

論文

[2120] プレストレスを導入したワッフル型の合成RCスラブの実験的研究

正会員 ○手塚 武仁 (清水建設技術研究所)

高田 博尾 (清水建設技術研究所)

1. まえがき

通常、床スラブは鉄筋コンクリート（以下、RCと呼ぶ）造であり、床スラブの剛性が不足すると振動障害やひびわれ障害が問題となる。また、建築空間としてはシステムやレイアウトの変更フレキシブルに対応できることを要求され、床スラブの大スパン化が多くなってきている。

その結果、床スラブは漸次厚くなる傾向にあり、断面増加に伴う設計荷重の増加などに結び付き、自重によるひびわれの発生など構造設計上不利となってきた。

ワッフルスラブは、板と曲げ及び捩じり抵抗の大きいリブを組み合わせ、荷重を二方向に伝達するとともに、引張強度が小さいので荷重を負担できない部材下部のコンクリートを除去し、自重を減少できるなどの構造的な特徴を持っている。一方、大スパン空間の実現や、RC造のひびわれやたわみに配慮した高付加価値のスラブの実現に、アンボンド工法によりプレストレスを導入した床スラブ工法が、施工の容易さとRC並みのコストなどを背景に採用されてきている。

写真-1に示すプレストレスを導入したワッフル型の合成RCスラブ（以下、HW合成スラブと呼ぶ）は、ワッフルスラブのリブの部分にプレストレスを導入したハーフPC部材を架設後に、床部分のコンクリートを後打ちして構築するスラブであり、次のような特徴を持っている。

- ①プレストレスの導入度により、床スラブのひびわれとたわみの制御ができる。
- ②ワッフル型の床スラブなのでPC鋼材のライズを大きくとれ、キャンセル力を有効に使える。
- ③ハーフPC部材とすることにより、型枠を兼用するとともに支保工を必要とせず、省力化と省仮設化など躯体工事の合理化が図られる。
- ④接合部は、現場打ちコンクリートとすることによりPC部材に生じやすい遮音問題に対処できる。

本研究では、HW合成スラブについて、アンボンド工法によるプレストレスの導入が床スラブのひびわれやたわみに及ぼす影響と、適性なプレストレス導入度などの設計時の構造特性の把握を目的として曲げ・せん断加力実験を行った。

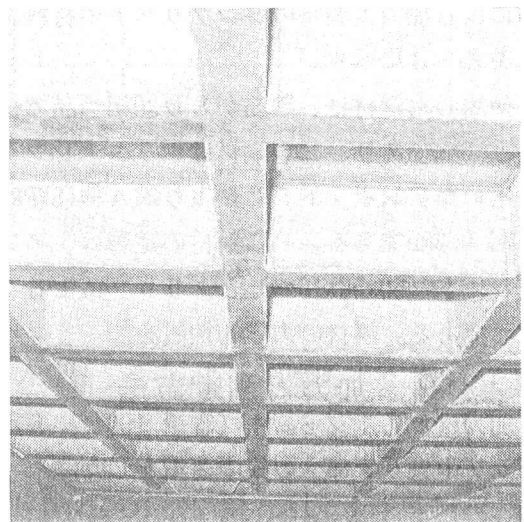


写真-1 HW合成スラブ

2. 実験概要

2. 1 供試体の種類

実験供試体は、試設計したスパンが10mのHW合成スラブに対して1/2の縮小モデルであり、断面形状を図-1に示す。実験要因は以下に述べる項目であり、供試体は表-1の4体とした。

①スラブのひびわれとたわみへのプレストレス導入力の影響度を調べる。プレストレス導入力レベルとして、床部分のコンクリート打ち込み時の応力をキャンセルする導入力（以下、所要力と呼ぶ）と、その 1.5 倍の導入力の 2 水準とした。

②合成 R C スラブでは、打ち継ぎ面でのすべり破壊がせん断耐力を決めることが多い。プレストレスの利用によりリブ断面が小さくなり、せん断耐力が低下することが考えられるので、スタッドによりすべりを拘束した場合としない場合、およびすべりが生じやすいように剥離材を打ち継ぎ面に塗布した場合の 3 水準とした。

