

## (1) プレストレストスラブの押抜き疲労強度に関する研究

山口大学工学部 正会員 ○松尾 栄治  
 山口大学工学部 正会員 浜田 純夫  
 (株)ピー・エス 正会員 阿部 宗人  
 大成建設(株) 正会員 大岩 昇

### 1. はじめに

プレストレスの導入によりスラブ厚を増すことなく強度増大が望めること等の有利性から、近年においてPC部材の使用頻度は増加傾向にある。同時にプレキャストスラブも、品質管理や補修、補強の簡便性からその需要は高まっている。そのような状況においては、PCスラブの押抜きせん断破壊機構の解明が急務であるが、これについての研究はほとんどなされていないのが現状であり、その疲労性状に関する研究に及んでは皆無に等しいといえる。

そこで本研究では、PC普通スラブの押抜きせん断疲労試験を行い、RCスラブとPCスラブにおける疲労性状の相違点等を実験結果から比較検討するものである。本研究は定点における疲労強度を調べるものではあるが、実際にスラブに作用する移動荷重に対する疲労強度を推定する基礎にもなる。PCスラブはRCスラブと異なり、ひび割れ深さが疲労特性に関係する点で複雑な考え方が重要であり、その観点から考察を行い疲労強度の推定式を求めた。

### 2. 実験方法

#### 2-1 供試体の諸元

一方向をプレテンション方式で、他方向をポストテンション方式でプレストレスを導入した正方形スラブで、供試体寸法は120×120×16cm (No. 1~4)、130×130×13cm (No. 5~14)の2種類である。有効プレストレスはいずれの供試体も、両方向ともに約45kgf/cm<sup>2</sup>とした。

#### 2-2 押抜きせん断試験

本実験では下限荷重を静的荷重の10%、上限荷重を60~86%として疲労試験を行った。また、強度比Sは「上限荷重/静的破壊荷重」として疲労特性を検討した。载荷状況を図-1に示す。支持条件は、スパン長110cm (No. 1~4)及び120cm (No. 5~14)で、四隅の浮き上がり防止を設けない四辺単純支持とした。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3-1 破壊回数及び破壊状況

疲労試験に先立って行った静的試験の結果及び、疲労試験における上限荷重と破壊回数を表-1に示す。破壊形式はいずれも押抜きせん断破壊であった。

#### 3-2 S-logN関係

本研究での疲労試験において破壊回数をN、応力比Sを

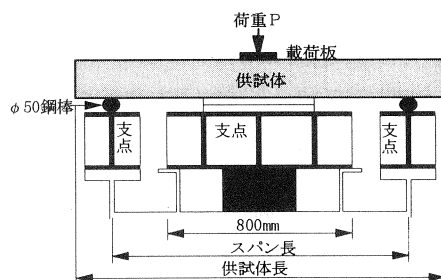


図-1 载荷状況

「疲労上限荷重/静的荷重」として、その関係についてRCスラブとPCスラブの相違や、スラブ厚やスパン長の相違等の要因が疲労性状に及ぼす影響について考察する。

(1) PCスラブとRCスラブの比較

一般的にPCスラブはRCスラブに比べて疲労に対して強いとされている。そこで、RCスラブとPCスラブの疲労試験結果をS-N関係を用いて表したものを図-2に示す。

実験C、Fはともに角田らが行ったRCスラブについてのデータ<sup>1)</sup>であり、ともに供試体寸法は120×140×10cmで、鉄筋比が異なるシリーズである。RCスラブの疲労は、鉄筋に作用する応力が降伏点以下の場合に鉄筋

の疲労破断を伴い、疲労強度が大きく低下するため、今回比較を行った実験シリーズC、Fのデータは、鉄筋破断を伴わない疲労試験結果のみを掲載した。

本実験のPCスラブの場合には、スラブ厚中央にPC鋼材が配置されているので、PC鋼材の疲労破断はみられない。両者の関係は、この図に示すようにPCスラブの方がRCスラブに比べて明らかに疲労強度が大きい。そこで、PCスラブが疲労に対して有利に働く要因について以下に考察する。

縦軸は各静的強度に対する強度比に対する強度比であるので、PCスラブの静的強度が高いことは、疲労強度が高いことの理由として妥当ではなく、ひび割れの進展性状に関連づけて考察すべきである。

