

スラブアンカーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究

An Experimental Study on Static Shear Strength Characteristics of Slab Anchors under Various Bond Conditions

渡辺 滉
Hiroshi WATANABE

川田工業(株)橋梁事業部技術統括部長

高田 嘉秀
Yoshihide TAKADA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計二課課長

宮地 真一
Shinichi MIYACHI

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計二課課長

牛島 祥貴
Yoshitaka USHIJIMA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計一課

榊田 智子
Tomoko MASUDA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計二課

塚本 岳史
Takeshi TSUKAMOTO

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計二課

一般に、コンクリート床版の合成効果を期待しない非合成桁形式の道路橋では、鋼桁が床版を支持し、車両通過時の衝撃を床版と鋼桁とで受け持ち、床版が所定の位置を確保するためにスラブアンカーを設けるように規定されている。最近の研究においてスラブアンカーを用いた非合成桁橋でも供用荷重下では十分な合成効果があることが報告されている。この合成効果は鋼桁上フランジとRC床版の付着、スラブアンカーのずれ抵抗力が大きな要因ではないかと考えられる。設計上スラブアンカーが伝達する水平せん断力は考慮されていないが、非合成桁橋でも合成効果があるため、実際は無視し得ない大きさの水平せん断力をスラブアンカーが伝達していることになる。本研究では実橋とより近い状態で、スラブアンカーの形状、RC床版と鋼桁上フランジ面との付着をパラメータとした静的押抜き試験を行い、ずれ耐荷力特性を把握し、その結果を実橋に反映した。

キーワード：せん断特性、スラブアンカー、非合成桁、付着

1. まえがき

一般に、コンクリート床版の合成効果を期待しない非合成桁形式の道路橋は、鋼桁が床版を支持し、車両通過時の衝撃を床版と鋼桁とで受け持ち、また車両の加速・制動、地震等による水平力に対し、床版が所定の位置を確保するためにスラブアンカーを設けるように規定されている¹⁾。そして、スラブアンカーの配置は、1 m以下の間隔で設けるものとし、その径は 13 mm以上、折り曲げ角度は45°とすることとなっている。これは経験的に決定された配置、形状であると推定され、設計において許容せん断耐力、疲労強度について明確に規定されていないのが現状である。

最近の研究においてスラブアンカーを用いた非合成桁橋でも十分な合成効果があることが、報告されている²⁾。この非合成桁橋で実測される合成効果は、鋼桁上フランジとRC床版の付着、スラブアンカーのずれ抵抗力が大きな要因ではないか、と考えられる。設計上スラブアンカーが伝達する水平せん断力は考慮されていないが、非合成桁橋でも合成効果があるため、実際は無視できない大きさの水平せん断力をスラブアンカーが伝達していることになる。また車両の走行にとまらぬ、床版には繰返し水平せん断力が作用することとなり、一般に鋼桁上フランジとRC床版の付着が切れると予想され、その後、スラブアンカーに作用

する水平せん断耐力は増加すると考えられる。

スラブアンカーの耐力を評価し、実挙動である合成効果を積極的に期待することで、主桁ウェブの水平補剛材の段数を低減させることができるなど、合理化が図れる。そこで、本研究ではスラブアンカーの形状、RC床版と鋼桁上フランジ面との付着に着目し、静的押抜きせん断試験を行い、せん断耐力とずれ定数の把握、試験後のコンクリートを切断して詳細に破壊性状の確認を行った。実橋の床版とより近い状態で押抜き試験を行うため、PC鋼棒により試験体に死荷重相当(床版+舗装)の拘束圧を加え、拘束圧を加えた状態で押抜きせん断試験を行った。さらに、供用荷重レベルにおける、繰返し荷重を作用させて、鋼桁上フランジとRC床版との付着、せん断耐力におよぼす影響度も明らかにし、その結果を実橋に反映した。

