

鋼構造物摩擦接合部の設計法に関する研究

工務部 設計課 鈴木 巖
大阪管理部 第1維持事務所 加賀山 泰一
神戸建設部 東神戸工事事務所 金 治 英 貞

要 約

本論文は現設計法による鋼構造物摩擦接合部の問題点を追跡し、それを改善するために行った一連の実験、検討の報告を行うものである。

現接合部における問題点とは、一言で言えばボルトの多列化である。多列化は一般に断面力の増大による結果と見られがちであるが、現設計にメスを入れることにより他の多列化増長要因があることが判った。

そこで、鋼桁、鋼製橋脚、長大橋を例として各種実験（プレートガーダー載荷実験、ボックスガーダー載荷実験）および諸検討を実施し、力学的諸性状（すべり耐力、応力分布等）の把握を試みた。

その結果および設計法検討によりボルト本数の低減等の摩擦接合理化の可能性が認められ、今後の設計法に反映できる研究を行ったのでここに報告する。

ま え が き

現在、阪神高速道路公団では多くの鋼構造物が採用されており、今後ともこの傾向は続くものと予想される。この鋼構造物は運搬条件、架設条件などによりブロック化が余儀なくされ、建設現場においてこれらをつなぎ合わせる必要がある。

近年、溶接技術の向上に伴い景観的に優る現場溶接が用いられるケースが増えてきたが、ここでは施工性、汎用性に優る高力ボルトによる摩擦接合の設計の合理化について研究を行った。つまり、鋼桁、鋼製橋脚、長大橋を例として、現状の継手部のボルトの多列化の原因を追跡し、これを改善

するための諸検討および安全性検討を行った。具体的には、プレートガーダーおよびボックスガーダーによる載荷実験、数値解析、そして試設計等である。

結論としては、これら一連の検討により摩擦接合部の合理化つまりボルト本数の低減および設計施工の簡略化が可能であることが判った。そして、検討結果に裏付けされた現設計法の改善点について提案を行った。

1 鋼 桁

1-1 現状と問題点

現在の鋼桁の摩擦接合部の設計法は、昭和55年

に改訂された道路橋示方書¹⁾(以下「道示」と称する)を踏襲した曲げ応力の三角形分布仮定による設計法である。これによると特に桁高の高い桁で大きな曲げモーメントが作用している場合には、ウェブ継手をモーメントプレートとシャーププレートに分けて設計が行われる。

この場合、作用モーメントはモーメントプレート、シャーププレート、フランジプレートの3部分で分担されることから、事実上のすべり耐力を把握することが非常に困難で現構造物の安全性評価において問題が残る。一方、施工においては作業性、安全性の面でウェブ継手の一枚化が望まれている。

よって、実験および数値解析³⁾により継手形状のすべり耐力におよぼす影響等を調査し、現設計法の見直しと設計合理化について考察する。

1-2 実験²⁾・3)

(1) 実験目的

実験目的は以下のとおりである。

- ①継手形状がすべり耐力におよぼす影響を調査する。つまりモーメントプレート、シャーププレート、フランジプレートのすべり耐力に対する寄与度を調査する。
- ②ウェブ上下端部のクリアランス部の曲げ応力の分配率を調査する。

(2) 実験方法

①実験供試体

実験供試体は全長4810mm、桁高832mmのプレートガーダーである。接合部はスパン中央部に設けており、モーメントプレートボルト本数を変化させた3形状(A桁:5列、B桁:4列、C桁:2列)の継手を設定している(図-1参照)。

