

(33) 鋼板・コンクリート合成床版の静的耐力に関する実験

大阪市立大学 工学部 ○園田恵一郎
大阪工業大学 堀川都志雄
(株) 栗本鉄工所 村田 広治

1. はしがき 道路橋鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版という）のひび割れ損傷が報告されて以来、その原因究明のため多くの関係者や研究者らによって室内および現場で多方面の角度から実験が行われ、鋼板接着、縦桁増設や床版厚の増加等の対応策が講じられてきた。昭和53年の建設省街路課長の通達¹⁾ではせん断耐力の向上を図るために床版厚の増加を推奨しているが、死荷重の増大をもたらすことになり鋼桁への負担を大きくする欠点を有している。また、型枠工の省力化や急速施工化等による費用の軽減を図ることも、RC床版にとって大切であると言われている。そこで、型枠の役割を担いかつコンクリート硬化後、強度部材となる鋼板とコンクリートの合成床版やPC版を型枠とする合成床版等が考案され、現在 2,3の実施例が報告されている^{2), 3)}。RC床版に比べて大きな鋼断面比を有する合成床版の曲げ耐力は大きく、その破壊性状は鋼板とコンクリートとの付着せん断破壊が支配的であるといわれている。合成床版では鋼板とコンクリートとを一体化させるためにずれ止めが設けられているが、ずれ止めに関する計算方法や設計基準は未だ確立されておらず明確ではない。従って、鋼板とコンクリートとの付着特性を知ることは合成床版を設計する上で重要なことである。

本研究ではスタッドのみで鋼板とコンクリートを接合するいわゆるRobinsonタイプの合成床版の付着特性と終局耐力に関する実験を行った。実験床版は短辺1^m×長辺2^m×版厚(11^{cm}+0.9^{cm})で、スタッドの配置間隔は短辺方向に15^{cm}で一定、長辺方向に7.5, 10および15^{cm}の3種類である。主として道路橋の床版を対象とし、荷重は後輪荷重(面積50^{cm}×20^{cm})を採用し、主桁近傍の載荷状態を想定したすなわちせん断力の卓越する端部載荷と支間中央部の曲げに支配される中央載荷の2つの載荷形式とした。それぞれの載荷に対し、たわみ、鋼板とコンクリートとのずれ量および鋼板のひずみを計測した。特に、スタッドに働くせん断力を求めるために、スタッド溶植部で鋼板にスリット(長さ5^{cm}×幅2^{mm})を設け、鋼板の応力からスタッドに働くせん断力を算出した。さらに、終局状態に至るまでの床版の挙動と崩壊機構および終局耐力の算定方法を検討した。

2. 実験床版の材料特性と諸元

コンクリートの配合を表-1に示す。
鋼板(厚さ9^{mm})に、Nelson型(ダイヘンSTK)φ13×80の頭付きスタッドを溶植した(図-1)。また各供試体のスタッド間隔を表-2にまとめる。なお、供試体Dは供試体Bでのスタッドのうち長辺方向の端部列のみに配置されたものである。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブの範囲(mm)	水セメント比w/c(%)	細骨材率s/a(%)	単位重(kgf/m ³)				
				水w	セメントc	細骨材s	粗骨材G	混和材
15	12	47	42.5	178	379	745	1008	97.5

表-2 各供試体のスタッド間隔(mm)

供試体	数	短辺方向	長辺方向
A	1	150	75
B	2	150	100
C	1	150	150
D	2	150	100

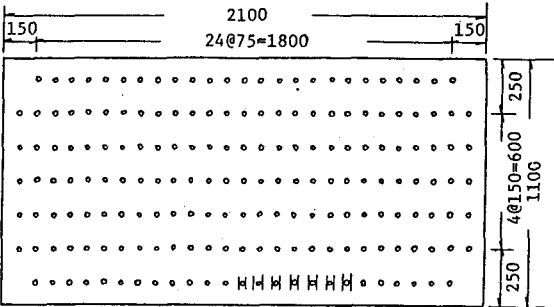


図-1 鋼板の寸法とスタッドの位置(mm)