2. 実験の概要

(1) 試験体

試験体の諸元と着目要因を表1に示す。付着に着目した試験体はタイプSLP1、SLB1、SLPB、SLRである。これらは、試験体のコンクリート床版と接する鋼フランジ面の処理方法の違いにより、付着の影響を変化させている。スラブアンカーの形状は一般的に非合成桁で用いられているものと同様の形状としている。付着の有無の影響、および強制的な付着の影響を比較するのが目的であ

り、強制的な付着を与えたタイプSLRの試験体のコンクリート接触面には、低粘度遅延硬化性樹脂モルタルを塗布し、押抜き試験は樹脂モルタル硬化後行った。

スラブアンカーの形状に着目した試験体はタイプSLP1, SLP2, SLP3, Pである。スラブアンカーの鉄筋径と折り曲げ角度の変化、折り曲げ筋の有無がせん断耐力、ずれ定数に与える影響を確認する。スラブアンカーの形状に着目した試験体では、鋼フランジ面に鉛系塗装とパラフィンを塗布し付着を極力除去している。また、タイプSLB1, STBでスラブアンカーとスタッドジベルの比較を行う。

実橋とより近い状態で押抜き試験を行うため、各試験体には対象橋梁に作用する死荷重相当（28 kN）の拘束圧を加えているが、この拘束圧の影響を把握するため拘束圧を加えていないタイプSLB3の押抜き試験体も用意した。

供用中の橋梁では車両の通行により、床版には繰返し

水平せん断力が作用することにより、コンクリート接触面の付着が切れることが予想される。タイプSLB2の試験体は200万回の繰返し載荷を行った後に、押抜き試験を行う試験体である。繰返し載荷が接触面の付着やせん断耐力におよぼす影響について検討を行う。

押抜きせん断試験の全試験体は同一の製作条件と形状寸法で表1に示した試験体についてタイプごとに3体ずつ製作した³⁾。コンクリートの目標設計基準強度を30 N/mm²で、その実測の圧縮強度は試験直前で25.7 N/mm²、試験終了後で28.3 N/mm²であった。

(2) 試験方法

今回の実験では、「京都第二外環状道路宇治川橋」を対象とし、その諸元を表2に示す。実際の床版とより近い状態で押抜き試験を行うため、実橋の床版に作用する死荷重相当分（28 kN）を試験体に作用させた。図1に示すように試験体のコンクリート床版部に4箇所の貫通孔

表1 試験体の諸元および着目要因

		試験体タイプ										
		SLP1	SLP2	SLP3	SLB1	SLB2	SLB3	SLPB	SLR	P	B	STB
概要図	平面図											
	測面図											
	付着	なし	なし	なし	あり	あり	あり	半分	強制付着	なし	あり	あり
	曲げ上げ角度	45°	なし	22.5°	45°	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	鉄筋径	16	13	16	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	スタッドジベル 軸径d = 19 mm 高さh = 110 mm
	繰返し	なし	なし	なし	あり	あり	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	締め込み	あり	あり	あり	なし	なし	あり	あり	あり	なし	なし	なし

