

木材のめり込み特性に基づく伝統木造柱脚及び  
柱一貫接合部の復元力特性のモデル化に関する  
実験的研究

2010 年

李 東潤

## 目次

### 第1章 序

1.1 研究の背景 .....	1-1
1.2 既往の研究 .....	1-2
1.2.1 柱の傾斜復元力	
1.2.2 柱一貫接合部の復元力	
1.2.3 柱脚一礎石間のすべり挙動	
1.3 研究の目的と構成 .....	1-5

### 第2章 むり込み実験に基づく伝統木造柱一貫半剛接合特性

2.1 序 .....	2-1
2.2 基礎式 .....	2-2
2.2.1 柱一貫接合部の幾何学的関係	
2.2.2 むり込み構成則の記述	
2.3 要素むり込み実験 .....	2-12
2.3.1 実験概要	
2.3.2 実験計画の詳細	
2.3.3 実験結果	
2.3.4 むり込み構成則	
2.3.5 モーメント一回転角骨格曲線の推定	
2.4 部分架構実験 .....	2-37
2.4.1 実験概要	
2.4.2 実験結果	
2.4.3 むり込み実験からの推定結果との比較	
2.5 結論 .....	2-45

### 第3章 むり込み実験に基づく柱脚モデルの復元力特性

3.1 序 .....	3-1
3.2 基礎式 .....	3-2
3.2.1 傾斜復元力	

3.2.2 むり込み構成則	
3.3 むり込み実験 .....	3-4
3.3.1 実験計画	
3.3.2 実験結果	
3.4 柱脚むり込み構成則 .....	3-13
3.4.1 定式化	
3.4.2 寸法効果	
3.5.実大柱脚実験との比較による提案手法の妥当性の検証 .....	3-18
3.5.1 実験計画	
3.5.2 実験結果	
3.6 結論.....	3-27
第4章 柱脚－礎石接触面の摩擦性状に関する静的実験	
4.1 序 .....	4-1
4.2 実験計画 .....	4-2
4.2.1 実験システム	
4.2.2 試験体	
4.2.3 載荷方法	
4.2.4 計測方法	
4.3 実験結果 .....	4-10
4.4 結論.....	4-24
第5章 結論	
5.1 本論文のまとめ .....	5-1
5.2 今後の課題 .....	5-2

## 発表論文一覧

## 謝辞

## 第1章. 序

### 1.1. 研究の背景

韓国, 日本, 中国などの東アジア諸国では, 古来より地域の気候や風土などに適応し, 独自に発展を遂げてきた寺社建築などを中心とする伝統木造建築物により, 歴史的な建築文化様式が形成されている。今日に到っても伝統構法による文化財が数多く残されており, 先人たちの遺してきた各国特有の様式美・構造美が連綿と受け継がれている。自国の風土や歴史を大切に受け継ぐ歴史的木造建築物を保存・再生しようとする試みを支援する機運は世界的にも高まっている。

日本においては 1995 年の阪神・淡路大震災以来, 直下型地震が頻発している。また東海・東南海・南海などの巨大海洋型地震が高い確率で発生することが予測されている。近年の例では, 2007 年の新潟県中越沖地震において, 多くの歴史的木造建築物に大きな被害をもたらされている。同地震では調査された 36 社寺 50 建物中, 47 もの建物に被害が報告されている。代表的な被害例は, 建物が  $1/10(\text{rad})$  以上大きく傾斜したものの, 屋根が形状を保ったまま層崩壊したもの, 小規模な建物において建物全体が移動したり, 形を保ったまま完全に転倒したものが挙げられる。世界でも有数の地震国である日本において, これらの伝統木造建築物の保存・再生に邁進するためには, 現存する伝統木造建築物の構造性能を的確に評価した上で, その文化的価値を喪失することなく耐震性を向上させることが重要である。

住宅などの一般的な木造構造物は, 通常, 建築基準法で定められた壁倍率に基づく壁量計算を行い, その耐震性が評価される<sup>2,3)</sup>。壁倍率は, 通常, 単位フレーム耐震要素の静的加力実験結果から, 層間変形角  $1/120\text{rad}$  時耐力を基に算出される。そのため壁倍率はあくまで架構の降伏点付近を対象とする耐力本位の指標に過ぎない。最近では, 壁倍率に変形性能を加味した算定もなされるようになりつつあるが, 依然として動的性状や大変形領域を十分に反映した設計を行うのは難しい状況にある。