鋼板およびコンクリートの力学的特性を表-3と4に示す。

表-3 鋼板の力学特性

降伏点 強度 (kgf/cm ²)	引張 強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソ ン比
2991.8	4107.1	2.124X10 ⁶	0.301

表-4 コンクリートの力学特性

供試体	材齢	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソン 比	圧縮 強度 (kgf/cm ²)	引張 強度 (kgf/cm ²)
A	44	1.84X10 ⁵	0.14	329.4	27.5
B-1	30	1.89X10 ⁵	0.14	264.8	24.1
C	30	1.89X10 ⁵	0.14	264.8	24.1
B-2	37	1.92X10 ⁵	0.12	305.7	28.2
D-1	65	1.92X10 ⁵	0.15	308.6	28.5
D-2	65	1.92X10 ⁵	0.15	308.6	28.5

3. 測定項目

- 1) 実験床版は全周単純支持されており、隅角部の浮き上がりを防止した(図-2)。また、1つの長辺方向の半分に沿って反力計(ロードセル)を配置し、反力の分布形を調べる。
- 2) スタッッドに働くせん断力を求めるために、スタッッドの中心から約1.5°離れた両側に幅2°のスリットを入れ、スリット間の鋼板の上・下面にひずみゲージを貼付する(図-3)。コンクリート打設前にスタッッドに既知のせん断力と鋼板の直応力差の関係を校正係数として求めておき、コンクリート合成後のスタッッドのせん断力を鋼板の直応力差より求める。
- 3) 床版中央点、中央点から30°および60°離れた箇所でのたわみを測定する。
- 4) 鋼板とコンクリートとのずれ量を計測するために、床版端部でIIゲージを設ける。

4. 床版の作製条件と載荷形式

走行する自動車荷重を直接担う道路橋合成床版に作用する力は、荷重の移動に伴って絶えず交番し、鋼板とコンクリートとの自然付着による抵抗力を設計に期待することができない。本実験においては、自然付着をあらかじめ除去するために、鋼板の上面に薄いビニールシートを敷き、その後コンクリートを打設して、スタッッドのみで接合される合成床版とした。

面積50°×20°のゴムパッドを介して一様に分布される載荷状態は、弾性域および塑性域を通して同一で、次の2つの形式とした(図-4)。a)は支持辺に最も近いスタッッドの前列と荷重端部とを一致させており、せん断力が卓越する状態である。b)は荷重中心が床版の中央にある場合で曲げによる影響が大きい。

