

柔な合成作用に適するスタッドの開発

DEVELOPMENT OF FAVORABLE STUD SHEAR CONNECTORS TO FLEXIBLE COMPOSITE ACTIONS

平城弘一*、松井繁之**、武藤和好***

Hirokazu HIRAGI, Shigeyuki MATSUI and Kazuyoshi MUTO

*工博 摂南大学助教授 工学部土木工学科 (〒 572-8508 寝屋川市池田中町 17-8)

**工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

*** (株) 酒井鉄工所 橋梁設計部 課長補佐 (〒 590-0831 堺市出島西町 3-1)

The paper deals with experimental investigations on the availability of flexible headed stud connectors for flexible composite actions. The development of flexible shear connectors are required instead of slab anchors in non-composite girders because there are many cases of fatigue failure of the slab anchors, and due to improvement of harmful crack width of RC slabs at negative moment region in continuous girder bridges. Then the authors have devised a new type of headed stud winding polyurethane or rubber at the base part of a stud as the flexible shear connectors. In order to confirm the properties of new stud connectors, push-out test and beam test were carried out. It became clear from the push-out tests that new studs have almost same static strength to ordinary studs, and show non-composite behavior more remarkably than slab anchors and ordinary headed studs. Also excessive restoration of slip between steel and concrete has been observed. In beam tests, the new studs allowed a large slip, and had enough fatigue strength under the cyclic shear force correspond to design live load.

Key Words : Composite Structures, Headed studs, Polyurethane, Flexible Connectors

1. まえがき

最近、非合成桁のプレートガーダーおよびボックスガーダーに使用されているスラブアンカーに、疲労による破壊が生じていることがしばしば発見されている。この場合、鋼桁とコンクリート床版とが遊離を起こし、この遊離間から発生する騒音が社会問題となる恐れがある。その対策として、床版と主桁の遊離個所を P C 鋼棒で緊結した事例がある¹⁾。このように非合成のスラブアンカーが疲労破壊に至るメカニズムは、現在のところ明解ではないが、床版の橋軸直角方向の曲げ作用に起因する疲労現象と思われる。そして、多くの場合、スラブアンカーの水平部の溶接止端部で破断していることが認められている。

通常の非合成桁橋に用いられるスラブアンカーのずれ止め効果は、設計計算では無視しているものの、実際には水平せん断力を伝達しており、その影響は無視できないと考えられる。そのため、車両走行に伴うせん断力の繰り返し作用の影響も考慮する必要がある。非合成桁橋について「理論に忠実な力学挙動」を追求するならば、床版を鋼桁に柔軟に固定させる結合材の開発が必要となる。それゆえ、非合成挙動を示し、かつ、疲労破壊を起こさ

ないような、新しい形式の結合材の開発が望まれる。

そこで、本研究では、柔なずれ止め性能を頭付きスタッドに求めた新しい利用法を提案する。すなわち、従来のずれ止め機構の積極的な不完全合成化を図るため、写真 1 に示すように、通常スタッドの根元部にウレタンなどのスポンジを巻き付けることによって、ずれ剛性を小さくすることを考案した。これにより、非合成桁にスタッドを使用しても、重ねばりに近い理想的な非合成挙

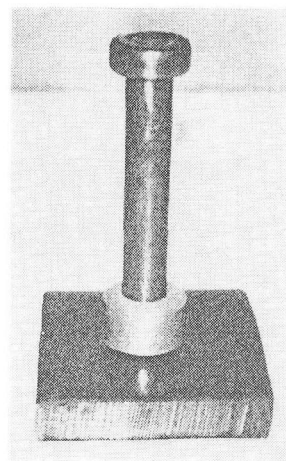


写真 1 新スタッド(ウレタン付き)

動が期待できるものと思われる。なお、新スタッドの頭部はアンカー材としての機能を、また、その軸部に巻き付けたウレタンなどの緩衝材は、ずれを吸収する機能を備えている。そして、緩衝材の材質およびその厚みと根元からの巻き付け高さを変化させることより、非合成度を制御することも可能である。

この新スタッドを用いて、「ずれ」を認める構造形式にした場合^{2)~4)}、次のような利点が考えられる。

① 新スタッドの根元ではコンクリートとの接触がなく、スタッド自身の曲げ剛性のみでせん断力に抵抗する。そのため、力学的に明解であり、新スタッドの周辺のコンクリートに生じる応力は大きく緩和される。

② 従来のスタッドに比べてばね定数が小さくなるため、作用する水平せん断力は小さくなる。その結果、活荷重による水平せん断力の変動範囲は小さくなり、また、その分布形状も円滑なものとなる。このことより、従来のスタッドよりもはるかに大きいずれを許容し、広範囲のスタッドで繰り返し荷重に抵抗するというずれ止め機構となる。

③ 連続合成桁において、負曲げ領域のRC床版の分担軸方向力のピークを低減させる。これにより、RC床版の橋軸方向の引張力とともに、乾燥収縮や温度差も考慮したひびわれ問題による、プレストレスしない連続合成桁橋の性能低下や耐久性低下の懸念が解消される。

既往の研究⁵⁾においても、鋼桁のフランジ上面にH形鋼を溶接し、このH形鋼のウェブに発泡スチロールを貼り付けたものを「柔ずれ止め」として開発したものがある。この場合、H形鋼の上下フランジに挟まれたコンクリートが、ウェブ面も含めた3方向の界面で付着を失い、これによる橋軸直角方向の貫通ひびわれの発生が心配される。この新スタッドを使用した場合、そのような心配は生じない。

ここで提案する新スタッドの性能は、今後、スラブアンカーの代用品として適用が可能で、かつ、連続合成桁にも寄与できるものである。新しく開発したこのスタッドが、柔な合成作用に有利であることを、押抜き試験とはり試験の結果から確認した。

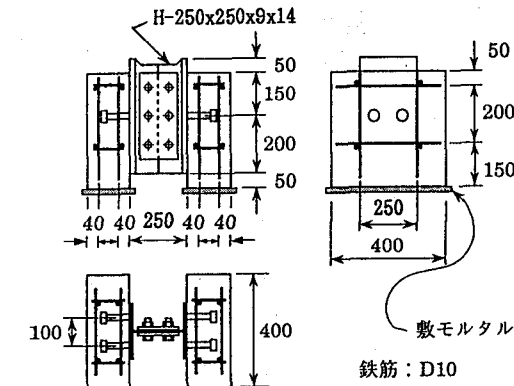


図1 押抜き試験体の形状寸法(シリーズⅠ～Ⅲ)

2. 試験体の種類と試験方法

表1に押抜き試験体の種類とコンクリートの強度特性を示す。実験パラメータは、鋼とコンクリートの接合面に挿入したテフロンと、スタッド根元部に巻き付ける緩衝材(ウレタンや天然ゴム)の有無である。なお、非合成挙動を比較するため、スラブアンカーの試験体も同時に用意した。標準押抜き試験体(シリーズⅠ～Ⅲ)と実橋を想定した押抜き試験体(シリーズⅣ)の形状寸法を、図1、2にそれぞれ示す。これらの試験体の製作は日本鋼構造協会の頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)に従った⁷⁾。なお、シリーズⅣの押抜き試験体におけるコンクリートブロックの寸法と鉄筋量は、実橋を想定して決めた。はり試験体(シリーズⅤ)の種類とコンクリートの強度特性を表2に示す。実験パラメータは、ずれ止めの間隔とプレロード(静的試験に先立って、繰り返し荷重を載荷させた

表1 押抜き試験体の種類およびずれ止めの形状とコンクリートの材料特性

シリーズ	タイプ	ずれ止め	テフロン	緩衝材(厚さ・高さ)	ずれ止め形状とコンクリート特性
Ⅰ	A	スタッド	なし	なし	スタッド : $d_s = 19\text{mm}$
	B	"		ウレタン(9mm・20mm)	$h_s = 120\text{mm}$
	C	"		" (9mm・30mm)	スラブアンカー : RB 16 $\phi \times 500$
	D	"		" (9mm・40mm)	コンクリート : $f'_c = 29.5\text{N/mm}^2$
	E	スラブアンカー		なし	$E_c = 2.356 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
Ⅱ	A	スタッド	あり	なし	スタッド : $d_s = 19\text{mm}$
	B	"		ウレタン(9mm・20mm)	$h_s = 120\text{mm}$
	C	"		" (9mm・30mm)	コンクリート : $f'_c = 29.7\text{N/mm}^2$
	D	"		" (9mm・40mm)	$E_c = 2.643 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
Ⅲ	F	スタッド	なし	ゴム(3mm・60mm)	スタッド(シリーズⅢ) : $d_s = 19\text{mm}$
	G	"		ウレタン(10mm・60mm)	$h_s = 120\text{mm}$
Ⅳ	H	スタッド	なし	なし	スタッド(シリーズⅣ) : $d_s = 22\text{mm}$
	I	"		ゴム①(3mm・125mm)	$h_s = 250\text{mm}$
	J	"		ゴム②(3mm・125mm)	コンクリート : $f'_c = 58.9\text{N/mm}^2$
					$E_c = 3.070 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

