

床スラブに接着したシアキープレートによる 鋼構造用耐震補強ブレース接合部の耐力評価

ESTIMATION OF STRENGTH OF SEISMIC RETROFITTING BRACE JOINT USING SHEAR-KEY PLATE ADHERED TO CONCRETE SLAB FOR STEEL STRUCTURE

市川 康*1, 鈴木一弁*2, 原田公明*3, 山田 哲*4, 和田 章*5

Yasushi ICHIKAWA, Kazuaki SUZUKI, Hiroaki HARADA,

Satoshi YAMADA and Akira WADA

Incorporating additional braces is representative method for seismic retrofit for steel structure. In the case of installing the braces, the welding of steel and chipping of floor concrete cause noise and vibration. In order to solve this problem, the previous paper proposed a new method using a shear-key plate adhered to concrete slab with epoxy resin. The failure of this method is brittle, but on the assumption that a buckling restrained brace with low yield steel of its core is applied, this joint is useful for a practical structure. This paper reports the strength of the adhered portion.

Keywords : Buckling Restrained Brace, Epoxy Resin, Chemical Anchor, Shear Strength of Concrete

座屈拘束ブレース, エポキシ樹脂, 接着系アンカー, コンクリートのせん断強度

1. 序

兵庫県南部地震以降、既存不適格建築物を対象とした耐震診断、耐震補強の必要性が認識されるようになり、研究・開発分野においても補強技術に関心が向けられ、新しい補強法についての研究^{1)~2)}も報告されるようになってきている。その中にはブレース等による強度型の補強だけでなく、地震エネルギーを塑性仕事に変換する鋼材ダンパー等による補強も提案され、応答変位や応答層せん断力についての低減効果が報告されている。

中低層鉄骨造を主な補強対象とし、既存骨組みには座屈拘束型のブレースをダンパーとして設置することを前提として、前報³⁾では図1に示すような接合方法を提案した。これは床スラブにエポキシ樹脂により接着したプレート（以下シアキープレート）によりブレース引張り力の水平成分をシアキープレートを介してスラブから梁に伝達させ、鉛直成分は柱に設けた高力ボルトにより柱スキンプレートの面内せん断力として柱に伝達する方法である（図2）。本接合方法の最終的な破壊はスラブからシアキープレートが剥離することで決まり、脆性的な破壊性状を示すが、座屈拘束ブレースの心材に降伏点上限値が管理された鋼材を用いれば、作用する力に明確な上限値が設定でき、実用に耐えられると考えられる。

本接合方法は在来工法で発生する現場溶接やスラブコンクリートのハツリ作業等の必要がないため、騒音・振動・粉塵等はほとんど発生しない。したがって建物を使用しながらの居ながら補強の可能性も広がる。

鉄骨造をブレースやダンパーにより補強する場合は、ブレース、ダンパー部分での剛性が低いと十分な補強効果が得られにくい。図3に示すようにスラブ上に接合用梁を設け、ブレースの引張り力を反対側の柱に伝える方法も考えられるが、ブレース軸力は接合用梁か

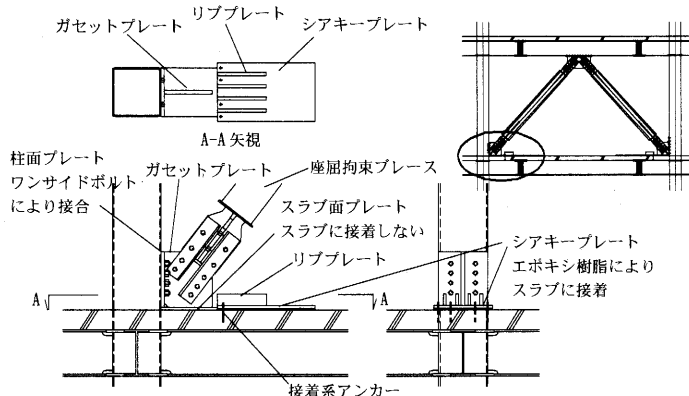


図1 シアキープレートによるブレース接合方法

*1 新日鉄エンジニアリング(株)建築・鋼構造事業部 工修

*2 新日本製鐵(株)建材開発技術部 修士(工学)

*3 (株)日建設計 構造設計主管・工修

*4 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)

*5 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Nippon Steel Engineering Corporation, M. Eng.

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

Senior Structural Engineer, Nikken Sekkei Ltd., M. Eng.

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

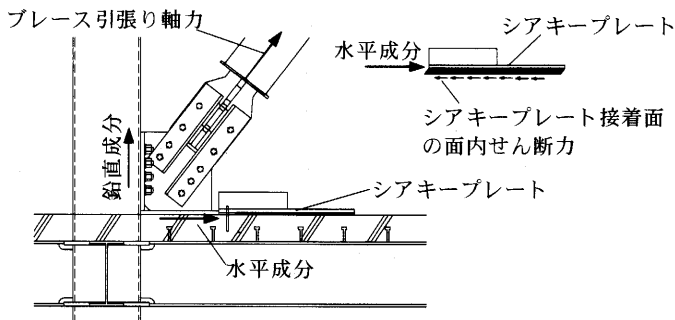


図2 接合部の応力伝達モデル

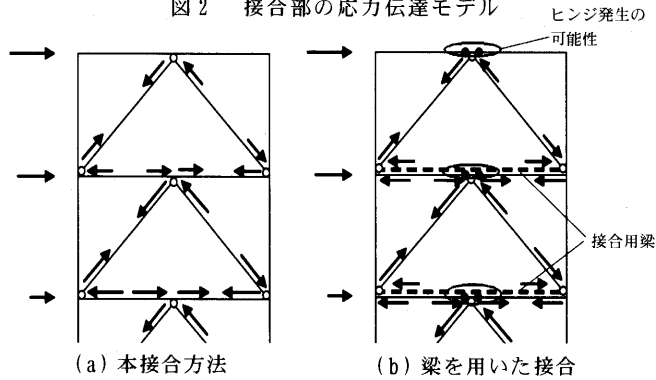


図3 接合法による応力伝達の差異

ら既存大梁を通して下階のブレースに流れるという長い伝達経路を
 経るため、ブレース剛性が低下し、十分な制振効果が得られない
 ことが予想される。また引張り側ブレースの剛性は圧縮側ブレース
 より低下するため、圧縮側ブレースの降伏が先行し梁中央にヒンジが
 発生することも考えられる。さらに、圧縮側ブレースの水平成分に
 加え、引張り側ブレースの水平成分が片側の柱に加わり、それが梁
 にも伝わることになり、ブレース2本分の力が集中することにも
 なる。