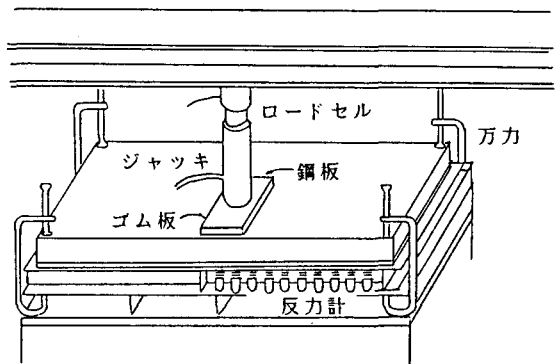


図-2 実験装置

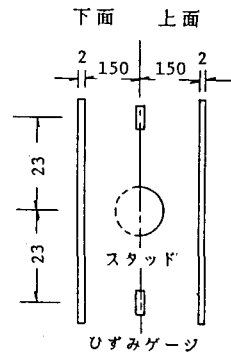


図-3
スリットの寸法と
ひずみゲージの位置

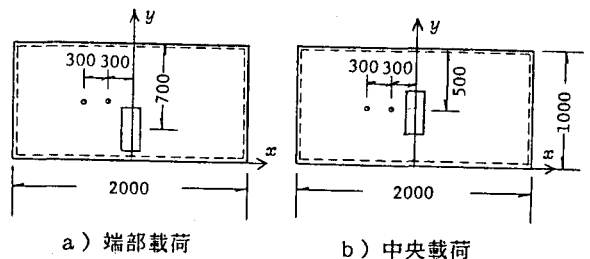


図-4 載荷形式とたわみ測定位置

5. 実験結果

本節では、端部載荷での合成床版の弾性域での挙動を述べ、終局状態については次節で述べる。

1) 長辺方向に沿う反力の分布

供試体AおよびB-1の長辺方向の支持辺に沿う反力分布を図-5に示す。実線は実測による結果で、破線は鋼板とコンクリートが完全合成された場合の厚板理論⁴⁾による3次元解析の結果である。支持辺中央点での反力は各供試体とも実験値の方が若干大きい、反力分布はほぼ一致している。

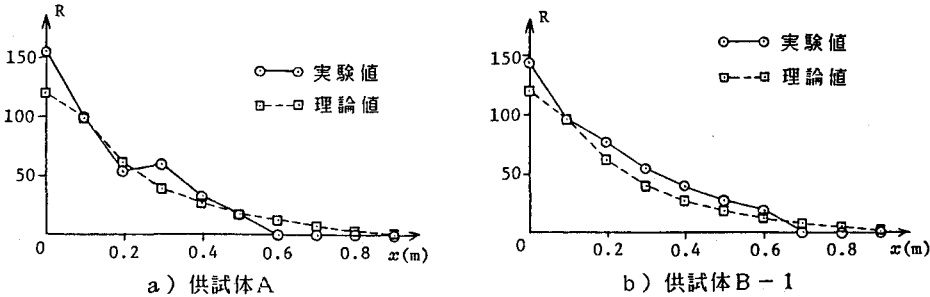


図-5 反力の分布(kgf/tf)

2) スタッドに作用するせん断力

支持辺に最も近い長辺方向の列のスタッドに働くせん断力の分布を図-6に示す。図中、実線は実験値で、破線は完全合成の理論値である。供試体A (スタッド間隔7.5 ϕ)、B (同10 ϕ) およびC (同15 ϕ) のいずれに対してもスタッドのせん断力の最大値は68 kgf/tf程度であるが、完全合成の理論値はそれぞれ135、175および260kgf/tfであり大きくなっている。この原因については次の論文で検討する。

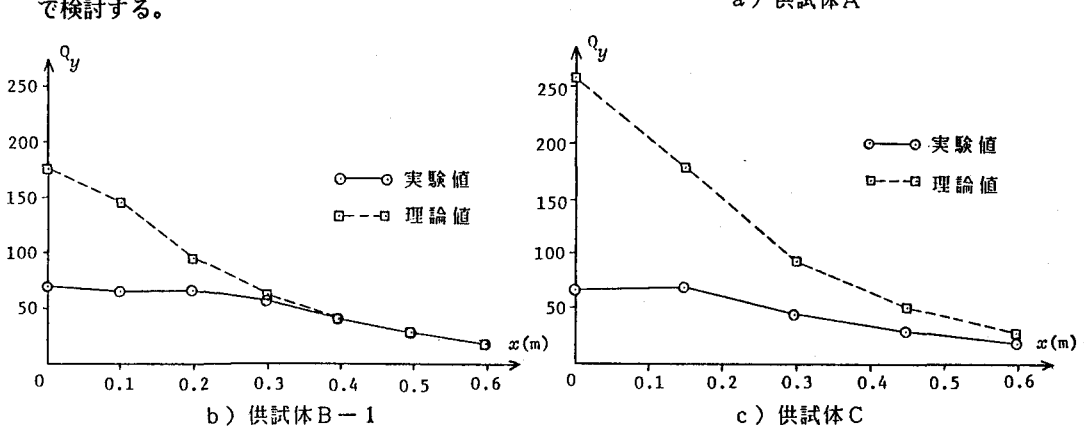


図-6 スタッドに働くせん断力(kgf/tf)