※テフロン : 鋼とコンクリートの接合面に厚さ 0.5mm のテフロン板を挿入したもの。
※ゴム① : グループ配置したスタッド自身にゴム巻き立てをしたもの。
※ゴム② : グループ配置したスタッド自身にゴム巻き立てを行い、さらにスタッド間の内側に発泡スチロールを詰めたもの。

※緩衝材の物性値 (文献⑥による参考値) :

ウレタン(低硬質タイプ) …… 比重 1.10 ~ 1.20、硬度 30 ~ 40
天然ゴム …… 比重 1.11、硬度 63

※テフロン: 鋼とコンクリートの接合面に厚さ0.5mmのテフロン板を挿入したもの。
 ※ゴム①: グループ配置したスタッド自身にゴム巻き立てをしたもの。
 ※ゴム②: グループ配置したスタッド自身にゴム巻き立てを行い、さらにスタッド間の内側に発泡スチロールを詰めしたもの。
 ※緩衝材の物性値(文献6)による参考値):
 ウレタン(低硬質タイプ)……比重1.10～1.20、硬度30～40
 天然ゴム……………比重1.11、硬度63

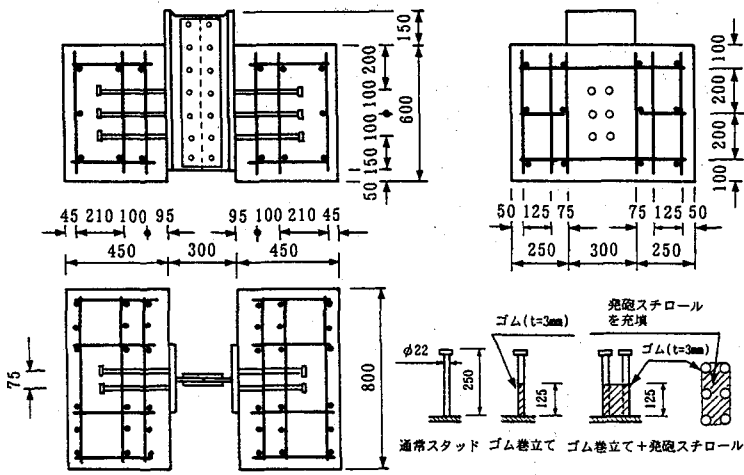


図2 押抜き試験体の形状寸法(シリーズⅣ)

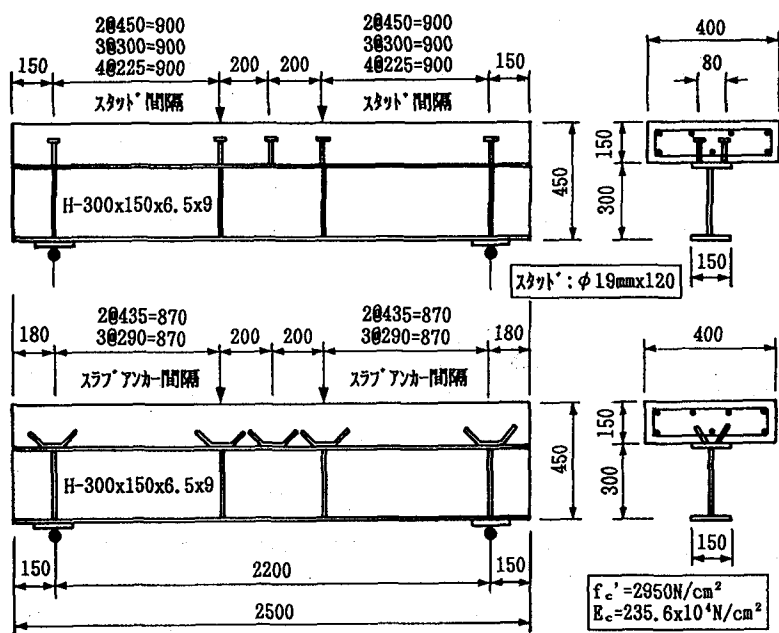


図3 はり試験体の形状寸法(シリーズ V)

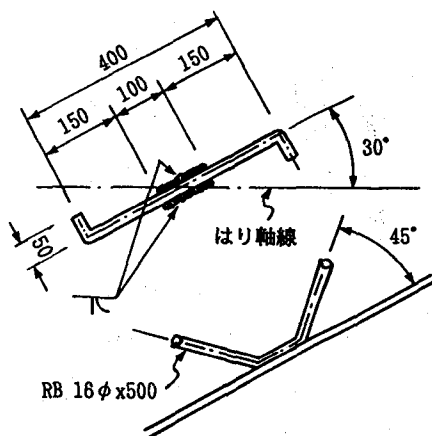


図4 スラブアンカーの詳細

表2 はり試験体の種類およびずれ止めの形状とコンクリートの材料特性(シリーズ V)

タイプ	ずれ止め		ウレタン ¹⁾	プレロード ²⁾	ずれ止めの形状寸法
	種類	間隔(mm)			
GA	-1	スタッド	225	なし	あり
	-2	"	"	あり	"
	-3	"	"	"	なし
GB	-1	スタッド	300	なし	あり
	-2	"	"	あり	"
	-3	"	"	"	なし
GC	-1	スタッド	450	なし	あり
	-2	"	"	あり	"
	-3	"	"	"	なし
GD	-1	スラブアンカー	290	なし	あり
	-2	"	"	"	なし
GE	-1	スラブアンカー	435	なし	あり
	-2	"	"	"	なし

スタッド
d_s = 19mm
h_s = 120mm

スラブアンカー
RB 16 φ x 500

1) ウレタンは厚さ 9mm で、スタッド根元部の全周に高さ 4cm まで巻き付けた。
2) 静的曲げ試験に先立ち、一部のはりについては、設計荷重レベルの繰返し荷重を載荷した。これにより、鋼とコンクリートとの間に働く付着力は完全に除去されていると考えられる。この設計荷重とは、C タイプのスタッドから算出した許容せん断力範囲に基づくもので、次の値を 10 万回載荷した。
(P_{min} = 2.5kN, P_{max} = 17.4kN)
3) コンクリートの材料特性: f_c = 29.5N/mm², f_t = 2.35N/mm²,
E_c = 2.356 × 10⁴ N/mm²

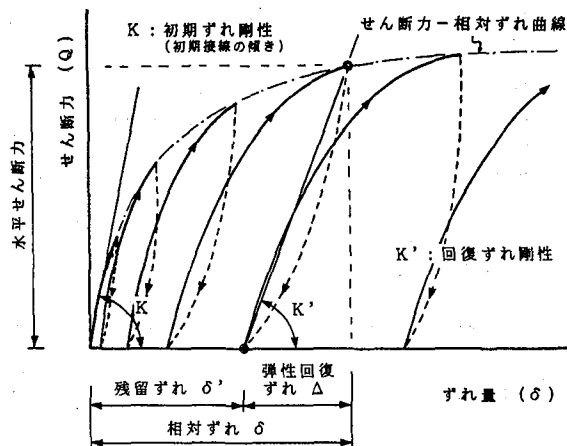


図5 ずれ性状と復元性挙動の定義

リーズ I の E タイプ)のみがコンクリートの支圧破壊であり、それ以外はスタッド軸部での破断であった。

図 5 に新スタッドのずれ性状と復元性の評価に用いる用語の定義を示す。ここで、「弾性回復ずれ」と「回復ずれ剛性」とを新しく定義する。

(1) ずれ性状

図 6、7 に、シリーズ I の漸増繰返し載荷で得られた代表的なせん断力-相対ずれ関係を示す。これらの図より、ウレタンの有無がスタッドのずれ性状に大きく影響を及ぼしていることが明らかである。また、除荷曲線の傾きを同程度のずれ量で比較した場合、ウレタン付きスタッド(C タイプ)の方が通常スタッド(A タイプ)より緩い、つまり大きな復元性能をもっていることが分かる。なお、このスタッドの復元性能については、後で詳細に検討する。