木造建築物は, 鉄骨造や鉄筋コンクリート造の建築物と異なり接合部を剛接合とみなすことができないという特徴がある。鉄骨造や鉄筋コンクリート造では, 適切な設計と施工を行うことでほぼ剛接とみなせる接合部を実現することは比較的容易である。ところが木質構造の場合, 木材に特有の「めり込み」という現象が剛性を低下させる原因となり, 変形の進行に伴い生じる「ガタ」がスリップ現象という木造接合部特有の力学特

性の原因となる。特に伝統木造架構は、このような「めり込み」を前提とした仕口が基本となって発展してきた構法であるため、壁倍率のように耐力だけの指標で耐震性能を規定することは、伝統木造架構の特性を生かした性能評価方法とはいえない。

一方、このような耐力を根拠とする壁量計算に対して、木造架構が本来有する靱性能を最大限に有効利用した設計法として、限界耐力計算に基づいた木質構造耐震設計法が近年整備されてきている<sup>4,5)</sup>。この設計法では耐力と変形性能、エネルギー吸収性能などの重要な構造特性を設計に反映させるために、建物の構成要素である単位フレームの復元力特性を個別に設定した後にこれらを加算して、架構の復元力特性を設定するというプロセスを踏む。このような復元力特性を有する耐震要素として、以下のものが挙げられる。(1)耐力と変形性能が主として接合部における復元力特性に依存するもので、履歴特性がスリップ形となる軸組。(2)太径柱の傾斜によって生じる傾斜復元力特性が有効に働く軸組などである。このような軸組の復元力特性を得るために、様々な伝統木造建築物実大部分架構に対する静的実験や振動台実験が実施されている。伝統木造建築の軸組は長い年月を掛けて発展してきた故に、様々な仕様が存在しているが、これら近年の取り組みにより軸組架構全体や接合部などにおける復元力特性の基礎データは徐々に充実してきているといえる。しかし、未だ汎用性に優れているとは言い難いのが現状である。また軸組の復元力特性を決定する上で、柱脚部が基礎に緊結されていないときに、柱に引き抜き力が生じる場合や、架構の水平耐力が摩擦抵抗力を上回る場合は、柱脚部の挙動を適切に評価する必要がある。しかし、特に非固定柱脚部の滑り挙動に対する研究事例は極めて少ないのが現状である。

## 1.2. 既往の研究

伝統木造建築物の地震力への代表的な抵抗機構として、太径柱がもつ傾斜復元力特性、柱と横架材の仕口部におけるめり込み抵抗、柱脚－礎石間の滑り挙動、組物の減衰性能などが挙げられる。以下では、次節で述べる本論文の研究目的に関連が深い、(1)柱一貫接合部の復元力、(2)柱の傾斜復元力、(3)柱脚－礎石間の滑り挙動の三点に関する既往の研究をまとめる。

### 1.2.1. 柱一貫接合部の復元力

接合部の中でも柱一貫接合部の復元力特性は、地震力への抵抗機構の中で重要な役割を果たす。これまでに、柱一貫接合部の数値モデルが複数提案されている。坂<sup>6)</sup>は寺社骨組の力学的研究の中で、柱梁からなる骨組に1あるいは2本の貫を通した場合、柱梁のみの復元力特性に対して、貫によってどの程度の復元力が増加するか明らかにするための実験を行った。後藤<sup>7)</sup>は貫通仕口による木造ラーメン(大黒柱)構造の研究を行い、仕口の挙動に関する静的実験を実施し、貫通構造の剛性は予想以上に小さいので剛性を確保するには相当の太さの柱を必要とすること、貫通材のめり込み剛性が高ければ柱はやや細く成し得ること、貫通仕口の回転変形は、降伏後においても放置されたものは相当の復元力特性を有することなどを明らかにした。稲山<sup>8)</sup>は木材の等変位めり込み特性と柱一貫接合部の関係を論じ、接合部のモーメントー回転角関係を定式化した。北守・小松ら<sup>9)</sup>は楔締め貫接合部モーメント抵抗機構とその挙動に対し、楔の初期支圧力が与える影響について理論式を提案し、初期支圧力をパラメータとした貫接合部試験からその妥当性を導いた。また、大きい初期支圧力を与えたものは回転初期の剛性が、与えなかったものに比べて顕著に高かったが、回転が大きくなるとほとんど影響がなくなることなどを明らかにした。前野と鈴木<sup>10)</sup>は伝統木造架構実大立体試験の振動台実験および静的水平力載荷実験を実施し、その構造要素の中から柱一横架材接合部のモーメントー回転角関係に関して分析した。その結果、架構全体の復元力特性に対して、柱一横架材接合部の抵抗力がどれくらい寄与しているかの知見を得た。また、この実験結果から得られた柱一横架材接合部のモーメントー回転角関係から非線形モデルを作成(柱脚、組物等も別途モデル化)して動的骨組解析を行い、実験結果を良い精度で予測している<sup>11)</sup>。森迫ら<sup>12)</sup>は、前野・鈴木の実大実験と同一寸法の柱一貫接合部の部分架構実験を実施し、接合部のモーメントー回転角関係を近似する曲線式を求めた。また、伝統木造架構の数値解析に用いるための柱一貫仕口回転ばね履歴モデルを作成する手法を述べた。