3) 床版のたわみ

たわみの測定位置と載荷形式を図-4に、また測定結果を表-5に示す。床版中央点でのたわみに着目し、床版の合成率を次のように定義する。

$$\alpha = (\delta_0 - \delta_m) / (\delta_0 - \delta_1) \quad (1)$$

ここに、 δ_m ：実験での測定値、 δ_1 ：完全合成の理論値、 δ_0 ：非合成（重ね板）の理論値

表－5 たわみの測定値(mm/1f)

a) 端部載荷				b) 中央載荷			
供試体名	測点(mm)			供試体名	測点(mm)		
	0	300	600		0	300	600
完全合成板*	0.026	0.019	0.010	完全合成板*	0.021	0.015	0.008
A	0.025	0.025	0.009	A	0.021	0.017	0.011
B-1	0.029	0.029	0.016	B-1	0.028	0.021	0.013
C	0.034	0.032	0.024	C	0.028	0.022	0.021
非合成板*	0.067	0.049	0.025	非合成板*	0.053	0.039	0.020

表－6 合成率 α の比較

供試体	A	B-1	C
端部	1.00	0.93	0.80
中央	1.00	0.78	0.78

*）厚板理論による計算値

表－6は各供試体における中央点のたわみを基準にした合成率を示している。表－6によれば、スタッド間隔が7.5 ϕ の床版はいずれの載荷状態に対しても完全合成に近い状態であるといえるが、スタッド間隔が広くなるにつれて合成率の低下がみられる。

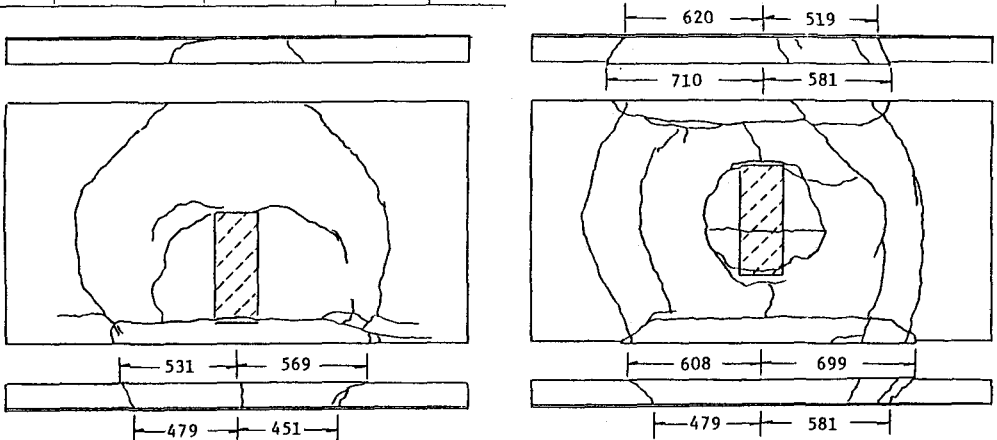
6. 崩壊時の挙動と終局耐力

端部載荷および中央載荷時での各供試体における終局耐力の比較を表－7に、また図－7では供試体Bの端部載荷と中央載荷時での崩壊メカニズムを示す。

表－7 終局耐力の比較

a) 端部載荷					b) 中央載荷				
供試体名	スタッド間隔(mm)	初期クラック発生荷重(tf)	破壊荷重(tf)	$P_{0.08}$	供試体名	スタッド間隔(mm)	初期クラック発生荷重(tf)	破壊荷重(tf)	$P_{0.08}$
A	150X75	38	68	36.0	B-2	100X150	50	64	43.0
B-1	150X100	40	61	31.3	D-2	端部スタッドのみ	27	41	27.1
C	150X150	33	52	-					
D-1	端部スタッドのみ	29	36	26.3					

(注) $P_{0.08}$ は端部の残留ずれ量が0.08mmの時の荷重を示す。



図－7 崩壊形式（供試体B）

端部荷重の場合には端部の付着破壊が支配的で、中央荷重では押抜きせん断形式で破壊した。

端部荷重における鋼板とコンクリートとのずれ量を図-8に、また中央荷重時のものを図-9に示す。

図中、破線は残留ずれ量 0.08mm （道示による許容せん断力の算定の規準値）から初期勾配と平行な傾きを持つ直線を示し、矢印は初期ひび割れの発生荷重を表す。この直線と実験値の包絡線との交点で荷重相当値 $P_{0.08}$ を仮定すれば、この相当値は本実験での長辺に沿った支持辺上で起こる初期ひび割れ発生荷重よりも小さいことが分かる。

