

立ち上げ部を有する露出型柱脚におけるせん断力伝達機構と耐荷機構の実験的検討

Experimental Study of Exposed-type steel-column base on Shear Transmission Mechanism and Stress Resistance Mechanism

東北大学大学院 助教 古川 幸

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究背景・目的

施工の簡便性から鋼構造骨組の柱脚接合として普及している露出型柱脚では、鋼材柱のせん断力 Q は①ベースプレート下面とコンクリートの摩擦力 Q_f と②アンカーボルトのせん断力 Q_b として基礎へ伝達され、基礎立ち上げ部がある場合には側方破壊への配慮も必要となる。しかし、露出型柱脚の高い普及度に反し、その応力伝達機構や耐荷機構は未だ曖昧な部分が多い(例えば、①②のせん断力負担割合や、①②の側方破壊耐力との関係性など)。申請者らは既往の研究^{*1)}より、鋼材柱の軸力によって基礎が側方破壊に至るせん断力が顕著に変化するという新しい知見を得た。結果の解析を進めると、②で伝達されるせん断力が側方破壊耐力に達した場合にひび割れが生じる可能性が高いということが分かった。そこで本研究では本知見の実験的検証を行い、鋼部材をRC部材に埋め込んでせん断力を伝達する接合部におけるせん断応力伝達機構と耐荷機構の理解を深め、設計を高度化することを試みる。

2. 実験計画

図1に圧縮力-水平力2軸載荷を可能とする載荷装置、図2に試験体詳細、RC部に埋め込むアンカーボルトセット寸法を示す。試験体は図1に網掛けで示した、断面が400 mm×400 mm、高さが800 mmのRC部材である。RC部の主筋は16-D19、帯筋はD10@50(帯筋比0.79%)である。RC部に埋め込むアンカーボルトセットは、1本のアンカーボルトで構成され、試験体によってはアンカーボルトにさらにプレートが溶接される。載荷は、図1の試験体左右に配置したジャッキ2基で一定圧縮力を維持したまま、水平力を正負交番漸増載荷した。圧縮力はアンカーボルトセット上面の保護プレートを介して、水平力はRC柱上部から出したアンカーボルトを介して試験体に載荷する。

実験変数は、①圧縮力の有無、②アンカーボルトセットの形状である。試験体は計4体であり、そのうちI-1、I-2は圧縮力無載荷とし、I-3、I-4は400 kNの一定圧縮力を載荷した。ここで、圧縮力400kNは、本RC柱に対して想定される上部鉄骨柱断面□-200×200×9の軸力比0.2に相当する。圧縮力を無載荷とした試験体は、摩擦によるせん断力 Q_f の伝達の影響を除外することが目的である。RC部に埋め込むアンカーボルトセット寸法は、図2に示すI-1を基準とし、I-2はI-1にさらにアンカーボルトセットの定着度を上げるために下端に鉄筋を用いた定着具を取り付けた。I-3はアンカーボルトに溶接した支圧プレート幅がI-1に比べて狭く、I-4はアンカーボルトのみとした。なお、図2、表1に示すIII-1は先行研究^{*1)}における試験体であり、比較対象として今回結果検討に加えたものである。

表2に材料諸元を示す。 σ_y 、 σ_u は鋼材の降伏強度、引張強度、 σ_{cb} 、 σ_c はコンクリートの割裂強度、圧縮強度を示す。

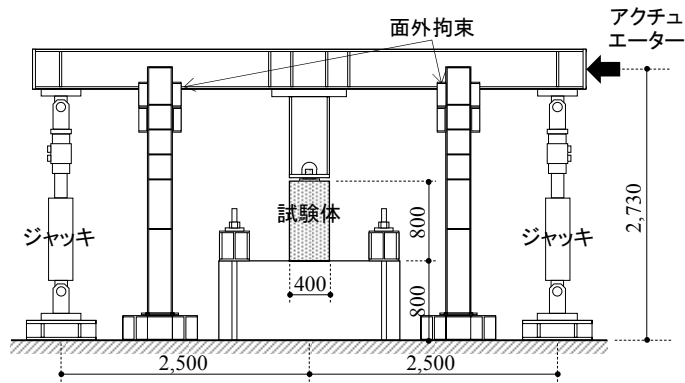


図1 圧縮力-水平力2軸載荷装置

表1 試験体材料諸元

		σ_v	σ_u
保護プレート	SN490B	400	531
支圧プレート	SN490B	358	516
主筋 D19	SD345	400	565
帯筋 D10	SD295A	344	515
A.B. M52	SNR490B	379	546
定着用鉄筋 D16	SD345	398	588
		σ_{cb}	σ_c
コンクリート		3.5	43.3