柱一貫接合部では、柱と貫の相対回転角の進行に伴い柱が貫や楔にめり込む形で変形が進行するため、木材のめり込み特性が復元力特性に大きな影響を及ぼすと予測される。木材のめり込み特性は相対回転角に応じて変化するが、上記の一連の研究では相対回転角の変化に応じためり込み特性の変化や、この変化が接合部の復元力特性に及ぼす影響は考慮されていない。また、伝統木造建築物の仕口で用いられることが多い楔や切欠きなどが復元力特性に及ぼす影響については、未解明な点が多く残されている。

### 1.2.2. 柱の傾斜復元力

地震動に対する伝統木造建築物の抵抗機構の中で、太径柱の傾斜復元力が重要な役割を果すことが知られている。地震力などによって柱が傾斜すると、柱の重心や組物などの上部構造が持ち上がる。柱径が大きく、柱の傾斜回転中心が自重や上部構造重量作用位置（水平面射影位置）より外側に在る場合、自重や上部構造重量によって復元モーメントが生じる。これによる水平方向の抵抗力が傾斜復元力であり、柱が太いほど最大耐力が大きくなることが知られている。

坂<sup>13)</sup>がその先駆的研究において、2本の柱に梁を乗せた単純な骨組の水平方向変位と復元力の関係を実験的に求め、柱が完全な剛体である場合の理論予測と比較して、最大耐力が小さくなることを指摘した。河合<sup>14)</sup>は柱上端および下端に生じるめり込み応力の理論解析を行い、これを用いることで、柱のロッキング前後における柱傾斜復元力特性を定式化し、静的実験結果と概ね一致する結果を得た。これらは、柱傾斜復元力特性の基礎的研究として位置付けられている。佐分利ら<sup>15)</sup>は、柱高さ幅比、弾性係数、大斗の有無をパラメータとした有限要素解析を行って、実験に基づく既往の提案式との比較を行った。その結果、部材の弾性係数によって、初期剛性は比例的に変化するものの最大耐力は変化しないこと、傾斜復元力特性は、材端条件による影響が大きいこと、柱のロッキング変形は柱両端近傍の局所的な変形により生じ、軸部の曲げ変形は小さいことを明らかにした。また実験提案式では水平力と変位を無次元化して、その関係式を算出していたが、これは柱高さ幅比の違いにより生じる誤差を含む可能性があることを指摘した。前野ら<sup>16)</sup>は伝統木造架構実大立体試験の振動台実験および静的水平力載荷実験を実施した。その結果より、柱に加わる力の釣合関係を用いて、架構全体の復元力から柱-横架材接合部のモーメント抵抗を減じることで、組物や枕盤を含む柱の傾斜復元力特性を抽出した。

これらの研究は柱全体を含む部分架構としての傾斜復元力を求めるのが目的であり、骨組全体の挙動を予測する上で貴重な資料を提供している。しかし、汎用的なモデル化を行うには、柱材と柱材の周辺部材との接合部を個別にモデル化することも重要である。このような考えに基づき、上谷ら<sup>17)</sup>は、柱脚底面の変形集中に着目して、柱脚部を曲面形状底面を持つ仮想的な剛体としてモデル化した。この結果、底面の集中半力作用位

置を柱の傾斜角と上載荷重をパラメータとする関数として、実験式として誘導した。前野<sup>14)</sup>は、実大架構実験結果から得られた柱の傾斜復元力特性（柱－横架材接合部のモーメント－回転角関係等も別途モデル化）の非線形モデルを作成して、動的骨組解析を行い、実験結果を良い精度で予測した。しかし、木材のめり込み特性と柱脚のモーメント回転角の関係には未解明な点が多く、角柱を含む柱脚部の汎用的なモデル化に向けた基礎データは十分といえる状況に至っていない。