前述のように、プレストレスの大きさに比例して、ひび割れ発生荷重は大きくなるが、ひび割れが生じた後は、プレストレスの影響は小さくなり、RCスラブと類似した破壊メカニズムをたどる。すなわち、ひび割れ発生まで、もしくは、許容ひび割れ以内ではプレストレスの影響が大きく反映されるが、それ以降はその影響があまり大きく反映されないために、ある荷重に達すると急激に押抜きせん断破壊すると考えられる。すなわち静的強度自体の増進は必ずしもプレストレスに比例して顕著になるとはいえない。よって、強度比Sで表した場合には、疲労強度が高く現れる。

その詳細について検討するために静的強度算定図を簡略化したものを図-3に示す。縦軸はスラブ上縁から中立軸までの距離xで横軸は荷重あるいは耐力である。実線は荷重が増加する際の中立

表-1 供試体番号と静的破壊荷重, 上限荷重, 破壊回数

No.	静的破壊荷重(tf)	強度比S	上限荷重(tf)	破壊回数N
1	62.95 120×120×16cm (2体の平均)	0.739	46.5	92000
2		0.700	44.1	6000
3		0.650	41.0	350000
4		0.600	37.8	*2000000
5	31.86 130×130×13cm (4体の平均)	0.863	27.5	10000
6		0.863	27.5	12704
7		0.863	27.5	12984
8		0.810	25.8	802796
9		0.810	25.8	486670
10		0.782	24.9	380000
11		0.782	24.9	113602
12		0.756	24.1	*1000000
13		0.756	24.1	*1110000
14		0.756	24.1	*2850000

\*途中打ち切り

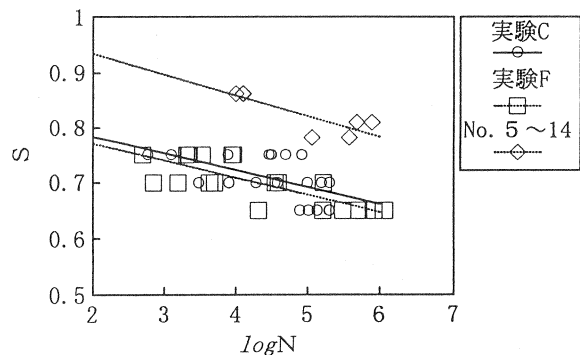


図-2 PC床版とRC床版の疲労強度

軸位置の上昇を示し、破線は中立軸位置の変化に対する耐力の変化を示す。中立軸位置はスラブを全断面有効として求めた値であり、耐力はPCスラブの押抜きせん断耐力算定式<sup>2)</sup>を用いた計算値である。すなわちこれらの曲線の交点における耐力 $P_0$ が静的強度となる。通常、強度比 $S$ は「 $P_1/P_0$ 」で表される。

しかし、 $P_1$ という上限荷重が作用した段階では供試体上面から $x_1$ の距離までしかひび割れが入っておらず、このひび割れ深さであれば、スラブには $P_2$ という静的荷重よりも大きな荷重に耐えられる耐力が潜在的に存在していると仮定できる。よって、強度比 $S$ は「 $P_1/P_2$ 」で表す方が妥当であると思われる。

また、PCスラブの場合はRCスラブに比べて算定式における $\tau_{max}$ がプレストレスの影響によって大きく、また、ひび割れも少ないので、算定式はひび割れの深さに影響されやすい。そのため、静的強度よりも低い荷重をかけた場合には、そのひび割れ深さにおけるスラブの耐力はかなり大きいものとなる。つまり、PCスラブの場合には、上限荷重 $P_1$ が実際の静的強度 $P_0$ に対する比率よりも $P_2$ に対する比率の方がかなり低くなっており、RCスラブに比べて低い強度比しか作用していないことになる。よって、PCスラブの疲労強度はRCスラブに比べて高い値を示していると考えられる。

以上をふまえて、強度比 $S$ を「 $P_1/P_2$ 」に修正したPCスラブとRCスラブのS-N関係を図-4に示すが、修正を行うことによってPCスラブとRCスラブはほぼ同程度の疲労強度を示す。

