

(26) 鋼板・コンクリート合成はりのスタッドに作用する力

FORCES ON STUDS IN STEEL PLATE AND CONCRETE COMPOSITE BEAMS

園田恵一郎* 鬼頭宏明** 浅香貴俊***

Keiichiro SONODA, Hiroaki KITOH, Takatoshi ASAKA

The aim of the paper is to reveal the stud-force characteristics of a steel plate and concrete composite slab (the Robinson slab), which is well known in its applications to bridge deck. Firstly, the paper describes the experimental results obtained by two-point loading tests for beam specimens, especially on the shearing force and tensile force of studs. Secondly, an attention is placed on a theoretical analysis on studs=forces in elastic region before cracking of concrete, using a three dimensional FEM. The results obtained reveal a mechanism of tensile force occurring on studs. Lastly, discussions are given on the stud-forces characteristics in inelastic region up to failure as a beam.

1. まえがき

道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷問題が報告されて以来、それに代わる種々の新形式の床版が開発され、そのいくつかは実用に供されている。それらの一つに頭付きスタッド（以下、スタッドと略称）が溶植された薄鋼板を埋め殺し型枠として使用し、これを場所打ちコンクリートと一体化させた鋼板・コンクリート合成床版、いわゆるロビンソン・スラブがあり、わが国においてもその施工例¹⁾がみられる。

この種の構造では、鋼板とコンクリートの接合面においてせん断力を伝達させ、両者が一体となって外力に抵抗するようにずれ止めとしてスタッドが配置されている。このようにずれ止めは合成構造の機能を左右する重要な構成部材であり、その設計に際してはそれに作用するせん断力ならびに軸引張力²⁾の適切な評価が必要となる。しかしながら、それらの作用力に関する明確な算定方法は未だ確立されたものがなく、その作用力特性が明らかにされていないのが現状である。

本研究は、鋼板・コンクリート合成構造のスタッド（ずれ止め）に作用する力の特性を把握するために鋼板・コンクリート合成床版と同断面形状を有する鋼板・コンクリート合成はり（以下、合成はりと略称）を対象として、モデル実験ならびに数値解析を行ったものである。すなわち、モデル実験として、スタッドの寸法（径、高さ）、配置間隔ならびに鋼板厚を変化させた合成はり供試体に対し静的載荷実験を行い、

* : 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 ** : 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

*** : 工修 清水建設㈱

表1 合成はり供試体の諸元と材料の力学的性質

No.	供試体名	スタッド			鋼板				コンクリート		
		径 (mm)	高さ (mm)	配置間隔 (mm)	厚さ (mm)	f_{su} (kgf/mm ²)	E_s (kgf/cm ²)	ν_s	f_c' (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	ν_c
1	A-19-100	19	130	100	9	42.6	2.25×10^6	0.312	270	2.25×10^5	0.173
2	A-19-150	19	130	150	9	42.6	2.25×10^6	0.312	270	2.25×10^5	0.173
3	A-19-214	19	130	214	9	42.6	2.25×10^6	0.312	270	2.25×10^5	0.173
4	A-19-300	19	130	300	9	42.6	2.25×10^6	0.312	270	2.25×10^5	0.173
5	B-13-150	13	100	150	6	45.5	2.09×10^6	0.274	244	2.47×10^5	0.187
6	B-19-150	19	130	150	9	42.8	2.00×10^6	0.284	244	2.47×10^5	0.187
7	C-13-150	13	100	150	6	45.5	2.09×10^6	0.274	244	2.47×10^5	0.187
8	C-19-150	19	130	150	9	42.8	2.00×10^6	0.284	244	2.47×10^5	0.187

注) 供試体Cシリーズ(No. 7, 8)はビニールシートを敷かずにコンクリートを打設したもの。

弾性域から破壊にいたる過程においてスタッドの挙動，特に作用するせん断力ならびに軸引張力，を調べた。また，数値解析として，3次元有限要素解析を行い，解析結果と実験結果の対比を行った。