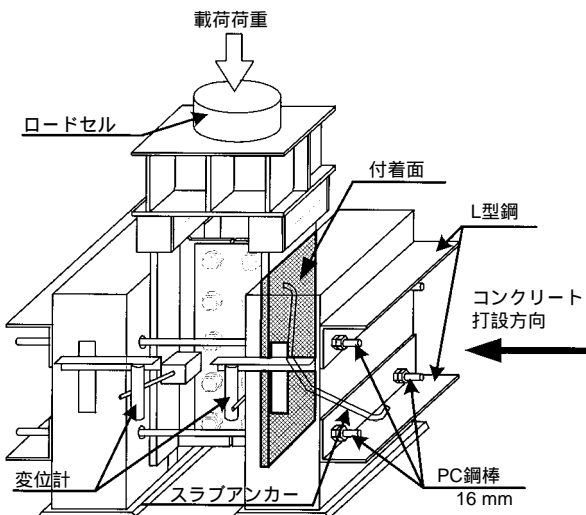


図1 押抜き試験試験体および試験方法

表2 橋梁諸元

橋梁諸元	
橋梁形式	6径間連続V脚ラーメン鋼箱桁橋
設計荷重	B活荷重（4車線）
交通量	23 900台/日/車線
大型車混入率	21.40%
総幅員	22.000 m
試験体に換算した幅員	3.700 m
床版厚	230 mm
舗装厚	75 mm
床版の橋直方向の付着幅	300 mm
スラブアンカー配置間隔	1 000 mm
1箱桁の断面剛度I	40 045 800 cm ⁴
1箱桁の断面係数Q	142 909 cm ³
鉄筋コンクリート単位体積重量	24.5 kN/m ³
アスファルト単位体積重量	22.5 kN/m ³

を設け、両端にねじを切ったPC鋼棒を配置し、ナットを締め付けることでPC鋼棒1本あたり7 kNの張力を導入した。PC鋼棒の張力は表面のひずみを測定して管理し、押抜き試験中もPC鋼棒のひずみの変化を連続的に測定した。押抜きせん断試験は万能試験機を用い、図1に示すような計測・载荷システムで、JSSCの頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)³⁾にしたがい行った。荷重の载荷方法は変位が0.1 mmに達するまで荷重制御による単調増加载荷法、その後、変位制御による漸増繰返し载荷法で行った。最大せん断耐力およびスラブアンカー、スタッドジベルの破壊状態が確認できるまで载荷を行った。また、繰返し载荷荷重については、文献4)を参考に疲労設計荷重が作用したときの水平せん断力を荷重振幅とし、表2の諸元より、荷重振幅を60 kN、5 Hzのサイクルで200万回の繰返し载荷を行った。なお、文献4)より200万回の疲労設計荷重が作用するのは、対象とした橋梁の約2年に相当する。

3. せん断耐力、ずれ定数の評価法

(1) 最大せん断耐力の評価方法

今回の実験では、試験体をPC鋼棒で緊張することにより死荷重相当分の拘束を与えた状態で押抜き試験を行っている。その結果、図2に示すように作用せん断力 - 相対ずれ変位曲線は、多くの試験体で作用せん断力のピーク値を示すことなく、作用せん断力が実験終了時まで増加し続ける傾向を示した。試験体を拘束しない押抜き試験では、通常作用せん断力の増加にともない、相対ずれは増加し、せん断力がピーク値を示した後、減少する傾向があり、このピーク値を最大せん断耐力として評価している。今回のように試験体を拘束した押抜き試験でピーク値を示さなかったのは、試験体をPC鋼棒で拘束していることが原因でないかと考えられる。実験中のPC鋼棒のひずみ測定結果からは、作用せん断力の増加にともない、PC鋼棒の引張りひずみが増加することが確認されている。このPC鋼棒のひずみの増分が、最大