さらに、ウェブ上下端部のクリアランス部の曲げ応力の分配率を調べるため、ウェブ最外ボルト列を排除する継手形状もそれぞれについて設定した。

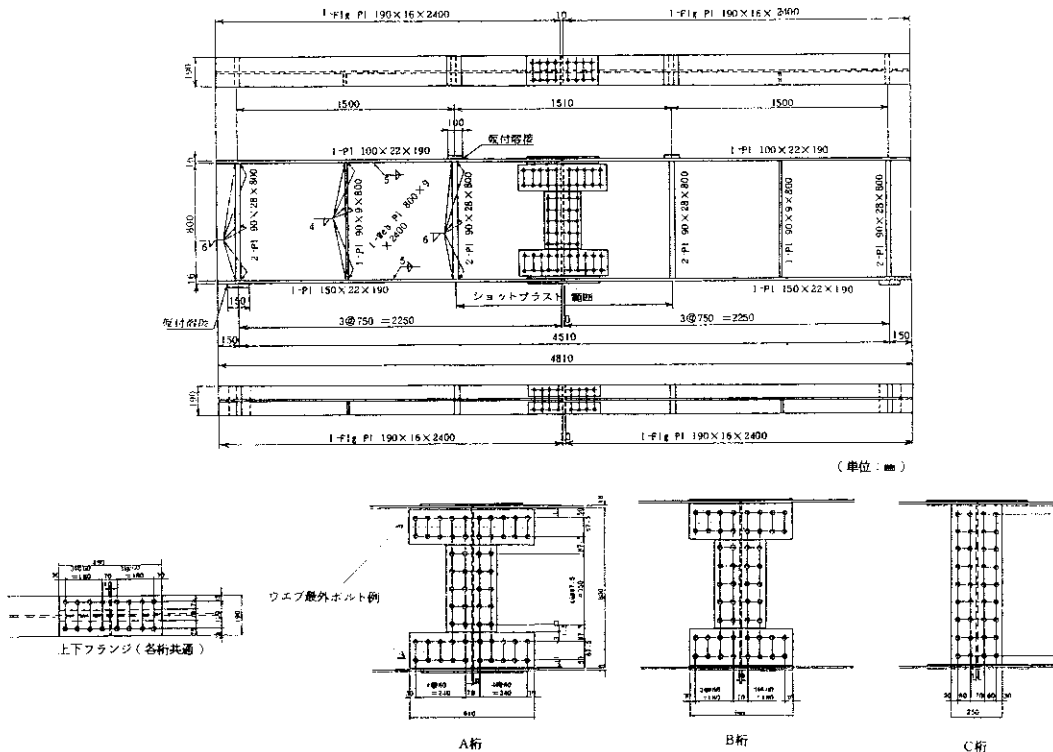


図-1 プレートガーダー供試体

② 載荷方法

載荷試験は、川鉄建材中央研究所に設置されている 300tf 構造物耐圧万能試験機を用いて行った。載荷は、スパン 3 等分点の 2 点載荷による純曲げ



写真-1 プレートガーダー載荷試験

載荷である（写真-1 参照）。

（3）実験結果

①各プレートの曲げモーメント分担率は継手形状により異なるが、全ての形状においてフランジプレートの分担力が卓越する。その値はモーメントプレート多列型（A 桁）が若干小さく約 63%、少列型（C 桁）が約 69% である（図-2 参照）。

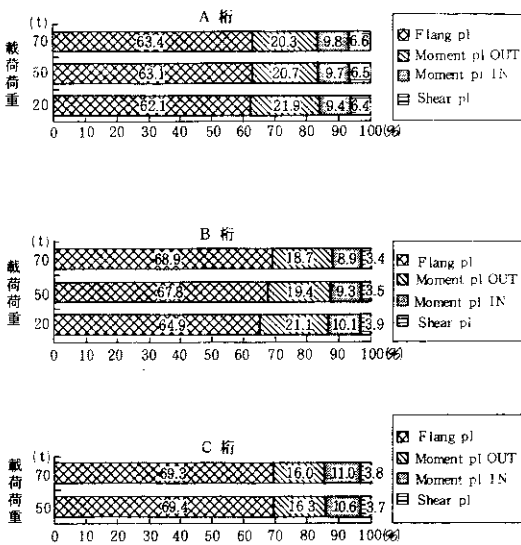


図-2 曲げモーメント分担率

②すべり耐力は、A 桁、B 桁、C 桁の順に 1 割程度づつ低下するが、ボルト 1 本あたりの耐力に換算すると逆の傾向となる（表-1 参照）。

③ウェブ上下端クリアランス部のモーメント分配率は A、B、C 桁ともにフランジ部で約 7 割である（表-2 参照）。

表-1 すべり耐力（プレートガーダー試験）

桁名	すべり音（大）の発生荷重 (tf)	P-δ 曲線の曲率最大点荷重 (tf)	ボルト本数
A 桁	110.0 (1.45)	105 (1.38)	76 本
B 桁	103.5 (1.52)	98 (1.44)	68 本
C 桁	87.5 (1.68)	85 (1.63)	52 本

注：（ ）内はボルト 1 本あたりのすべり耐力

表-2 最外ボルト列のモーメント分配率

	A 桁	B 桁	C 桁
フランジ (%)	70.0	70.6	71.2
モーメントプレート (%)	20.8	24.2	25.6
シヤープレート (%)	9.2	5.2	3.2