2. 実験方法

(1) 合成はり供試体

実験に用いた供試体は全長160cm, 幅30cm, 高さ18.6cm または18.9cm, うちコンクリート部高さ18cmの矩形断面を有する合成はり8体である。鋼板には厚さ6mm, 9mmの2種類を用い, 鋼板とコンクリート間のずれ止めとして前者に対しては Nelson型 $\phi 13 \times 100$ を, 後者には $\phi 19 \times 130$ のスタッドを各々溶植した。スタッドの溶植間隔はスパン方向に 10, 15, 21, 4, 30(cm)と変化させ, スパン直角方向には15cmに固定した。

また、せん断力を測定するために着目スタッドの近傍の鋼板にはスリットを設けた。

この種の構造の設計においては、一般に鋼板とコンクリートの自然付着による抵抗力を期待できないとされている。そこで、自然付着の影響をあらかじめ除去するために、鋼板上面に薄いビニールシートを敷いた後コンクリートを打設し、スタッドのみで接合される合成はりとした。また、自然付着の影響を調べるために、一部の供試体に対しては、ビニールシートを敷かず直接コンクリートを打設した。

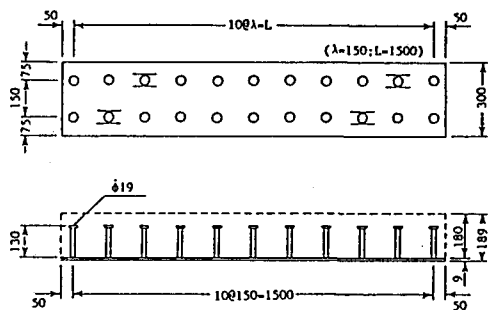


図1 供試体(スタッド間隔150mmの場合)

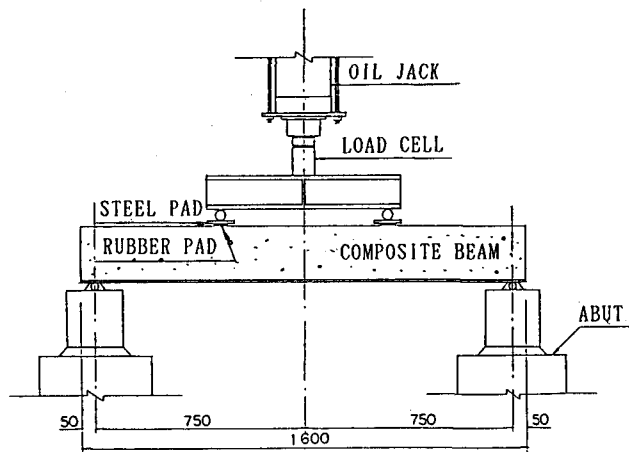


図2 2点载荷を受ける合成はり

供試体諸元の一覧を表 1 に、供試体の形状ならびにスタッドの配置の一例を図 1 に示す。

(2) 载荷形式

供試体は図2に示すように順スパン 150cmで単純支持し、載荷位置にははり幅と同寸法の硬質ゴムを置き、一様な荷重分布で2点載荷されるようにした。なお、載荷位置は終局状態でせん断破壊が支配的になるようにせん断スパン高さ比(a/d)を2.5とした。

(3) スタッドに作用する力の測定

各供試体において作用するせん断力ならびに軸引張力を測定する着目スタッドをせん断スパン内に設定した。せん断力はスタッドの基部、すなわち溶着部に作用するものとその軸部に作用するものの2者の測定を行った。前者に対し、図3(a)に示すようにスタッド近傍にスパン方向のスリットを設け、スリット間の鋼板の上・下面にひずみゲージを貼付し、鋼板に作用する面内力の差によってせん断力を求めた。また後者に対しては、図3(b)に示すようにスタッド軸部にスパン方向に向き合う型で貼付された3組のひずみゲージにより、軸部の曲げモーメントを測定しその測定間隔で差分することによりせん断力を求めた。また、同ゲージより軸部に作用する軸引張力を測定した。なお、ゲージを貼付するに当たっては、軸部に幅2mm、深さ1.5mmの溝切り加工を施し、貼付後パラフィンにより溝を埋め、ゲージを保護すると共に、加工しないスタッドと同形状を有するようにした。

