互関係で決定される。本研究では、置換はりのせん断耐力 P_{su1} 、押し抜きせん断耐力 P_{su2} および曲げ耐力 P_{mu} を用いて決定する方法を提案する。つまり、 P_{su1} 、 P_{su2} および P_{mu} を算定し、これらの大きさを比較すればよい。 $P_{mu} < P_{su1}$ の場合には、曲げ破壊となり耐荷力は P_{mu} となる。また、 $P_{su1} < P_{mu} < P_{su2}$ の場合には、押し抜きせん断破壊であり P_{su1} が耐荷力となる。 $P_{su2} < P_{mu}$ の場合には、曲げ押し抜きせん断破壊し、耐荷力は P_{su2} で与えられる。ただし、 P_{su1} 、 P_{su2} および P_{mu} は以下の式で求める。

$$P_{su1} = 2 f_{ucd} \cdot b_w \cdot d, \quad P_{su2} = 2 f_{ucd}' \cdot b_w \cdot d$$

$$P_{mu} = Mu / \{ (L-C)/4 - Q(L-A)/2 \}$$

$$\text{ただし、} 1/Q = \{ (L-A)^3/96EI - \alpha L^2/D \}$$

ここに、 f_{ucd} はコンクリートのせん断強度、 f_{ucd}' はコンクリートの斜め圧縮に対するせん断強度、 b_w ははり幅、 d ははりの有効高さ、 Mu は終局曲げモーメントである。なお、載荷荷重の速度の影響は、コンクリートおよび鋼材料の強度にひずみ速度効果³⁾を導入することにより動的影響を考慮した。

4. 算定結果

図-6、7に、荷重範囲が $15 \times 15 \text{ cm}$ のRCスラブの耐荷力と破壊モードを上記方法を用いて算定した結果を示す。図-6は、スラブの有効高さ d と動的耐荷力の関係（鉄筋比0.5%）、図-7は鉄筋比と動的耐荷力（有効高さ10cm）を示したものである。図中の●、▲、■印は、それぞれ高速、低速および静的載荷に対する実験結果を表している。図から、有効高さが小さい場合および鉄筋比が小さい場合は実験結果との対応が不十分であるが、いずれの載荷速度においても80~110%の精度で耐荷力および破壊モードを容易に推定することができる。

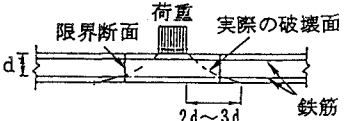


図-5 限界断面

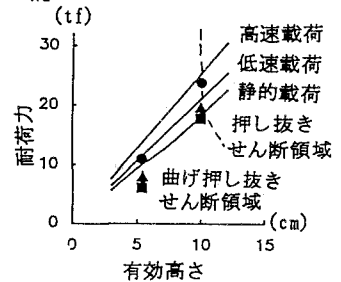


図-6 耐荷力～有効高さの関係

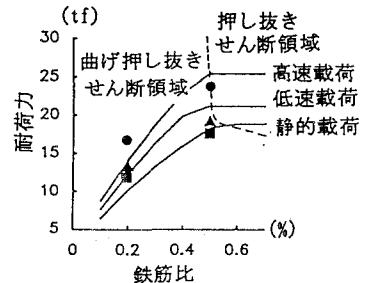


図-7 耐荷力～鉄筋比の関係

1) S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, 2nd ed, McGraw-Hill, New York, pp. 135-141, 1959

2) 土木学会：限界状態設計法指針（案）

3) 高橋他：ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析、構造工学論文集、V o 1.32 A, pp. 669~682, 1986