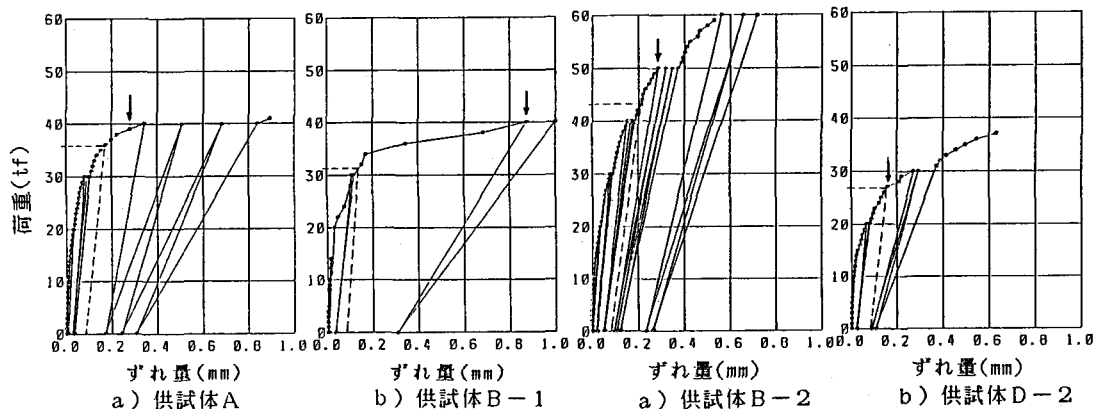


図-8 端部ずれ量（端部荷重）

図-9 端部ずれ量（中央荷重）

供試体A（端部荷重）と供試体B-2（中央荷重）の床版中央点でのたわみを図-10に示す。

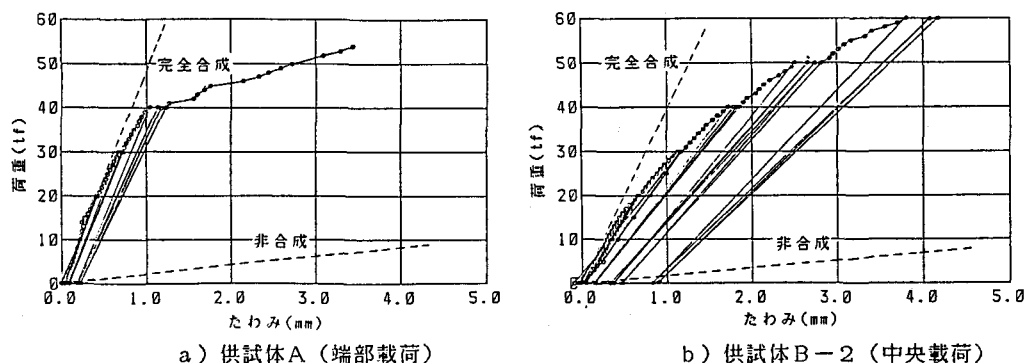
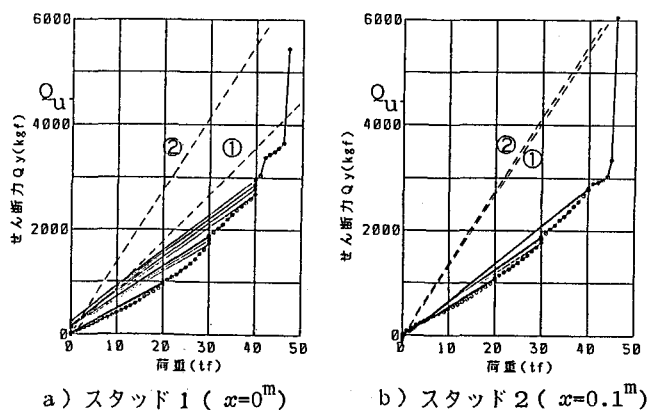