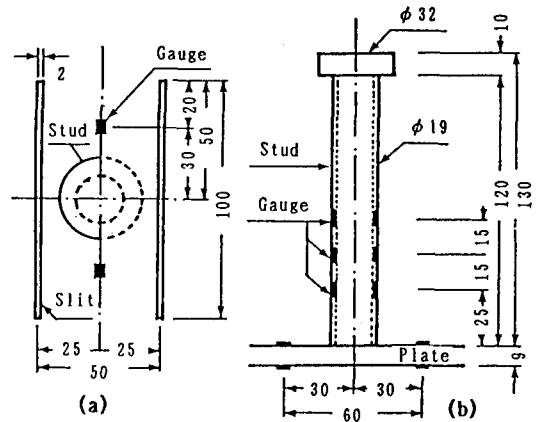


図3 着目スタッド詳細

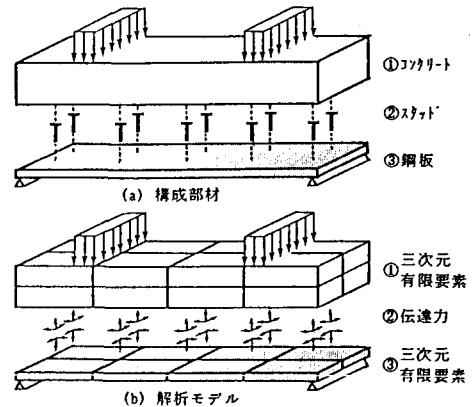


図4 合成はりの解析モデル

3. 解析手法

(1) 解析モデル

対象とする合成はりでは、図1に示したようにスタッドは離散的に配置され、その溶着部の面積は鋼板とコンクリートとの接合面（以下、界面と略称）に比して非常に小さく局所的に力を伝達している。このことより、スタッドに作用する力の特性を調べるには、3次元解析をする必要があると考えられる。そこで、図4に示すように鋼板およびコンクリートは3次元有限要素（20節点アイソパラメトリック要素）によりモデル化し、スタッドは伝達力に置換し、解析を行った。すなわち、合成床版に対して厚板理論を基本解とし、選点法によりスタッド配置位置にて変位を連続させる手法³⁾を応用した。さらに、本研究では次に述べる界面の接触条件を考慮した。

(2) 鋼板とコンクリートの接合面

（界面）での接触条件

合成はりの界面において伝達される力としては、スタッドを介するせん断力、軸引張力、界面の接触による摩擦力、圧縮力ならびに自然付着力が考えられる。しかしながら、摩擦力ならびに付着力の影響を定量的に評価することは困難であるので、ここでは、界面にて伝達される力としてスタッドを介するものに加えて、界面の接触による圧縮力を考慮する。すなわち、表2に示した操作に従い、スタッド配置位置以

表2 スタッド位置以外の界面での接触条件

接触条件	鉛直方向伝達力: Z 〔圧縮力を伝達〕	鉛直方向相対変位: Δw 〔分離する〕
満足する		
満足しない		
注1)	コンクリート 鋼板	注2) → : 選点に付加 ← : 選点より削除

外に設けた全ての選点において接触条件を満たすまで繰返し計算を行った。

接触条件を考慮することによる影響を図5に示す。解析は、構造ならびに荷重の対称性を利用して図中(a)に示す1/4領域に対して行った。図中(c)が接触条件を考慮した界面の鉛直方向相対変位であり、条件を考慮しないもの:(b)と比較すると、スタッドに作用する軸力成分が圧縮から引張に転じることなど解の性状に著しい差異がみられる。

4. 合成はりのスタッドの挙動

(1) 弾性域でのスタッドに作用する力

実験結果および解析結果から得られた弾性域でのスタッドに作用する力(以下、作用力と略記)を表3に示す。表中、実験値としてスタッドの基部でのせん断力、軸部でのせん断力、軸部での軸引張力を各々、 S_b , S_t , N と記した。また解析値としてスタッドのずれ剛性を無限大としたもの、ずれ剛性としてFisherら⁴⁾の提案したせん断力-ずれ曲線の初期傾きを採用したものを各々、TYPE1, TYPE2とし、添え字1,2を付けて記した。