図 8 ～ 11 に、シリーズ I と II の代表的なせん断力-

もの)の有無である。はり試験体の形状寸法を図 3 に示す。なお、比較のため、押抜き試験(シリーズ I)の場合と同様に、はり試験でもスラブアンカーの間隔を変化させた試験体を用意した。図 4 に使用したスラブアンカーの詳細を示す。スラブアンカーは、はり軸線(押抜き試験では載荷方向)に対して、30°傾けて取り付けられている。

3. 試験結果および考察

3.1 押抜き試験の結果

各試験体の破壊形式は、スラブアンカーの試験体(シ

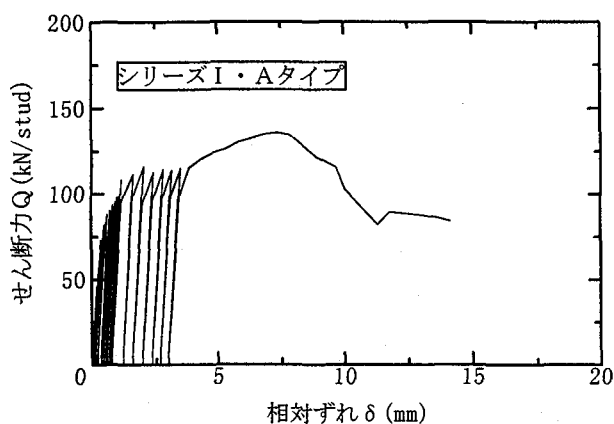


図6 セン断力-相対ずれ関係(シリーズ I・Aタイプ)

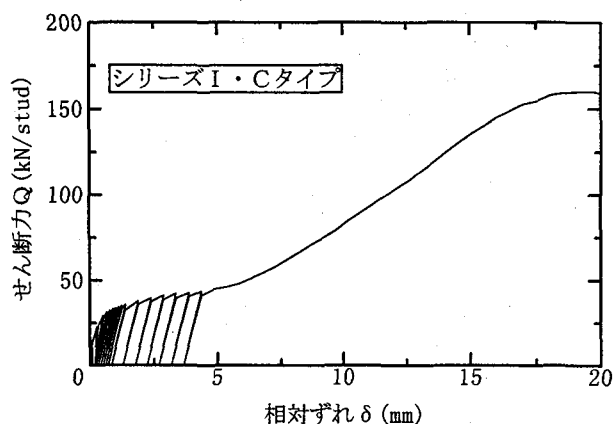


図7 セン断力-相対ずれ関係(シリーズ I・Cタイプ)

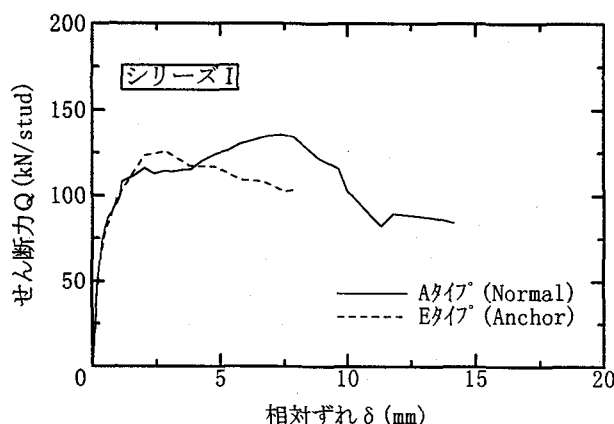


図8 セン断力-相対ずれ関係(シリーズ I・通常スタッド、スラブアンカー)

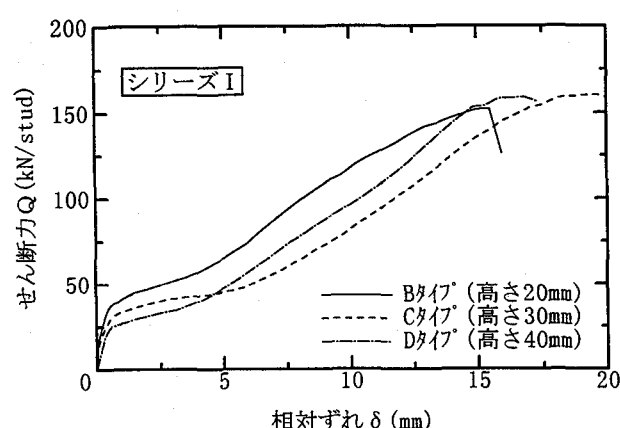


図9 セン断力-相対ずれ関係(シリーズ I・ウレタン付きスタッド)

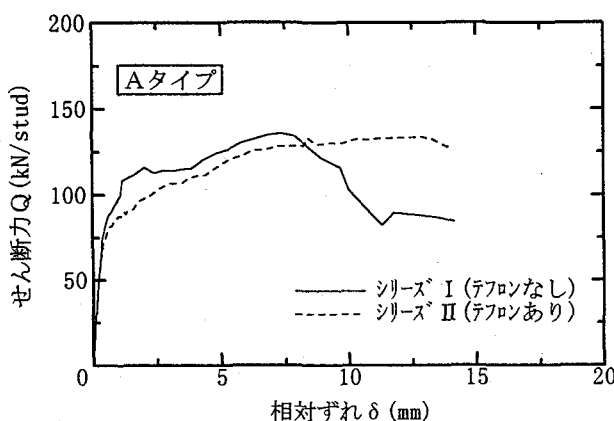


図10 セン断力-相対ずれ関係(Aタイプ・通常スタッド)

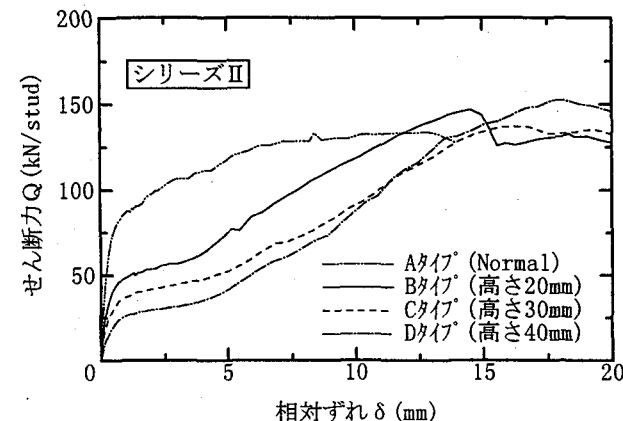


図11 セン断力-相対ずれ関係(シリーズ II・テフロンあり)

相対ずれ関係を比較したものを示す。まず、図8から通常スタッドとスラブアンカーのずれ性状は、相違がないことが分かる。図9からは、ウレタン付きスタッドが最大せん断耐力の約 1/5 の荷重レベルで大きなずれが発生していることが分かる。つまり、ウレタン付きスタッドには、せん断力が一定の状態ですれが進行する領域(流れ)が存在するという、特徴的な力学性状が認められる。そして、約 4mm までせん断力が増加することなしにずれが進行しているが、後述する新スタッドをモデル化した解析結果および復元性挙動から判断して、スタッド自

身は全断面にわたっては降伏していないと思われる。

図10によれば、鋼とコンクリートの接合面に厚さ 0.5mm のテフロン板を挿入した試験体のずれ性状は、初期段階ではテフロンを挿入していない試験体と差異が見られないものの、終局に近づくほど大きく違った傾向を示すことが分かる。相対的に、テフロンを有する試験体のずれ関係の方が滑らかな曲線を描いている。

ウレタン付きスタッドでは、ウレタン高さが 40mm の場合についてのみ、テフロンの存在によって流れ領域(相対ずれ 5mm 前後)に若干の違いが確認できた。しかし、

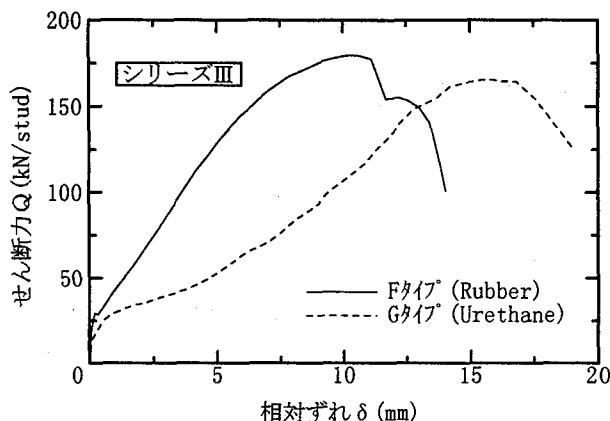


図12 セン断力-相対ずれ関係(シリーズⅢ)