1-3 考察および対策

以上の結果によりモーメントプレートとシヤープレートのボルト本数の違いがあまり大きくなければ、ウェブプレートは 1 枚とすることが可能であり、設計、施工の簡略化におけるメリットが大きい。

安全性の評価については、実験結果のみでは困難であり数値解析結果³⁾を参考にする。この解析は、離散化モデルによって構成された鋼桁摩擦接合部シュミレーションモデルにボルトの配置、軸力等を入力することによりすべり耐荷モーメント、各ボルトの摩擦負担力等を求めるものである。

ここで、現設計法による構造物にモデルを適用し設計モーメントとすべり耐荷モーメントを比較した。その結果、すべり耐荷モーメントは設計モーメントを上回るが、ボルト 1本当りの許容力として与えている安全率 1.7を下回る結果となった。

これは、シャーププレートとは剛性（ボルト列）の異なるモーメントプレートを有していることから、ウェブ内曲げ応力が三角形分布を呈さずモーメントプレート部に集中し、中立軸付近のボルトが摩擦負担に対し有効に働いていない結果と考えられる。この不整形の応力分布はウェブ内のスプライスの剛性を均等にする事つまりボルト列を揃えることで解消されることから、ウェブプレートの 1枚化は鋼桁としての摩擦接合部の安全性向上と各鋼桁摩擦接合部の安全性均一化に対して有効である。

2 鋼製橋脚

2-1 現状と問題点^{5), 6), 7)}

通常の橋脚の継手断面では多くの場合面外曲げに比べ面内曲げが卓越しているが、ボルト配列に着目するとフランジボルト本数に比べウェブボルト本数が多くなっているケースがあり、力学的に不合理な配列になっている（写真-2参照）。

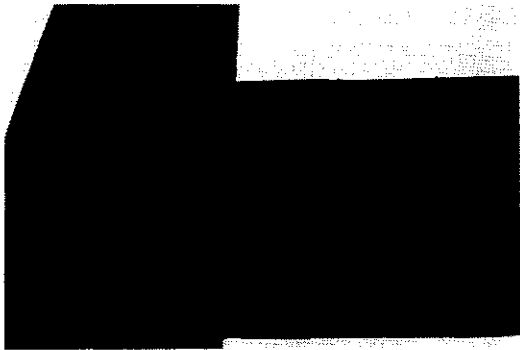


写真-2 鋼製橋脚の現状

上記の不合理なボルト配列に加え、ダブルデッキ構造等による断面力のアップ、杓座位置、輸送を考慮したブロック割によって生じる隅角部近傍継手が原因で、道示で示されている1列あたり

の最大許容本数12本も逸脱する継手が生じている。

これらを増長している要因としては、ボックス断面特有のフランジ、ウェブの近接ボルトの取り合いが挙げられる。つまり、フランジ面を先にボルト締めすると、ウェブ面のボルトはボルト締めつまりレンチ作業の関係でウェブ端近傍に配置することは不可能であり、ある程度のクリアランスが必要である（図-3参照）。

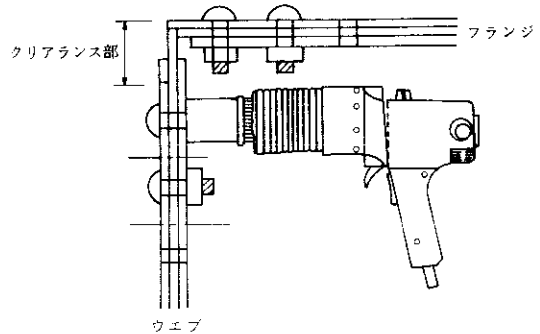


図-3 フランジ、ウェブの取り合い状況

このため、設計においてはこのクリアランスをあらかじめ設け、クリアランス部の伝達応力を本来のウェブ最外列伝達応力に加えてウェブ最外ボルト列で受け持たせることとしている。この結果、最外ボルト列本数により支配されたウェブ添接は非常にボルトの多い継手となっている。

2-2 実験^{5), 8)}

(1) 実験目的

鋼製橋脚におけるウェブクリアランス部のモーメント分配状況を定量的に把握するため、実際の構造および断面力の作用を考慮した載荷試験を行うこととした。

(2) 実験方法

① 実験供試体

供試体は載荷ボックス部長さ7400mm、桁高1000mmそして水平曲げ載荷アームを付したコの字形であり、着目箇所はボックスガーダー中央部の摩擦接合部である。継手形状は、現設計法に準じるウェブ多列型（フランジ2列、ウェブ3列）と合理的

