

(27) 異形鉄筋スタッド方式による鋼管矢板基礎 頂版結合構造に関する研究

STUDY ON THE CONNECTED STRUCTURE BETWEEN FOOTING CONCRETE AND STEEL SHEET
PIPE WALL BY THE DEFORMED BAR STUD WELDING

吉川 紀* 古池正宏** 川上圭二*** 片山 猛****

Osamu YOSHIKAWA, Masahiro KOIKE, Keiji KAWAKAMI, Takeshi KATAYAMA

As a connection structure between footing concrete and steel pipe wall, a stud welding method was developed more responsible than former ones. The stud welding method which we developed is that long deformed bars are horizontally welded method as stud bars by means of which steel shete pipe wall and footing concrete are connected. On the 1100mm long and 19mm diameter stud welding, some experimental studies were carried. Mechanical test of stud-welded bar were performed and the shear capacity was especially cleared.

As for the second step, by 1/5 scale tests of connected structure between concrete and steel sheet pipe wall, the static characteristics of connection structure were cleared. Then three connected methods were compared, which are "so called", the Bracket method, the Inserted bar methods. The last is a now proposed. These tests proved that the connection structure by the proposed method had a sufficient shear capacity as others.

1. まえがき

鋼管矢板基礎は、橋梁構造物の大型化に伴って河口や沿岸域に建設される基礎形式として、近年採用が一般化してきた。昭和59年2月には、日本道路協会より「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」¹⁾が出版されるとともに、平成元年4月以降に改定が予定されている「道路橋示方書 IV 下部構造編(日本道路協会)」²⁾(以下“道示”と称す)にも改定される方向で検討が進められている。

この鋼管矢板基礎の要ともいべき橋脚との結合部造、すなわち頂版と鋼管矢板との結合構造については(図-1 参照)、同上指針において、通称、プレート・ブラケット方式と差し筋方式とが示されている。この2方式はどれも一長一短があるが、その施工性から最近は後者の方式が採用されはじめている。しかし、プレート・ブラケット方式は、現場溶接が主体のためその溶接の信頼性に問

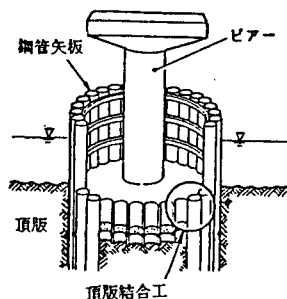


図-1 鋼管矢板基礎模式図

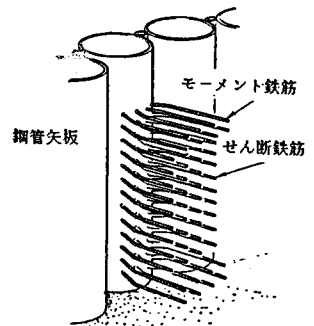


図-2 異形鉄筋スタッド方式頂版結合工

* : 工修 阪神高速道路公団 保全施設部
*** : 新日本製鐵 建材開発技術部

** : 工修 阪神高速道路公団 大阪第一建設部
**** : 新日本製鐵 建材開発技術部

題があり、また差し筋方式は、鋼管矢板の中詰め施工管理に結合工の耐力が左右されるなどの問題がある。これらの技術課題解決のため、著者らはより合理的で施工性向上に寄与する結合形式—スタッド方式結合—（以下「異形鉄筋スタッド方式頂版結合工」と称す。）を提案する。

すなわち、図-2にみるように、従来のプレートや鉄筋に代わって、鋼管に現場でスタッドを水平打ちし頂版と鋼管矢板を一体とするもので、いわば合成桁における鋼桁とコンクリート床板との結合構造のイメージである。

本報は、異形鉄筋スタッド方式頂版結合工の開発に当たって実施した頂版結合工の大型模型実験成果ならびに設計方法を中心に報告する。

2. 異形鉄筋スタッド方式頂版結合工の設計に関する検討課題

鋼管矢板基礎の頂版と鋼管矢板との結合部は、頂版に作用する荷重を円滑に、かつ安全に鋼管矢板に伝えねばならない。この結合部に異形鉄筋スタッドを適用する場合、異形鉄筋スタッド接合により、引張力およびせん断力を伝達する必要がある。まず、スタッド単体としての課題であるが、従来スタッド接合における引張力の試験方法については、JASS6 鉄骨工事改定案（1981）等に規定されている。しかし、せん断力については、試験方法の規定がなく、試験方法そのものを確立する必要がある。