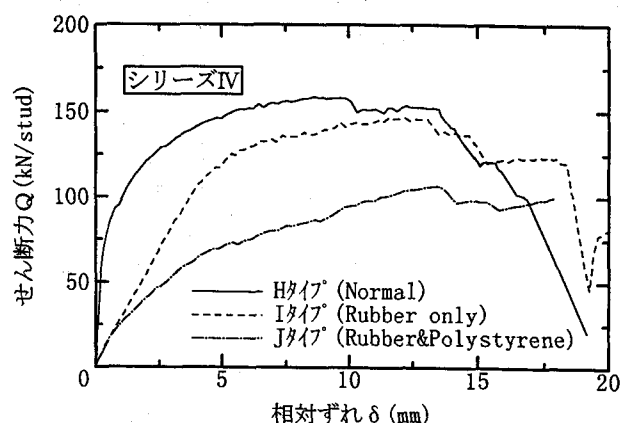


図13 セン断力-相対ずれ関係(シリーズⅣ)

その他のウレタン高さのスタッドでは、テフロンの有無に関係がなく、ほぼ同様なずれ性状を示していることが、図9と図11との比較から理解できる。

図12に、シリーズⅢの代表的なせん断力-ずれ関係を示す。この図から、スタッド根元に巻き付ける緩衝材の種類と厚み、つまりウレタンまたは天然ゴムといった材質(硬度)と、ウレタンの厚さ10mmと天然ゴムの厚さ3mmといった違いによって、ずれ性状に顕著な差があることが分かる。根本的な相違点は、ずれ性状に流れが存在するか否かである。ゴム(Fタイプ)の場合、ずれはせん断力の増加に比例して増加するが、ウレタン(Gタイプ)の場合は、シリーズⅠおよびⅡと同様に、ずれ性状に流れが存在している。

図13は、シリーズⅣの代表的なせん断力-ずれ関係である。この試験体シリーズは、実橋に供するデータを得ようとして実施したものであり、施工の合理化を図るために、プレキャスト床版の使用を想定している。そのため、スタッドをグループ配置している。この図より明らかに、グループ配置された個々のスタッド根元にゴムを巻き付けたIタイプのずれ性状は、シリーズⅢのFタイプと同様な傾向を示している。しかし、Jタイプの試験体のように、スタッドの個別ゴム巻き付けに加えて、それらの間に発泡スチロールを挿入させたような場合には(表1、図2参照)、大きなずれ性状を示すことは立証されたが、せん断耐荷力は他のタイプに比べて小さいことが明らかとなった。

ここで、ウレタンの高さによって、スタッド自身の応力状態がどのように異なるかを把握するため、FEMによる3次元線形解析を行った結果について述べる。図14に示すように、標準押抜き試験体のH形鋼のフランジに溶植されたスタッドについて、コンクリートに接触する部分をばね支持縁、ウレタンを巻き付けた部分を自由縁とするモデル化を行った。スタッドの寸法は、シリーズⅠ～Ⅲの押抜き試験体およびはり試験体に用いた19φ×120である。このモデルに対して、H形鋼とコンクリートの相対ずれとして、x軸方向に0.3mmの強

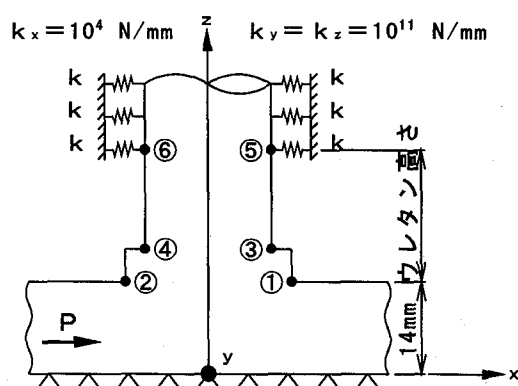


図14 ウレタン付きスタッドに対するFEM解析モデル

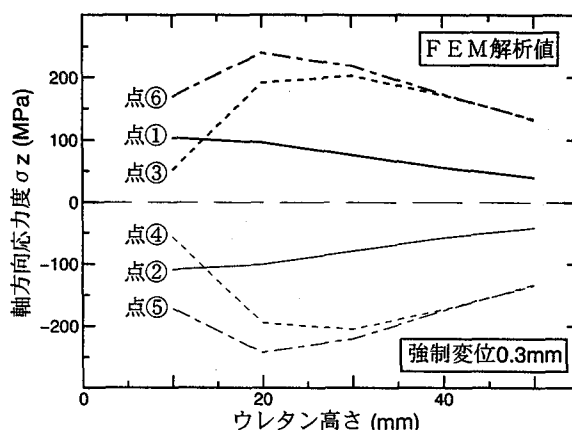


図15 ウレタン付きスタッドの根元における軸方向応力度

制変位を与えた。このときの、溶接止端部(点①～④)およびウレタン接触面の上端部(点⑤、⑥)におけるスタッド軸方向応力度 σ_z の計算値を図15に示す。この図より、ウレタン高さの違いによって、最大応力度の発生位置とその値が異なることが分かる。そして、ウレタン高さ20mmの場合に軸方向応力度が最大となり、相対ずれ0.3mmでほぼ降伏し始めていると考えられる。それ以外のウレタン高さでは、図中の各最大応力度とスタッドの降伏強度235MPaとの関係より、高さ30mm、40mm、

10mm、50mm の順で、相対ずれ 0.32mm、0.41mm、0.41mm、0.53mm が降伏開始点となる。

さて、前掲の図9において、曲線の傾きが初期状態から緩くなり始めるときの相対ずれの値は、上記の降伏開始点にはほぼ等しいといえ、スタッド軸部断面の一部が塑性域に入ったために、曲線が緩やかになるものと思われる。その後、ひずみ硬化の影響によって再び曲線の傾きが大きくなり、最大せん断力に達するものと考えられる。以上の結果から、ウレタン高さの違いにより、ずれ性状に違いの現れることが実験と解析の両方から明確になった。

(2) 復元性挙動

通常、スタッドが水平せん断力を受けた場合、スタッドの支圧側のコンクリートが圧壊することによって、接合面にずれが生じる。その圧壊の進行とともに、スタッド材の断面が局部的に降伏し始めると、残留ずれが生じることになる。このとき、このコンクリートの圧壊領域はせん断力の増加に伴って変化するため、スタッドを支持する位置が漸次変化し、スタッド材が降伏する断面もそれに伴って変化していく。その結果、ずれの残留が増加する。

ここで提案する新スタッドでは、柔な合成作用が特徴であり、大きな非合成挙動(大きなずれの発生)を呈することを確認することが重要である。また同時に、ずれ止め機構に必要な復元特性を把握しておくことも大切である。残留ずれが起こると、橋桁の残留たわみが大きくなるが、この変形を少なくするには、ずれの復元性が重要な因子となる。そこで、新スタッドの実用化を図るため、押抜き試験ならびに 3.2 に示すはりの曲げ試験の結果に基づいて、以下に、ずれ性状の復元性を議論することにした。

図 16 はシリーズ I のせん断力-弾性回復ずれ関係を示したものである。この図から明らかなように、各タイプは2つのグループに分かれている。つまり、一方が通常スタッド(Aタイプ)とスラブアンカー(Eタイプ)のグループで、他方がウレタン付きスタッド(B～Dタイプ)のグループである。弾性回復ずれは、ウレタン付きスタッドの方が大きな値を示していることが分かる。これにより、ウレタン付きスタッドは、作用せん断力が小さな範囲に限定されているが、大きな復元性を有しているといえる。

図 17、18 は、シリーズ I と II における弾性回復ずれと相対ずれの関係を示したものである。これらの図には、テフ龙的の有無とウレタン高さの影響などが現れている。

まず、接合面に挿入されたテフ龙的の滑り効果により、相対的に、シリーズ II の方がシリーズ I に比べて、大きな弾性回復ずれを示していることが分かる。また、ウレタンの高さに関しては、シリーズ I、II とも、ウレタン高さが大きくなるほど、弾性回復ずれが大きくなることも明らかである。なお、シリーズ I のスラブアンカー(

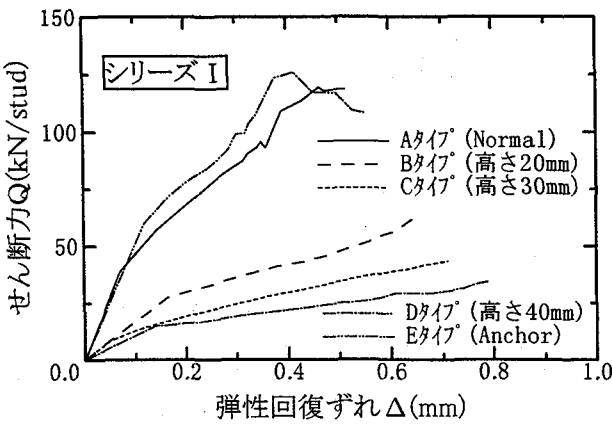


図 16 せん断力-弾性回復ずれ関係(シリーズ I)