設計法に準じるフランジ多列型(フランジ3列、ウェブ2列)の2形状を設定した(図-4参照)。

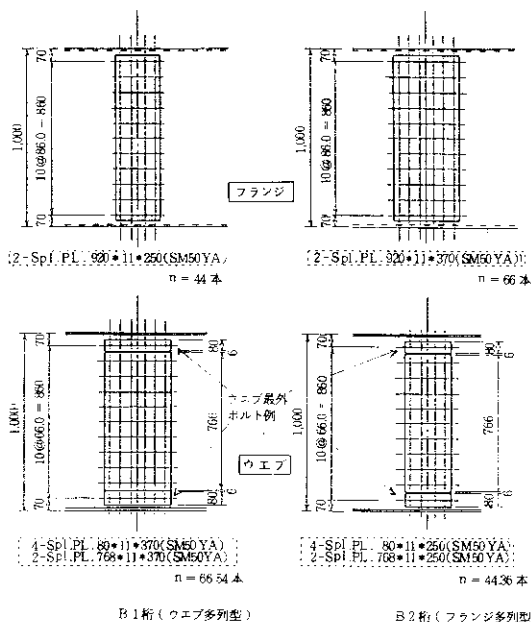
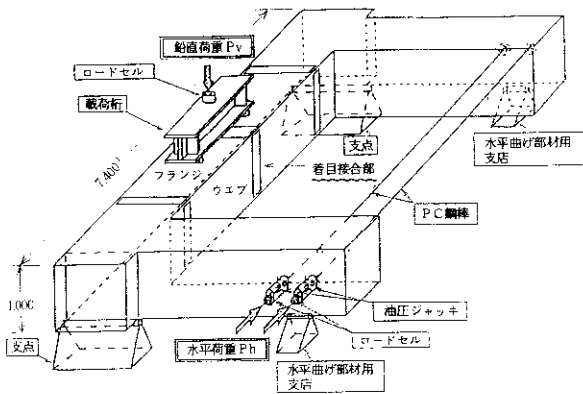


図-4 ボックスガダー供試体

さらに、ウェブクリアランス部の曲げモーメントの分配率を調べるため、ウェブ最外ボルト列を排除する継手形状もそれぞれについて設定した。

② 載荷方法

実験目的から二軸曲げ載荷とする必要があったため、写真-3に示すように面外曲げはPC鋼棒の

緊張による段階載荷、面内曲げは鋼桁同様の試験機による逐次載荷とした。これより、面外曲げと面内曲げの比率はある範囲内で任意に設定でき、実構造物における断面力に対する評価もほぼ正確に行うことができた。

2-3 考察および対策

本実験により、現設計法においてすべてウェブ(3) 実験結果

①ボルト 1本あたりのすべり耐力を比較すると、ウェブ多列型よりもフランジ多列型の方が1割程度大きい(表-3参照)。

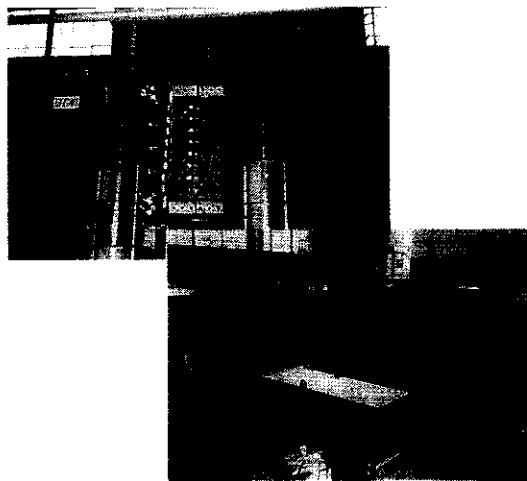


写真-3 ボックスガダー載荷試験

表-3 すべり耐力(ボックスガダー試験)

試体名	すべり音発生荷重(tf)	ボルト本数
B1桁	135 (0.69)	196本
B2桁	160 (0.78)	204本

注: ()内はボルト1本あたりのすべり耐力

②ウェブ最外ボルト列を除去した実験結果をみると、ウェブクリアランス部の曲げモーメント分配率はフランジ分が約55%~65%である。(表-4参照)。

表-4 クリアランス部曲げモーメント分配率

B1桁(ウェブ多列型)				B2桁(フランジ多列型)			
P_{H1} (tf)	P_{V1} (tf)	フランジ (%)	ウェブ (%)	P_{H2} (tf)	P_{V2} (tf)	フランジ (%)	ウェブ (%)
0	50	63	37	0	50	63	37
	75	61	39		75	64	36
30	50	62	38	30	50	59	41
	75	-	-		75	59	41
60	50	65	35	60	50	55	45
	75	67	33		75	54	46