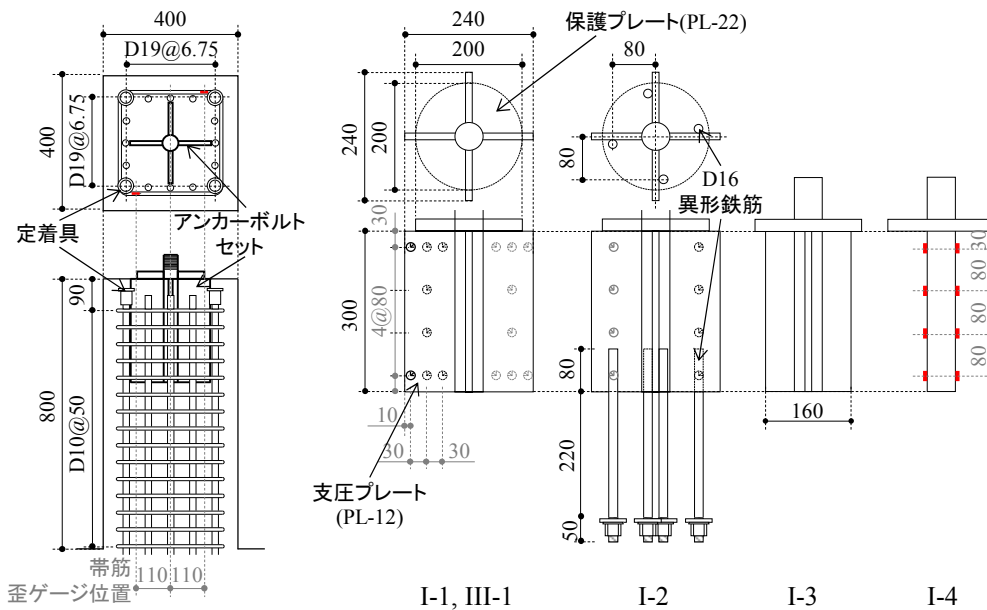


図2 試験体パラメータ

表2 試験体一覧

実験 #	#	F_c	軸力載荷	支圧プレート			配筋		追記
				W_{SP}	t_{SP}	L_{SP}			
I	I-1	43.3	圧縮力0 kN	240	12	300	帯筋のみ	0.79%	
I	I-2		圧縮力0 kN	240	12	300	帯筋のみ	0.79%	D16定着アンカー
I	I-3		圧縮力400 kN	160	12	300	帯筋のみ	0.79%	
I	I-4		圧縮力400 kN	-	-	300	帯筋のみ	0.79%	アンカーボルトM52のみ
III	III-3		圧縮力400 kN	240	12	300	帯筋のみ	0.79%	

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 実験結果

3.1 ひび割れ耐力・最大耐力比較

図3に、水平載荷荷重 Q [kN]とRC柱の回転角 θ [rad]の骨格曲線図を示す。各プロットには各目標変形角1サイクル目最大値を抽出した、なお、RC柱の部材角 θ [rad]は、保護プレートのRC柱下部に対する相対変位を両者の距離で除したものである。図中には帯筋が降伏歪に達した時点も示す。図4には、全試験体における、RC部上端から斜長ひび割れが進展する時点における荷重（支点部ひび割れと呼称）と最大荷重を整理した。ここで、図中の「テコ反力」については後述する。