つぎに頂版結合構造においては、スタッドを介在させた鋼とコンクリートとの合成構造として、引張軸力とせん断力の2軸応力状態での耐力力や変形性能を検討し、設計手法を確立する必要がある。

3. 設計に関する検討

——大型模型実験を中心として——

3. 1 実験概要

表-1に実験概要を示す。すなわち、スタッド溶接単体試験、コンクリートでの押し抜きせん断試験、さらに頂版結合構造体としての大型模型実験を行った。特に大型模型実験としては、せん断力が卓越するモデルで3方式（プレート・ブラケット方式、差し筋方式、異形鉄筋スタッド方式）の比較およびブラケットの効果と偏心載荷の影響を評価するため、合計5ケース実施した。

（1）引張せん断耐力試験（A試験）

スタッドをコンクリートとの合成構造に用いる場合、異形鉄筋スタッドには引張軸力とせん断力が作用するため、引張試験に加えて、2軸応力状態でのせん断耐力試験（以下、引張せん断試験と称する）も実施した。スタッド径は19mmである。引張軸力は、サーボ式油圧ポンプにより試験を通じて一定軸力とした。

（2）押し抜きせん断耐力試験（B試験）

頂版に作用する荷重を鋼管矢板（軸力として）に安全に伝達させるためには、鋼管・スタッド・頂版の3者からなる結合構造の挙動を確認する必要があるため、押し抜きせん断試験を行った。なお、本試験は差し筋方式との比較実験とした。

試験は、鋼管とコンクリートとの接合部にせん断力が作用するように左右対象構造とした。またコンクリート内での鉄筋定着長は鉄筋直径の30倍とした。

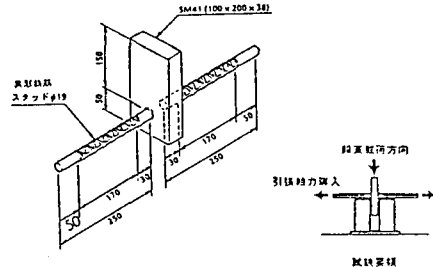
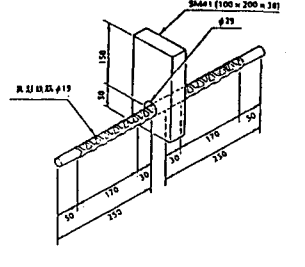
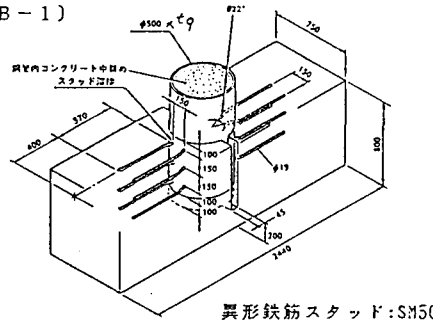
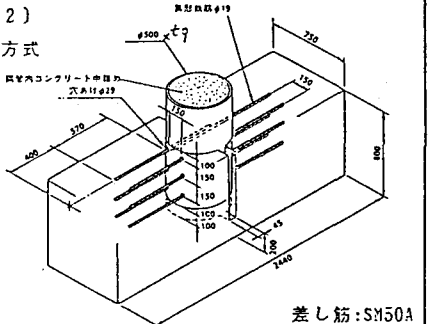
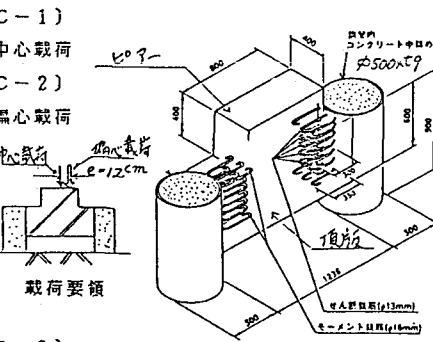
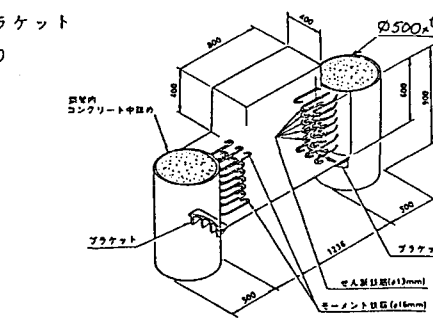
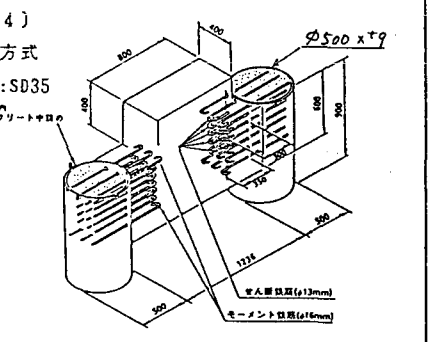
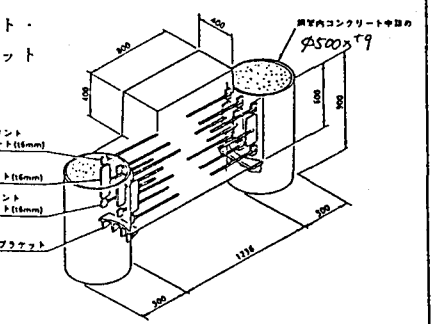
（3）大型模型実験（C試験）