自然付着除去用ビニールシートの有無以外は同諸元を有するBシリーズ(有)とCシリーズ(無)を比較すると、自然付着の存在により作用力が低減していることがわかる。この傾向はスタッド径の小さいものまたは軸部での作用力において顕著である。次に、実験値と解析値を比較すると前述した自然付着の影響を受ける供試体を除いては、解析値は実験値に対し良好な一致を見ている。特に、3.(2)で述べた界面の接触条件の考慮により、弾性域における軸引張力の発生を定量的に説明している。また、各作用力成分を比較すると、基部に作用するせん断力に対し、軸部のものは概ね10%以下の値であり、作用するせん断力は

表3 弾性域でのスタッドに作用する力 ($P=1tf$ 載荷時)

No.	供試体名	スタッド位置 (mm)	せん断力(kgf)						軸引張力(kgf)					
			実験値	解析値				実験値	解析値					
				S_b	S_t	S_1	S_1/S_b	S_2	S_2/S_b	N	N_1	N_1/N	N_2	N_2/N
1	A-19-100	100	109	-	-	155	1.42	122	1.12	5	13	2.91	10	2.16
		200	86	-	-	152	1.76	119	1.39	-	-	-	-	-
		300	94	-	-	106	1.13	98	1.05	-	-	-	-	-
2	A-19-150	150	162	-	-	198	1.23	156	0.96	-	-	-	-	-
		300	92	- 3	-	174	1.88	138	1.50	12	20	1.58	15	1.18
3	A-19-214	214	274	18	-	295	1.08	204	0.74	69	44	0.64	30	0.44
		428	97	-	-	170	1.75	133	1.38	-	-	-	-	-
4	A-19-300	300	186	13	-	305	1.62	213	1.13	50	55	1.10	38	0.75
5	B-13-150	150	84	-11	-	159	1.88	113	1.34	-11	18	-1.63	13	-1.19
		300	69	- 6	-	139	2.03	100	1.46	10	16	1.69	12	1.21
6	B-19-150	150	183	-14	-	186	1.02	151	0.82	34	21	0.61	17	0.49
		300	114	-11	-	164	1.43	134	1.17	41	21	0.50	16	0.38
7	C-13-150	150	27	- 1	-	159	5.72	113	4.07	0	18	∞	13	∞
		300	17	0	-	139	8.11	100	5.83	1	16	23.1	12	16.7
8	C-19-150	150	141	-18	-	186	1.32	151	1.07	1	21	34.7	17	27.8
		300	137	-12	-	164	1.19	134	0.97	2	21	10.0	16	7.65