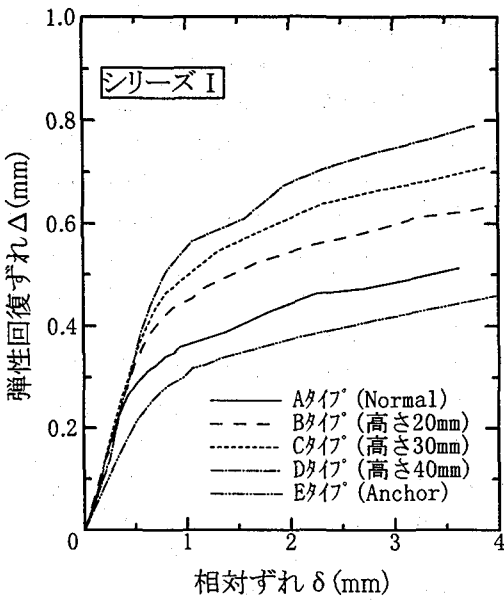


図 17 弾性回復ずれ-相対ずれ関係(シリーズ I)

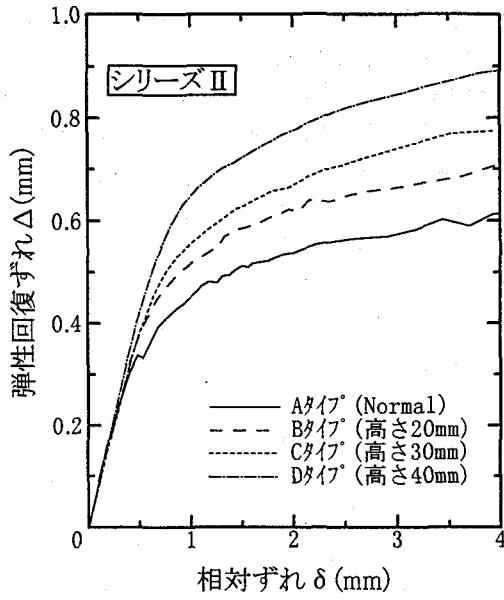


図 18 弾性回復ずれ-相対ずれ関係(シリーズ II)

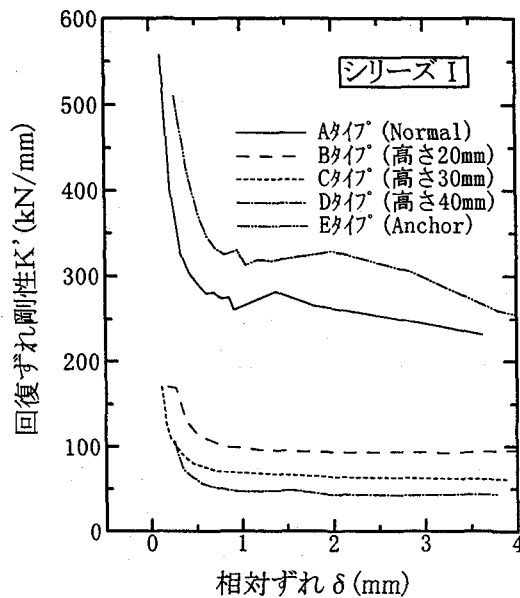


図 19 回復ずれ剛性-相対ずれ関係(シリーズ I)

Eタイプ)の弾性回復ずれは、他のタイプに比べて、最も小さかった。これは、スラブアンカーの試験体のみがコンクリートの支圧破壊となったためであろう。また、図 17、18 において、曲線の初期の線形性の失われる相対ずれ量は、先に述べた FEM 解析によるスタッドの降伏開始点とほぼ同程度の値となっている。

図 19 は回復ずれ剛性-相対ずれ関係を示したものである。ここで、回復ずれ剛性とは、せん断カーズれ曲線における除荷曲線の傾きのことである。この図より、いずれのタイプにおいても、相対ずれが 1mm を超えたあたりから、回復ずれ剛性はほぼ一定となることが分かる。このときのウレタン付きスタッドの回復ずれ剛性は、通常のスタッドのものに比べて、約 1/3 の値となっている。このことは、せん断カーズれ関係における除荷曲線の傾きが緩くなり、ウレタン付きスタッドの方が通常スタッドより復元性に優れていることを示している。

(3) 最大せん断耐力(Q_{max})

表 3 に示すように、スラブアンカーを除いて、破壊形式がスタッド軸部のせん断破壊であったため、シリーズ I～III の最大せん断耐力は、ほぼ同一であった。一方、直径 22mm のスタッドを片側 6 本用いたシリーズ IV の H タイプの結果が、直径 19mm のスタッドを片側 2 本用いたシリーズ III のものとほぼ等しくなった。両者のスタッドの軸径と本数が異なっているものの、同程度の破壊荷重で同じ破壊形式となったのは、シリーズ IV の試験体ではスタッドのグループ配置の影響により、スタッドの本数分だけの耐力増加が生じなかったためと考えられる。なお、シリーズ IV の J タイプは、最大押抜き量 50mm に達したので試験を終了した。試験後、コンクリートスラブをカッターで切断し、破断面を観察したところ、この

表 3 押抜き試験結果 (各タイプ 3 体の平均値)

シリーズ	タイプ	せん断耐力 Q_{max} (kN/本)	ずれ定数 ¹⁾ K (kN/cm/本)	最大ずれ量 ²⁾ δ_{max} (mm)	破壊形式
I	A	154.2	2361	9.4	スタッド軸部のせん断
	B	154.2	1311	15.8	"
	C	153.9	1133	18.6	"
	D	165.0	724	17.3	"
	E	133.0	2404	4.4	コンクリートの圧壊
	①	126.1	平城・松井の提案式(1)による計算値		
	②	118.2	Ollgaard らの提案式(2)による計算値		
II	A	135.7	2339	11.9	スタッド軸部のせん断
	B	141.4	1347	15.2	"
	C	138.2	1083	16.7	"
	D	155.7	708	18.7	"
	①	126.5	平城・松井の提案式(1)による計算値		
	②	125.6	Ollgaard らの提案式(2)による計算値		
III	F	158.0	805	9.6	スタッド軸部のせん断
	G	163.0	783	14.2	"
	①	174.0	平城・松井の提案式(1)による計算値		
	②	190.6	Ollgaard らの提案式(2)による計算値		
IV	H	163.0	2108	10.5	スタッド軸部のせん断
	I	147.0	282	12.0	(一部、破壊せず)
	J	98.0	248	12.5	破壊せず ³⁾
	①	305.0	平城・松井の提案式(1)による計算値		
	②	255.6	Ollgaard らの提案式(2)による計算値		
	1) ずれ定数(K): せん断カーブの曲線における初期接線の傾き(初期すべり剛性) 2) 最大ずれ量(δ_{max}): 最大せん断耐力の到達時に発生する相対ずれ量 3) 破壊せず: 最大押抜き量(50mm)に達しても、スタッド軸部のせん断破壊およびコンクリートの圧壊が観察されず、最終的に、スタッド群がコンクリートスラブから引き抜ける破壊を呈したものの。				

タイプの試験体は、引き抜き破壊を示していることが確認された。このことより、軸部のせん断破壊を示した他のタイプに比べて、 Q_{max} は極端に低い値を示していた。以上より、J タイプを除いて、 Q_{max} はスタッド根元部のウレタンおよび天然ゴムの有無に影響を受けないといえる。

スラブアンカーの Q_{max} は、既往の研究⁹⁾と同様に、スタッドに比べて若干低い値を示すものの、スラブアンカー(ϕ 16mm) 1 本とスタッド(ϕ 19mm) 2 本分がほぼ同程度であった。このことより、スラブアンカーの結果は、シリーズ I～III のスタッド試験体と同等な評価をするために、作用せん断力を 4 で割って整理している。

また、表中には平城・松井⁹⁾の提案式(1)および Ollgaard ら¹⁰⁾の提案式(2)より求めたせん断耐力も併記した。両者の比較より、シリーズ IV を除いて、平城・松井の提案式の方が実験値と良好に適合していることが分かる。

$$Q_u = 30A_s \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_c} + 10000 \quad (1)$$

$$Q_u = 0.5A_s \sqrt{E_c \cdot f_c} \quad (2)$$

ここで、 Q_u : スタッドの静的せん断耐力(N)、

h_s : スタッドの高さ(mm)、

d_s , A_s : スタッド軸部の直径(mm)および断面積(mm²)、

f'_c , E_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²) および弾性係数 (N/mm²)。