異形鉄筋スタッド方式を頂版結合工へ適応するに当たっての最終試験として、実構造物を対象にした従来方式（プレート・ブラケット方式、差し筋方式）との比較試験を実施した。

また、橋脚に作用する地震時曲げモーメントは、頂版を通じて鋼管杭に偶力として作用すると考えているが頂版に対称に作用するかどうか、また頂版天端に水平力が作用することを考え、垂直中心載荷（C-1）の他、偏心モーメントを作用させる実験、すなわちせん断スパン比を変化させた試験（C-2）を行った。

表-1 実験概要

(単位: mm)

	異形鉄筋スタッド方式	他方式
スタッド単体試験 (A)	(A-1)  異形鉄筋スタッドφ19 SM41 (100 × 200 × 38) 引張耐力測定	(A-2) 異形鉄筋母材 (差し筋方式)  異形鉄筋φ19 SM41 (100 × 200 × 38)
コ押し抜きリセント断橋試験物 (B)	(B-1)  異形鉄筋スタッド: SM50A	(B-2) 差し筋方式  差し筋: SM50A
大型橋梁実験 (C)	(C-1) 中心載荷 (C-2) 偏心載荷 偏心距離 $e = 125\text{mm}$ 荷重要領  異形鉄筋スタッド: SM50A (C-3) プレート有り  異形鉄筋スタッド: SM50A	(C-4) 差し筋方式 差し筋: SD35  差し筋: SD35 (C-5) プレート・プレート方式  異形鉄筋スタッド: SM50A

1) 使用材質-----鋼 管 : SKK41 (JIS A5525)、異形スタッド : SM50A (JIS G3106)
 鋼 板 : SS41 (JIS G3101)、鉄 筋 : SD30B, SD35 (JIS G3112)
 コンクリート : 設計基準強度240kgf/cm²の早強コンクリート

2) 供試体寸法-----阪神高速道路公団高速湾岸線(南伸部)橋脚をモデルとし、頂版の幾何寸法は約1/5とした。原設計の設計荷重は、常時抗反力R=181.5tonf/本(鋼管矢板φ1000mm×t12mm)であり、このときの各供試体のコンクリートの付着、支圧強度およびせん断鉄筋の許容応力度を原設計と同じとして耐力を推定すると、C-1~C-4は36.5tonf/本、C-5は36.2tonf/本となる。これより供試体の設計耐力に相当する載荷荷重を30tonfと設定した。

3. 2 引張せん断耐力試験結果 (A試験)