圧縮力を載荷しなかった試験体I-1は、最大荷重が158 kNであり、全試験体中最も低い最大荷重であ

った。水平荷重100 kNでアンカーボルトセットが埋め込まれたRC柱上端を起点とした斜長ひび割れが進展し、150 kN程度で荷重がほぼ横ばいとなり、RC柱上部の荷重方向前方半分の破壊が進んだ。一方、純圧縮力を荷重したIII-1では、支点部ひび割れが生じる荷重がI-1の2.7倍である269 kNまで上昇し、最大荷重もI-1の2.3倍である368 kNに増加した。また、柱脚部の曲げひび割れの進展も遅れ、剛性も顕著に上昇した。また、アンカーボルトセットの形状や寸法は異なるが、同じく圧縮力を荷重したI-3、I-4も、支点部ひび割れ荷重が272 kN、314 kNまで上昇し、最大耐力は345 kN、314 kNであった。これらから、圧縮荷重を荷重することで、支点部ひび割れが発生する荷重、最大荷重ともに2倍近く上昇することが分かる。帯筋の軸力については、いずれも支点部ひび割れ発生以降にRC部上部で増え始め、帯筋の降伏が発生した直後に最大荷重を迎えた。支圧プレート下部に鉄筋を溶接してRC柱に定着したI-2では、支点部ひび割れはI-1（定着鉄筋なし）の1.2倍である120 kN、最大荷重はI-1の1.7倍である273 kNであった。定着鉄筋によるアンカーボルトセットの固定は、支点部ひび割れに対しては効果が薄く、最大荷重に対して効果がより大きいことが分かる。なお、I-2では定着鉄筋が219 kNで降伏したことから、より径の大きな定着鉄筋を使用した場合には、最大荷重がさらに上昇した可能性が高い。

アンカーボルトセットの寸法の違いに着目すると（I-3、I-4、III-1）、支圧プレートの幅が240 mm（III-1）から160 mm（I-3）の2/3まで減少した場合については支点部ひび割れ、最大荷重ともに大きな違いは生じなかったが、アンカーボルトのみにした場合（I-4）には顕著な変化が見られた。RC部中央にアンカーボルトが埋め込まれているだけのI-4では、ひび割れの顕出がおくれ、最大荷重を記録した時点において際立った音とともに斜長ひび割れが一気に入り、他の試験体に比べて変形量の観点からは早期に荷重を低下させた。I-4においては、帯筋の軸力も最大荷重まで増加せず、荷重低下に入ったサイクルで深さ300 mmまでの上段に位置する帯筋が一斉に降伏した。アンカーボルトに支圧プレートを溶接した他の試験体では支圧プレートによってRC部に伝達される支圧力が広く分散することで早期に側方破壊を生じ、緩やかに帯筋の負担も増えるのに対し、アンカーボルトのみの場合にはいわゆる側方破壊が脆性的に発生してしまうということが分かった。本知見は、本研究目的と直接関係するものではなかったが、副次的に観察できた非常に興味深い結果であるので、ここに記載するものとする。

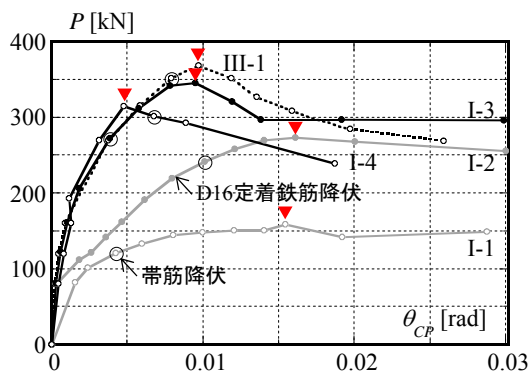


図3 骨格曲線

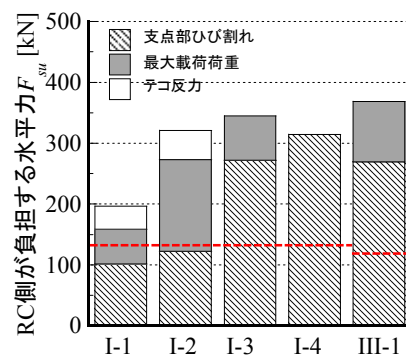


図4 耐力比較

アンカーボルト接合部におけるせん断力は、①ベースプレート下面とコンクリートの摩擦力 Q_f と、②アンカーボルトのせん断力 Q_b の、2経路で伝達される。この内、RC部の側方破壊に関係するのは②である。図4に各種合成構造指針^{*)2)}に基づいて計算した側方破壊荷重も赤の点線で示す。図より、圧縮力を荷重しなかったI-1、I-2の支点部ひび割れ耐力は非常に良い対応を示していることが分かる。I-3、4、III-1の支点部ひび割れ耐力の上昇は、①の寄与と考えられ、圧縮荷重400 kNに対して、おおよそ150 kNから200 kNが摩擦力で伝達されたと考えられる。つまり、本接合部を従来の方法で設計すると、圧縮力が加

わる場合においては過剰に安全側の設計となる。引き抜き力を考慮する必要がある場合には、アンカーの固定がなされていれば、剛性は下がるものの、同様に大きく安全側の設計となることが分かる。