シリーズ I とシリーズ II の結果の比較から、 Q_{max} はシリーズ II の方が若干低いことが分かる。これは、付着の影響を完全に除去するために、鋼とコンクリートと接合面にテフロン板を挿入したためと考えられる。

(4) ずれ定数および最大ずれ量

表 3 に示したシリーズ I のずれ定数に着目すると、通常のスタッド (A タイプ) とスラブアンカー (E タイプ) は同程度で、ウレタン付きスタッド (B ~ D タイプ) は、スタッド根元からのウレタンの高さが増すごとに低下していることが分かる。最大ずれ量は、シリーズ I の E タイプが A タイプのほぼ 1/2 であり、また、ウレタン付きスタッドでは高さ 30mm (C タイプ) のものが最も大きくなっている。一方、シリーズ II ではウレタン高さ 40mm のものが最も大きくなっている。以上より、ウレタン付きスタッドの場合は、ウレタン高さが 30mm 程度であれば、通常のスタッドと同様なせん断耐力を保持するとともに、十分なずれ容量を得ることができるといえる。なお、シリーズ III のゴムを用いた試験体 (F タイプ) の最大ずれ量は、ゴムの厚さ (3mm) にも関係するが、通常のスタッドと同程度の値にとどまった。

3.2 はり試験の結果

新スタッドが通常のスラブアンカーよりも柔であり、非合成桁用として有利であることを確認するため、押抜き試験の場合と同様に、はり試験でも、ずれ性状と復元性に主眼をおいて記述する。

(1) ひずみ分布

はり試験体を完全合成および鋼のみとした場合について、鋼ばり下縁の垂直応力度が設計許容応力度 137MPa (ひずみは 667 μ) に到達する荷重は、それぞれ 121kN および 73kN であり、設計荷重に相当する載荷荷重は、約 100kN であるといえる。そこで、設計荷重 100kN と設計荷重を 2 倍した荷重 200kN での、支間中央点の横断面内における測定ひずみを表 4 に示す。また、図 20 に同じ断面のひずみ分布を示す。普通スタッドおよびスラブアンカーの場合、100kN ではほぼ完全合成であり、200kN では鋼とコンクリートの接合面にひずみの不連続が生じ、不完全合成の状態になっている。一方、ウレタン付きスタッドでは、GA-2 を除き、100kN で既に不完全合成の状態となっていることが分かる。また、200kN での非合成度も明確である。

(2) たわみ性状

図 21、22 に、シリーズ V の漸増繰り返し載荷で得られた代表的な荷重-相対たわみ関係を示す。これらの図

表 4 支間中央点での床版と鋼ばりのひずみ (シリーズ V)

荷重 P (kN)	測定位置	ひずみ (μ)				
		GB-1	GD-1	GA-2	GB-2	GC-2
100	床版上縁	-274	-377	-238	-310	-234
	床版下縁	47	53	18	208	250
	形鋼上縁	49	12	-20	-261	-244
	形鋼下縁	443	487	533	637	660
200	床版上縁	-548	-542	-458	-479	-608
	床版下縁	100	158	87	260	581
	形鋼上縁	-1	-44	-537	-732	-889
	形鋼下縁	951	1127	1167	1431	1471

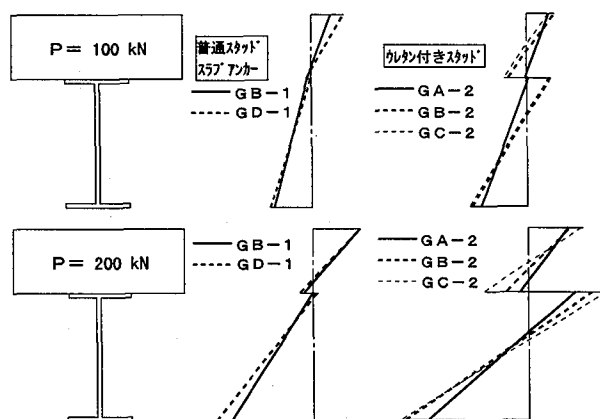


図 20 支間中央点でのひずみ分布 (シリーズ V)

より、押抜き試験の場合と同様に、たわみ性状はスタッド根元部に巻き付けられたウレタンの有無に、大きく影響を受けていることが分かる。また、除荷曲線の傾きもウレタン付きスタッドの方がかなり緩やかになっている。そして、荷重 225kN までの除荷における残留たわみは、普通スタッドのそれと変わりがない。このことから、復元性が非常に大きいことが証明された。

各タイプの支間中央点における荷重-活荷重たわみ関係を図 23、24 に示す。ここで、活荷重たわみとは、相対たわみから残留たわみを減じて求めたものである。これによって、荷重増分に対する純粋なたわみの増加量が、各載荷ステップごとに表示される。図中には、鉛直面内の 2 次元モデルによる線形 FEM 解析結果も併記している。なお、スタッドを柔なずれ止めと仮定した不完全合成ばりの解析においては、シリーズ I で得られたばね定数 (ずれ定数) を用いている。これらの図より、普通スタッドとスラブアンカーは、終局状態付近を除いて、たわみ性状がほぼ同等であり、かつ、設計荷重の範囲では完全合成にほぼ等しいことが分かる。

一方、ウレタン付きスタッドでは、GA-2 の場合は、載荷荷重 100kN 程度までは完全合成にほぼ等しいのに対し、GB-2 および GC-2 では不完全合成の状態となっている。そして、荷重が 100kN ~ 200kN の範囲では、3 タイプとも不完全合成として解析した計算値とよく一致

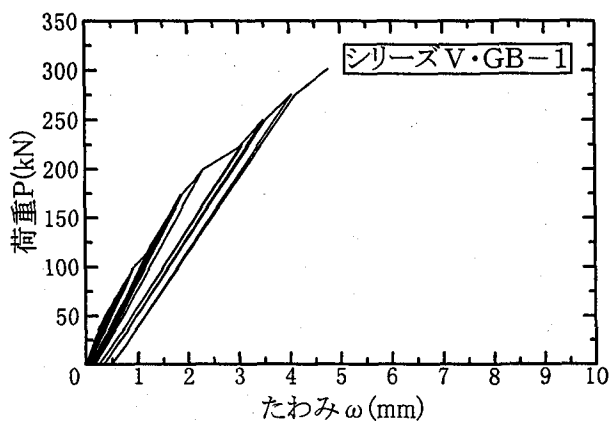


図 21 荷重-たわみ関係(シリーズ V・通常スタッド)

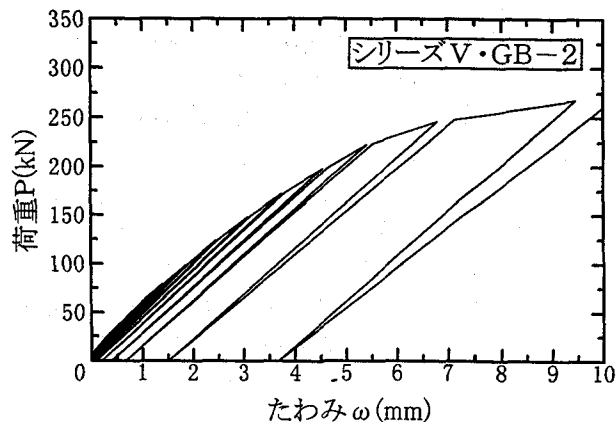


図 22 荷重-たわみ関係(シリーズ V・ウレタン付きスタッド)

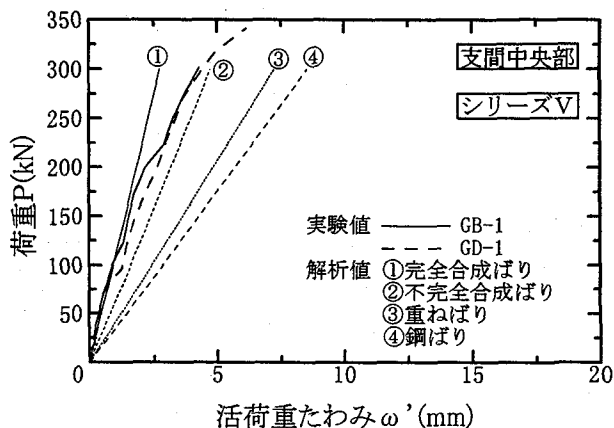


図 23 荷重-活荷重たわみ関係(シリーズ V・通常スタッド、スラブアンカー)