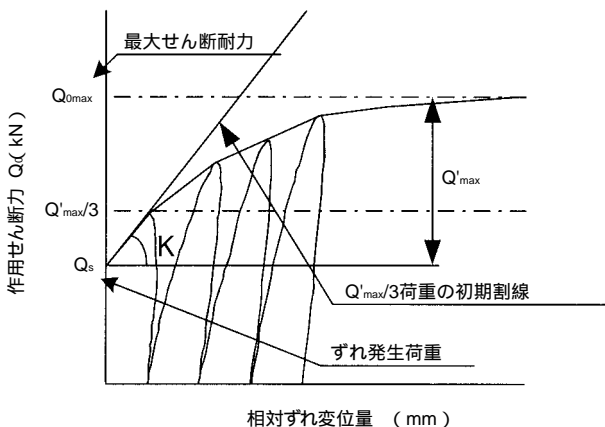


図2 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

せん断耐力に少なからず影響を与えていると考えられるが、ここでは試験終了時までの最大せん断力の最大値を最大せん断耐力として評価することとした。

(2) ずれ定数の算出方法

今回の実験では、コンクリート接触面の付着を考慮した試験体があること、拘束圧を加えて実験を行っていることにより、図2に示すようなずれ発生荷重 (Q_s) が存在している。そのため、ずれ定数 (K) はずれ発生荷重 (Q_s) を原点にして算出することとした。つまり、図2に示すように、最大せん断耐力 (Q_{0max}) から、ずれ発生荷重を差し引いた値 $Q'_{max} (= Q_{0max} - Q_s)$ を1/3にした値 $Q'_{max}/3$ 荷重点と原点となるずれ発生荷重とを結んだ初期割線の傾きをずれ発生後のずれ定数 (K) として求めた。なお、折り曲げ筋のない試験体、強制的な付着を持たせた試験体については、初期のずれ剛性は付着による要因が大きく、ずれ発生後のずれ定数の比較は困難であるため、ずれ定数の算出は行っていない。表3にタイプごとのずれ定数を示す。

表3 ずれ定数

タイプ	諸元	試験体 No.	ずれ定数 K (kN/mm)
タイプ SLP1	付着なし スラブアンカー 鉄筋径 16 角度 45°	No.A	405
		No.B	418
		No.C	376
		平均	400
タイプ SLP2	付着なし スラブアンカー 鉄筋径 13 角度 45°	No.A	269
		No.B	309
		No.C	354
		平均	311
タイプ SLP3	付着なし スラブアンカー 鉄筋径 16 角度 22.5°	No.A	510
		No.B	377
		No.C	480
		平均	456
タイプ SLB1	付着あり スラブアンカー	No.A	59
		No.B	158
		No.C	141
		平均	119
タイプ SLB2	付着あり スラブアンカー 繰返し载荷あり	No.A	59
		No.B	158
		No.C	141
		平均	119
タイプ SLB3	付着あり スラブアンカー 締込みなし	No.A	1000
		No.B	474
		No.C	994
		平均	823
タイプ SLPB	付着半分 スラブアンカー	No.A	184
		No.B	121
		No.C	168
		平均	158
タイプ STB	付着あり スタッドジベル	No.A	132
		No.B	130
		No.C	131
		平均	131

(3) 試験体拘束の影響

死荷重相当分の拘束圧を加えた試験体(タイプSLB1)と、拘束圧を加えていない試験体(タイプSLB3)の作用せん断力 - 相対ずれ変位量の関係を図3に示す。図の縦軸はフランジ1面あたりの作用せん断力である。また、グラフ中に最大せん断耐力 (Q_{0max})、ずれ発生荷重 (Q_s) も一緒に示している。これより試験体を拘束することにより、ずれ発生荷重、最大せん断耐力がともに約15%増

加している。これは試験体を拘束することにより、鋼フランジ面とコンクリート床版との間の摩擦等が影響したものと考えられる。ずれ発生荷重、最大せん断耐力の違いからも付着が切れる前、および切れた後も摩擦がずれ抵抗力として作用していると考えられる。今回の実験では、死荷重相当分以上の拘束力が作用しているが、死荷重相当分のみでも摩擦の影響により拘束をしない試験体よりもせん断耐力は大きくなっていったものと考えられる。すなわち実際の非合成桁橋梁では、スラブアンカーのずれ抵抗力、付着だけでなく、死荷重による摩擦もずれ抵抗力に影響をおよぼしていると考えられる。ずれ定数は、試験体を拘束した方が小さかった。これは、試験体を拘束することでずれ発生荷重が大きくなるため、ずれが発生するまで作用していたせん断力が、一気にスラブアンカーに作用するためである。