2. 2 使用材料

使用コンクリートは、呼び強度が 270kgf/cm^2 (JIS 規格外品) の豆砂利コンクリートである。粗骨材の最大寸法は 10mm 、スランプの範囲は $18 \pm 2.5\text{ cm}$ 、空気量の範囲は $4 \pm 1.0\%$ である。基本調合を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は山砂と砕砂の混合砂（粗粒率 2.55）であり、粗骨材は豆砂利（粗粒率 6.04）とした。水は工業用水であり、混和剤は A E 減水剤標準型とした。 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体による加力実験時のコンクリートの材料試験結果を表-3 に示す。

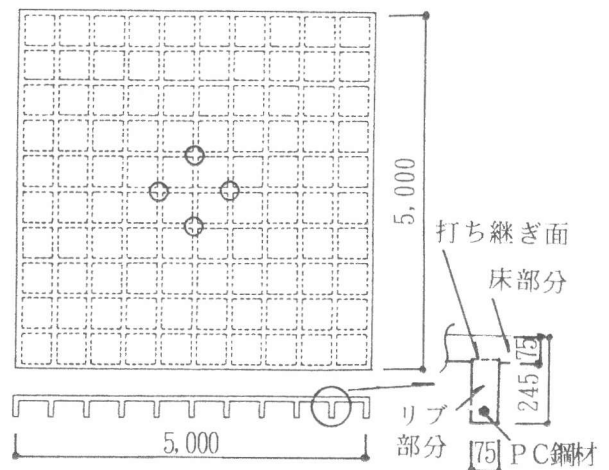
使用した鋼材は、鉄筋が S D 30 相当品で径が 10mm と 6mm であり、P C 鋼材はポリエチレンシースを用いたアンボンド P C 鋼より線 A 種 (SWPR7A) で径が 9.3mm である。P C 鋼材の定着は、アンカープレート ($50 \times 50 \times 10\text{mm}$) とグリップによるくさび定着である。鋼材の力学的性質を表-4 に示す。

2. 3 加力と測定方法

加力はオイルジャッキ（容量 100tf ）を用いてスラブ中央リブ部への集中荷重とした。

表-4 鋼材の力学的性質

材種		断面積 cm ²	降伏点 kgf/cm ²	ヤング率 kgf/cm ²
SD30	D10	0.6939	3641.	1.96x10 ⁶
	D6	0.3337	3736.	1.73x10 ⁶
SWPR7A		0.5161	18600.	2.00x10 ⁶



(注) ○はスラブ中央部の 4 点加力位置を示す。

図-1 実験供試体の断面形状 (単位: mm)

表-1 実験供試体と実験要因

供試体	導入力レベル		すべり拘束		
	所要力 $\times 1.0$	所要力 $\times 1.5$	有	無	無 剥離材
S3310	○		○		
S5010		○	○		
S3300	○			○	
S3301	○				○

表-2 コンクリートの基本調合

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)				
		W	C	S	G	A d
53.5	46.7	188	352	796	909	0.883

表-3 コンクリートの材料試験結果

供試体		圧縮強度 kgf/cm^2	割裂強度 kgf/cm^2	ヤング率 kgf/cm^2
S3310	①	262	20.6	266500
	②	256	25.4	267400
S5010	①	267	23.0	260800
	②	273	26.3	275000
S3300	①	265	21.5	270600
	②	289	20.6	263100
S3301	①	254	21.1	258900
	②	275	18.9	280700

(注) ①はリブ部分、②は床部分を示す。

供試体は気中養生とした。

オイルジャッキの反力は加力フレームを介して反力床にとった。供試体の支持方法は、周辺に丸鋼（ $\phi 30\text{mm}$ ）を供試体と反力はりの間に介して、鉛直方向下向きのたわみのみ拘束した単純支持形式とした。測定は、荷重とP C鋼材のプレストレスの変動をロードセルで、スラブ中央下端のたわみを変位計で求めた。また、鉄筋とコンクリートのひずみをストレインゲージで測定した。スラブ下端の曲げひびわれ幅は、 π 型変位計で測定した。

3. 実験結果と考察

実験はスラブ中央の一点加力として開始したが、最初の供試体 S3310が加力点のローカルな破壊を生じたため、他の供試体は加力治具を介したスラブ中央部の4点加力（図-1参照）とした。

3. 1 プレストレスの有効率

リブの部分のコンクリートを打ち込み後、供試体 S3310と S5010は材令15日で、供試体 S3300と S3301は材令8日でプレストレスを導入した。

プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度は、各々 246 kgf/cm^2 と 203 kgf/cm^2 であった。