### 1.2.3. 柱脚－礎石間の滑り挙動

伝統木造の地震力への抵抗機構の中で柱脚は建物の根幹を成す重要部位の一つであり、傾斜復元力と並んで地震時に重要な役割を果たすことが知られている。過去の地震被害では、柱脚の滑りが実際に発生したことが報告されている<sup>15)</sup>。木材相互あるいは木材と鋼材間の摩擦や滑りに関しては解析的、実験的研究がなされているが、伝統木造柱脚の滑りに関連して検討を行った研究は極めて限られている。

西岡ら<sup>16)</sup>は、柱を基礎に緊結しない茶室の振動台実験を行い、建物全体の滑り挙動を調べた。向坊<sup>17)</sup>は 1x1 スパンの木造建物の振動台実験を実施し、礎石建て構法木造建物特有の現象である、柱脚の滑りおよびロッキングによる柱脚の浮き上がり挙動について分析を行った。その結果より、柱底面と礎石間の摩擦係数を算定した。しかし、柱脚と礎石の間の滑りを直接的かつ定量的に扱った研究は限られており、特に最も基礎的なデータである静摩擦係数とそのバラツキや、柱脚の形状、礎石の表面処理方法、繰返し载荷などが静摩擦係数に及ぼす影響に関する検討を行った研究は見当たらない。

## 1.3. 研究の目的と構成

伝統木造建物架構の耐震性能を的確に判断するためには、限界耐力計算もしくは動的骨組解析を行うどちらの場合でも、その復元力特性をモデル化することは一次的に重要な課題である。特に骨組の挙動に大きな影響を及ぼす柱－貫接合部のモーメント回転角関係および柱の傾斜復元力特性については、実験に基づく多くの基礎データが収集されてきている。しかし、多くの様式を持つ伝統木造建物のモデル化に対応するためには、部材寸法等の諸条件によって、接合部の復元力特性を決定できるより汎用的な接合部モデルが必要となる。

本論文では、伝統的木造建物において半剛接合部の特性が建築物全体の応答を大きく支配すること、接合部の挙動がめり込み特性に依存することに着目し、柱－貫接合部に



におけるモーメント-回転角関係および柱の傾斜復元力特性を予測する手法を提案することを大きな目的とする。具体的な研究課題は以下のとおりである。

1. 静的実験を通じて、木材のめり込み現象に基づいた幾何学的釣合から、めり込み形状と境界反力を関係付けるめり込み構成則を誘導する。
2. この構成則を用いて、柱-貫接合部のモーメント-回転角関係を予測する手法および柱脚部のモーメント-回転角関係を予測する手法を定式化する。
3. 提案手法による予測骨格曲線と、柱-貫接合部および柱脚部の部分架構実験結果との比較により、提案手法の妥当性を検証する。
4. 伝統木造建物の柱脚-礎石間摩擦係数の定量的な基礎データを得る。

本論文は第1章から第5章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、まず、研究の背景として伝統木造建築物の置かれている現状について述べ、本研究で解明する課題と関連する既往の研究について述べている。またその上で、本研究の目的と本研究の位置づけを説明している。

第2章では、柱-貫接合部のモーメント-回転角関係を予測する手法について検討を行う。まず、楔や仕口での切欠きを考慮した上で、柱と貫の相対回転角に応じためり込み特性に関する実験データを収集し、これらの実験データからめり込み構成則を得る。次に、得られためり込み構成則から柱-貫接合部のモーメント-回転角骨格曲線を予測する手法を定式化する。その上で、提案手法による予測結果と部分架構実験結果との比較を通じて推定の精度を検討する。また、仕口での切欠きが骨格曲線に及ぼす影響についても検討を行う。

第3章では、木材のめり込み実験から柱脚のモーメント-回転角関係を予測する手法を提示する。めり込み実験では材料試験機を用いて、固定角度を実験パラメータとして、1/3スケールの円柱及び角柱の試験体を礎石にめり込ませる。本実験を通じて、鉛直荷重の大きさが柱脚に作用する反力とその作用位置に及ぼす影響を明らかにする。この実験結果を基に、柱脚のモーメント-回転角関係を予測する手法を定式化する。また実寸大の柱脚要素の頂部に一定鉛直力と繰返し強制水平変位を与える実験結果と提案手法の予測結果との比較を通じて、提案手法の妥当性を検証する。また、これらの比較を通じて寸法効果についても検討を行う。