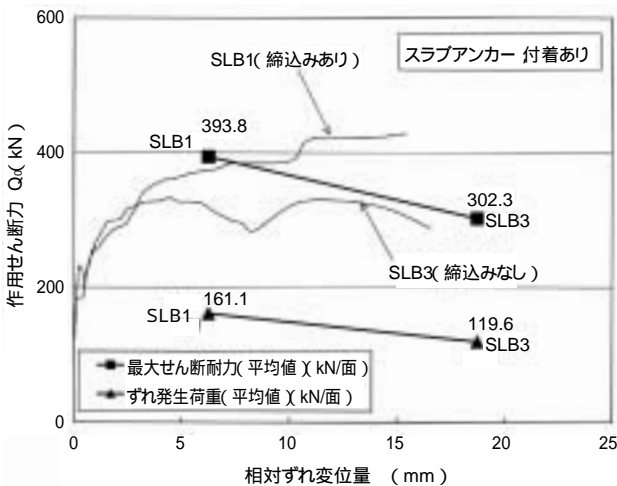


図3 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

4. 試験結果

(1) 付着の影響

図4に試験体コンクリート接触面の付着面の状態を変化させた時の作用せん断力 - 相対ずれ変位量の関係を示す。付着の影響があるため、せん断耐力、最大せん断耐

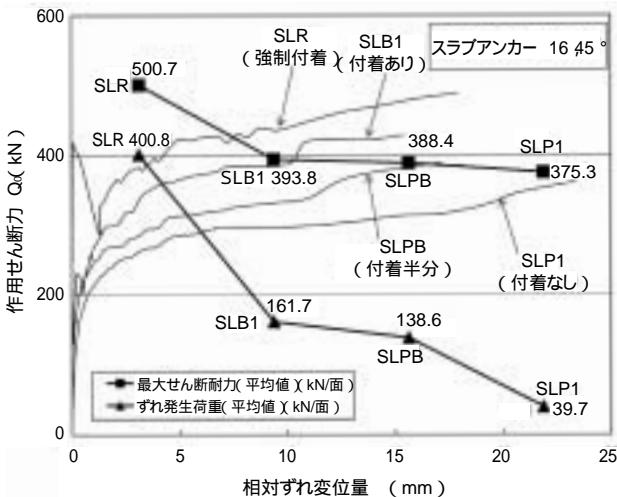


図4 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

力は付着のある試験体の方が大きかった。これはずれ発生荷重が大きいためである。特に強制的な付着を与えたタイプSLRのずれ発生荷重は、最大せん断耐力の約80%、付着面がプラスト処理のタイプSLB1で40%であり、ずれ剛性は付着による要因が大きいことがわかる。またずれ定数は、付着を除去した試験体の方が大きかった。これは付着のある試験体では、鋼フランジに接するコンクリートの界面がせん断破壊を起こし、付着が切れ、一気にずれが進行するためである。付着が切れるまでに作用していたせん断力はスラブアンカーに集中して作用し、相対ずれ変位量が大きくなる。

(2) スラブアンカー形状の影響

スラブアンカーの形状を変化させた場合の試験体の作用せん断力 - 相対ずれ変位量の関係を図5に示す。スラブアンカーの鉄筋径の影響は、鉄筋径が小さくなるとせん断耐力、最大せん断耐力は小さくなった。スラブアンカー折り曲げ筋の角度が小さくなるとせん断耐力、最大せん断耐力は若干小さくなるが、大差はなかった。折り曲げ筋のない試験体は、スラブアンカーのある試験体と比較してせん断耐力、最大せん断耐力ともに小さくなっている。これより折り曲げ筋の有無、スラブアンカーの鉄筋径はせん断耐力に大きく影響を与えるが、折り曲げ角度にはあまり影響しないことがわかった。折り曲げ筋のある試験体の破壊性状は、鉄筋径、折り曲げ角度に関係なくコンクリートの圧壊が支配的で、スラブアンカー