また、プレストレスの導入により供試体の中央は $0.02\sim 0.038\text{ mm}$ の反り上がりたわみを生じた。

プレストレスの導入から載荷までの期間は、供試体により $30.6\sim 50.6$ 日であるが、この期間にコンクリートの乾燥収縮とクリープおよびP C鋼材のリラクセーションにより導入したプレストレスが減退する。供試体中央部のP C鋼材の両端にロードセルを介して測定したプレストレスの減退の測定結果を図-2に示す。

コンクリートの乾燥収縮とクリープは、供試体のコンクリートの打ち込みと同時に採取した円柱供試体（ $\phi 10\times 20\text{cm}$ ）により求めた。クリープ供試体には、てこ式の加力装置により実験供試体の軸力に相当する 30.3 kgf/cm^2 の持続荷重を加え、ひずみの測定は埋め込み型のひずみゲージによった。

プレストレスの減退と有効率を表-5に示す。

プレストレスの減退は導入後1~2日が大きい。10日程度で応力の変動はほぼ収束傾向にある。

プレストレス有効率は、測定結果が $0.91\sim 0.97$ であるのに対し、算定結果は $0.83\sim 0.91$ であった。

3. 2 振動感覚の評価

床スラブの振動は居住性や作業性に影響する。そこで、加力前の供試体 S3310に対して① 10kg のサンドバックを高さ 20cm から落下させる方法と、②大人2人の歩行時について振動測定を行った。

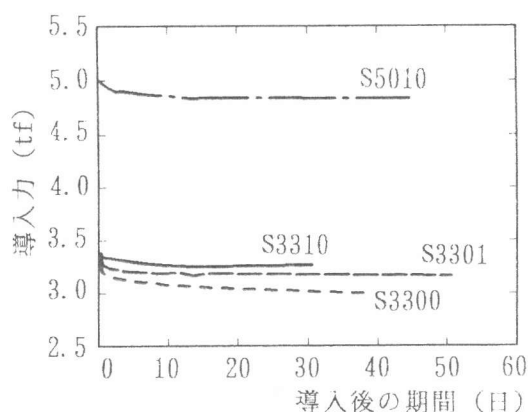


図-2 実験時までのプレストレスの減退

表-5 プレストレスの有効率

供試体	緊張力導入力		有効率		
		初 期	加力時測定	算定	
S3310	3.90tf	3.38tf	3.26tf	0.96	0.90
S5010	5.69tf	5.00tf	4.83tf	0.97	0.91
S3300	3.99tf	3.28tf	2.99tf	0.91	0.86
S3301	4.19tf	3.34tf	3.16tf	0.95	0.83

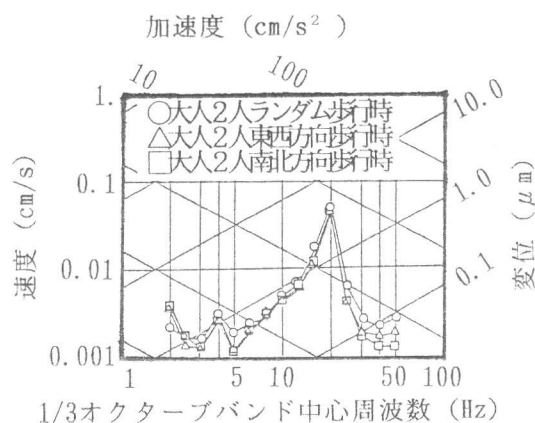


図-3 HWスラブの振動評価曲線

測定波形がランダム波であるので、振動波形を1/3オクターブ分析して振動の実効値により振動評価をした。振動評価曲線を図-3に示す。

供試体の断面2次モーメントに等価の板厚を持つ曲げ等価スラブによる振動数の算定結果とパワースペクトルから求めた供試体の1次振動数を表-6に示す。供試体の1次振動数は18.6Hzであり、RC造床スラブの通常の値に相当している。

一方、振動評価としては1/3オクターブバンド中心振動数が20Hzで大きなピークを示している。

このピークにはスラブ自体の粘性減衰が小さいことが影響している。重量が軽いとともに周辺はりの拘束による構造減衰があまり期待できない大スパンの床スラブの衝撃力に対する振動感覚については、水平に比べ敏感な垂直振動に関して有効な制振対策を必要とする場合もあると言える。