【注】スタッド位置は支持辺から着目スタッドまでの距離を示す。

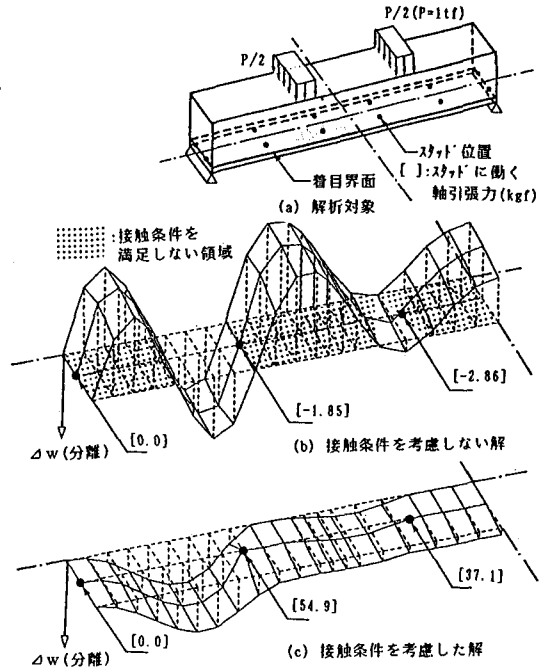


図5 界面での鉛直方向相対変位

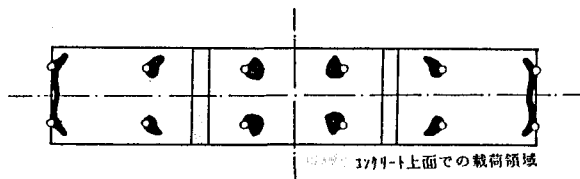


図6 界面における鋼板とコンクリートの接触領域

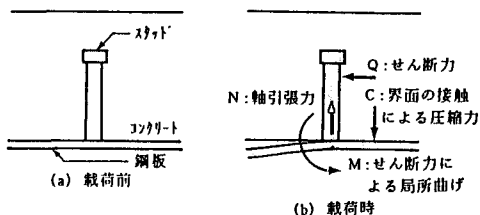


図7 スタッドに作用する軸引張力の発生機構

基部に集中しているといえる。また、軸部においてはせん断力よりも軸引張力が卓越し、基部に作用するせん断力の20%を越えるものもある。

(2) 弾性域での軸引張力の発生機構

図6は解析によって得られた界面での接触領域の一例を示したものであるが、接触領域はスタッド配置位置を起点としてはりの中心部に広がっていることがわかる。これはスタッドに作用するせん断力によってスタッド位置近傍の鋼板が局所曲げを受けるためであると思われる。このことより、図7のようにスタッドに作用するせん断力によりスタッドを境にして、一方の界面が分離し、他方は接触して圧縮力を伝達し、その反力としてスタッドに軸引張力が発生すると考えられる。

(3) 非弾性領域でのスタッドに作用する力

各供試体の初期ひびわれ発生荷重と破壊荷重を表4に示す。いずれの供試体も載荷点と支持点を結ぶ斜めひびわれの発生により破壊に至った。

弾塑性域から終局状態にいたる過程での作用力(実験値)の変化を図8～9に示す。自然付着の影響は初期ひびわれが確認される以前の段階: $P < 4\text{--}5\text{tf}$ においてスタッド径の小さな供試体No. 7において見られるが弾性域でのそれに比べて顕著ではない。また、両図の比較よりせん断力がほぼ初期の傾きを保ちながら増加するのに対し、軸引張力は載荷荷重 5tf 以前においてその傾きの変化点が存在し、その後変化した傾きを保ち終局状態に至っている。その原因としては、スタッドを取り囲むコンクリート部のひびわれの発生に起因し

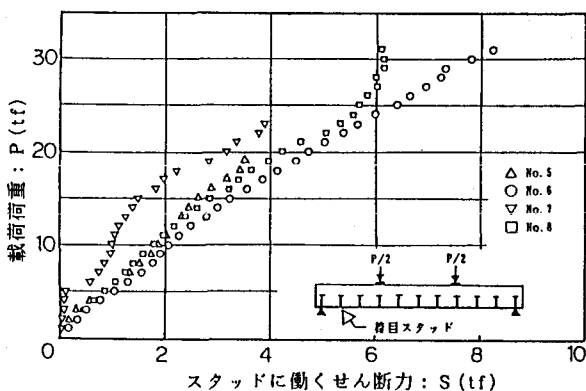


図8 スタッド基部に作用するせん断力の変化

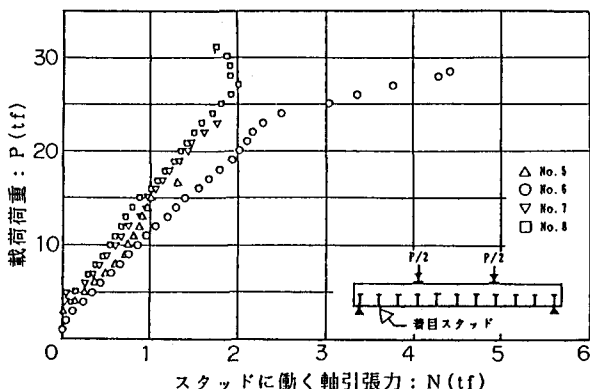


図9 スタッドに作用する軸引張力の変化

表4 ひびわれ荷重: P_{cr} と破壊荷重: P_u

No.	供試体名	P_{cr} (tf)	P_u (tf)
1	A-19-100	7.0	20.0
2	A-19-150	3.0	23.0
3	A-19-214	7.0	21.5
4	A-19-300	9.0	26.5
5	B-13-150	4.0	19.0
6	B-19-150	3.0	31.5
7	C-13-150	6.0	23.0
8	C-19-150	5.0	31.0