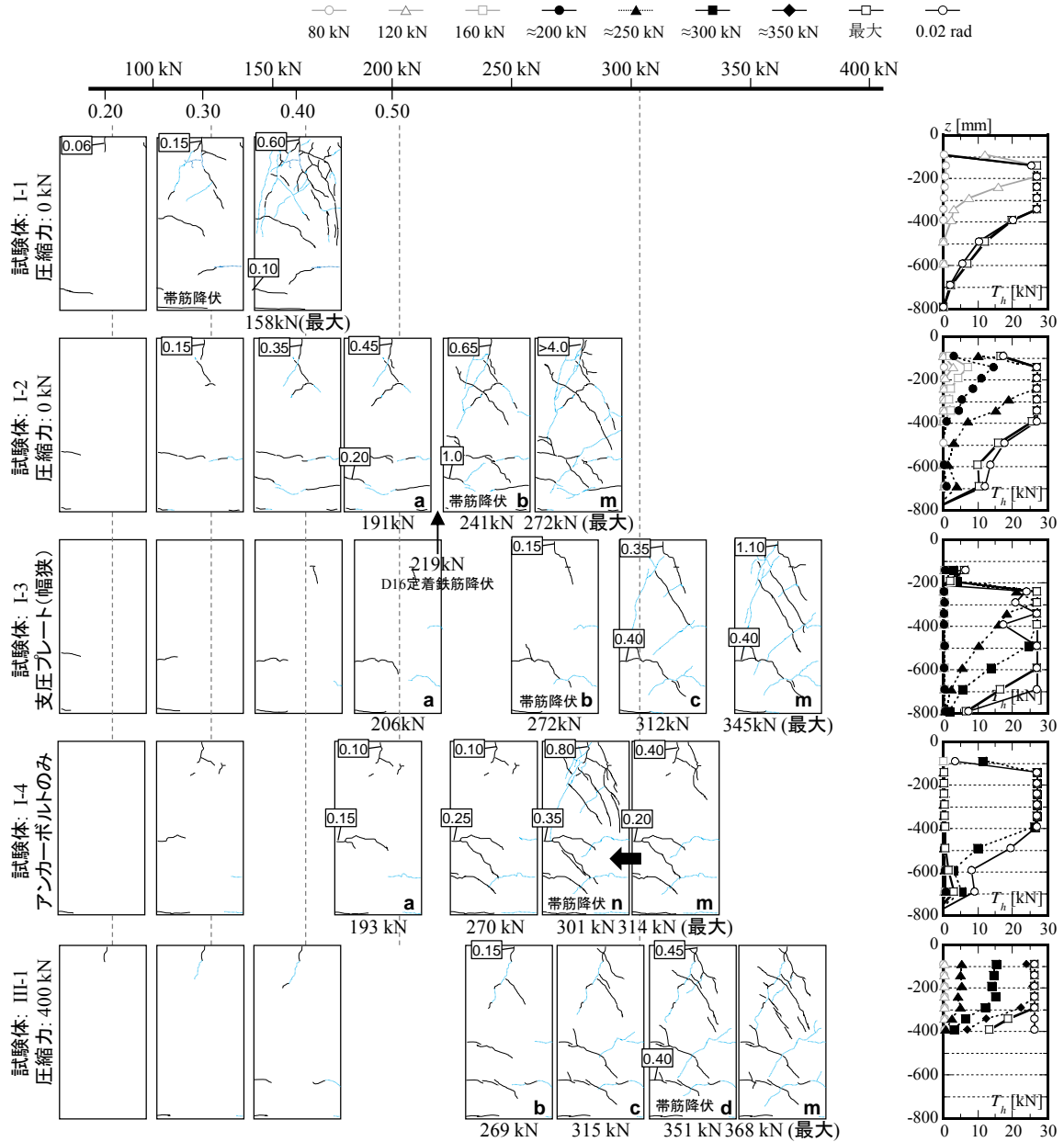


図5 試験体ひび割れ変遷，帯筋軸力分布

3.2 アンカーボルト部における歪分布

本節では、実験結果詳細を検討し、せん断力伝達機構と耐荷機構の構築を試みる。図6にI-1,I-2,I-3における支圧プレートに貼付した3軸ゲージで計測した水平方向のせん断歪分布を、図7に圧縮力を導入した3試験体 (I-3,I-4,III-1) における軸力導入時にアンカーボルトが負担している軸力分布を、図8にI-4のアンカーボルト曲げ歪から算定した曲げ力とせん断力分布を示す。