一方、本接合法による場合はブレース軸力が既存大梁を介
 して下階のブレースに伝達されるため、剛性低下が少なく、また
 ブレース軸力の伝達も両側の柱に分散されるため耐力が限定
 される既存骨組みの補強には適しているものと考えられる。

前報³⁾では接合部周辺を切り出した実大試験体による接合部
 実験と縮小モデルを用いたフレーム実験により、本接合法がブ
 レース軸方向力として750kN程度の接合部耐力を有し、1/75程度
 のフレーム変形にも追従できることを確認した。

これまでの実験ではシアキープレート接着面に加え、既存柱との
 接合部も耐力を負担していたためシアキープレート接着面の耐力が
 直接求められなかった。そこで本論文ではシアキープレートをスラ
 ブコンクリートに接着した試験体による2種類のせん断実験を行い、
 さらにFEM解析と比較することで、シアキープレート接着面の耐力
 を評価することを試みる。

2. 要素実験

シアキープレート接着面のすべり耐力を把握することを目的とし、
 スラブコンクリートにシアキープレートを接着した試験体を作成し、
 シアキープレート先端に水平力を作用させた。

2.1 実験概要

スラブに用いるコンクリートは普通コンクリートFc21と、既存建

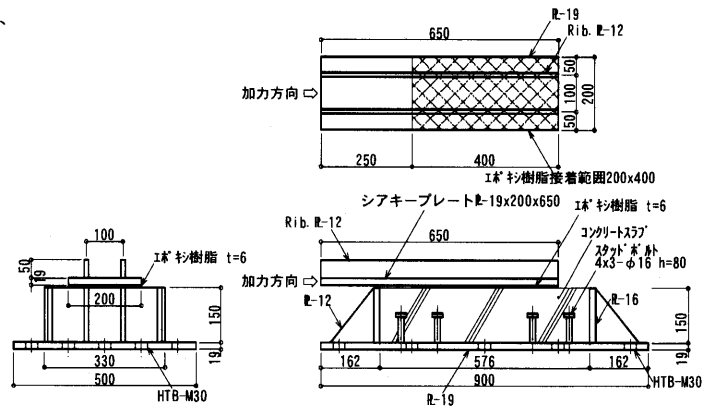


図4 要素実験試験体概要 (F24, L24 の場合)

表1 要素実験試験体一覧

試験体名	コンクリート 種別	接着範囲 (mm)	シアキープレート 形状 (mm)	コンクリートスラブ 形状 (mm)	スタッドボルト 本数
F22	普通	200×200	200×450	330×376	3×2
F24	普通	200×400	200×650	330×576	3×4
F26	普通	200×600	200×850	330×976	3×6
L22	軽量	200×200	200×450	330×376	3×2
L24	軽量	200×400	200×650	330×576	3×4
L26	軽量	200×600	200×850	330×976	3×6

表2 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張り強度 (N/mm ²)	ヤング率 (×10 ⁴ N/mm ²)
普通コンクリート	20.3	2.09	2.544
軽量コンクリート	12.9	1.24	1.124

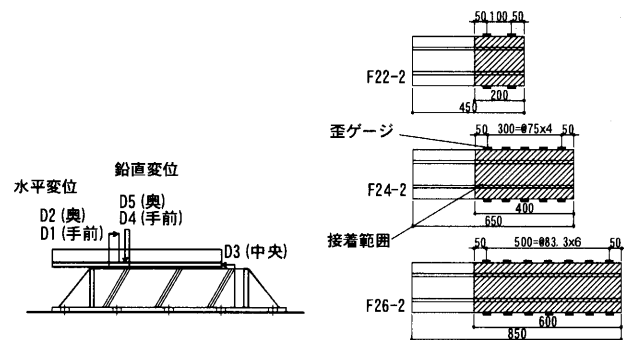


図5 変位計・歪ゲージ位置

物で軽量コンクリートが使用されていることも想定し、Fc15の軽量
 コンクリートの2種類とした。

座屈拘束型ブレースの耐力として700kN程度を仮定し、ブレース
 が45°の角度で設置されるとし、その水平成分490kNを必要となる
 耐力として試験体を設計した。接着面のせん断強度を文献²⁾により
 $0.313\sqrt{F_c}$ (N/mm²) とするとFc21の場合、必要となる接着面積は
 600mm×600mm程度、Fc15の場合、600mm×680mm程度となる。載
 荷装置の関係から幅方向を200mmとし、長さ方向を変化させ、図4
 に示すような試験体3種類を設定した。シアキープレートの厚さは
 19mmであり、それにリブプレート (PL12×50) を2枚溶接すること
 で、シアキープレート軸剛性を高め、接着面でせん断応力が均
 等に分布するようにしている。試験体は各ケース2体の合計12体
 を用意した (表1)。

スラブコンクリート材料試験結果は表2に示す通りである。シア
 キープレートとコンクリートスラブの間には厚さ6mmの隙間を設け、
 その間にエポキシ樹脂を充填している。エポキシ樹脂は鋼板接着用

表3 エポキシ樹脂材料試験結果

圧縮強さ (N/mm ²)	引張り強さ (N/mm ²)	引張りせん断接着強さ (N/mm ²)	圧縮弾性率 (N/mm ²)
120.4	59.2	18.0	3990

表4 最大荷重と平均せん断応力度

試験体名	接着面積 (mm ²)	最大せん断耐力 Qmax (kN)	平均せん断応力度 τ_u (N/mm ²)
F22-1	40000	122	3.05
F22-2	40000	143	3.58
F24-1	80000	328	4.10
F24-2	80000	347	4.34
F26-1	120000	507	4.23
F26-2	120000	423	3.53
L22-1	40000	94	2.35
L22-2	40000	94	2.35
L24-1	80000	204	2.54
L24-2	80000	201	2.51
L26-1	120000	284	2.36
L26-2	120000	295	2.46

エポキシ樹脂であり、JIS K 7208, 7113, 6850 による試験結果は表3 に示す通りである。鋼板同士を接着し引張り力を作用させる試験による引張りせん断接着強さは18.0 N/mm²と高く、コンクリートと鋼板を接着した場合はコンクリート側で破壊することになる。