3. 3 たわみ性状

荷重と供試体中央部のたわみの関係を図-4に、包絡線の比較を図-5に示す。供試体 S3310を除いてスラブ中央部の4点加力としたので供試体 S3310以外の初期剛性は13~16%大きい。

初期弾性剛性はスラブ下端に曲げひびわれが発生するまで保持されている。曲げひびわれ発生時のたわみは1.70mm (S3310)から3.75mm (S5010)の範囲にあった。曲げひびわれの発生荷重で除荷すると、残留たわみは0.3mm程度である。

荷重を増して行き、リブの部分の下端鉄筋が降伏するとひびわれ幅が急速に大きくなり、その後リブの部分の上端鉄筋が降伏すると同時に剛性は大きく低下する。アンボンドPC鋼材を使用しているために、PC鋼材の付着が小さくリブの補強鉄筋の降伏後は剛性低下に対する抵抗が小さい。

3. 4 ひびわれ性状

加力時の供試体下端の曲げひびわれ幅を π 型変位計を用いて測定した。

建築学会のプレストレストコンクリート設計施工規準（以下、PC規準と呼ぶ）の解説の式により求めたひびわれ発生荷重の算定値と測定値の比較を表-7に示す。算定では、コンクリートの曲げ引張強度として表-3の割裂強度を用い、供試

表-6 HWスラブの振動数

	測定結果	算 定 結 果	
	単純支持	単純支持	固定支持
1次	18.6 Hz	20.8 Hz	38.0 Hz
2次	—	51.9 Hz	77.3 Hz
3次	—	83.0 Hz	114. Hz

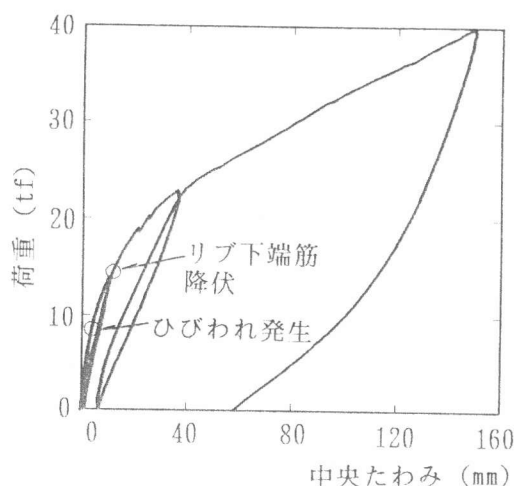


図-4 荷重とたわみ（供試体 S5010）

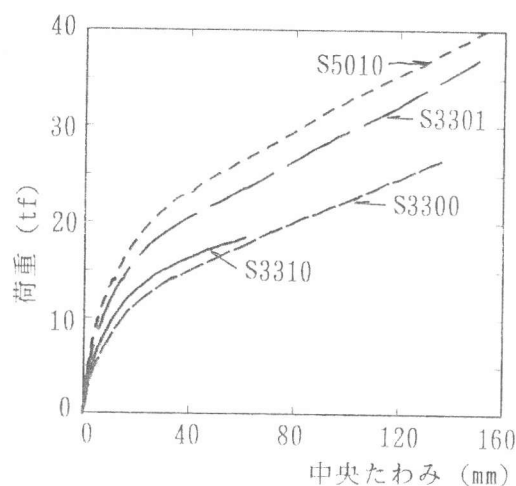


図-5 荷重とたわみの包絡線の比較

表-7 ひびわれ発生荷重 P_{cr}

供試体	縁応力度	測定 P_{cr}	算定 P_{cr}
S3310	39.9 kgf/cm ²	3.57 tf	5.90 tf
S5010	68.4 kgf/cm ²	8.55 tf	9.84 tf
S3300	36.3 kgf/cm ²	4.66 tf	5.47 tf
S3301	38.8 kgf/cm ²	6.03 tf	5.49 tf

（注）縁応力度の内、自重の項は除いた。

体の自重はリブの部分で負担すると仮定した。

P C 規準の解説の式により、ひびわれ発生荷重は算定できると言える。導入プレストレスが 1.5 倍になるとひびわれ発生荷重は 2.4 倍になっている。初ひびわれが発生する時のリブの下端鉄筋の応力度は $717 \sim 1464 \text{ kgf/cm}^2$ を示し、S D 30 相当の鉄筋の長期許容応力度の約 $1/2$ となっている。