てスタッドの作用力状態が変化したことが推測されるが、この点については更に検討が必要である。この様な増加傾向により、終局時近傍において測定された軸引張力は、その基部に作用するせん断力に比して、ほぼ30～50%程度の値に達している。

次に、供試体No. 6についてスタッドの基部および軸部に作用するせん断力の変化を示したものが図10である。軸部に作用するせん断力とは基部のその比は10%以下ではほぼ一定であり、弾性域でみられた傾向と同じである。図中の直線は解析値であり、TYPE1, 2に加えて、両者に対しコンクリートのびわれ状態を想定し鋼板とコンクリートの弾性係数比 $n:15$ として設定したものを各々、TYPE3, 4として併記した。

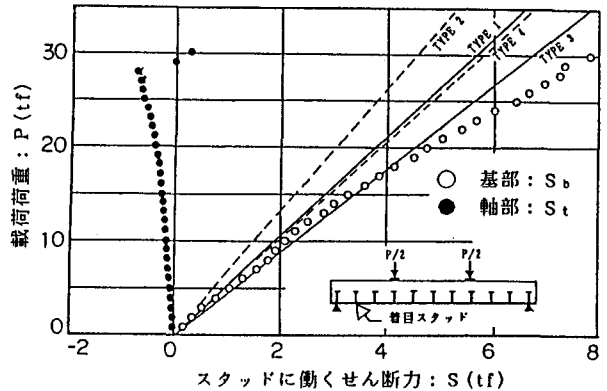


図10 スタッドの基部ならびに軸部に作用するせん断力の変化

5. まとめ

鋼板・コンクリート合成はりのスタッドに作用する力の特性を究明するために8体の供試体に対するモデル実験ならびに3次元有限要素解析を行った結果、得られた結論を以下に要約する。

- (1) スタッドに作用するせん断力は、その基部（溶植部）に集中しており、その軸部にはほとんど作用せず、むしろ軸引張力が卓越していた。
- (2) ひびわれ発生前の弾性域において、スタッドに軸引張力が発生する機構を界面の接触条件を考慮した数値解析例を通して考察し、モデル実験においてもその発生を確認した。
- (3) スタッドに作用する軸引張力は、弾性域において、スタッドの基部に作用するせん断力の約10～20%程度の値を示した。また、載荷荷重の増加と共にスタッドの変形及びコンクリートのひびわれの影響により軸引張力の増加は著しくなり、終局時近傍においてはスタッドの基部に作用するせん断力の約30～50%程度の値の達した。
- (4) 本研究で用いた解析手法は、モデル実験でのひびわれ発生前の弾性挙動を定量的に説明でき、その有用性が確認できた。

謝辞：本研究を行うにあたり、供試体の製作に関しご協力を頂いた(株)栗本鉄工所設計部部長・村田広治氏に対し、ここに記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 新津啓二，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，Vol.14, No.11, pp.42-49, 1980.
- 2) British Standard Institution: BS5400 Part5, (Code of practice for design of composite bridges), 1979.
- 3) 園田恵一郎，堀川都志雄，鬼頭宏明，木曾収一郎：鋼板・コンクリート合成床版のスタッドに働くせん断力と押し抜きせん断耐力，土木学会論文集，No.404/1-11, pp.249-258, 1989.
- 4) Ollgaard, J.G., Slutter, R.G. and Fisher, J.W.: Shear strength of stud connectors on light-weight and normal weight concrete, Engineering Journal of American Institute of Steel Construction, No.5, pp.55-64, 1971.