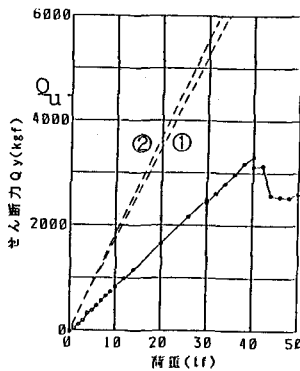
図-10 床版中央点でのたわみ

端部荷重での荷重端部近傍のスタッドに働くせん断力の変化を図-11, 12に示す。

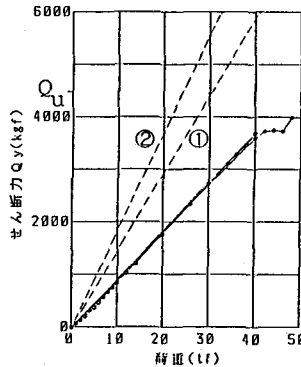
図中、記号①は完全合成の理論値で、②は文献⁵⁾のせん断有効幅より算出された値である。また、 Q_u はBS5400 part5 によるスタッド1本当りの公称静的強度（ $=4.47\text{tf/本}$ ）を示す。

図-11 供試体Aのスタッドのせん断力 $Q_y(\text{kgf})$
($Q_u = 4.47\text{tf}$)





a) スタッド 1 (x=0^m)



b) スタッド 2 (x=0.2^m)

図-12 供試体Bのスタッドのせん断力Q_y(kgf)

次に、図-8と図-11、12からスタッドに作用するせん断力とずれ量との関係が得られる(図-13)。図-13によれば、供試体A、Bとも初期のずれ係数は約 $50 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$ 程度であるが、J.G.Oilgaardら⁹⁾のPush-out試験のデータから求めた係数は、本実験値よりも小さい値になっている。

7. 押抜きせん断耐力の算定法についての一考察

図-7の崩壊形式は供試体B(スタッド間隔 $150\text{mm} \times 100\text{mm}$)に対するものであるが、他の供試体A($150\text{mm} \times 75\text{mm}$)、C($150\text{mm} \times 150\text{mm}$)およびD(端部のみ間隔 100mm)に対する崩壊形式も大差なく、これらの崩壊形式はRC床版の押抜きせん断形式とほぼ類似しているものと思われる。そこで、土木学会編「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」に規定されたRC床版の押抜きせん断耐力の算定式の準用を試みる。

$$V_{cpd} = f_{vd} u_p d / \gamma_b \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} f_{vd} &= \beta_r (1 + \beta_{ds} + \beta_p) f_{v0d}, \quad \beta_r = 2(0.85 + 0.4d/r_c), \quad \beta_p = \sqrt{100p_w} - 1 \leq 0.73, \\ \beta_{ds} &= 1.0 - 0.015d \geq 0.60 \quad (d: \text{cm}), \quad f_{v0d} = f_{vk} / \gamma_c \quad (\text{kgf/cm}^2), \\ f_{vk} &= 0.94 f_{ck}'^{1/3} \quad (\text{kgf/cm}^2) \end{aligned}$$

ここに、 γ_b と γ_c は部分安全係数であり、実験値との対応のためには $\gamma_b = \gamma_c = 1$ にとり、 f_{ck}' はコンクリートの圧縮強度(表-4)にとり、他の係数は指針(案)に従うものとする。

さて、上式において鋼断面の寄与は β_p のみであり、その上限値0.73はほぼ釣合鉄筋比に相当すると思われる $p_w = 0.03$ に対応して採られている。すなわち、釣合鉄筋比を越える鉄筋量を有するはりでは曲げ耐力がコンクリートの圧縮限界ひずみに支配され、鋼断面の耐力への寄与が鈍感になるためにこのような上限値が設けられているものと思われる。しかしながら、スラブの場合(通常RCスラブでは鉄筋比が0.03を越える場合は少ないが)には、圧縮コンクリートは2軸方向の拘束を受けるために、圧壊に至るときの限界ひずみが増大し、終局荷重時には鋼材が降伏に至ることが予想される。