異形鉄筋スタッドのせん断耐力試験結果を図-3に示し、比較として実施した鉄筋母材のせん断耐力試験結果を図-4に示す。図-3、4では、せん断耐力がせん断位置によって変化するため1mm、10mmの2ケースを示した。まず引張軸力が作用していないと、異形鉄筋母材そのもののせん断耐力は、せん断位置に関係なくほぼ41~45kgf/mm²と一定していた(図-4)。一方、異形鉄筋スタッドでは、せん断位置1mmのときのせん断耐力は、せん断位置10mmのときの1.85倍と大きく、72kgf/mm²であった(図-3)。これは、せん断位置1mmの試験では、余盛部も抵抗しており見かけ上大きくなったと言える。

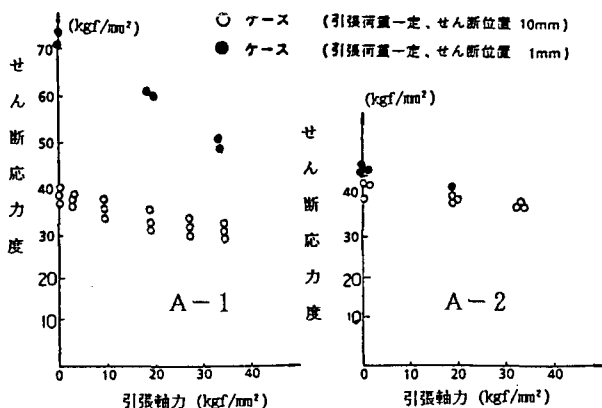


図-3 異形鉄筋スタッド
のせん断耐力

図-4 鉄筋母材
のせん断耐力

つぎに、異形鉄筋スタッドの場合、引張軸力作用下でのせん断耐力については、せん断位置10mm、作用引張軸力0.9σ_y(σ_y:降伏強度)という厳しい条件下でも、作用軸力がない場合と比較して、せん断耐力の低下割合は77%で、せん断耐力26.2~32.2kgf/mm²程度あり、設計上十分なせん断耐力を有することが実証された。

3. 3 押し抜きせん断試験結果 (B試験)

押し抜きせん断試験の荷重~相対変位の結果を図-5に示した。異形鉄筋スタッドの許容せん断応力度を母材の許容引張応力度20kgf/mm²の60%、すなわち12kgf/mm²と考えて設計すると、試験体の常時設計荷重40tonf、常時設計荷重の1.5倍で60tonfとなる。載荷荷重60tonfにおいてスタッド

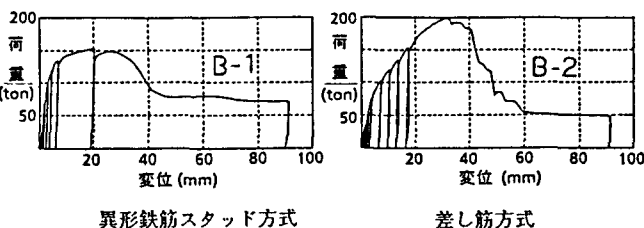


図-5 荷重~相対変位

方式では、鋼管とコンクリートとの相対変位が1.7mmであり、一方、差し筋方式では2.7mmであったことから、スタッド方式は設計耐力レベルではより剛な結合形式であるといえる。

3. 4 大型模型実験結果

実験仕様は昭和61年度に阪神高速道路公団で実施した差し筋方式模型実験³⁾と同一とした。

(1) 最大荷重と破壊過程

各供試体での最大荷重とその破壊過程での状況を整理すると表-2のようになる。最大荷重と設計荷重との比較では、スタッド方式、差し筋方式はほぼ同じ値であったが、プレート・ブラケット方式では、これら

より約1.5 倍の値であった。

表-2 実験結果一覧表

供試体 No	結合部材 仕様方式	ひび割れ発生荷重(tf)			載荷荷重90tfにおける			最大荷重 (tf)	安全率		破壊形態
		モーメント ひび割れ	せん断 ひび割れ	真口からの ひび割れ	頂版中央部 たわみ (mm)	せん断鉄筋 軸力 (3段目) (kgf/cm ²)	モーメント 鉄筋軸力 (上部) (kgf/cm ²)		結合部耐力 (常時耐力) (tf)	最高荷重 常時耐力	
C-1	異形鉄筋 スタッド	50	135	100	1.54	485	13	183	36.5	5.0	コンクリート せん断破壊 (一部 スタッド鉄筋)
C-2	異形鉄筋 スタッド	40	125	65	1.50	564	35	173	36.5	4.7	供試体の真口から のひび割れ/一部 スタッド鉄筋破壊
C-3	異形鉄筋 スタッド	45	160	260	1.35	313	-65	332	36.5	9.0	コンクリート圧壊
C-4	差し筋	55	130	60	2.11	603	-434	173	36.5	4.7	供試体の真口 からのひび割れ
C-5	プレート・ ブラケット	75	125	100	1.45	32	-271	278	36.2	7.6	コンクリート圧壊