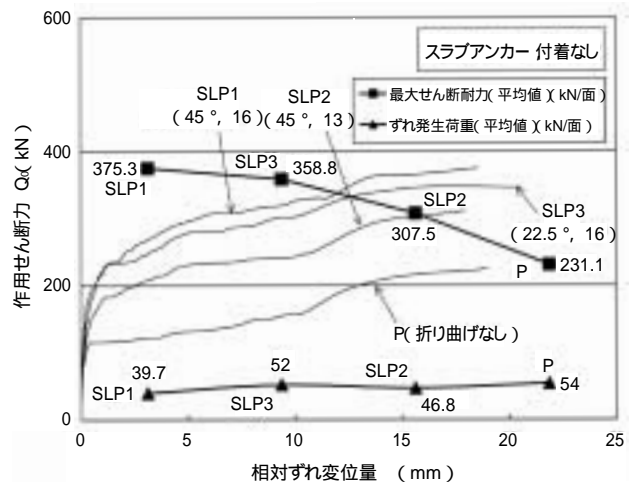


図5 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

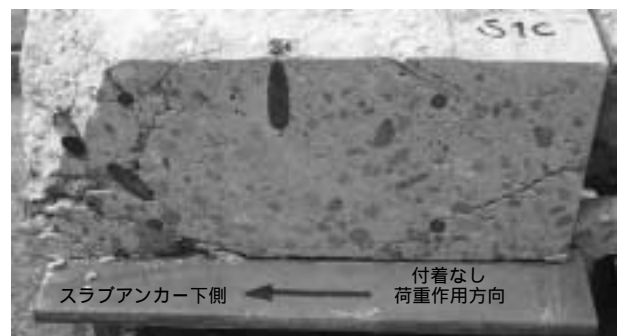


写真1 破壊性状 (タイプSLP1)

下側の折り曲げ筋先端からコーン状の押抜きせん断破壊が確認された。また、スラブアンカーの破断は確認されなかった。試験体の破壊性状を写真1に示す。

(3) 繰返し載荷の影響

繰返し載荷後、押抜き試験を行った試験体(タイプSLB2)と繰返し載荷を行っていない試験体(タイプSLB1)の作用せん断力 - 相対ずれ変位量の関係を図6に示す。ずれ発生荷重は、繰返し載荷を行った試験体の方が小さく、繰返し載荷を行っていない付着を除去した試験体と大差がない。繰返し載荷をすることにより、鋼フランジに接するコンクリートの界面で若干せん断破壊を起こしたのではないかと考えられる。ずれ定数は繰返し載荷を行った方が大きかった。これは、繰返し載荷をすることにより、付着の影響が小さくなり、ずれ発生荷重が小さくなっているからである。最大せん断耐力は繰返し載荷を行った試験体の方が大きくなった。これは繰返し載荷をすることにより、作用せん断力が試験体のスラブアンカーに均等化されて作用したのではないかと考えられる。このことについては、試験体数も少ないこともあり、推論の域を出ないと考えている。繰返し載荷を行った試験体と、行っていない試験体の破壊性状を写真2, 3に示す。ともにスラブアンカー下側の折り曲げ部の根元での圧壊が起こっている。しかし繰返し載荷を行った試験体は、せん断力が均等に作用していると考えられるため、繰返し載荷を行っていない試験体に比べ、圧壊はそれほど激しくはなかった。繰返し載荷を行った試験体、行わなかった試験体ともに押抜き試験終了後、スラブアンカーの破断は確認されなかった。200万回の繰返し載

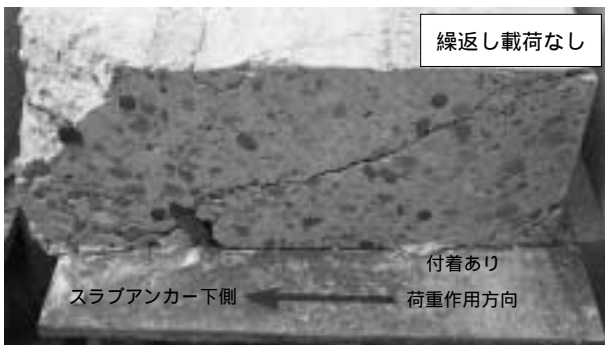


写真2 破壊性状 (タイプSLB1)

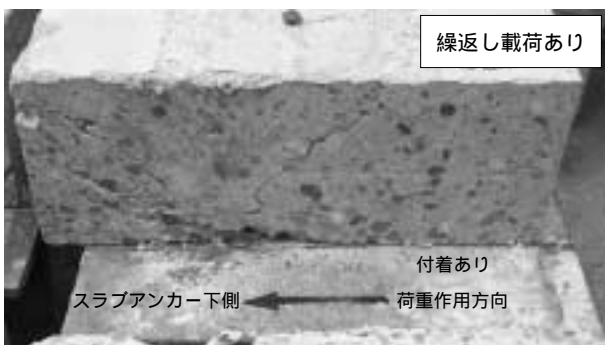


写真3 破壊性状 (タイプSLB2)