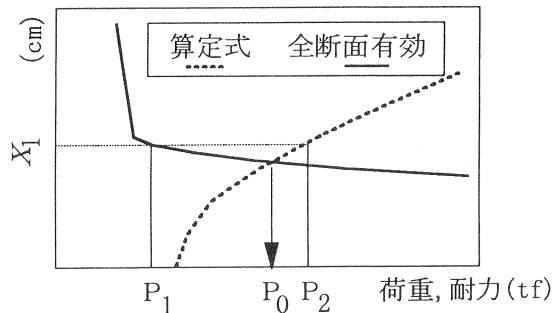


図-3 スラブの静的押抜き強度算定図

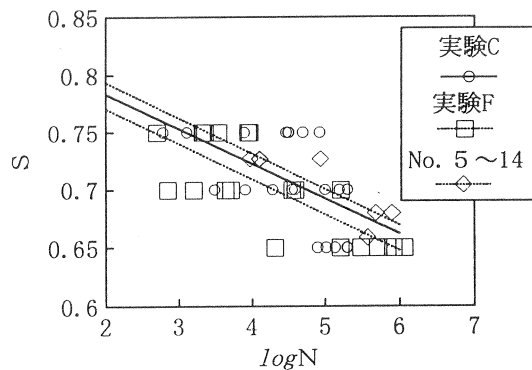


図-4 修正後のS-N曲線

(2) 供試体の寸法が疲労特性に及ぼす影響

スラブ厚やスパン長等がPCスラブの疲労性状に及ぼす影響について考察する。まず、No. 1~4とNo. 5~14の疲労試験結果を実験値で得られた静的強度を用いて従来のS-N関係で表したものを図-5に示す。スラブ厚が大きく、スパン長が短いNo. 1~4供試体の方がNo. 5~14に比べて、疲労強度が低く表れており、供試体条件によって疲労試験結果は大きく異なる。前述のように、PCスラブの疲労強度は、ひび割れ深さによる静的耐力の変化が大きいので、疲労特性を普遍的に評価するためには強度比 $S$ の修正が必要である。しかも、プレストレスの有無によって修正が必要なだけでなく供試体条件によっても強度比 $S$ の修正が必要である。

そこで、前述の強度比 $S = 「P_1/P_2」$ を用いて修正したものを図-6に示す。図に示すように、供試体条件によって異なるPCスラブの疲労強度も強度比 $S = 「P_1/P_2」$ を用いて修正することにより同条件で疲労強度が推定できる。

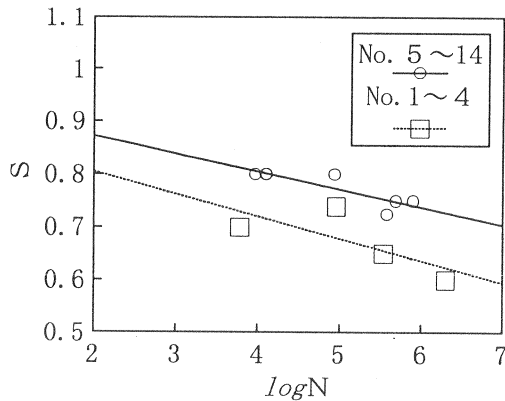


図-5 供試体条件による  
PCスラブの疲労強度

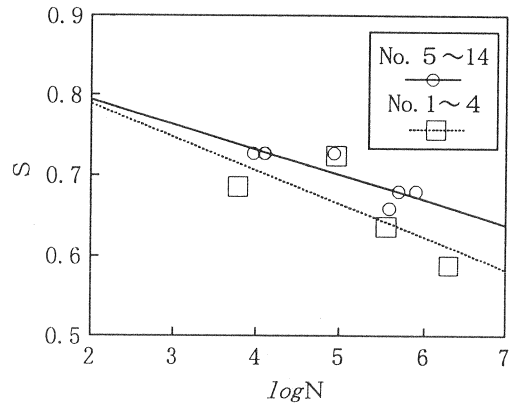


図-6 供試体条件によるPCスラブ  
の疲労強度 ( $P_1/P_2$ )

### 3-3 コンクリートのひずみと疲労強度の関係

鉄筋の疲労破断を伴わないRCスラブの疲労強度はコンクリートの疲労強度に依存することから、PCスラブの疲労強度もコンクリートの疲労強度と密接な関係があることは十分に考えられ、どのような供試体にも共通性のあるコンクリートひずみと破壊回数の関係を検討する必要がある。