(2) 3方式の比較

1) 荷重-変位関係

図-6 には、各結合方式における荷重-変位関係 (変位は頂版下面中央部で測定した値である) が示されている。いずれの方式においても、荷重レベルが、60tonfまでは頂版内のプレート、鋼管または鉄筋とコンクリートとの付着で荷重を受け持っていると考えられ、線形的な動きを示している。さらに荷重が増加していくと、ブラケットおよび結合鉄筋に発生するひずみから判断して、ひびわれの発生時点から荷重分担機構が変化し、プレート・ブラケット方式ではブラケットが荷重分担していき、さらに線形的な関係が続けていくが、他の2方式では結合鉄筋のせん断ずれ変形が大きくなり、非線形関係を示した。

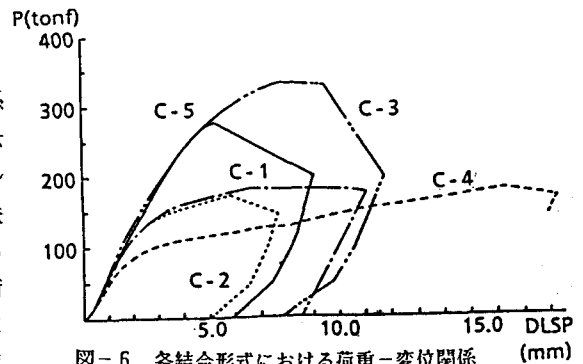
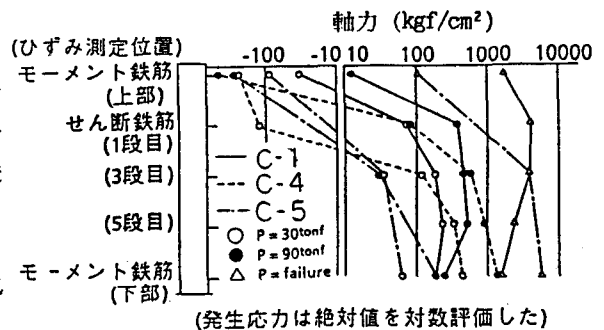


図-6 各結合形式における荷重-変位関係 (mm)

2) 結合部における応力状態

今回実験したせん断力が卓越するモデルでは、図-7よりプレート・ブラケット方式と差し筋方式とで軸力の大きさに差があるものの、三角形分布でその分布形状はよく似ている。一方、異形鉄筋スタッド方式では他の2方式と比較して、全ての段のせん断鉄筋位置において引張力が発生し、かつ分布形状も放物線分布となっており、他方式よりは均等に作用している。



(発生応力は絶対値を対数評価した)

図-7 結合部の応力状態

しかし荷重に対する結合鉄筋の応力からみると、90tonfではプレート・ブラケット方式や異形鉄筋

スタッド方式が 200~500 kgf/cm² 程度であるのに対して、差し筋方式では 500~1500 kgf/cm² 程度となっている。また、作用せん断応力度 (載荷荷重を結合鉄筋の純断面積 $A_s = 61.8\text{cm}^2$ で除した値) と結合鉄筋に発生した引張応力度との関係に着目すると、90tonfまでは、発生する引張応力度は作用せん断応力度と線形関係にあり、かつ絶対値は下まわり、スタッド方式では26~37%、差し筋方式では27~67%となる。

(3) 異形鉄筋スタッド偏心載荷試験結果

偏心量は、頂版上面に鉛直力の2割の水平力が作用したときに、頂版下面に発生するモーメントが同じに

なるように中心線より12cmとした。

1) 荷重-変位関係

頂版下面の変位状況を図-8に示す。頂版中央部変位でみると、150tonfまでは載荷位置の差による挙動の差はほぼない。しかし、その後の載荷により両者の挙動に大きな差が生じた。