P_{H1} : 水平荷重、 P_{V1} : 鉛直荷重

に流れると仮定されているウェブクリアランス部の応力は、形状効果等による多少の影響があるとは思われるものの、その多くはフランジに流れることが確認された。

これより合理的かつ経済的なボルト配列が可能であり、具体的にはフランジの分担曲げモーメントをクリアランス部の5割前後とするのが妥当であると考えられる。これは、実験により求められたウェブクリアランス部の曲げモーメント分配率と応力分布形状から逆算してその負担範囲を求めたものである⁹⁾。なお、実橋脚に対して行った試算によればボルト本数は2割程度低減できるという結果を得ている。

3 長大橋

3-1 現状と問題点

道示においては、1列あたりの好ましい最大ボルト本数は8本、許容できるボルト本数は12本と

されているが、この規定はその原理を考えると長大橋においても例外とはならない。しかしながら、長大橋故の大断面力によりどうしてもこの規定が守れない場合、その安全性に対する各種要因の整理検討を行い総合的な判断を下さなければならない。以下に、東神戸大橋における多列継手(n=14本)について行った検討結果¹⁰⁾を紹介する。

3-2 検討

摩擦接合における破壊までの挙動は、ボルト各部の局部すべり→主すべり→ボルトの支圧によるボルトあるいは部材の破断というのが一般的である。そこで、この挙動において問題となる項目について検討を行った。

(1) すべり係数の変化

ボルトの多列化による最大の検討項目はすべり係数の低下である。これについては、過去に各機関において大規模な実験が行われている。この中でも比較的新しい実験は本四公団によるもので、ボルト列数3、6、12、18列についての短冊引張試験が行なわれている¹¹⁾。その結果、すべり係数は順に0.551、0.537、0.515、0.544と必ずしも多列になると低下するとは断定できないと報告されている。

(2) ボルトおよび部材の破断

リベットのアンボトニング現象同様に、摩擦接合においてもせん断力は不均一な分布を示す。これより、ボルト端部においてはボルトの支圧によるボルト自身の破断および部材破断の可能性が生じる。

そこで、継手を連続体とみなし、母材、添接板間のせん断力を算出し、これを用いてボルトおよび部材端部の破断に対する安全性検討を行った。

①せん断力分布

せん断力は、作用荷重として全強の75%と実応力の2ケース、ボルト列数として8、12、14、16の4ケースを設定しこのそれぞれの組合せに対し求めた。その結果、ボルト本数に関わらず端部においてせん断力が卓越し、中央部ボルトはあまり寄与していない結果となった(図-5参照)。

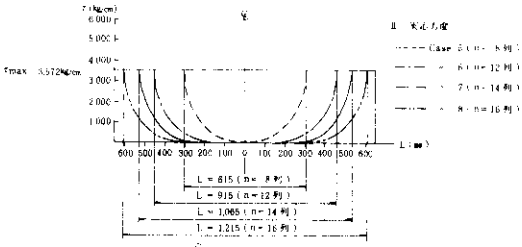
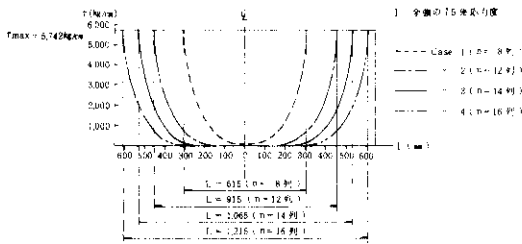


図-5 多列継手のせん断力分布

また、上記せん断力は母材と添接板間に相対すべりが生じないと仮定した計算であり、これは明らかに端部ボルトの限界摩擦力を無視した計算である。そこで、端部すべりを考慮したせん断力分布を作用荷重=実応力、 $n=14$ 本について求めた(図-6参照)。