スラブコンクリートはスタッドボルトにより下部プレートと一体化され、下部プレートは高力ボルトにより反力台に緊結されている。スタッドボルトはφ16mm、H=80mmであり表1に示す本数を各試験体に設けた。荷重は一方方向単調荷重である。

前報³⁾の接合部実験では16mm厚のシアキープレートがエポキシ樹脂を介しスラブ表面から6mmの位置に固定され、それをスラブ上に設置した22mm厚のスラブ面プレートが加力する形であった。スラブ面プレートの図心とシアキープレートの図心は3mmずれることになるが、接合部実験ではスラブ面プレートがスラブから2~3mm程度離れる様子が観察されたことから、シアキープレートに作用する水平力はほぼシアキープレート図心高さであると考え、水平力はシアキープレートの端面全体に作用させた。スラブ表面から水平力の合力までは15.5mmとなる。リッププレートには水平力は作用しないようにしている。

計測は図5に示すように、コンクリート表面からのシアキープレートの水平、鉛直変位を変位計により計測した。またF22, F24, F26のそれぞれ1体にシアキープレート側面に歪ゲージを貼付し、プレート軸方向の歪を計測した。

2.2 実験結果

表4に各試験体の最大荷重を示す。いずれの試験体も接着面下のコンクリートで破壊しており、脆性的な破壊性状を示した。実験後のコンクリート面を見ると、接着範囲のコンクリートが5~10mm程度の深さでほぼ水平に破壊しており、シアキープレートにはその部分のコンクリートが付着した状態であった。当初仮定したせん断強度は、普通コンクリートの試験体で1.41N/mm²、軽量コンクリートの試験体で1.12N/mm²となるが、本実験では最大荷重時の平均せん断応力度(最大荷重を接着面積で除した値)はその約2倍の数値を示した。

図6に荷重-変位関係を示す。変位は接着面始端でのシアキープレートの

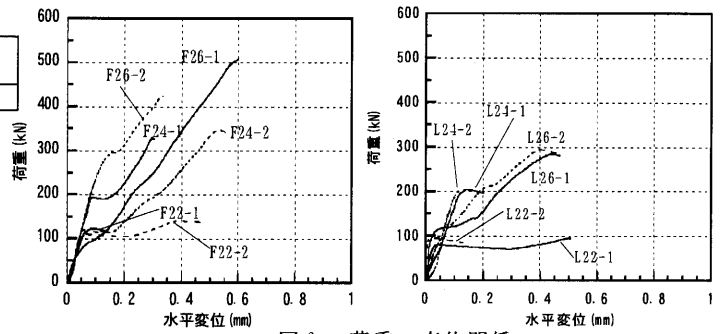


図6 荷重-変位関係

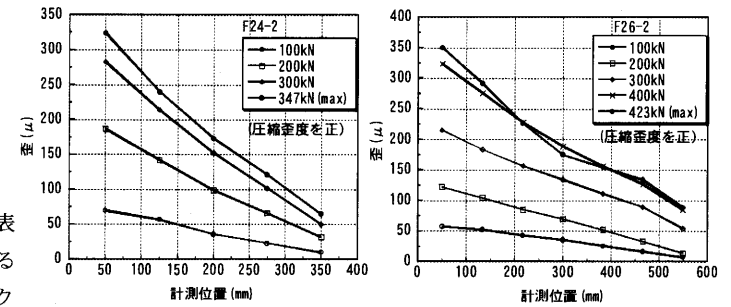


図7 シアキープレート側面の歪分布

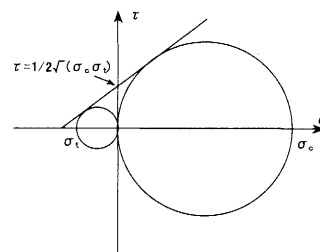


図8 Mohr-Coulombによるせん断強度

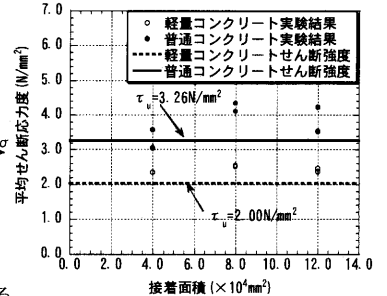


図9 せん断強度の評価

プレートとスラブコンクリート間の変位であり、図5に示す変位計D1, D2の平均値である。破壊時の変位は0.2~0.6mm程度と非常に小さい。荷重-変位関係はほぼ線形を示すが、L22, F22のように0.1mm以下の変位でほぼ最大耐力に達し、耐力を維持したまま0.5mm程度の変形まで達する試験体もあった。

図7にF24, F26のシアキープレート軸方向の歪分布を示す。歪はシアキープレート側面に貼付した歪ゲージの値の平均値であり、圧縮歪度を正としている。F24, F26での歪分布はほぼ直線であることから、接着範囲でのせん断応力分布がシアキープレート材軸方向に均等に分布していると考えられる。

本実験での接着面での耐力はコンクリートのせん断強度により決定される。せん断強度の算定方法の一つとして図8に示すようなMohr-Coulombの破壊説に基づく方法⁴⁾があり、コンクリートの圧縮強度 σ_c と引張り強度 σ_t から次式により与えられる。

$$\tau_u = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_c \sigma_t} \dots \dots (1)$$

図9に実験値と(1)式によるせん断強度との比較を示す。既往の文献⁵⁾では、コンクリートのせん断強度は実験方法により著しく異なることが報告されているが、本実験では実験値と(1)式とはほぼ良い対応を示していることから、本実験でのせん断強度は(1)式により評価可能と考えられる。

3. 実大シアキープレートによるせん断実験

要素実験により、接着面のせん断強度を概ね推定することができた。しかし実際に使用するシアキープレートは、大きな耐力を負担させようとすると材軸方向の長さが必要になり、シアキープレートの終端まで接着面のせん断応力度が均等に分布せず、想定したせん断耐力が得られないことが予想される。そこで実大シアキープレートを用いて水平力を作用させるせん断強度を実施した。

3.1 実験概要

図10に示すように、本実験では心材にLY225を用いた座屈拘束ブレースを45°の角度で既存建物に設置すると仮定した。座屈拘束ブレースを降伏軸力1500kN ($\sigma_y=225\text{N/mm}^2$)とし、LY225の降伏点の上限値である295N/mm²から座屈拘束ブレースに作用する軸力の上限値を2000kNとした。接着面の必要耐力はブレース軸力の上限値の水平成分に1.5倍の安全率を設け、 $P=2100\text{kN}$ と設定し、コンクリート圧縮強度を21、15N/mm²、引張り強度を圧縮強度の1/10として(1)式から接着面積を決定した。