接合部がせん断破壊する時点においては、RC柱に埋め込まれたアンカーボルトセットとRC柱は一体性を失い、上端に水平力 P を受けたアンカーボルトセットはRC柱内部においてテコ回転を生じる (図9(b))。つまり、RC柱側が負担する水平力 F_{su} は、テコ反力 (図1(b) F_{sl}) 分だけ割り増される ($F_{su} = P + F_{sl}$) (図4)。I-1では、支点部ひび割れが顕著になり変形が進んだ0.008 rad(▲)からアンカーボルトセット下方がRC柱載荷方向後方から反力を受ける、いわゆるテコ作用が生じていることが分かる。一方、

支圧プレート下端に定着鉄筋を有するI-2では0.008 rad(▲)までは下端におけるテコ作用がとどめられている。しかし、0.01 rad(■)時点において定着鉄筋が引張降伏した後は、テコ反力が増大した。圧縮力を載荷したI-3では、水平力を上回る圧縮力の影響でせん断歪が安定しないが、テコ反力は最後まで生じていないことはわかる。したがって、圧縮力を導入しなかった試験体においては、テコ反力が生じることによってRC側に伝達するせん断力が増加し、見かけのせん断耐力が減少していたことが分かる。ただし、このテコ反力が生じるのは、支点部ひび割れが顕著となった後、もしくはI-2においてはさらに定着鉄筋が降伏した後であるので、側方破壊にあたる支点部ひび割れ荷重に対して影響はない。

図7に示した圧縮力400 kN導入時におけるアンカーボルトに生じた軸力を見ると、アンカーボルトのみの試験体I-4において、生じている圧縮軸力が小さい。これは、支圧プレートがあるI-3,III-1に比べてRC部に埋め込まれた際のアンカーボルトセットの鉛直剛性が小さいために、載荷した圧縮軸力のほとんどが保護プレートを介してRC部に伝達されたためと考えられる。したがって、I-4においては、他の2つに比べて、水平力に対して保護プレートとRC部の間に生じる静止摩擦力が大きくなる。その結果、支点部ひび割れの顕出が遅れた可能性も考えられる。図8に示したI-4のアンカーボルト部材力分布を見ると、最大荷重時(□)に一気にせん断力の負担が300 kN以上まで増加していることから、最大荷重に達するまでは、水平力はほぼ保護プレートとRC部上面の摩擦によって伝達されていたことが分かる。なお、支圧プレートを有する試験体においては、アンカーボルトセットの平面保持が成立しがたいため、アンカーボルトセットの負担力を実験結果からは推定しがたかったため、ここでは詳述しない。

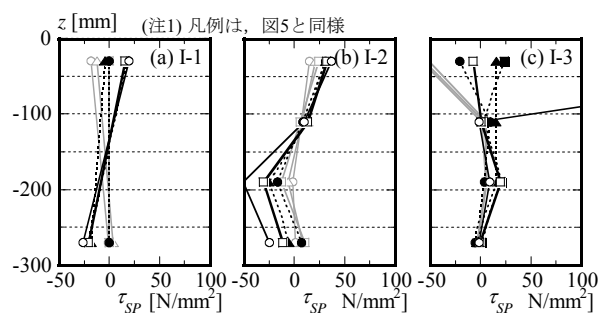


図6 支圧プレートせん断歪分布

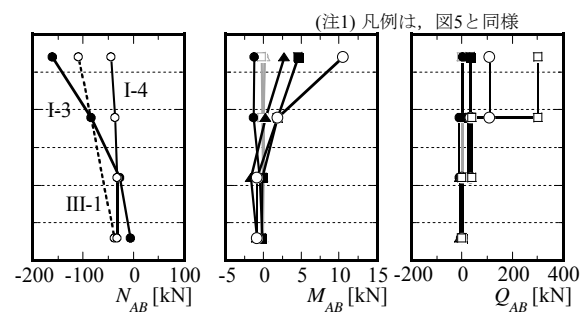


図7 A.B.軸力

図8 A.B.部材力 (I-4)