2) 結合部における応力状態

図-9に結合部鉄筋の発生応力を示すが、設計荷重の3倍の90tonfでは中心載荷、偏心載荷とも変位(図-9)や結合部鉄筋の発生応力には差が見られない。このことよりせん断力が卓越する形式では、設計において偏心載荷状況を想定して結合部鉄筋の発生応力の割増をする必要はなく、現設計手法で問題ないといえる。しかし載荷荷重が増していくと、偏心載荷では偏心載荷側の鉄筋応力は反対側の約2倍発生しており、上記(1)項で示したコンクリートの破壊形態の差など、限界状態設計法では両者の差を考慮する必要がある。

(4) 最大変位時の結合部の状況

破壊後各供試体のコンクリートを慎重にはつり、結合部の状況を調査した。その結果、

- ① プレート・ブラケット方式では、最大荷重においてもプレートは十分に余裕を有していると推定されるが、ブラケットは鋼管との結合部付近で座屈している。
- ② 差し筋方式では、差し筋そのものは鋼管挿入穴で大きく変形し、かつ、断面が減少しているが、破断までには至っていない。
- ③ 異形鉄筋スタッド方式では、最大変位時でスタッドが一部破断していた。この破断箇所は、スタッド発生軸力の大きい箇所と一致していた。これらの破壊状況を図-10に示した。

(5) じん性率

載荷荷重Pと頂版中央部変位 δ との関係からじん性率を計算すると、表-3のようになる。じん性率の算定に用いた降伏荷重の判定は、 $\log P \sim \log \delta$ 関係の急変部より判定した。また、じん性率の評価は吸収エネルギーと変形性能との下記の2通りの考え方により行った。

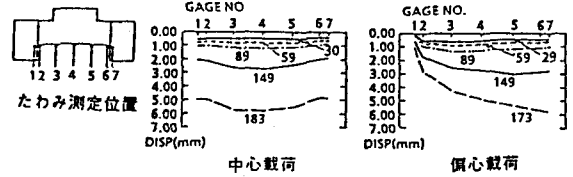


図-8 頂版下面の変位状況

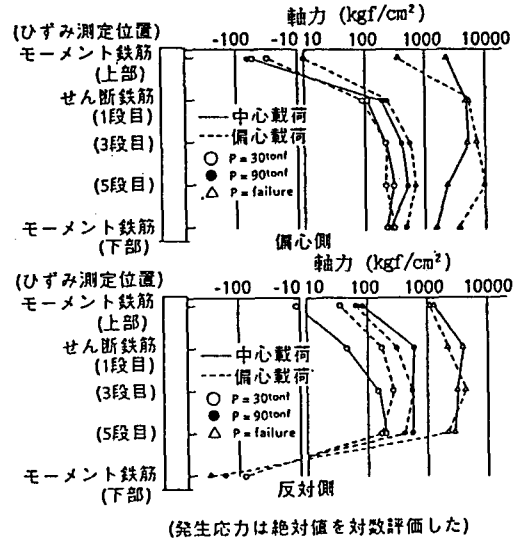


図-9 結合部における応力状態

中心載荷(C-1) 偏心載荷(C-2)

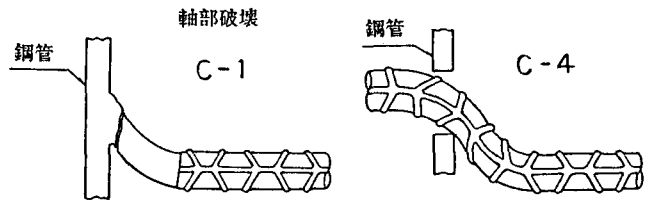


図-10 最大変位時の結合部の状況

表-3 各供試体のじん性率

供試体 No	降 伏 時			最大荷重 での吸収 エネルギー Er (t・mm)	最大 荷重の 変位 Yr (mm)	じん性率	
	荷 重 (tonf)	吸収エネ ルギー-Ey (t・mm)	変 位 Yy (mm)			Er/Ey	Yr/Yy 塑性率
C-1	130	172	2.5	882	6.9	5.1	2.8
C-2	130	150	2.4	684	5.8	4.5	2.4
C-3	200	328	3.2	1,671	8.0	5.1	2.5
C-4	100	176	2.9	1,494	11.4	8.5	3.9
C-5	180	270	3.0	797	5.3	3.0	1.8