実験概要を図11に示す。試験体はH形鋼梁、コンクリートスラブ、シアキープレートにより構成され、それを反力台に設置し、5000kNの油圧ジャッキによりシアキープレート先端に水平力を作用させた。反力は反力桁を介し、主にPC鋼棒により負担させた。

試験体は図12、13に示す2体であり、H400×400の大梁上に150mm厚のコンクリートスラブを打設し、その上にシアキープレートを6mmのクリアランスを設け設置し、間にエポキシ樹脂を充填した。エポキシ樹脂は要素実験で用いたものと同じ種類であり、表5にJIS K 7208, 7113, 6850による試験結果を示す。大梁とスラブはスタッドボルトで一体化されている。表6にそれぞれ

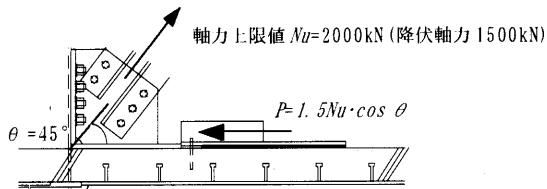


図10 接着面の必要耐力

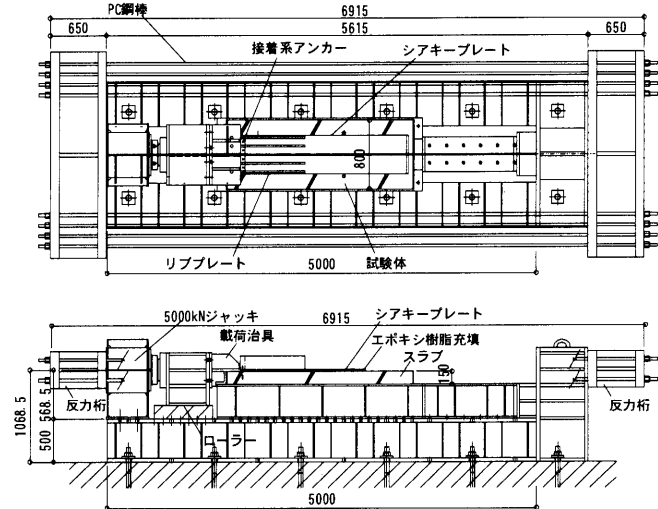


図11 実大シアキープレートによるせん断実験の概要

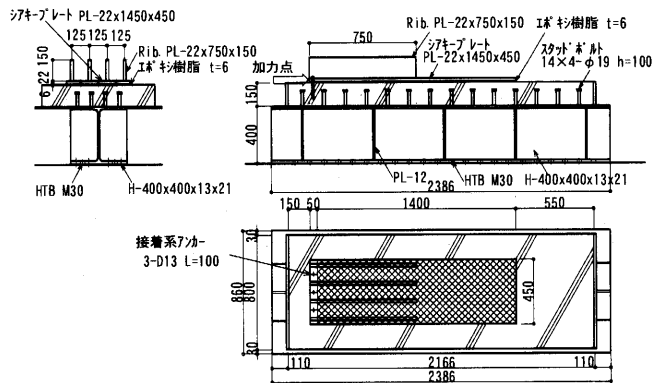


図12 F-1試験体の形状

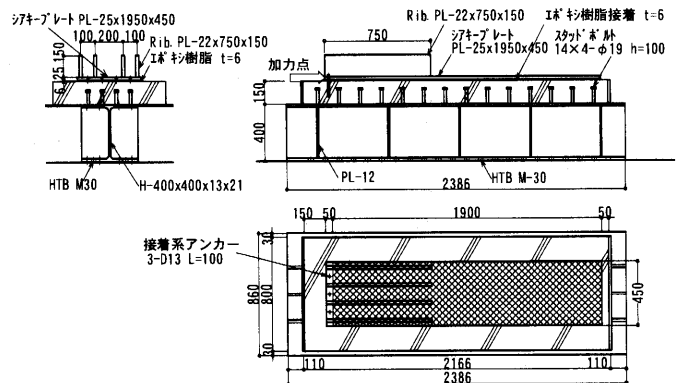


図13 L-1試験体の形状

表5 エポキシ樹脂材料試験結果

圧縮強さ (N/mm ²)	引張り強さ (N/mm ²)	引張りせん断接着強さ (N/mm ²)	圧縮弾性率 (N/mm ²)
119.0	53.4	19.9	3600

表6 試験体一覧

試験体	コンクリート	シアキープレート (mm)		リブプレート (mm)		接着面積 (cm ²)	予想耐力 (kN)
		板厚	W×L	板厚	h×L1		
L-1	Fc15	PL25	450×1950	4-PL22	150×750	8550	1845
F-1	Fc21	PL22	450×1450	4-PL22	150×750	6525	2250

表7 コンクリート材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張り強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
L-1	13.4	1.39	1.373
F-1	22.3	2.29	2.828

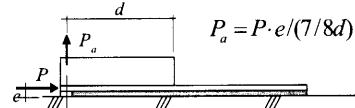


図14 接着系アンカーの設定

表8 接着系アンカーの検討

試験体	e (mm)	d (mm)	P (kN)	Pa (kN)	接着系アンカー引張り耐力 (kN)
F-1	17	725	2250	60.3	74.6
L-1	18.5	725	1845	53.8	65.9

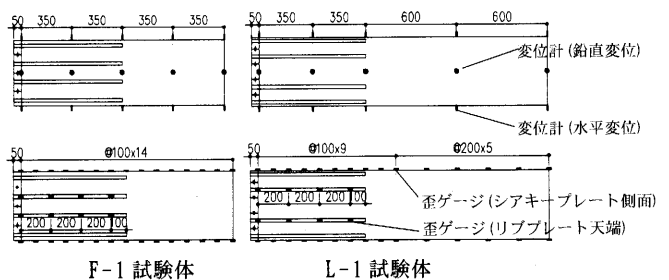


図15 変位計・歪ゲージ設置位置

の試験体のシアキープレートの形状および全接着面積に(1)式によるせん断強度を乗じて得られる予想耐力を示す。せん断強度はコンクリートの材料試験(表7)から得られた値を用いている。