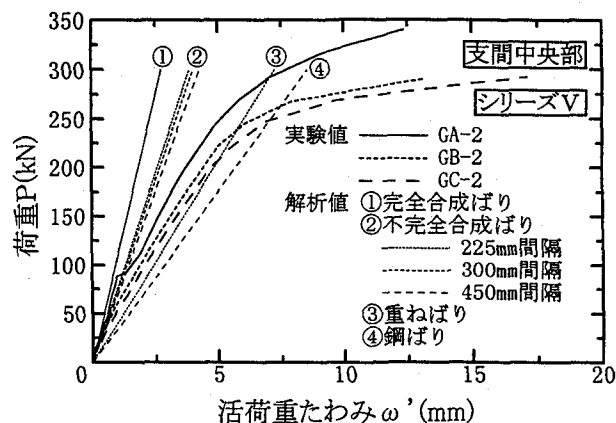


図 24 荷重-活荷重たわみ関係(シリーズ V・ウレタン付きスタッド)

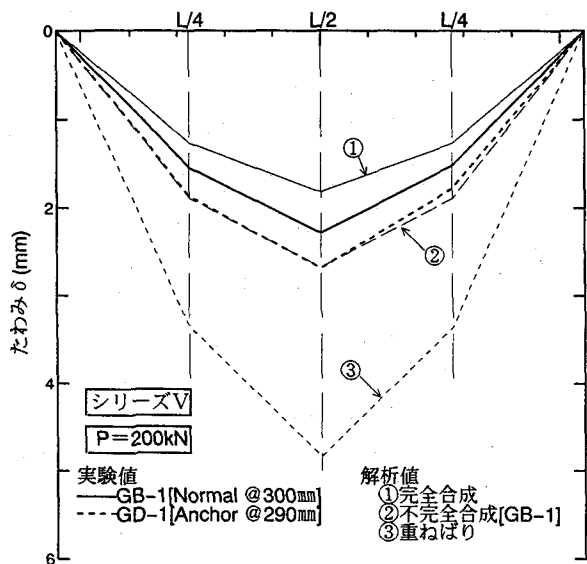


図 25 支間方向の相対たわみ分布(シリーズ V・通常スタッド、スラブアンカー)

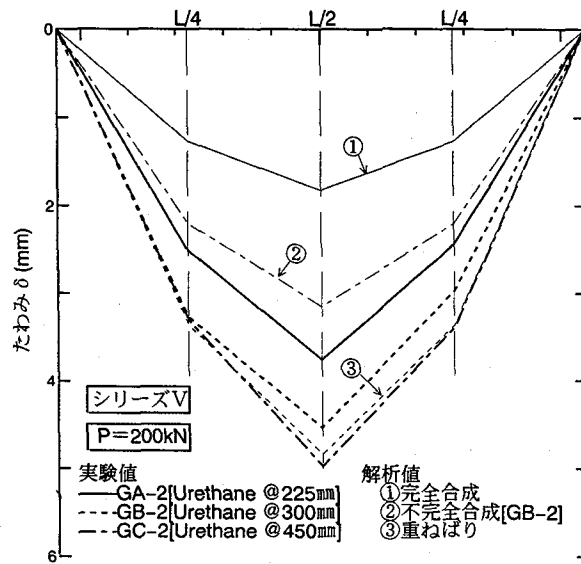


図 26 支間方向の相対たわみ分布(シリーズ V・ウレタン付きスタッド)

している。さらに、200kN を超えるあたりで重ねばりに一致していることも分かる。

図 25、26 は、200kN 載荷時での各タイプの支間方向の相対たわみ分布を示したものである。これらの図は、設計荷重の 2 倍程度の載荷時のものであるため、各試験体の特徴がよく現れている。すなわち、通常スタッドの

たわみが完全合成とウレタンを考慮しない不完全合成の理論値との中間にあるのに対し、スラブアンカーは、ウレタンなしの不完全合成の理論値に一致している。そして、ウレタン付きスタッドは、ウレタンを考慮した不完全合成の理論値と重ねばりとの中間に位置している。

(3) ずれ性状

図 27 に各タイプのはり端部における荷重－相対ずれ関係を示す。この図から、通常スタッドとスラブアンカーのずれ性状は、たわみ性状と同様に、終局近くを除いて、ほぼ同じ挙動を示していることが分かる。一方、ウレタン付きスタッドは、スタッド間隔 225mm を除いて、設計荷重 100kN 載荷時において、約 1mm 程度の相対ずれを示していることが分かる。これにより、はりにおいて、ウレタン付きスタッドを 300mm 以上の間隔で配置した場合、設計荷重を受けた状態でも非合成挙動を呈することが分かった。この傾向は、図 20 のひずみ分布から推定した非合成挙動の結果と一致している。

(4) 復元性挙動

はり試験(シリーズ V)では、押抜き試験(シリーズ I～IV)の場合と違って、鋼ばりの弾性のために、除荷時にはずれが回復し、残留たわみも大きく発生しないと考えられる。つまり、スタッドが降伏しても、鋼ばりが降伏点に達しなければ、その復元性は大きい。このことは、本試験体よりも鋼断面の比率の大きい実橋の主桁において、さらに有利であると考えられる。

図 28 に GC タイプ(スタッド間隔 450mm)の相対ずれと残留ずれの関係を示す。比較のために、図中には押抜き試験(シリーズ I, II)の結果も併記している。この図より、通常のスタッドを用いたはり試験体(GC-1)は、ウレタン付きスタッドを用いた試験体(GC-2)のものに比べて、大きな残留ずれを示していることが分かる。このことは、ウレタン付きスタッドを用いた試験体は、大きな非合成挙動を示すにもかかわらず、通常のスタッドを用いたものより、復元性は大きいことを意味している。

一方、この図より、押抜き試験の相対ずれ－残留ずれの関係は、載荷初期を除いて、直線で表されることが分かる。そして、鋼とコンクリートの接合面に挿入したテフロンの有無の影響を、ほとんど受けないことも理解できる。以上より、スタッド自身とそれを取り巻くコンクリートの反発力で生じている押抜き試験体の復元性は、はりのそれに比べて、極めて小さいといえる。

(5) 曲げ耐荷力(破壊荷重)

表 5 より、破壊荷重には、ずれ止め間隔による差が明らかに認められた。また、各タイプのウレタンの有無や GB タイプ以外でのプレロードの有無による破壊荷重の差は同程度であるといえる。また、スタッド間隔とスラブアンカー間隔の等しい GB タイプと GD タイプ、GC タイプと GE タイプでは、破壊荷重はほぼ等しいことも分かる。破壊形式は、鋼ばり下縁が降伏した後、コンクリート床版が圧壊するものであった。また、今回の試験ではプレロードの影響は、破壊荷重のほか、ひずみ、たわみおよびずれの力学性状において観察できなかった。

表 5 には破壊荷重に関して、実験値と計算値とを比較

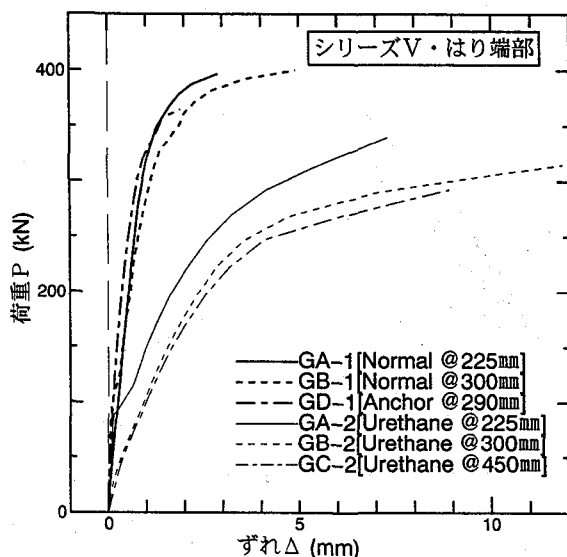


図 27 荷重－相対ずれ関係(シリーズ V)

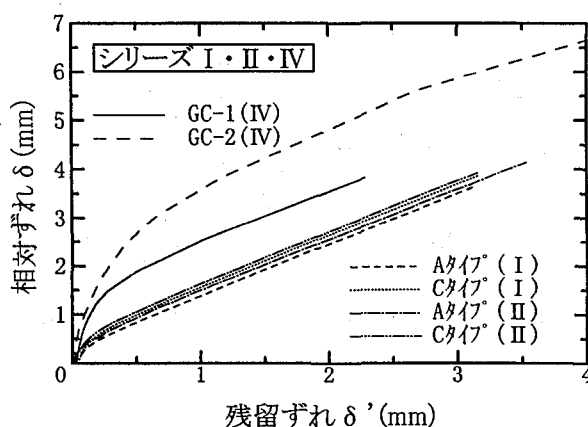


図 28 相対ずれ－残留ずれ関係(シリーズ I, II, IV)

