

逆リブ型合成スラブの開発 (その 1)

古 屋 則 之
竹 本 靖

Development of Concrete Slabs Using Upward Ribbed Precast Concrete Panels (Part 1)

Noriyuki Furuya
Yasushi Takemoto

Abstract

A newly developed reinforced concrete slab system is introduced. This slab system consists of upward ribbed precast prestressed concrete panels and concrete cast in place on the panels.

The experimental work shows that the basic behavior of the slab and the composite effect of it on a steel girder are satisfactory.

概 要

上向きにリブを持つプレストレストプレキャストコンクリートパネルに、あと打ちコンクリートを施した合成スラブ方式の開発に関する報告である。このスラブ方式の設計法と特徴を紹介すると共に、2種の構造実験の結果について述べている。実験の内容は、パネル単体および合成スラブの曲げ性状、ならびに鉄骨はりとの合成ばり効果に関するもので、いずれの実験結果からも、このスラブ方式が、設計上の要求を充分満足することが確かめられた。

1. まえがき

ここでいう逆リブ型合成スラブとは、上面に1方向の凹凸(逆リブ)を持ったプレストレストプレキャストコンクリートパネル(以下、PC版)をはり間に掛け渡し、その上にあと打ちコンクリートを施工して一体とする鉄筋コンクリート合成スラブである。

2. スラブの設計法

この合成スラブの設計は、工事の各段階で、断面各部の応力をチェックするという方針で行う。

PC版は自重の他、あと打ちコンクリートの重量と作業荷重を支える1方向スラブとして断面を決め、その際、中間サポートが無い場合は単純スラブとし、サポートを立てれば連続スラブとして応力を算定してゆく。リブ方向にはプリテンション方式によってプレストレスを導入し、PC版重量の軽減とひびわれ防止を計るが、その場合の考え方はパーシャルプレストレスングとする。

はり間に掛け渡したPC版上には、溶接金網などを全面、あるいは支点上部に敷いてコンクリートを打ち、

その硬化後は、合成断面で載荷荷重を支えることとなる。支点上では、負の曲げモーメントに対し、引張側コンクリートを無視するが、スパン中間下端では、引張応力が常に生じないようにプレストレスのレベルを定める。

3. スラブの特徴

この合成スラブは、逆リブ型のPC版を用いることにより、型枠が不要である、作業床を兼用することができる、ひびわれが生じない、底面が平滑である、床厚を薄くでき、階高を縮めることができるなどの利点を持つ。さらに、あと打ちコンクリートを施工することにより、床配管スペースをとることができる、PC版の不陸や目違いをカバーできる、面内剛性を期待できるなどの特徴もある。

一方、問題点としては、(1)PC版圧縮側コンクリートの断面欠損による強度への影響、(2)PC版とあと打ちコンクリートとの一体性、(3)はりとの合成ばり効果、(4)スラブの面内剛性などが挙げられる。