シアキープレートは前報³⁾と同様、加力点側にリブプレートと接着系アンカーを設けている。これらは、シアキープレートの軸剛性を高めて接着面での長さ方向のせん断応力度分布を均等化し、また、コンクリート面から加力点が上にあることにより接着面に発生する曲げモーメントに抵抗するためである。接着系アンカーは予想耐力にスラブ面から荷重点までの高さを乗じて得られる曲げモーメントに抵抗できるように配置した(図14)。計算結果を表8に示す。接着系アンカーの引張り耐力は文献⁶⁾から求め、コーン破壊する場合の耐力である。

水平力は要素実験と同様の考えによりシアキープレート端面全体に作用させている。

計測は図15に示す位置に変位計と歪ゲージを設置することで行った。変位計によりコンクリート表面とシアキープレートの水平変位、鉛直変位を計測し、またシアキープレート側面とリブプレート天端での歪を測定した。

3.2 実験結果

3.2.1 最大荷重と破壊状況

各試験体の最大荷重は表9に示すとおりであり、全接着面積にせん断強度を乗じて得られる予想耐力を下回る結果となった。図16に荷重-変位関係を示す。変位はコンクリート表面とシアキープレート間の水平変位であり、シアキープレート材軸に対称に設置した変位計の平均値である。

水平変位は加力点から50mmの位置で最も大きく、シアキープレート終端に近づくにつれて小さくなる。F-1試験体の荷重-変位関係を見ると約1100kNまではほぼ線形関係であり、その後変位のみが増加、再度荷重が増加した後、破壊に至っている。L-1試験体は約600kNまではほとんど変位は発生せず、その後線形の荷重-変位関係を示し、最大荷重に達したあと破壊に至っている。2体の試験体とも加力点から50mmの位置の変位で0.5~0.6mm程度と非常に小さい変位で破壊した。破壊性状は脆性的であり、破壊箇所は要素実験と同様、エポキシ樹脂下の深さ5~10mmのコンクリートで、ほぼ水平に破壊していた。シアキープレートには5~10mm

表9 最大耐力

試験体名	コンクリート	接着面積(cm ²)	最大耐力(kN)
L-1	Fc15	8550	1250
F-1	Fc21	6525	1337

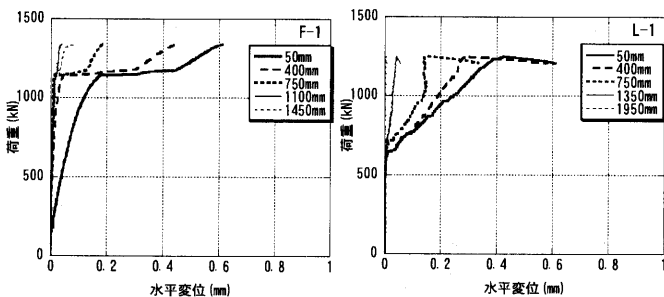


図16 荷重-変位関係

厚のコンクリートが付着した状態であった。

3.2.2 シアキープレート長さ方向の鉛直変位分布

図17に荷重ごとのシアキープレートのコンクリート表面からの鉛直変位分布を示す。

F-1試験体では鉛直変位は1100kNまでは0.2mm程度と小さいが、それ以降リブプレート範囲で約0.5mmの上側への変位を示した。L-1試験体は600kN程度までは鉛直変位はほとんど発生せず、それ以降にF-1試験体と同様、リブプレート範囲で最大0.6mm程度の上方向の変位を示した。

3.2.3 歪分布

図18にシアキープレート側面の荷重ごとの歪分布を、図19にリブプレート天端の荷重ごとの歪分布を示す。いずれも圧縮歪を正としている。

シアキープレート側面の歪分布はリブプレート終端となる50mm付近で跳ね上がる傾向を示し、シアキープレートのみの範囲では、ほぼ線形に分布する。その範囲ではせん断応力が概ね均等に分布しているものと考えられる。

リブプレート天端の歪分布はF-1試験体で1100kN程度まで、L-1試験体で600kN程度までは圧縮歪を示すが、その後引張り歪に転ずる。

F-1試験体では1100kN程度まで鉛直変位にも大きな変化は無

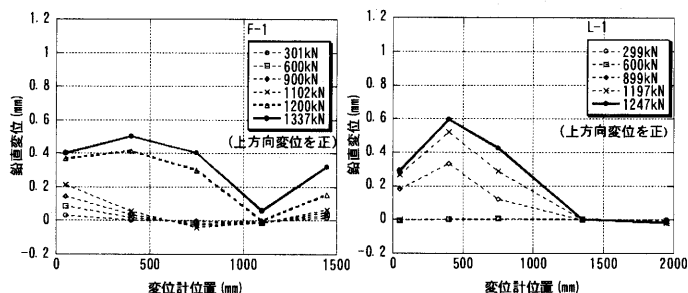


図17 鉛直変位分布

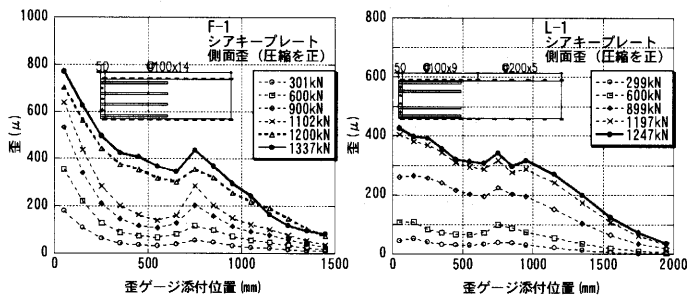


図18 シアキープレート側面の歪分布

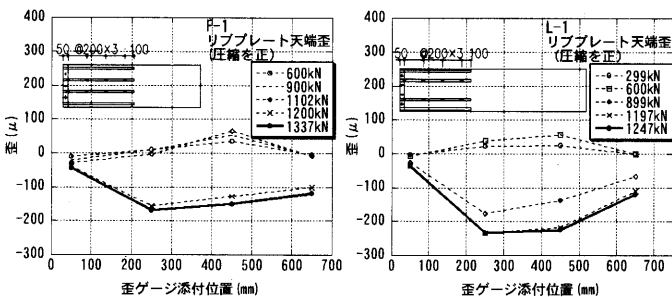


図19 リブプレート天端の歪分布

く、またリブプレート天端の歪も圧縮側であり、この時点まではリブプレート下の範囲はコンクリート面と接着していたものと考えられる。しかしそれを超えるとリブプレート範囲では上向きの鉛直変位を示し、またリブプレート天端の歪も引張り側に転じており、1100kN程度でリブプレート下ではコンクリート面からの剥離が生じたものと考えられる。それ以降は主にリブプレート無し
の接着範囲で水平力に抵抗していたものと予想されるが、F-1試験体はリブプレート範囲とシアキープレートのみの範囲がほぼ同じであったため1100kNからそれほど耐力は上昇せず1337kNで全体が剥離したの
ものと考えられる。