した結果も示している。ここで、計算値とは、合成断面としての全塑性モーメントから算出したものである。なお、本試験では鋼材の材料試験を実施しなかったため、全塑性モーメント算出のための鋼材の降伏点強度には、材料の基準降伏点の値に、既往の研究¹¹⁾で得られている(実測値/公称値)の比を乗じて補正したものを使用した。この表から、曲げ耐荷力に関して、実験値は計算値と比較的によく一致していることが分かる。

(6) 押抜き試験結果との比較および疲労照査

ここでは、はり試験結果と押抜き試験結果とを関係づけて、はり端部のスタッドの疲労照査を実施する。なお、我が国の道路橋示方書にはスタッドの疲労強度式が提示されていないので、筆者らが提案している設計用疲労強度評価式を用いて行う¹²⁾。また、ウレタン付きスタッドの疲労強度式は現在のところ、提案されていないが、今回のような設計荷重程度の繰り返し荷重においては、

表5 はりの静的曲げ試験結果(シリーズ V)

タイプ	破壊荷重 P(kN)	平均値
		平均値/計算値
GA	-1	396.9
	-2	401.8
	-3	377.3
GB	-1	399.4
	-2	360.2
	-3	360.2
GC	-1	365.1
	-2	345.5
	-3	318.5
GD	-1	367.5
	-2	370.0
GE	-1	350.4
	-2	352.8

1) 試験は全て漸増繰り返し載荷法で実施。
 2) 破壊形式は、鋼ばり降伏後の床版コンクリートの圧壊。
 3) 平均値：破壊荷重(試験時の最大荷重)の平均値。
 計算値：全塑性モーメントから計算した破壊荷重(=340.7kN)。
 3) 全塑性モーメント計算に用いた材料特性値
 ・コンクリートの圧縮強度：29.5N/mm²
 ・鋼材の降伏点強度：240 × 1.163^{*}) = 279N/mm²
^{*})割増し係数(文献 11)を参照

通常スタッドの強度式を使用してよいものと判断した。ただし、ウレタンが存在によってせん断耐力に有意な差が認められなかったため、許容せん断力範囲を求めるための Q_u には、シリーズ I、A タイプの $Q_{max} = 154.2\text{kN}$ を用いる。

$$R/Q_u = 0.99 \cdot N^{-0.105} \quad (3)$$

ここで、R：スタッドに作用するせん断力の変動範囲 (kN)、

Q_u ：スタッドの静的強度、

N：疲労破壊に至るまでの繰り返し回数 ($N = 1.0 \times 10^7$ とする)。

$$\text{以上より、} R = 0.99 \cdot N^{-0.105} \cdot Q_u = 28.1 \text{ kN} \quad (4)$$

まず、上記のせん断力範囲に対応するずれ量の許容変動範囲を図 8、9 より求める。ここで、通常スタッドが 0.16mm、ウレタン付きスタッド(ウレタン高さ 40mm)が 1.13mm と読み取られる。つぎに、はり試験体において、端部にこのずれ量を生じさせる載荷荷重 P を図 27 から求める。この値が、変動荷重の許容範囲に相当するとみなせる。図中に示した 5 種類の試験体に関してこの値を求めると、通常スタッドの GA-1 と GB-1 が、55.9kN と 108.5kN であり、ウレタン付きスタッドの GA-2、GB-2 および GC-2 がそれぞれ 160.0kN、116.7kN、109.2kN となる。はり試験体の設計荷重は 100kN 程度であるが、全荷重中に占める活荷重の割合を 50%程度と仮定すれば、荷重の変動範囲は 50kN 程度と考えられる。以上に述べた荷重-ずれ関係の比較から、はり試験の結果の範囲では、通常スタッドよりもウレタン付きスタッドの方

が、疲労に対して高い安全性を有しているものと推定できる。

4. 結論

本研究で提案した新スタッドに関する一連の試験から、次のことが明らかになった。

(1) 押抜き試験(シリーズ I～IV)において

1) ウレタン付きスタッドは、通常スタッドと同程度のせん断耐力を有し、かつ、ずれ剛性を小さく抑えることができるため、スラブアンカー以上の非合成挙動が期待できる。

2) グループ配置したスタッドの静的耐力は、スタッド間のコンクリートの干渉によって、通常スタッドの場合よりも若干低い値となる。したがって、スタッド群の耐力は、スタッド 1 本の押抜き耐力と配置された本数との積よりも低い値となり、実橋の設計では適切な低減係数の導入が必要であろう。

3) ウレタン付きスタッドの復元性挙動は、通常スタッドおよびスラブアンカーよりも優れている。

4) スタッドの静的せん断耐力は、スタッド根元のウレタンの有無に関係なくほぼ同一である。また、通常スタッド 2 本(φ 19mm)とスラブアンカー 1 本(φ 16mm)の静的耐力は、ほぼ等価である。

(2) はりの曲げ試験(シリーズ V)において

1) ウレタン付きスタッドは、設計荷重相当の載荷では不完全合成の挙動を示し、通常スタッドよりも作用せん断力は小さくなっている。そして、重ねばりに近い理想的な非合成の性状を示したのは、載荷荷重が設計荷重の 2 倍程度になったときと推定される。このことから、過大な重量の車両が通行しない一般的な交通状況にある橋梁においても、供用開始後、比較的早期の段階で不完全合成の挙動を呈するものと予想できる。

2) スタッドをバネとしてモデル化した線形解析により、ウレタン付きスタッドについて、設計荷重程度までの不完全挙動を予測することが可能である。

3) 押抜き試験の結果と同様に、ウレタン付きスタッドを用いたはりの復元性挙動は、通常スタッドおよびスラブアンカーのものに比べて優れている。

4) はり試験結果と押抜き試験結果とを関係づけて、通常スタッドおよびウレタン付きスタッドの疲労安全性を、筆者らが提案しているスタッドの強度評価式で照査した。その結果、本研究のはり試験に関する諸元や載荷荷重のレベルでは、通常スタッドよりもウレタン付きスタッドの方が高い安全性を有していると推定される。

5) はりの曲げ耐力はスタッド根元部のウレタンの有無に関係なくほぼ同じである。

今後は、新スタッド自身の疲労強度と新スタッドが床版コンクリートの乾燥収縮によるひびわれに及ぼす影響についても、実験的および解析的に明らかにしたい。

参考文献

- 1) 川田工業：橋の補修・補強を考える，川田技報，Vol.16, pp.84-87, 1997.
- 2) 佐伯章美：連続合成げた橋ーおもにプレストレスしない形式，新しい合成構造，日本鋼構造協会，pp.65-70, 1977.
- 3) 稲葉紀昭，井口光雄：鉄道橋用断続合成桁の設計法の提案，構造工学論文集，Vol.41A, pp.1085-1096, 1995.
- 4) 稲葉紀昭，宮崎竜聖，井口光雄，武居秀訓：鉄道橋用断続合成桁の簡易的な設計法について，第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.31-35, 1995.
- 5) 阿部英彦，中島彰典，堀内 博：合成桁におけるスラブ分割の影響と柔ずれ止めの開発，構造工学論文集，Vol.35A, pp.1205-1214, 1989.
- 6) 高分子学会編：高分子データ・ハンドブック ー応用編ー，培風館，1986.
- 7) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート，No.35, 1996.
- 8) 中島章典，池川真也，森内大介，西園広之，大江浩一，阿部英彦：非合成桁橋スラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度について，第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.197-201, 1995.
- 9) Hiragi, H., Matsui, S. and Fukumoto, Y. : Static and Fatigue Strengths of Studs, IABSE Symposium, Brussels, pp.197-202, 1990.
- 10) Ollgaard, J.G. et al. : Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, AISC, Engineering Journal, Vol.8, No.2, pp.55-64, 1971.
- 11) 土木学会関西支部共同研究グループ：限界状態設計法による合成桁橋の設計法に関する研究報告書，1988.
- 12) 松井繁之，平城弘一，福本嘯士：頭付きスタッドの強度評価式の誘導 ー疲労強度評価式ー，構造工学論文集，Vol.35A, pp.1233-1244, 1989.

(1997年9月26日受付)