荷重とひびわれ幅の関係を図-6 に示す。最大ひびわれ幅が約 0.2 mm に達する時にリブの下端鉄筋は降伏応力度に達し、その後急速にひびわれ幅が大きくなっていく。

これは、P C 鋼材がアンボンド方式であるために付着力が小さく、ひびわれ幅の増加に抵抗できないためである。アンボンド方式のプレストレスを導入した場合は、ひびわれ幅制御鉄筋の応力度を降伏点以下にする必要がある。

供試体の最終ひびわれ状態を図-7 と写真-2 に示す。最終ひびわれは、リブの部分のひびわれが床部分まで伸びて、供試体全面に降伏線を形成するように生じた。

ひびわれ発生時の曲げひびわれ幅を建築学会のプレストレス鉄筋コンクリート構造設計・施工指針の算定方法により求めると、表-8 のようになり、ひびわれ幅算定値は測定値に近似している。

加力直前の供試体の下端に生じている、乾燥収縮およびクリープを含む縁圧縮ひずみが打ち消されるデコンプレッション時点の荷重を P_A として、変動する積載荷重を含む全使用荷重の繰返し作用に相当する各加力レベルの荷重を P_B とする。

荷重レベル比 $\lambda = P_A / P_B$ に対する最大ひびわれ幅を整理すると図-8 のようになる。

荷重レベル比 λ が $0.33 \sim 0.60$ で曲げひびわれが発生し、荷重レベル比 λ が $0.14 \sim 0.28$ でリブの下端鉄筋が降伏する。最大ひびわれ幅が急激に大きくなるのは、荷重レベル比 λ が $0.3 \sim 0.4$ 以下になった時であり、境界点の最大ひびわれ幅は 0.1 mm 程度になる。最大ひびわれ幅が 0.1 mm を越えた直後にリブの下端鉄筋が降伏応力度に達し、ひびわれ幅の発達領域に至る事から、床スラブの水平性を満足する制限ひびわれ幅は 0.1 mm 程度である。

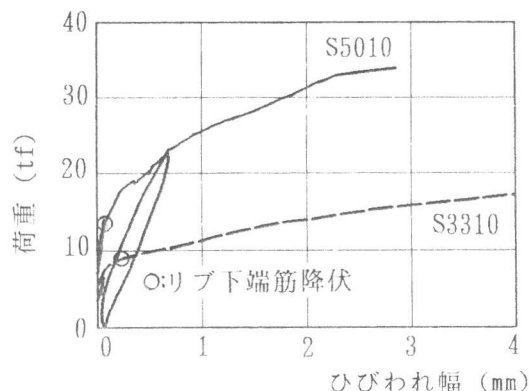


図-6 荷重とひびわれ幅の関係

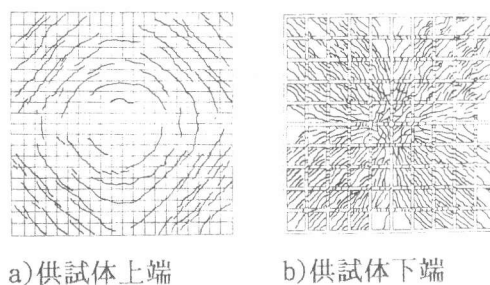


図-7 最終ひびわれ図

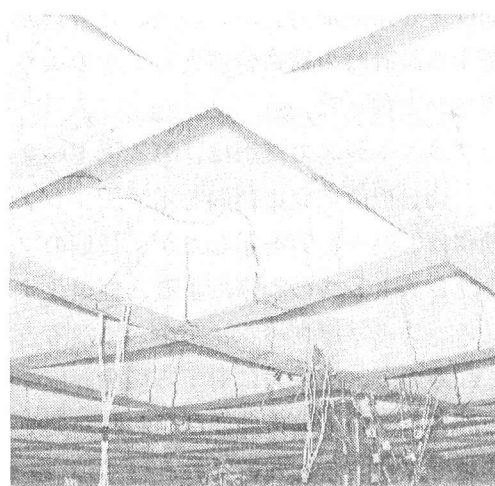


写真-2 最終ひびわれ状態

表-8 曲げひびわれ幅Wの検討

供試体	算定W(a)	測定W(b)	(a)/(b)
S3310	0.024mm	0.04mm	0.60
S5010	0.044mm	0.04mm	1.09
S3300	0.044mm	0.04mm	1.09
S3301	0.048mm	0.04mm	1.20