L-1試験体も同様で600kN程度までは鉛直変位はほとんど発生せず、リブプレート天端の歪も圧縮側であることから、リブプレートも含め接着部での剥離は発生していないものと考えられる。しかし、900kNでは、リブプレート下の鉛直変位の進展、リブプレート天端での引張り歪の発生に見られるように、リブプレート範囲でコンクリート面からの剥離が生じたものと考えられる。L-1試験体はF-1試験体と異なり、リブプレート範囲750mm（接着範囲700mm）に対し、シアキープレートのみの範囲が1200mmと長いため、その範囲でのコンクリートのせん断強度により、リブプレート範囲が剥離したと予想される600kN以降も耐力が上昇し、1247kNまでの耐力を有したの
ものと考えられる。

4. FEM解析

実大シアキープレートを用いたせん断実験での試験体を対象に、接着面での応力状態を確認する目的でFEM解析を行った。

4.1 解析モデル

解析モデルは図20に示すように、コンクリートスラブ、シアキープレート、エポキシ樹脂をソリッド要素としたモデルである。解析は弾性解析としている。コンクリートスラブはスタッドボルトで支持される。スタッドボルトはコンクリートスラブを支持する水平バネと鉛直バネに置き換え、スタッドボルト設置箇所に配置した。スタッドボルトの水平バネは文献⁷⁾に倣い、スタッドボルトが周辺コンクリートのバネにより支持されているとして(2)式により求めた。コンクリートの反力係数は文献⁷⁾と同様、コンクリートのヤング係数を用いている。スタッドボルト以外のコンクリートスラブ下面の境界条件は水平方向にローラー支持とし、鉛直方向には圧縮側で固定、引張り側で自由となるバネを配置した。鉛直バネはスタッドボルトの軸剛性とし(3)式により設定した。各材料の材料定数とスタッドボルトの剛性を表10、11に示す。接着系アンカーは、引張り側では接着系アンカー軸断面による軸剛性を持ち、圧縮側では剛となるバネとしてモデル化した。引張り側の剛性は(4)式により求めた。

水平力は、実験でシアキープレートがコンクリート面から剥離していない範囲である600kNとし、25mm厚のシアキープレート端面に均等に作用させた。

$$H k_{st} = 4EI_s \cdot \beta_c^3 \cdot \frac{e^{2\beta_c \cdot H} - e^{-2\beta_c \cdot H} + 2\sin(2\beta_c \cdot H)}{e^{2\beta_c \cdot H} + e^{-2\beta_c \cdot H} + 4 + 2\cos(2\beta_c \cdot H)} \quad (2)$$

$$V k_{st} = a_s E_s / H \quad (3)$$

$$\text{ここで } \beta_c = \sqrt[3]{k_c / 4E \cdot I_s}$$

$H k_{st}, V k_{st}$: スタッドボルト1本当たりの水平バネ、鉛直バネ
 k_c : コンクリートの反力係数(=Ec)
 EI_s : スタッドボルトの曲げ剛性
 a_s : スタッドボルトの軸部断面積
 H : スタッドボルトの高さ

$$V k_o = a_o E_s / l \quad (4)$$

a_o : 接着系アンカーの軸断面積

l : コンクリート表面からシアキープレート天端までの距離

4.2 解析結果

4.2.1 歪分布

シアキープレート側面とリブプレート天端の歪分布を実験値と解析値とで比較した。実験値はシアキープレート両側面の歪ゲージの平均値、リブプレート天端の歪ゲージの平均値とし、解析値は図20に□で示す位置でのソリッド要素での歪であり、それぞれ600kNでの値である。図21にシアキープレート側面の歪を、図22にリブプレート天端の結果を示す。いずれも圧縮歪を正としている。

F-1試験体ではシアキープレート側面、リブプレート天端の歪分布ともに解析値は実験値から若干ずれているものの、歪分布の傾向は概ね一致している。L-1試験体では解析値と実験値は良く対応しており、リブプレート終端位置でシアキープレート側面の歪がはね上がる傾向やリブプレート天端の歪分布を表現できている。

4.2.2 接着面の応力分布

歪分布が解析値と実験値で概ね対応していることから、本モ

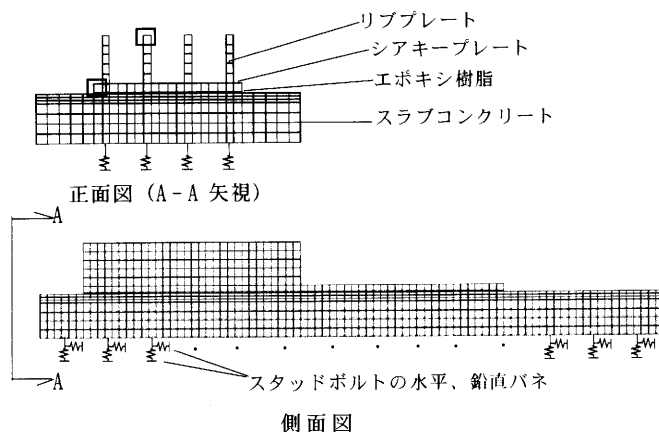


図20 FEM解析での解析モデル

表10 材料定数

		ヤング係数(×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン比
コンクリート	F-1	2.828	0.167
	L-1	1.373	0.167
鉄骨		20.5	0.3
	エポキシ樹脂	0.33	0.36

表11 スタッドボルトの剛性

	スタッド径	スタッドボルト剛性(kN/mm ²)	
		水平	鉛直
F-1	19φ	586	583
L-1	19φ	341	583

デルにより接着面の応力分布を推定した。

図23、24にソリッド要素でメッシュ分割したスラブコンクリートうち最上段の位置(図中○印)での材軸方向のせん断応力分布と垂直応力分布を示す。横軸はスラブ先端からの距離である。

せん断応力分布はF-1試験体、L-1試験体とも加力点近くで大きな値を示し、加力点から離れるにつれて急激に低下し、シアキープレートのみの部分では概ね均等に分布している。