$$\nu_{ER} = \frac{E_r}{E_y} = \frac{\text{最大荷重での吸収エネルギー}}{\text{降伏荷重での吸収エネルギー}}$$

$$\nu_R = \frac{Y_r}{Y_y} = \frac{\text{最大荷重での変位}}{\text{降伏荷重での変位}}$$

(6) ブラケットの荷重分担率

プレート・ブラケット方式 (C-5)

と異形鉄筋スタッド方式 (C-3) について、ブラケットの歪みより推定したブラケットの分担率を図-11に示す。分担率の中の推定にあたっては、模型実験のブラケットの歪み測定を行った⁴⁾。ブラケットのみの載荷試験は、模型実験でのブラケット上部のコンクリートの支圧分布形態を数種類仮定して実施した。ブラ

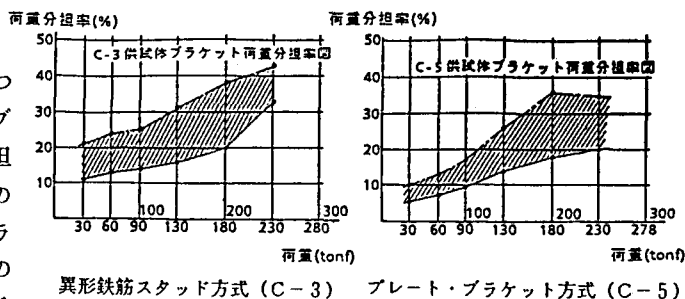


図-11 ブラケットの荷重分担率

ケットのみの載荷試験の歪みと模型実験の歪みとを比較し、ブラケットに最大歪みおよび最小歪みを生じさせる荷重形態を推定し、分担率の中とした。設計荷重(30tonf)ではC-5は10%程度以下であり、その後180tonfで17~30%となっている。一方、C-3の分担率は設計荷重(30tonf)では、C-5の2倍とプレートとスタッドとの剛性差を示しているが、載荷荷重が増加するにともないブラケットの負担が大きくなり、この差は縮まっていくものの、設計荷重(180tonf)においても異形鉄筋スタッド方式の方が約1.5倍ブラケットの分担率は大きい。

以上、現在の結合部設計では、最大荷重と設計荷重との比較(表-5参照)などをあわせて考えると、ブラケットの剛性を若干落とすもの、プレート・ブラケット方式をとる以上、ブラケットを省略することは不可と考えられる。

3. 5 異形鉄筋スタッド方式の評価

以上の実験検討の結果、異形鉄筋スタッド方式の結合工について以下のことを明らかにした。

- 1) 試験体B-1、C-1の最大荷重での設計耐力に対する比はそれぞれ3.8、5.0倍であり、差し筋方式とはほぼ同等である。
- 2) 頂版中央部変位において、降伏時までは異形鉄筋スタッドの方が差し筋方式にくらべ約7割と小さい。
- 3) 降伏時(変位量で2~3mm)での吸収エネルギーでみると、異形鉄筋スタッド方式と差し筋方式とはほぼ同等である。
- 4) 異形鉄筋スタッド方式では、配置した各段のせん断鉄筋の発生軸力がほぼ均等である。
- 5) せん断鉄筋に作用する引張軸力は、設計荷重の3倍でも570kgf/cm²以下であり、引張軸力が作用した場合でのせん断耐力の低下を設計に考慮する必要はない。
- 6) 設計耐力レベルにおける偏心載荷試験も中心載荷試験と同様な発生応力、頂版変位を示しており、許容応力度設計手法としては、現行の設計手法を用いても良いといえる。

4. 異形鉄筋スタッド方式の設計方法の提案

異形鉄筋スタッド方式頂版結合工の実設計において必要なせん断耐力の設計法について提案する。

表-4に各種試験結果をとりまとめ、許容せん断応力度を検討した。まず、降伏荷重時のせん断応力度に対して、SD35異形鉄筋の引張強度での安全率1.75(= 3500kgf/cm² ÷ 2000kgf/cm²)を各種試験結果に適