3.2 最大せん断耐力とせん断力耐荷機構

本研究と同様に立ち上げ部を有する露出型柱脚の終局せん断性能について評価を行った(ただし摩擦力の影響を排除するためにRC部と鋼材の間にテフロンシートを挟んだ状態で載荷)浅井等は、側方破壊が発生した後における耐力上昇について研究成果を報告している。浅井等の指摘同様、本実験においても側方破壊(=支点部ひび割れ)発生後、帯筋の軸力を増加させながら一定量耐力を上昇させた。この事象は申請者が本研究で元々想定していた課題ではないが、本接合方法のせん断力に対する設計手法の高度化という大目的に大きく貢献するものであることから、以下に追加考察を行う。

本現象を考察するにあたって重要な実験結果はI-2である。I-2では圧縮力を載荷していないことから、支点部ひび割れ耐力は100 kN前後に留まったが、最大荷重はI-1の2倍近くまで上昇した。したがって、支点部ひび割れ(=側方破壊)のように、本研究で課題とした鋼材とRC部間の摩擦力は最大耐力に対して影響は小さいと考えられる。接合部のせん断破壊性状(図5)より、せん断破壊時には載荷方向前方のアンカーボルトセットとRC柱の帯筋で囲まれた部分において、①アンカーボルトセット上端を起点とするコンクリートの圧縮束と②帯筋の引張力(水平方向)、③アンカーボルトセット引張力(鉛直方向)が釣り合う、トラス機構が形成されると考えられる(図9)。もし、③鉛直方向力が十分に確保でき

ない場合、①と②で決定されるRC柱側のせん断耐力に達する前に鉛直方向力の最大値で支点部のせん断力が頭打ちとなる。ここで、③鉛直方向力として、(③-1) 支圧力によって生じる支圧プレートとコンクリート間の摩擦力と、(③-2) アンカーボルトセット定着具の引張力が挙げられる。また、(③-3)鉄骨柱から伝達される圧縮力も、トラス機構の③鉛直方向力としての働きを有する。試験体5体のうち、定着鉄筋が最大荷重に達する前に降伏したI-2は③鉛直方向力で接合部のせん断耐力が決定したと考えられる。なお、靱性保証指針^{*3)}の信頼せん断強度式を適用した場合（ただしRC部破壊は断面の半分で生じることから断面の半分でトラス機構が成立すると仮定）、終局せん断耐力は251 kNと推定され、最大耐力に対してはまだ安全側の評価となった。

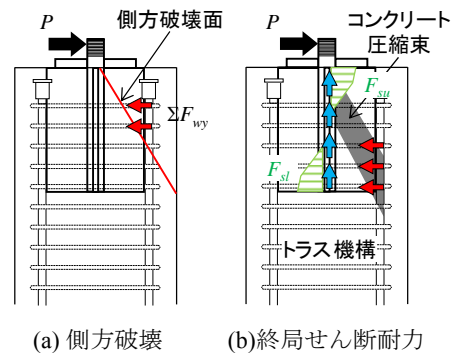


図9 せん断破壊機構

4. まとめ

本研究で得た主な知見を以下に列挙する。

- ① 圧縮力を載荷することで、接合部におけるせん断耐力は2倍以上に上昇した。せん断力の半分以上を摩擦力が負担したことになる。
- ② 接合部をアンカーボルトのみにした場合、圧縮力下においては急激な破壊を生じる。
- ③ アンカーボルトの定着を適切に取った場合、0軸力下においてもせん断耐力の上昇がみられた。特に③は、立ち上がり部を有するRC部と鋼部材の露出型接合の終局せん断強度に対する理解を今後さらに深めるうえで、非常に有益な結果といえる。

参考文献：

- 1) 岩見遼平, 古川幸, 木村祥裕, 渡辺亨：下部RC柱と上部鉄骨柱から成る最下層柱接合部の応力伝達機構，鋼構造年次論文集,第22巻,pp.424-427,2014.11
- 2) 各種合成構造設計指針・同解説，第3版，2012.
- 3) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，第4版，2008.

(発表論文)

工藤慈野、古川 幸、岩見遼平、木村祥裕、渡辺 亨、金田勝徳、和田 章：層中間ピン柱脚接合部のせん断力耐荷機構のモデル化と終局せん断耐力評価 その1 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016(掲載予定)

古川 幸、岩見遼平、木村祥裕、染谷俊章、金田勝徳、和田 章：層中間ピン柱脚接合部のせん断力耐荷機構のモデル化と終局せん断耐力評価 その2 せん断耐力評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016(掲載予定)