垂直応力分布は引張りを正として示している。垂直応力分布は加力点付近とリブプレート末端では圧縮応力が、リブプレート中央では引張り応力が発生しており、複雑な分布を示す。実験ではある荷重を超えるとリブプレート範囲で浮き上がるような挙動が推測できたが、解析結果で見られる引張り応力によるものと考えられる。リブプレート範囲でのこのような応力分布は、シアキープレート+リブプレート断面での中立軸位置が水平力の作用点であるリブプレート板厚中央よりもやや高い位置にあり、リブプレート天端が引張りとなる曲げモーメントが発生するためと考えられる。シアキープレートのみの範囲ではリブプレート範囲での複雑な分布とは異なり、シアキープレート末端で圧縮応力が作用しているが、その他では大きな垂直応力は発生していない。

4.2.3 シアキープレート接着面のせん断耐力

F-1試験体、L-1試験体での荷重-変位関係は、荷重が小さい範囲では線形関係にあり、途中で剛性低下し、破壊に至る。FEM解析の結果に見られるように、リブプレート範囲では引張り応力が作用するので、荷重が小さい範囲ではシアキープレート全範囲で接着が維持されているが、荷重が大きくなると引張り応力により、リブプレート下の接着部分が剥離し、その後はシアキープレートのみの部分で水平力を負担しているものと考えられる。せん断強度(τ_u)を(1)式によるものとし、図25に示すようにシアキープレートのみの範囲を有効接着面積(A_e)とし

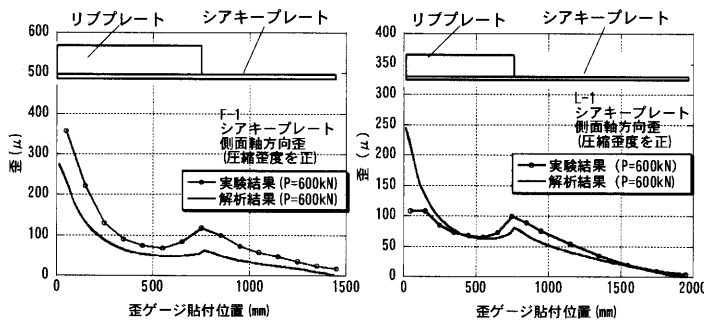


図21 シアキープレート側面歪の比較

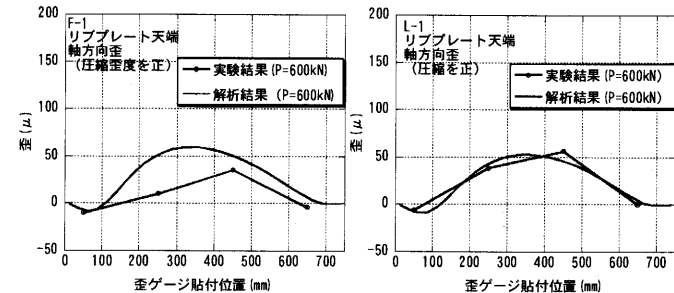


図22 リブプレート天端歪の比較

て、せん断耐力を $\tau_u \times A_e$ で評価すると表12に示すように実験値をやや下回るものの、概ね良い対応を示す。

本接合方法の破壊性状は脆性的であるため、接着面積を設定する場合は作用するブレース軸力に対し十分な安全率を設けることが必要となる。LY225の降伏点上限値を295N/mm²と想定し、それに対して1.5倍の安全率を設け、F-1、L-1の実験結果と、提案する接着面耐力、作用するブレース軸力の水平成分とを比較すると、図26のようになる。ブレース軸力範囲と接着耐力との間で十分な余

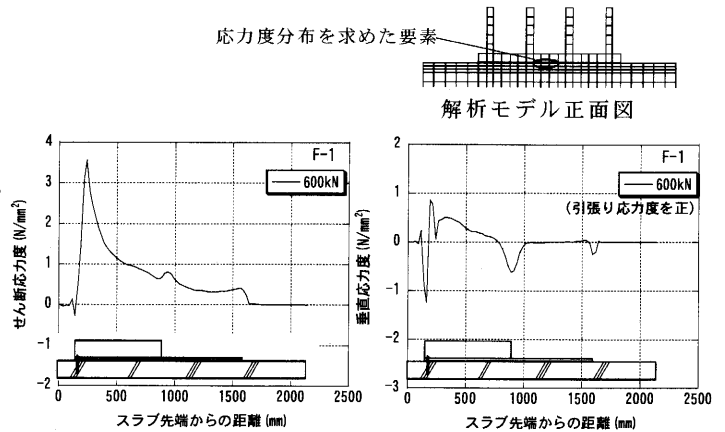


図23 F-1試験体のせん断・垂直応力分布

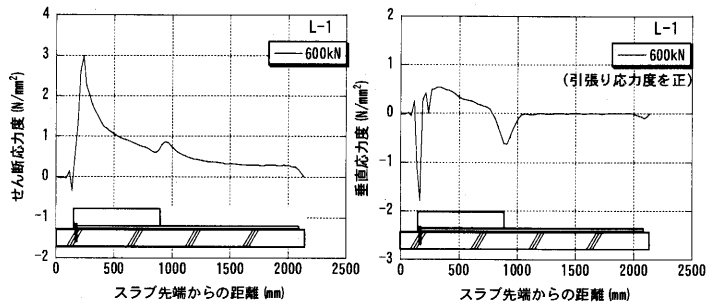


図24 L-1試験体のせん断・垂直応力分布

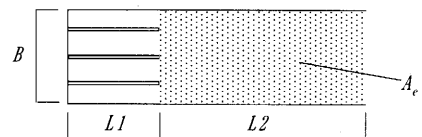


図25 有効接着面積

表12 接着部の耐力評価

	B (mm)	L2 (mm)	Ae (×10 ⁶ mm ²)	τ_u (N/mm ²)	耐力評価P _v (kN)	実験値P _e (kN)	P _v /P _e
F-1	450	700	0.315	3.57	1126	1250	0.90
L-1	450	1200	0.540	2.16	1165	1337	0.87