これらについては、いずれも実験によって、その性状を確かめることとした。

4. PC版および合成スラブの実験

PC版単体の正、負の曲げ性状、およびあと打ちコンクリートとの合成効果（一体性）を明らかにするため、以下の実験を行った。

4.1. 供試体

供試体の形状を写真-1に、概要を図-1に、種類を表-1に、使用材料の性質を表-2に示す。

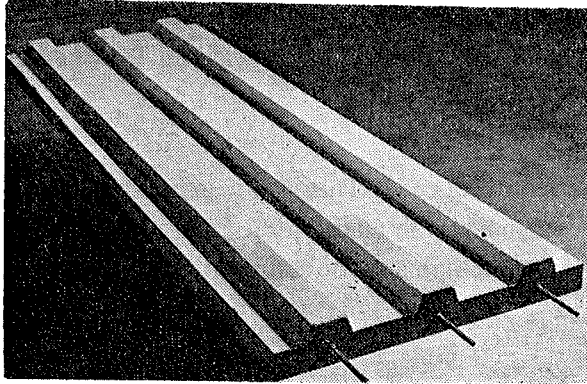


写真-1 PC版の形状

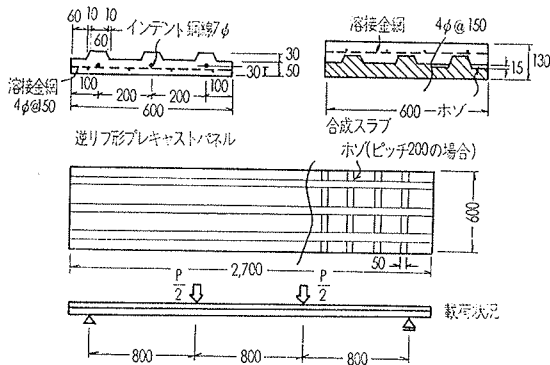


図-1 供試体の概要

供試体の断面は、スパン約3mのスラブを想定した実寸法である。

比較用のPR-0を除き、PC版にはいずれもインデントPC鋼線7φにより、平均プレストレス30kg/cm²が、プリテンションで導入してある。プレストレスの導入は、コンクリート材令5日で強度が350kg/cm²に達した時、プリテンションベッドをゆるめて行った。合成効果をみるPR-3~6に対しては、プレストレス導入後、両端支持の状態であと打ちコンクリートを施工した。

4.2. 実験方法

PC版単体、合成スラブとも、図-1に示すように単純支持の3等分点載荷とした。加力は片振り漸増くり返しとし、4サイクル目で破壊させた。測定は、スパン中央のたわみ、コンクリート表面および鋼材のひ

	供試体名称	導入プレストレス (kg/cm ²)	ホゾのピッチ (mm)
単体曲げ 実験用	PR-0(比較用)	0	/
	PR-1(表曲げ用)	30	
	PR-2(裏曲げ用)	同上	
一体性 実験用	PR-3	30	ホゾ無し
	PR-4	同上	800
	PR-5	同上	400
	PP-6	同上	200

表-1 供試体の種類

コンクリート調合表

	ω/c (°/vl)	スランプ (cm)	単位水量 (kg/m ³)	セメント (l/m ³)	細骨材* (l/m ³)	粗骨材* (l/m ³)
PC版	42.5	12	171	127	305	357
後打ち部分	54.7	18	175	101	336	338

*細骨材, 粗骨材共にヒルトン使用

コンクリートの材質

供試体名称	圧縮強度 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ³ kg/cm ²)	比重
PR-0	384	15.5	1.48	1.55
PR-1	390	15.8	1.39	1.56
PR-2	401	15.2	1.37	1.54
PR-3	PC版	394	15.7	1.41
	後打ち	236	/	1.26
PR-4	PC版	409	14.6	1.41
	後打ち	255	/	1.31
PR-5	PC版	400	13.7	1.54
	後打ち	267	/	1.44
PR-6	PC版	434	13.1	1.54
	後打ち	285	15.3	1.39

鋼材の引張試験結果

	φ (mm)	E · A (ton)	Py _{0.2%} (ton)	Pmax (ton)
4面インデントPC鋼線	7	754	5.74	6.39
	φ (mm)	E (10 ³ ton/cm ²)	σy _{0.2%} (ton/cm ²)	σmax (ton/cm ²)
溶接金網	4	1.96	4.69	5.08

表-2 使用材料の材質

ずみ分布、PC版とあと打ちコンクリートとのずれのそれぞれについて行った。

4.3. 実験結果と考察

実験結果の一覧を表-3に、両実験の荷重-たわみ曲線の各1例を図-2, 3に示す。

4.3.1. PC版単体の曲げ性状 プレストレスのないPC版PR-0は、曲げ載荷により、ひびわれ→剛性低下→PC鋼線の降伏→圧縮側コンクリートの圧壊という経過をたどって破壊する。PR-1は、ひびわ

供試体		実験値 (ton)			計算値 (ton)	
		ひびわれ荷重	鋼線降伏荷重	最大荷重	設計荷重	ひびわれ荷重
パネル単体	PR-0	0.25	1.15	1.30		0.19
	PR-1	0.80		1.65		0.62
	PR-2	0.35	0.90	1.10		0.27
合成スラブ	PR-3	1.60	3.70	4.95	0.80	1.90
	PR-4	1.63	3.80	4.85	0.82	1.77
	PR-5	1.00	3.70	4.20	0.82	1.69
	PR-6	1.70	3.90	4.35	0.83	1.65