荷では付着も完全に切れておらず、スラブアンカー自体にはせん断力はあまり作用していなかったのではないかと考えられる。

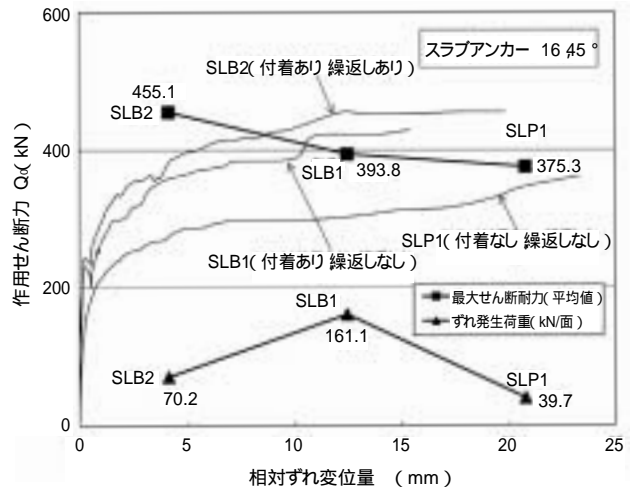


図6 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

(4) スタッドジベルとの比較

スラブアンカーとスタッドジベルの作用せん断力 - 相対ずれ変位量の関係を図7に示す。付着のあるスラブアンカーの試験体(タイプSLB1)と付着のあるスタッドジベルの試験体(タイプSTB)である。スラブアンカーの最終破壊状態はスラブアンカー下側の折り曲げ筋根元でのコンクリートの圧壊で、スラブアンカーの破断は見られなかった。一方、スタッドジベルは溶接余盛り上面のスタッド軸部でせん断破壊しており、スタッド根元部ではコンクリートの局所的な圧壊が確認された。

最大せん断耐力はスラブアンカーの試験体で393.8 kN/面、スタッドジベルの試験体で591.4 kN/面であった。スタッドジベルは片面に3本配置しているため、スタッドジベル1本あたり197.1 kN/本であった。よって1個のスラブアンカー(16 mm)の最大せん断耐力は2本のスタッドジベル($d=19$ mm)に相当することがわかった。

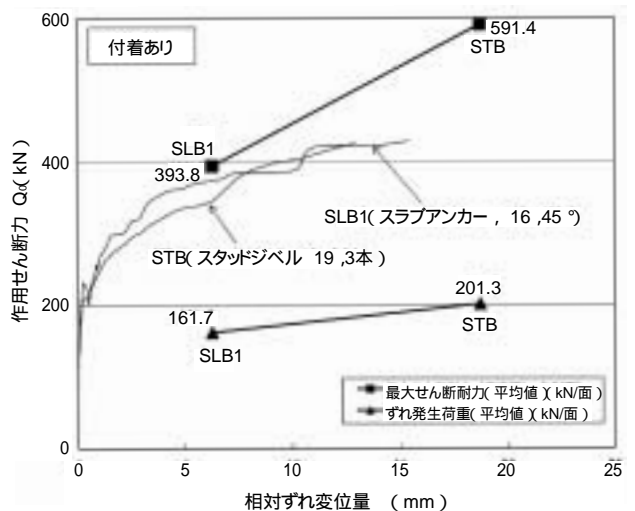


図7 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

5. 実橋への適用

非合成桁としてスラブアンカーを用いた「京都第二外環状道路宇治川橋」では、実挙動である合成効果を積極的に取り入れ、水平補剛材の省略などを行っている。本橋では、押抜きせん断試験より得られたスラブアンカーのずれ特性を用いて、ずれ止め機能を期待したスラブアンカーの配置を行っている。以下にその概要を述べる。