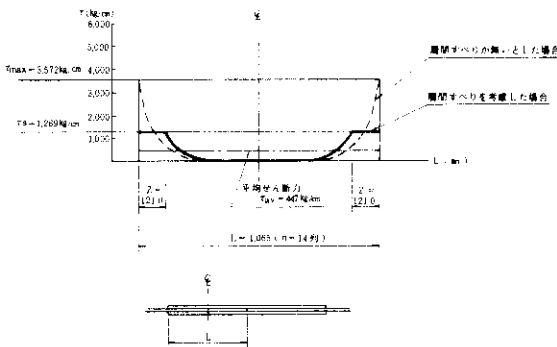


図-6 すべりを考慮したせん断力分布

②端部ボルトおよび部材の安全性

端部ボルトの受け持つべきせん断力 ρ_{end} をもとに、ボルトと部材の安全性の評価を行う。

ボルト: F10T $\rightarrow \sigma_{ba}=10000\text{kg}/\text{cm}^2$

$$\tau_{ba} = \sigma_{ba} / \sqrt{3} = 5774\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$\tau = \rho_{end} / (\pi d^2 / 4) = 3722\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$\therefore \tau_{ba} > \tau \rightarrow \text{安全}$$

部材 : SM58 $\rightarrow \sigma_{ba}=5800\text{kg}/\text{cm}^2$

$$\tau_{ba} = \sigma_{ba} / \sqrt{3} = 3349\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$\tau = \rho_{end} (2bt) = 1211\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$\therefore \tau_{ba} > \tau \rightarrow \text{安全}$$

ここで、 σ_{ba} : 許容応力度

τ_{ba} : 許容せん断応力度

τ : 作用せん断応力度

b : 部材幅

t : 部材厚

3-3 考察および対策

上記検討により、すべり係数低下あるいはボルト、部材破断がないことからこの多列継手($n=14$ 本)の安全性が確認された。

ここでの検討結果から判るように、ボルト本数の低減はせん断力の平滑化に寄与することから、継手の安全性を高めるものと考えられる。よって、配列幅の広い長大橋においては最適配列となる太径ボルトの使用によるボルト低減を考えるべきであろう。

実際、東神戸大橋においてもこの多列継手部において太径(M24)ボルトの使用によりボルト列数を2列低減することができた。

あとがき

本研究はボルトの多列化問題に端を発した研究であるが、ここでは鋼桁、鋼製橋脚を具体例として合理化案を、長大橋を例に安全性照査法を示し得ることができた。また、今後の取り組むべき課題を挙げるとすれば、継手部に対する母材全強の75%規定の見直し^{4), 6), 7)}であろう。

今後、経済的かつ施工性と景観に優れたボルト継手の構造物がつくられるよう道示および各設計基準等への反映が速やかに行われることを望む次第である。

最後になりましたが、本研究の総括的指導にあ

たられた故西村昭神戸大学教授に深謝の意を示し、またご冥福をお祈り致します。さらに、阪神高速道路公団技術審議会および鋼構造検討委員会、神戸大学小林秀恵技官および関係諸氏、(株)片山鉄工所石原靖弘氏、川鉄建材中央研究所、東神戸大橋JV各位のご指導ご協力のもとに本研究が成ったことに感謝致します。

参 考 文 献

- 1)日本道路協会：道路橋示方書・解説 鋼橋編、平成 2年 2月
- 2)中谷：鋼 I 桁断面桁摩擦接合継手の設計法に関する研究、神戸大学修士論文、昭和55年 2月
- 3)金治：鋼桁摩擦接合部の限界状態設計に関する研究、神戸大学修士論文、昭和63年 2月
- 4)財団法人建設工学研究所、阪神高速道路公団：鋼製橋脚摩擦接合部の設計法に関する調査研究報告書、平成 1年 3月
- 5)財団法人建設工学研究所、阪神高速道路公団：鋼製橋脚摩擦接合部の設計法に関する調査研究（その 2）報告書、平成 2年 3月
- 6)阪神高速道路公団技術審議会鋼構造分科会：鋼製橋脚摩擦接合に関する実験概要、平成 1年12月
- 7)西村、小林、加賀山、金治：鋼製橋脚摩擦接合部の設計法に関する考察（その 1）、土木学会第45回年次学術講演会概要集、平成 2年 9月
- 8)西村、小林、石原、金治：鋼製橋脚摩擦接合部の設計法に関する考察（その 2）、土木学会第45回年次学術講演会概要集、平成 2年 9月
- 9)阪神高速道路公団鋼構造検討委員会：鋼橋脚摩擦接合部の設計、平成 2年 9月
- 10)阪神高速道路公団、東神戸大橋JV：主塔塔柱HTB継手J11腹板継手部の安全性に関する検討、昭和63年11月
- 11)馬場、田島、平野：太径多列高力ボルト摩擦継手試験、橋梁と基礎、昭和61年 1月