表-3 実験結果一覧

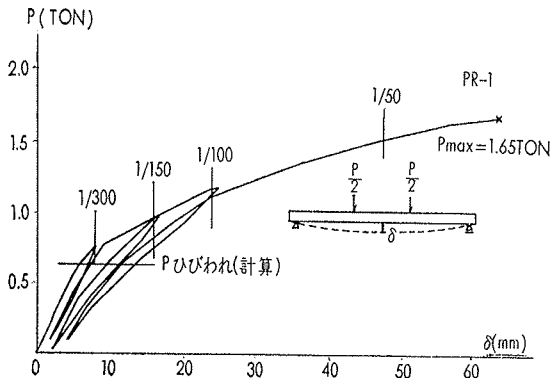


図-2 PR-1の荷重-たわみ曲線

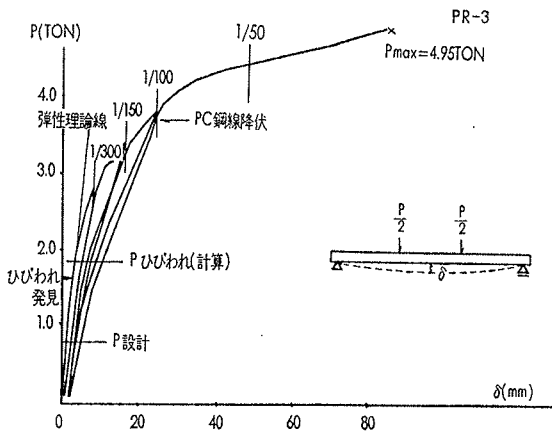


図-3 PR-3の荷重-たわみ曲線

れ→なだらかな剛性低下→コンクリートの圧壊となり、PC鋼線は最後まで降伏しない（破壊時の鋼線ひずみは、降伏ひずみの約90%）。これは、PC版の圧縮域の面積がリブ部分のみなので、結果的に過大鉄筋比となるためである。ただし、破壊荷重は施工時設計荷重（≡ひびわれ荷重）の3倍弱、最大たわみはスパンの1/40におよぶ上、復元性も良好なので、問題はないといえる。支点上での負曲げを想定し、上記の2供試体とは逆向きの載荷をしたPR-2は、PC鋼線の位置が圧縮縁に近くなるため、ひびわれ荷重、最大荷重ともに、PR-1よりかなり低く、鋼線の降伏がコンクリートの圧壊に先行する。ただし、ひびわれ後の耐力、および変形の伸びは充分である。

4.3.2. 合成スラブとしての一体性 PC版とあと打ちコンクリートとの一体性を確かめるために、PC版の谷部にシアキーとなるホゾを、ピッチを変えて設け、曲げせん断載荷時の挙動を比較したのが、PR-3～6供試体である。実験経過と結果によれば、ホゾのないPR-3から、こまかいピッチでホゾを設けたPR-6までは、変形および破壊性状にほとんど差がなく、PC鋼線の降伏に続くコンクリートの圧壊に至るまで、コンクリート境界面はいずれもすべりを起していない。したがって、力の方向と平行とはいえず、このような凹凸を持つPC版の界面には、特にシアキー、シアコネクタを設ける必要はないといえよう。

5. 合成ばりの実験

スラブとはりとのシアコネクタで繋結させ、合成ばりとして用いることは有効な設計手段となる。ここでは、前記問題点(3)に関して合成スラブと鉄骨はりからなる合成ばり効果を確認するための実験を行った。

5.1. 合成ばりの設計

シアコネクタの研究は、主として土木分野の橋りょうに関して実験的に進められてきて、設計法も確立しているが、建築分野ではまだ設計法が確立されていない。ここでは、シアコネクタとしてスタッドジベルを用いるが、その設計法の1つに、A. A. S. H. O.¹⁾の道路橋の仕様書があり、そこではI. M. Viestの実験結果²⁾をもとに、コンクリートとはりとの残留ずれが $7.5 \times 10^{-3} \text{cm}$ となる荷重を限界値と定め、さらに安全率（通常4）で除した値を許容値としている。