一方、鋼板・コンクリート合成スラブでスタッドの強度と数が十分でないときは、部分的な付着せん断ずれが先行した後に押抜きせん断破壊が発生することも考えられる(図-8、9)。したがって、式(2)における鋼断面量の寄与を次式のように修正する。

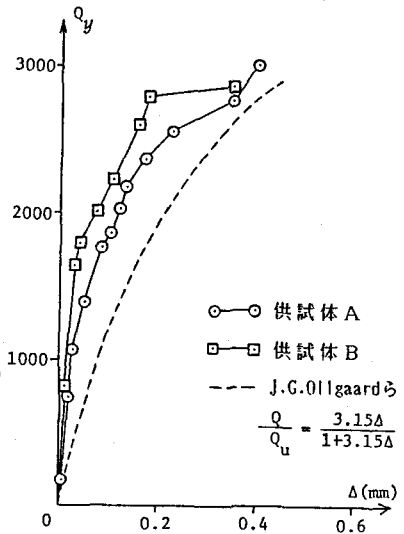


図-13 スタッドのせん断力とずれ量の関係

$$\beta_p = \sqrt{100\alpha p_w} - 1 > 0 \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 $p_w = t/(d+t/2)$ (t は鋼板の厚さ)、 α は鋼断面量の低減率で、スタッドの強度と数によって決まる係数であり以下のように評価する。

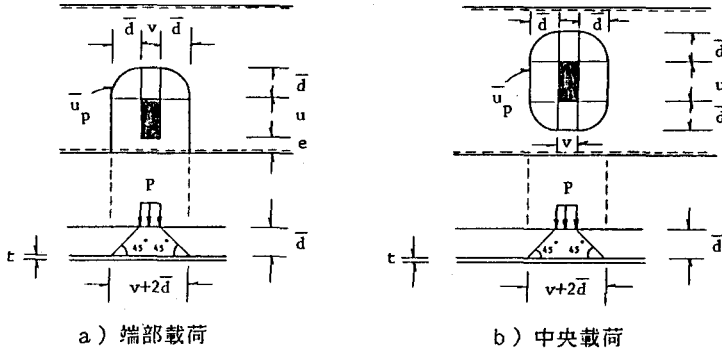


図-14 有効せん断面

大野、水谷、小柳⁷⁾によれば、RCスラブの押抜きせん断耐力は荷重域周辺からほぼ45°の角度で広がるピラミッド形の限界断面の仮定によって算定できると述べている。鋼板・コンクリート合成スラブにおいても同様なピラミッド形の限界断面が存在すると仮定し、押抜きせん断破壊時には図-14に示す周長 $\bar{u}_p$ で囲まれた面積 A_u の内部の鋼板上のスタッドが付着せん断に抵抗すると考える。

ところで、図-14において付着せん断破壊を伴わない押抜きせん断破壊を起こすためには、最大曲げモーメントの位置での鋼板の応力が降伏応力に到達するまで、 $\bar{u}_p$ で囲まれた鋼板の面積内のスタッドが付着せん断力に抵抗する必要がある。この抵抗力 R_u は図-14に示すような一方向スラブを対象として、次式で与えられると仮定する。

$$R_u = 2t(v+2\bar{d})\sigma_{sy} \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 σ_{sy} は鋼板の降伏応力、 $\bar{d}$ はコンクリート部の厚み

従って、使用スタッド1本のせん断耐力 Q_u をJ.G.Ollgaardらの提案式⁶⁾より求める。

$$Q_u = 0.5a_s \sqrt{f'_c E_c} \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 a_s はスタッドの断面積、 E_c はコンクリートのヤング率