用すると、異形鉄筋スタッド単体では 1657kgf/cm^2 となり、押し抜きせん断試験、大型模型実験結果からは $1201\sim 1661\text{kgf/cm}^2$ となる。

さらに破壊荷重時の値についても同様に計算すると、SD35の安全率 $2.5 (=5000\text{kgf/cm}^2 \div 2000\text{kgf/cm}^2)$ より、異形鉄筋スタッド単体では 1560kgf/cm^2 、またコンクリート構造物としては $1119\sim 1803\text{kgf/cm}^2$ となる。

ここで、最小値を示している模型実験（偏心載荷）の最大荷重での破壊形態が頂版コンクリートのせん断ひび割れによるもので、せん断鉄筋の破壊でないため参考値として考え、許容応力度としては 1200kgf/cm^2 とした。

表-4 各種試験によるせん断強度

試験項目	試験結果		許容応力度の設定	
	降伏荷重時のせん断応力度 P_y	破壊（最大荷重時）のせん断応力度 P_u	$\frac{P_y}{1.75}$	$\frac{P_u}{2.5}$ (参考)
スタッド単体試験	2900	3900	1657	1560
押抜きせん断試験	2908	4508	1661	1803
模型実験（中心載荷）	2103	2961	1201	1184
模型実験（偏心載荷）	2103	2799	1201	1119

(注) 試験結果は、一本当たりの平均降伏荷重・破壊荷重で評価した。

5. あとがき

異形鉄筋スタッド方式による鋼管矢板基礎の頂版結合工について、現在使用されているプレート・ブラケット方式、差し筋方式を含め性状確認試験を進めてきた。その結果、

- 1) いずれの方式も通常考えられている設計での安全性は十分確保されている。特にプレート・ブラケット方式は、最大荷重、降伏荷重について安全性が大きい。
- 2) 差し筋方式と異形鉄筋スタッド方式は、ほぼ同じような安全性を有している。また、差し込み鉄筋とスタッド鉄筋との機能性が顕著な差として表れている。すなわち、差し込み鉄筋は極めて大きな変形を取りうる。しかしスタッド鉄筋は変形性能が小さいため、せん断剛性が大きく、かつ均等にせん断力が分布することがわかった。
- 3) 従来実施されなかった地震時水平力作用を想定した偏心載荷試験を実施したが、設計荷重の3倍レベルまでは中心載荷試験結果と同様な挙動を示したことにより、水平力が作用する場合も従来の設計手法を適用しても問題ないと言えよう。

なお、本検討でのモデルはせん断の卓越したケースであるが、頂版のスパンの長い曲げタイプに対してはこれまでの検討結果⁵⁾から、プレート・ブラケット方式、差し筋方式では、頂版結合部での破壊が生じないことが確認されている。このことから異形鉄筋スタッド方式でも破壊形状には変化がないと思われる。

異形鉄筋スタッド方式頂版結合工の施工には、太径スタッドの水平打ちが必要となり、このために太径（19mm）、かつ高強度異形鉄筋の水平スタッド打設装置の開発、スタッド打設装置の自動化、品質管理値の設定、施工管理方法の合理化などを考案しているが、別途土木学会論文集に報告しているので参照されたい。

最後に本検討の実施に当たって御審議していただいた「異形鉄筋スタッド方式頂版結合工研究会」の藤井教授（主査：京都大学）、小柳教授（岐阜大学）、小林助教授（京都大学）ならびに各委員の方々に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」、日本道路協会、1984
- 2) 「道路橋示方書・同解説・IV 下部工編」、日本道路協会、1980
- 3) 「鋼管矢板基礎頂版結合部の模型実験報告書」、阪神高速道路公団・鋼管杭協会、1986
- 4) 「鋼管矢板基礎頂版結合部の模型実験解析業務報告書」、阪神高速道路公団・新日本製鐵株式会社 1988
- 5) 「矢板式基礎頂版結合部の模型実験報告書」、阪神高速道路公団・鋼管杭協会、1977