又、その実験結果では、スタッドジベルの終局値は限界値のさらに2倍以上に達することが示されている。このようにA. A. S. H. O.の道路橋の仕様書では、スタッドジベルの耐力にかなりの余裕があるため、それによって設計した合成ばりの耐力は、負モーメントに対しては、コンクリートスラブが引張りに利かないので鉄骨はりの耐力以上は期待できないにもかかわらず、正モーメントに対しては、スラブと合成された高い耐力を発揮する。したがって、両者の耐力差は大きく、正負の曲げモーメントを受ける建築物のはりにおいては不合理な設計となる場合がある。

ここでは、スタッドジベルは、合成ばりの終局時まで、コンクリートと鉄骨はりとの間で、せん断力を伝達できればよいという考えから、供試体の設計に当っては、スタッドジベルの終局耐力をA. A. S. H. O.に定められた限界値の2倍と仮定し、合成ばりが終局耐力に達する時にスタッドジベル自身もまた、終局耐力に達するような設計とした。これはA. I. S. C.の

鉄骨構造の手引き³⁾に見られるものとよく似た方法である。

5.2. 供試体

供試体の鉄骨ばり、PC版、スタッドジベルの配置などを図-4に、鋼材とコンクリートの材料試験結果

を表-4に示す。

供試体は、スタッドジベル(16φ, H=80)を100@千鳥に溶植したH形鋼(H-294×200×8×12, スパン5m)のフランジの上に両側からPC版を乗せ、その上からあと打ちコンクリートを打設して幅90cm, 厚さ11.5cmのスラブを形成したものの2体である。1体はPC版のリブ方向がはりと直交するもの(C.B.1供試体), 他の1体は平行になるもの(C.B.2供試体)である。ここに用いたPC版の断面形状や、PC版およびあと打ちコンクリートそれぞれの配分は4章の実験の時と同じである。

5.3. 実験方法

加力は、単純ばり形式の中央集中交番加力とし、図-5のように、供試体の下から加力した。コンクリートが圧縮側となる場合を正加力とし、その逆を負加力とした。

測定は、図-6に示す位置のたわみ、ずれ、ひずみなどについて行った。

5.4. 計算値

計算値に採用した材料強度や定数は、材料試験結果にもとづく。

5.4.1. 曲げ剛性 曲げ剛性の計算には、次の2つの仮定, (1)コンクリートの引張応力度は無視, (2)鉄骨とコンクリートは完全に一体となり、平面保持が成立……を設け、コン