通常、非合成桁としてのスラブアンカー（16）の配置は、場所にかかわらず1 m程度の間隔で配置しているが、活荷重などの大きな衝撃を受ける桁端部においては、スラブアンカーの破断などの破損事例が報告されている。本橋ではこれらの破損事例から、合成桁としての挙動を反映し、耐久性を考慮したスラブアンカーの配置を行った。

本橋を合成桁として設計した場合、桁端部でのスラブアンカー1本あたりに作用する水平せん断力は216 kN/本であった。本橋の上フランジは原板プライマーで、本橋の上フランジに最も近い状態の試験体は、付着のない試験体（タイプSLP1）である。タイプSLP1の押抜きせん断試験結果は、最大せん断耐力が375.3 kN/面、本橋の水平せん断力216 kN作用時のずれ量は1.9 mmであった。実験結果の最大せん断耐力と本橋の水平せん断力を比較すると、安全率とずれ量を考慮すると、1 m間隔の配置では問題があるように思える。そこで、コンクリートの圧壊がなく、ずれ量0.1 m程度および最大せん断耐力（終局耐力）に対する安全率を3.5程度確保するようにスラブアンカーを配置した。スラブアンカーの配置は500 mm間隔、スラブアンカー1本あたりの水平せん断力は108 kN/本となる。

6. まとめ

本研究では、スラブアンカーの合成効果を明らかにするため、実橋に近い状態で押抜きせん断試験を行った。本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) スラブアンカーを溶接する鋼フランジ面に付着があることにより、最大せん断耐力、ずれ発生荷重は大きくなる。よって、鋼桁上フランジとコンクリート床版との付着面の処理状態は、ずれ剛性に大きく寄与している。また付着の有無に関係なく、破壊性状はスラブアンカーの折り曲げ筋根元のコンクリートの局所的な圧壊が支配的であった。
- (2) スラブアンカーの鉄筋径は、最大せん断耐力に与える影響が大きかった。しかし、折り曲げ角度は最大せん断耐力にそれほど大きな影響を与えないことも明らかとなった。破壊性状は、付着面の状態、スラブアンカーの鉄筋径、折り曲げ角度に関係なく、下

側折り曲げ部前面のコンクリートの圧壊が支配的であり、また、スラブアンカーの折り曲げ筋先端からコーン状の押抜き破壊が確認された。また、スタッドジベルと比較し、スラブアンカー（16 mm）1個あたりの最大せん断耐力は、スタッドジベル（ $d=19$ mm）2本に相当することがわかった。

- (3) 疲労設計荷重レベルで繰返し載荷を200万回作用させた結果、繰返し荷重を載荷させることにより、RC床版と鋼桁上フランジ面の付着は切れやすくなることがわかった。よって実際の橋梁では、付着が切れるレベルの繰返し荷重、回数が作用するとスラブアンカーにせん断力が作用し、スラブアンカーが破断してしまうと考えられる。また繰返し載荷試験を行うことにより、せん断耐力が大きくなった。これは、繰返し荷重を作用させることにより、作用せん断力がスラブアンカー自身に均等に作用するのではないかと考えられる。
- (4) 実橋と近い状態での押抜き試験では、試験体を拘束することにより、最大せん断耐力、ずれ発生荷重は大きくなった。これは試験体を拘束することによる鋼フランジ面とコンクリート床版との間の摩擦等が影響していると考えられる。よってスラブアンカー、付着だけでなく、死荷重による摩擦等がずれ抵抗力に影響している。
- (5) 実橋へ適用した場合、スラブアンカーに作用する水平せん断力が小さい橋梁では、スラブアンカーのずれ抵抗力と付着の合成効果を考慮し、合成桁としての設計が可能となる。

本実験を行うにあたり、多大な助言ご指導をいただきました。摂南大学の平城弘一助教授に紙面を借りて心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，鋼橋編，1996.12.
- 2) 松井，平城，石崎：スタッドの非合成桁橋への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，1997.
- 3) 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，1991.
- 4) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計要領（案），1999.12.