コンクリートひずみと破壊回数の関係については、圧縮部のコンクリートの破壊がPC鋼材の破壊に先立って起こるようなPC曲げ部材の疲労寿命に関して、不等分布応力を受けるコンクリートの疲労寿命をもとにして Op1e<sup>3)</sup>らがその推定方法について報告している。また、コンクリート標準示方書にも普通コンクリートの場合、一定の応力繰り返しによる平均疲労寿命について次式が提案されている。

$$\log N = 17(100 - S_1) / (100 - S_2) \quad (1)$$

ここに、 $\log N$  : 疲労寿命の対数の平均値

$S_1, S_2$  : 繰り返し最大応力, 最小応力比

そこで、すべての供試体における最大コンクリートひずみと破壊回数の関係を Op1e の式と示方書の提案式<sup>4)</sup>とともに図-7に示す。これは縦軸に各階数毎の最大荷重載荷時におけるコンクリートひずみを取り、横軸に破壊回数をとったものである。この図に示すように、PCスラブの疲労強度は各供試体毎の静的耐力誤差や強度比に関係なく、コンクリートの疲労強度に依存するといえる。

また、破壊回数  $\log N$  とコンクリートひずみとの間には直線的な関係があり、コンクリートひずみから疲労強度を推定すること

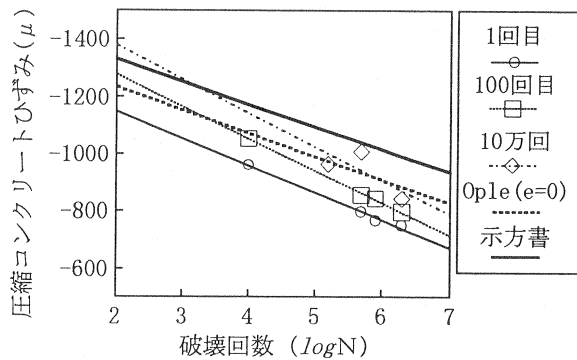


図-7 破壊回数と圧縮コンクリートひずみの関係

が可能である。載荷回数が1回目, 100回目, 10万回目各々におけるコンクリートひずみ $\epsilon$ と破壊回数Nの関係は次式で与えられる。

$$1 \text{ 回目} : \epsilon = 10^{-6}(-1341 + 95.7 \log N) \quad (2)$$

$$100 \text{ 回目} : \epsilon = 10^{-6}(-1504 + 112.9 \log N) \quad (3)$$

$$10 \text{ 万回目} : \epsilon = 10^{-6}(-1617 + 11.6 \log N) \quad (4)$$

$$\text{Op1e}(e=0) : \epsilon = 10^{-6}(-1400 + 821 \log N) \quad (5)$$

$$\text{示方書} : \epsilon = 10^{-6}(-1489 + 78.9 \log N) \quad (6)$$

式(2)~(6)により各回数毎の最大荷重載荷時のコンクリートひずみを代入することによって破壊回数を求めることができる。また, 式(6)はNo. 5~14のコンクリートの圧縮強度  $460 \text{ kgf/cm}^2$ , 静弾性係数  $E_c = 3.09 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  をもとに算出した示方書の提案式である。

式(5)および(6)は本実験の1回目におけるひずみに相当するもので, 本実験結果と比較すると, 破壊回数に対してやや高い値となっているが, ほぼ類似していると考えられる。

### 3-4 鉄筋のひずみ

図-8は載荷板中心からの距離が0, 20, 40cmの位置の鉄筋ひずみと荷重の関係を表したものである。中央での鉄筋ひずみに対し, 載荷板中心から20, 40cmの距離の位置にある鉄筋ひずみはほとんど変化がみられない。ここで, 比較するためにRCスラブの荷重と鉄筋ひずみの関係について表したものを図-9に示す。この図から明らかなように, 供試体長やプレストレスによる鉄筋ひずみの大きさに違いはあるものの, 載荷板中心からの距離による鉄筋ひずみの性状には大きな違いがみられる。

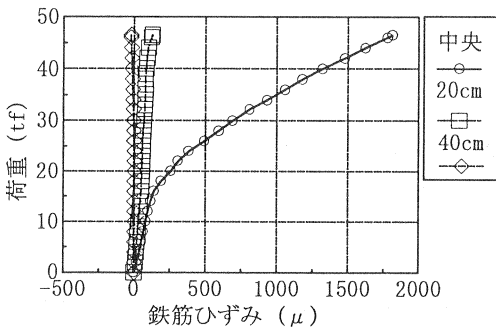


図-8 荷重と鉄筋ひずみの関係 (PCスラブ)