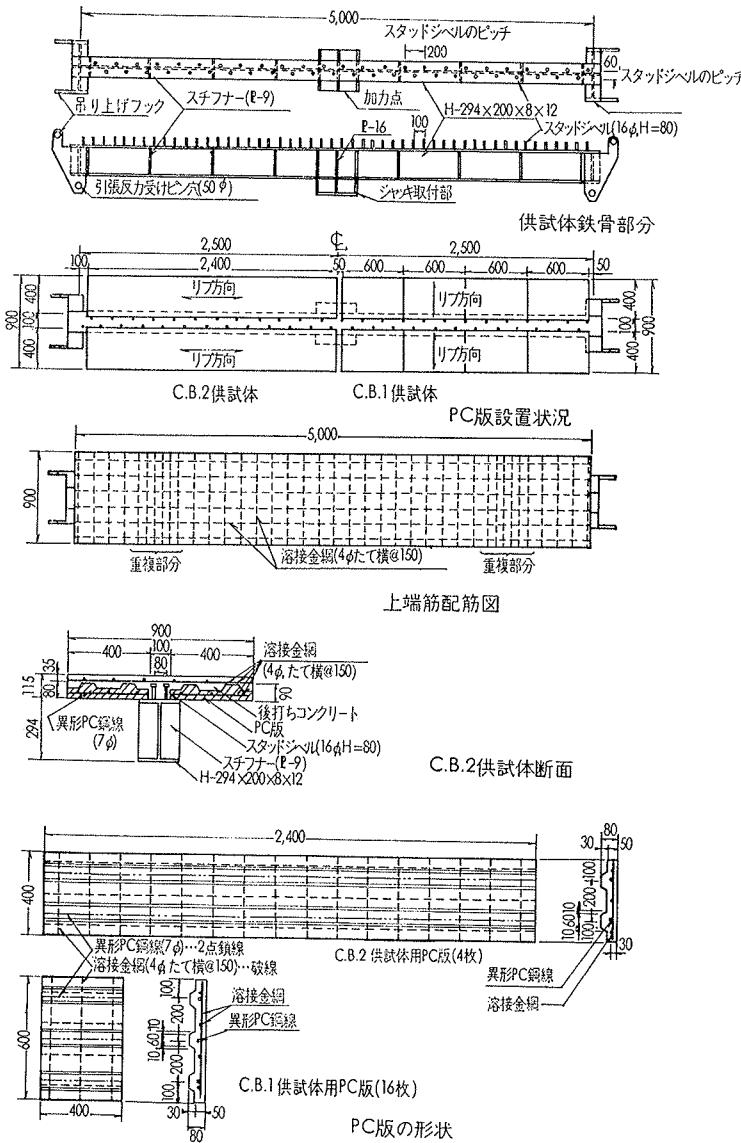


図-4 供試体概要

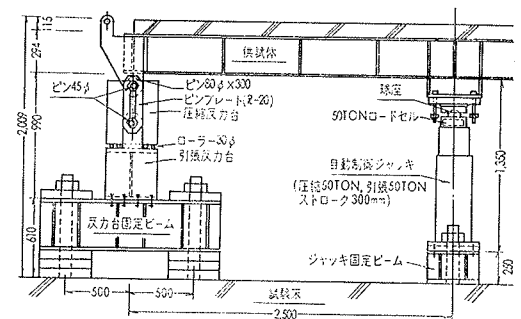


図-5 実験方法

鋼材	降伏強度 (ton/cm ²)	最大強度 (ton/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ ton/cm ²)	伸び率 (%)	供試体名称	圧縮強度 (kg/cm ²)	引裂強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)	比重	
ウエブ (H-8)	2.69	4.34	2.08	26.0	C.B.1	PC版	345	16.1	1.48	1.56
フランジ (H-12)	2.54	4.37	2.11	28.6		後打ち	292	13.6	1.44	1.53
スタッドジベル (16φ)	4.46	5.49	2.14	17.9	C.B.2	PC版	319	15.6	1.36	1.58
						後打ち	280	15.6	1.24	1.53
PC鋼線 (7φ4面インダント)	15.05	16.70	2.05	7.00						
溶接金網 (4φ)	4.69	5.08	1.96	-						

表-4 材料試験結果

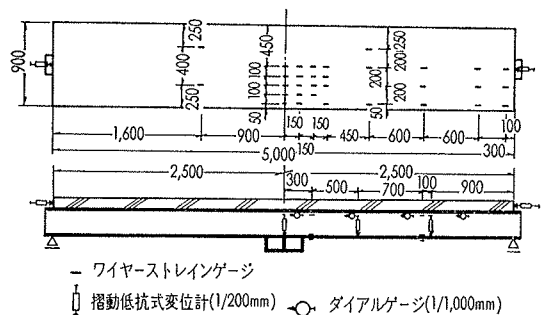


図-6 測定位置

クリートの弾性係数に、あと打ちコンクリートの値を採用した。

5.4.2. スタッドジベルの設計用終局耐力 A. A. S. H. O. のスタッドジベル限界値算定式

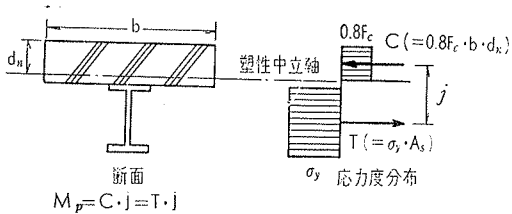
$$Q_{cr} = 87.5d^2\sqrt{F_c} \quad (\text{C. G. S. 換算}) \cdots \cdots H/d \geq 4.2$$

d : スタッドジベルの径 H : 同高さ

F_c : あと打ちコンクリートの圧縮強度

を用いて、1本当りの終局耐力 $Q_d = 2Q_{cr}$ とした。

5.4.3. 合成ばりの曲げ終局耐力 合成ばりの終局時には、鉄骨は全断面が降伏し、コンクリートは圧縮側応力度が一様に $0.8F_c$ に達しているものとして、全塑性モーメント M_p を算出した。