3. 5 P C 鋼材の応力変動

供試体の中央部の P C 鋼材について、両端にロードセル（容量10tf）を介して加力時の導入プレストレスの応力変動を測定した。測定結果を表-9に示す。

曲げひび割れが発生するまでは、導入プレストレスの変動は小さい。曲げひび割れが発生する時の導入プレストレスの変動は、0.016 ~ 0.048tf であり、加力前の導入プレストレスに対して0.49 ~ 1.61%に相当している。

リブの下端鉄筋が降伏する時の導入プレストレスの変動は 0.187~0.400tf であり、導入プレストレスに対して、合成スラブ打ち継ぎ面のすべり拘束のある場合（S3310 と S5010）が、5.38 ~ 5.74%であり、すべり拘束のない場合（S3300 と S3301）が、9.34 ~ 13.38%に相当している。

ひびわれ補強鉄筋が降伏する時の P C 鋼材の応力は、合成スラブの打ち継ぎ面にすべり拘束がない場合は、ある場合に比べ約2倍の変動を示す。

4. まとめ

曲げ・せん断加力実験の結果、H W合成スラブに関する設計時の構造特性として次のような事項が明らかとなった。

- 1) プレストレスの減退は、導入後1~2日が大きく、10日程度で収束傾向を示す。プレストレス有効率は0.91~0.97を示したが、長期のプレストレス有効率については今後の課題としたい。
- 2) プレストレスの利用により、軽量化するとともに大スパン化した床スラブの粘性減衰は小さくなる。スラブ厚スパン比が小さくなると、スラブ周辺のはりの拘束により生じる構造減衰も小さくなるので、衝撃力に対する振動評価を十分に検討する必要がある（図-3参照）。
- 3) 床スラブの下端に曲げひびわれが発生するまでは初期弾性剛性を維持し、曲げひびわれの発生時点で除荷すると残留たわみは 0.3 mm 程度となる。曲げひびわれ発生後の剛性については、リブの部分の補強鉄筋の応力状態が大きく影響する（図-4参照）。
- 4) アンボンド P C 鋼材の付着力が小さいので、リブの部分の補強鉄筋が降伏すると曲げひびわれ幅が急速に大きくなる（図-6参照）。曲げひびわれ幅が 0.1mmを越えるとひびわれ幅の発達領域に至る事から、床スラブの水平性を保つ制限ひびわれ幅は 0.1mm程度である（図-8参照）。
- 5) リブの補強鉄筋が降伏する時の P C 鋼材の応力に打ち継ぎ面のすべり拘束が大きく影響する。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート設計施工標準、日本建築学会：2) プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針、日本建築学会

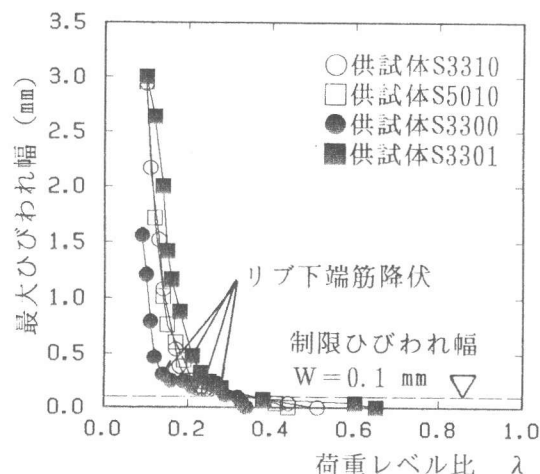


図-8 荷重レベル比とひびわれ幅

表-9 P C 鋼材の応力変動 ΔP_s

供試体	加力前 P_s	ひびわれ ΔP_s	下筋降伏時 ΔP_s
S3310	3.26 tf	0.016 tf (0.49%)	0.187 tf (5.74%)
S5010	4.83 tf	0.043 tf (0.89%)	0.260 tf (5.38%)
S3300	2.99 tf	0.048 tf (1.61%)	0.400 tf (13.38%)
S3301	3.16 tf	0.040 tf (1.27%)	0.295 tf (9.34%)

(注) カッコ内は $\Delta P_s / P_s$ を示す。