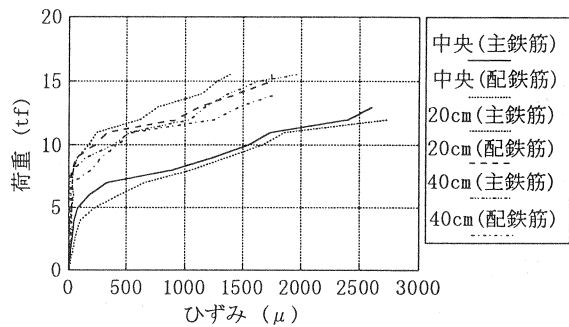


図-9 荷重と鉄筋ひずみの関係 (RCスラブ)

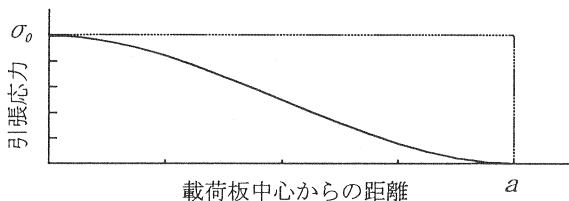


図-10 引張応力分布 (RCスラブ)

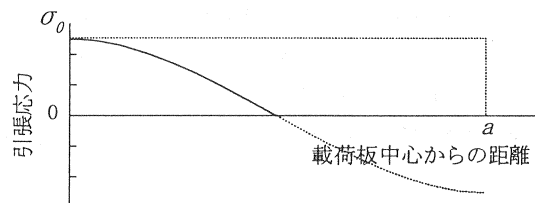


図-11 引張応力分布 (PCスラブ)

RCスラブにおいてはスラブからの距離が大きくなるにつれて鉄筋ひずみは小さくなるものの、それ相応のひずみがでているのに対し、PCスラブにおいては、ある距離以上(供試体長の1/4程度)になると、ほとんどひずみは観測されない。

上記のような現象についてスラブに作用する下限引張応力分布から考察する。図-10~11は載荷板中央にある応力 $\sigma_0$ が作用した場合のRC、PCスラブについて、載荷板中心からの距離と $\sigma_0$ の関係を示したもの(a:載荷板中央から支点までの距離)であり、3次関数で仮定したものである。図-11に示すように、PCスラブの場合にはプレストレスによって圧縮応力が働くために載荷板中心からある程度離れた位置では下限にはほとんど応力が作用しない。このことはRCスラブに比べて、PCスラブの押抜き角度が急になることも関連づけられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を総括し以下に示す。

(1)強度比Sを「上限荷重/静的破壊強度」で表した場合には、コンクリートの有効断面の減少が抑制されるために、RCスラブに比べて高い値を示す。しかし、強度比Sを「上限荷重/ひび割れ深さごとの静的強度」で表すことによって、RCスラブとPCスラブの疲労強度の差は小さくなり、また、供試体条件の違いによる疲労強度への影響も考慮できる。

(2)PCスラブにおいてはプレストレスにより、スラブの強度に対するコンクリートの影響が高く、PCスラブの疲労回数はOpleの提案する角柱コンクリートのひずみ-破壊回数関係「 $\epsilon = 10^{-6} (-1400 + \log N)$ 」に依存し、最大コンクリートひずみから破壊回数を推定することが出来る。

(3)PCスラブにおいては載荷板中心から供試体長の1/4程度以上離れた位置ではプレストレスの影響によりほとんど引張力が作用しない。そのため、ひび割れは押抜き面までしか発生せず、押抜き角度もRCスラブよりも急な角度となり、押抜き面積は小さくなる。

#### 【謝辞】

本実験を行うに際し、山口大学大学院の奥村征史氏には多大なる御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 角田与史雄, 藤田嘉夫: RC床版の疲労押し抜きせん断強度に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第317号, pp. 149-157, 1982. 1.
- 2) 松尾栄治, 大岩 昇, 濱田純夫, 阿部宗人: PC床版の押抜きせん断強度の推定法, 土木学会中国支部第49回研究発表会発表概要集, pp. 529-530, 1997.
- 3) Ople, F. S., and Hulsbos, C. L.: *Probable Life of Plain Concrete with Stress Gradient*, ACI Journal, Vol. 63, No. 1, pp. 59-82, 1966.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書, 設計編, 1991.