$$M_p = C \cdot j = T \cdot j$$

- d_n : スラブの圧縮縁から中立軸までの距離
- b : スラブの幅 σ_y : 鉄骨の降伏強度
- A_s : 鉄骨の断面積 j : 応力中心間距離

図-7 終局時の応力度分布

合成ばりの終局時に、鉄骨とコンクリートの界面に作用する水平せん断力は、曲げモーメントの最大位置と最小位置(加力点と支点)の間に対して、 $\sum Q = C (=T)$ となるので、スタッドジベルの配置数 n は、 $n = C/Q_d$ を満足するように定めた。実際の供試体について、 $n \cdot Q_d/C$ の値は、C. B. 1 で 1.04, C. B. 2 で 0.98 となっている。

5.5. 実験結果と考察

荷重-たわみ曲線を図-8に、荷重-ずれ曲線を図-9に、ひずみ分布を図-10に、ひずみ測定から作図した圧縮側コンクリート表面の応力度分布を図-11に、実験終了後のスタッドジベルの状況を写真-2に示す。

5.5.1. 曲げ剛性 正加力における曲げ剛性は計算値をわずかに上回り、はりとはスラブとのずれが記録されるあたりまで変化しない。その後、ずれの発生とともに剛性は低下するが、その比率はわずかである。

負加力において、最初コンクリートを考慮した剛性に近かったが、曲げひびわれ発生後は鉄骨はりだけの剛性に漸近してゆく。

5.5.2. ひびわれ 負加力における曲げ初ひびわれは、C. B. 1供試体では 15 kg/cm^2 , C. B. 2供試体では 16 kg/cm^2 の応力度で発生した。曲げひびわれは

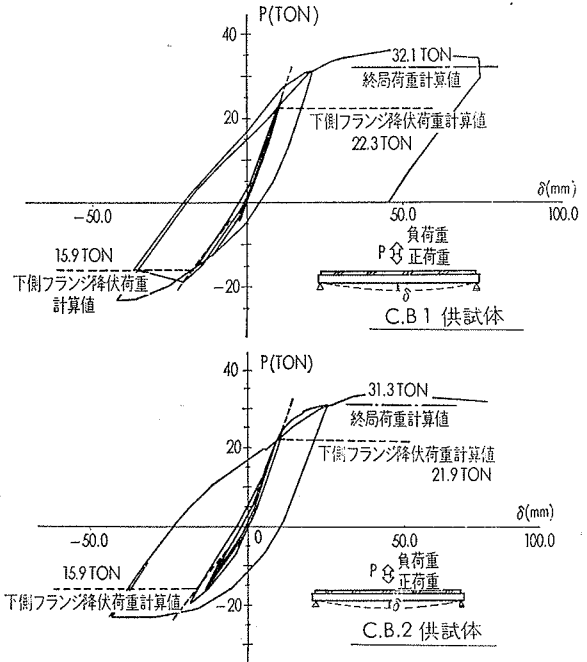


図-8 荷重-たわみ曲線

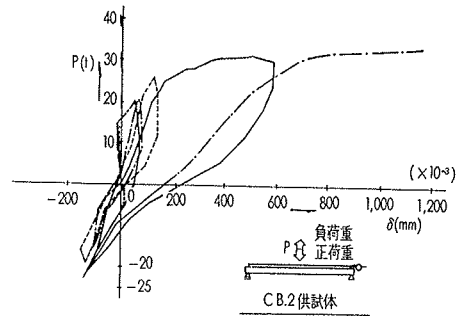
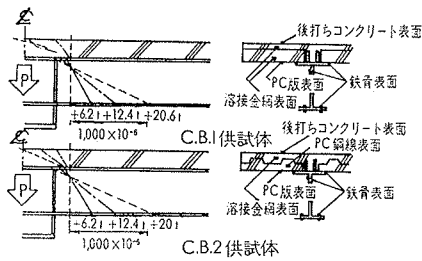