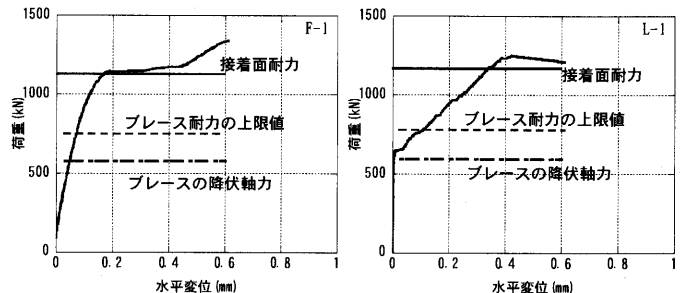


図26 接着面耐力に対するブレース軸力範囲

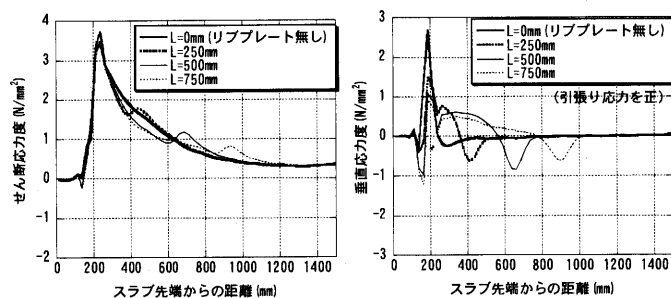


図27 リブプレート長さによる応力度分布の差異

裕が見込まれることから、1.5倍程度の安全率が妥当であると考えられる。

4.2.4 リブプレートの影響

リブプレートの影響を確認するために、F-1試験体を元に、リブプレート長さ $L=0\text{mm}$ (リブプレート無し) から $L=750\text{mm}$ まで変化させ同様の解析を行った。作用させた荷重は 600kN である。接着面直下のコンクリートのせん断応力度分布、垂直応力度分布を図27に示す。

せん断応力度分布はリブプレートの長さにかかわらず加力点付近で大きな値を示し、その後低下する傾向にある。加力点付近でのせん断応力度の大きさもリブプレート長さによらずほぼ同じである。

垂直応力度分布はリブプレート無しの場合 ($L=0\text{mm}$) は引張り応力がシアキープレート先端 (200mm 付近) で局所的に作用するが、それ以外の部分では大きな垂直応力は発生していない。 $L=250\text{mm}$ の場合は加力点付近で引張り応力が、リブプレート終端で圧縮応力が見られ、その間はほぼ直線分布となる。シアキープレート先端での引張り応力は $L=0\text{mm}$ の約 $1/2$ となっている。リブプレートを長くするにしたがってシアキープレート先端に発生する引張り応力は緩和されるが、引張り応力が発生する範囲は広がる傾向にある。シアキープレート先端に作用する引張り力を接着系アンカーで負担できれば、リブプレートが無い方が大きな水平耐力を確保できると予想できる。シアキープレート全面積を有効接着面積とした場合の水平耐力は表4に示すように 2250kN であり、図27の垂直応力度分布での $L=0\text{mm}$ の解析結果から、 2250kN の水平力が作用したときの引張り応力度の合力を算定すると約 200kN となる。文献⁶⁾により接着系アンカーの耐力を算定すると9-D13の接着系アンカーで負担可能となる。以上から、リブプレートを省略し、先端の接着系アンカー本数を増やすことでシアキープレート接着部の耐力を上げることが可能であると推測できる。ただし、本工法の耐力は解析での予測が難しいため実験での検証が必要であり、今後の課題である。

5. まとめ

本研究ではシアキープレートを用いた耐震補強用座屈拘束ブレースの接合部耐力を確認するために2種類の実験を実施した。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- ・接着部分のせん断強度はMohr-Coulombによる破壊条件によるせん断強度により評価可能である。

- ・実大シアキープレートせん断実験では、リブプレート下の接着部分が早い段階で剥離するが、その時点で接着面全体が破壊せず、シアキープレートのみ部分で水平力に抵抗し、全体の破壊には至らない。

- ・リブプレートがある場合は接着面のせん断耐力はせん断強度 τ_u にシアキープレートのみ部分の接着面積を乗じた耐力で評価できる。ただし本実験でのプレート厚、長さ、コンクリート強度の範囲で適用するのが妥当である。

- ・シアキープレート接着面での破壊性状は脆性的であるため、座屈拘束ブレースの降伏軸力上限値に安全率を乗じて接着面積を設定することが重要である。

- ・実大せん断実験では、リブプレートが長く、リブプレート中央部で引張り応力が発生し、有効接着面積が小さくなったものと考えられる。FEM解析の結果からは、リブプレートを省略すれば有効接着面積をより広く取れ、耐力を大きくできる可能性があることが推測できる。ただし、シアキープレート先端のコンクリート表面に発生する引張り応力に抵抗できる接着系アンカーを設ける必要がある。また本工法の耐力は解析による予測が難しいため、実験による確認が必要となる。

謝辞

本研究を行うにあたり(株)日建設計の常木康弘室長、林博之主管には貴重なご意見を賜りました。また試験体製作について(株)東邦アーステック樋口哲郎部長、米田信一氏にご協力を戴きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 久木田真一, 荻野谷学, 宮川和明, 木下陵二, 藤澤一善, 藤永隆, 大谷恭弘, 三谷勲: 鋼管ブレースを使用した既存RC造建築物の耐震補強工法に関する実験的研究(その1 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1分冊, pp377-378, 2000. 9
- 2) 毛井崇博, 宮内靖昌: 接着接合された鉄骨ブレース補強骨組の力学特性, 日本建築学会構造系論文集 第539号, pp103-109, 2001. 1
- 3) 市川 康, 岡安亜倫, 中村博志, 山田 哲, 和田 章: 床スラブに接着したシアキープレートによる鋼構造用耐震補強ブレースの接合方法に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集 第596号, pp133-140, 2005. 11
- 4) 近藤泰夫他: コンクリート工学ハンドブック pp330-331, 朝倉書店, 1970
- 5) 森田司郎, 須賀好富, 岡島達雄: 建築材料・施工, pp98-99, 鹿島出版会, 1984
- 6) 財団法人日本建築防災協会: 2001年版既存鉄筋コンクリート建築物の耐震改修設計指針・同解説 pp259-283, 2001. 10
- 7) 山野辺宏治, 矢部喜堂, 和田章: 頭付きスタッドの弾塑性性状を考慮した合成梁架構の弾塑性平面骨組解析, 日本建築学会構造系論文集 第502号 pp135-140, 1997. 12

(2006年4月10日原稿受理, 2006年8月28日採用決定)