ここで考える鋼板・コンクリート合成床版のスタッド間隔が $(\lambda_x \times \lambda_y)$ とすれば、式(3)の低減率 α は次式で定義できる。

$$\alpha = \frac{Q_u A_u}{R_u \lambda_x \lambda_y} \leq 1 \quad \text{--- (6)}$$

最後に、 $f'_c = f_{cd} = f_{ck}'$ 、 $t = 0.9^\circ$ 、 $d = 11.45^\circ$ 、 $u = 50^\circ$ 、 $v = 20^\circ$ とし、表-3、4の材料定数と各供試体の諸元を用いて式(6)による α と式(3)の β_p を求め、さらに式(2)による押抜きせん断耐力を計算すれば表-8の値を得る。

表-8 押し抜きせん断耐力の計算値

载荷形式	供試体	スタッド間隔 ($\lambda \times \lambda y$)	fvod (kgf/cm ²)	Qu (tf)	α	$\beta \rho$	Vcpd(tf)	
							計算値	実験値
端部	A	150X75	6.49	5.3	0.567	1.11	63.3	68
	B-1	150X100	6.04	4.8	0.385	0.740	51.5	61
	C-1	150X150	6.04	4.8	0.257	0.421	45.1	52
	D-1	端部のみ	6.35	5.2	0.092	0	38.6	36
中央	B-2	150X100	6.33	5.2	0.446	0.873	67.5	64
	D-2	端部のみ	6.35	5.2	0	0	45.8	41

注) 端部载荷では、 $\bar{u}_p=148\text{cm}$, $A_u=2720\text{cm}^2$, 中央载荷では、 $\bar{u}_p=176\text{cm}$, $A_u=2920\text{cm}^2$
 $p_w=t/(\bar{d}+t/2)=0.0786$

8. まとめ

以上の結果をまとめると次のような結論を得た。

- 1) スタッド間隔が小さい程床版の合成率は高く、終局耐力も増大する。
- 2) スタッドに働くせん断力の算定に対して完全合成の理論は十分でない。すなわち、たわみから見て完全合成と思われる床版でもスタッドに働くせん断力は完全合成の理論に従わない。
- 3) 崩壊メカニズムは端部载荷では付着せん断破壊に支配される押抜きせん断形であり、中央载荷ではRC床版に見られる典型的な押抜きせん断形であった。終局状態に至るまでにコンクリートと鋼板との間にはかなりのずれが発生するが、荷重-ずれ曲線はJ.G.Ollgaardらの提案する曲線よりも高い。すなわち、Push-out試験のスタッドよりも合成床版の場合の方がずれ抵抗は大きいといえる。
- 4) 合成床版の押抜きせん断耐力はRC床版に対する既往の提案式を準用して求められる。

最後に、本実験は金山哲也君(現鹿島建設(株)勤務)の大阪市立大学工学部卒業論文の一部として実施された。同君に謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 建設省都市局街路課長, 道路局企画課長通達, 道路橋鉄筋コンクリート床版の設計施工について, 昭和53年4月。
- 2) 新津啓治, 浅島弘光, 大貫一生, 落合正利: 鋼製型枠合成床版を用いた合成桁の設計・施工, 橋梁と基礎, 昭和55年11月, PP.42-49。
- 3) 今井宏典, 園田恵一郎, 水元義久, 正田正一: PC埋設型枠を用いた道路橋床版の特性, 土木学会論文集, No.356/1-3, 1985年4月, PP.565-573。
- 4) 園田恵一郎, 堀川都志雄: 道路橋床版の輪荷重直下の応力の算定について, 土木学会論文報告集, No.273, 1978, PP.15-22。
- 5) 園田恵一郎, 堀川都志雄, 広瀬清泰: 道路橋鋼板・コンクリート合成床版のずれ止めの設計に関するせん断有効幅, 土木学会論文報告集, No.338, 1983, pp.1-9。
- 6) J.G. Ollgaard, R.G. Slutter and J.W. Fisher., Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete, AISC Eng. Jour., No.5, 1971, Apr., pp.55-64。
- 7) 大野定俊, 水谷隆, 小柳怡: RCスラブの押し抜きせん断破壊のモデル化と終局耐力, RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 昭和57年6月。