図-9 荷重-ずれ曲線

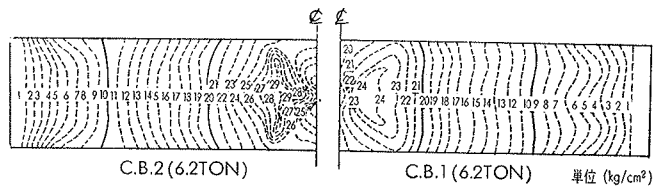
C. B. 1 供試体では PC 版の中にもすぐ延びてゆくが、C. B. 2 供試体では、PC 版に導入されたプレストレスが解除されるまで、ひびわれは PC 版上の境界面で止ってしまい、ひびわれ発生後の両供試体の剛性低下に差が生じた。

5.5.3. ずれ はりとスラブとのずれは、両供試体とも 15ton(その時のスタッドジベルにかかっているせん断力は $0.27Q_d$ と推定される) 以後に明確となり、そのことはひずみ分布図で、はりとはスラブとの境界でひずみ分布がずれていることから推察できる。残留ずれは、下フランジ降伏後の 25 ton に対しても最大 $5.4 \times 10^{-3} \text{ cm}$ であった。

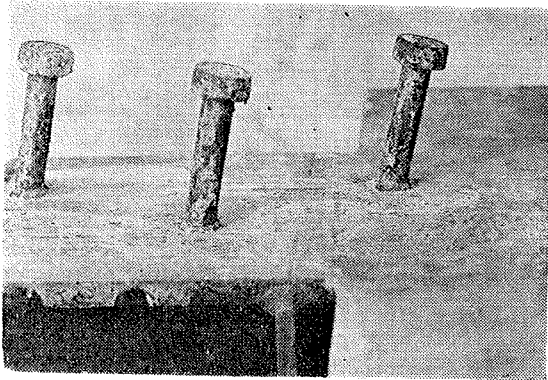
5.5.4. 最大耐力, その他 コンクリート表面の応力度分布は、はりとはスラブのひずみ分布にずれが生じて、下フランジが降伏する近辺までは図のような全



図一〇 ひずみ分布



図一〇 コンクリート表面の応力度分布



写真一 実験後のスタッドジベルの状況

幅有効を示す分布状態であった。

最大耐力は、両供試体とも、終局耐力計算値を上回ったあと、コンクリートの破壊で決った。この破壊はPC版がはりの曲げ変形に追従できなくなり、あと打ちコンクリートを下からはね上げる形で生じた。このような破壊の形式は、引張載荷という方法(図一五)によるものと思われる。破壊直前には、鉄骨は全断面が降伏し、下フランジはひずみ硬化域に入り、一方、コンクリートの表面応力度は最大 $0.9F_c$ に達していた。したがって、耐力的にはほぼ限界であったといえる。

なお、実験終了後にコンクリートをはつり、スタッドジベルを観察した結果、破断箇所はなくいくらか変形は見られるものなお健全であったことが確かめられた(写真一2)。

6. まとめ

逆リブ型合成スラブの開発を目的とした一連の実験

的研究のうち、PC版単体および合成スラブの曲げ実験、ならびにH形鋼との合成はり曲げ実験によって得られた結論は、以下の通りである。

(1) PC版単体は、表曲げ、裏曲げのいずれに対しても、期待通りの強度性状を示し、型枠兼作業床としての性能を満足する。

(2) 合成スラブは、PC版と、あと打ちコンクリートの界面に、特別なシャキーやシャコネクターを設けなくても、充分、一体性を発揮する。

(3) 合成はりでは、A. A. S. H. O. 道路橋仕様書に示された、変形で押えた限界値の2倍を、スタッドジベルの終局耐力として採り、これが合成はりの曲げ耐力と等しくなるようスタッドの径およびピッチを定める、という設計方法をとることの妥当性が、PC版のリブ方向の両者について、確かめられた。

参考文献

- 1) Standard Specifications for Highway Bridges: The American Association of State Highway Officials, 8th Edition, Section 9, 1961, 114~118
- 2) I. M. Viest: Investigation of Stud Shear Connectors for Composite Concrete and Steel T-Beam, Journal of ACI, Vol. 27, No. 8, April, 1956, 875~891.
- 3) Manual of Steel Construction: American Institute of Steel Construction Inc, 7th Edition, Part 5, 1970, 5-32~5-35, 5-147~5-150