第4章では柱脚底面と礎石間で生じる滑り挙動を調べ、静摩擦特性のモデル化について検討する。固定角度を実験パラメータとして1/3スケールの円柱及び角柱の試験体を用いて、それぞれの静摩擦係数を求める。回転角による柱底面の接触面積、鉛直力の違い、載荷の繰返し数などが静摩擦係数に及ぼす影響について検討を行う。

第5章では、本研究で得られた結果と今後の課題について述べる。

## 参考文献

- 1) 腰原幹雄, 松田昌洋, 津和佑子:平成 19 年新潟県中越沖地震における木造社寺建築の被害, 生産研究, Vol.60, No.2, pp.138-142, 2008
- 2) 木質構造設計基準・同解説 ―許容応力度・許容耐力設計法―, 日本建築学会, 2006
- 3) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計, (財)日本住宅・木材技術センター, 1991
- 4) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会:伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル ―限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法, 学芸出版社, 2004
- 5) 伝統的な軸組構法を主体とした木造住宅・建築物の耐震性能評価・耐震補強マニュアル, (社)日本建築構造技術者協会関西支部, 2009.9
- 6) 坂静雄:社寺骨組の力学的研究(第 2 部 貫の耐力), 建築学会大会論文集, pp.259-268, 1941.4
- 7) 後藤一雄:貫通仕口による木造ラーメン(大黒柱)構造の研究 ―その 1 仕口の挙動に関する実験的研究―, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 366 号, 1986, 8
- 8) 稲山正弘:木材のめり込みとその応用, 東京大学博士学位論文, 1991
- 9) 北守頭久, 加藤泰世, 片岡靖夫, 小松幸平:伝統木造における貫接合部の耐力発現モデルの提案と実験的検証, 木材学会誌, Vol.49, No.3, pp.179-186, 2003
- 10) 前野将輝, 鈴木祥之:伝統木造軸組の実大実験による柱―横架材接合部の曲げモーメント抵抗に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 601 号, pp.113-120, 2006.3
- 11) 前野将輝:寺院建築物における伝統木造軸組の構造力学特性と耐震性能, 京都大学博士論文, 2007
- 12) 森迫清貴, 三宅裕子, 北尾聡子:伝統木造架構の柱―貫仕口部の繰り返し載荷実験に基づく履歴曲線のモデル化, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.503-512, 2005.3
- 13) 坂静雄:社寺骨組の力学的研究(第 1 部 柱の安定復元力), 建築学会大会論文集, pp.252-258, 1941.4
- 14) N. Kawai: Column Rocking Resistance in Japanese Traditional Timber Buildings, *Proceedings of the International Wood Engineering Conference*, Vol.1, pp.183-190, 1996.10

- 15) 佐分利和宏，長瀬正：伝統的木造架構における柱傾斜復元力に関する構造解析，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1，pp.143-144，2000.9
- 16) 前野将輝，西塔純人，鈴木祥之：伝統木造軸組の実大実験による柱に加わる力の釣合関係と柱傾斜復元力特性の評価，日本建築学会構造系論文集，第 615 号，pp.153-160，2007.5
- 17) 上谷宏二，荒木慶一，家倉優人，吉田亘利：伝統木造建築物柱脚の平面接触モデルに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 582 号，pp.117-122，2004.8
- 18) 西岡聡，森山敏行，西澤英和：国宝妙喜庵寺庵の実物大モデルの振動台実験 基礎と柱とを繋結しない形式の伝統木造建築の耐震性状に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp.93-100，2006.10
- 19) 向坊恭介：伝統工法木造建物の地震応答と耐震性能に関する研究，京都大学博士論文，2008

## 第2章. むり込み実験に基づく柱一貫半剛接合部復元力特性のモデル化

### 2.1. 序

伝統木造建築物では、鉄骨構造や鉄筋コンクリート構造の建築物と異なり接合部を完全剛接合とみなすことが出来ない。そのため、接合部を半剛接合として構造解析が行われることが多い<sup>1-3)</sup>。このように接合部を半剛接合として構造解析を行う場合、半剛接合部の復元力特性を適切にモデル化することは、伝統木造建築物全体の構造性能を評価する上で一次的に重要な課題である。

接合部の中でも柱一貫接合部の復元力特性は、地震力への抵抗機構の中で重要な役割を果たす。これまでに、柱一貫接合部の数値モデルや定式化が複数提案されている<sup>3-10)</sup>。坂<sup>4)</sup>、後藤<sup>5)</sup>、稲山<sup>6)</sup>らは木材のむり込み特性と柱一貫接合部の関係を論じ、接合部のモーメント-回転角関係を定式化した。小松ら<sup>7,8)</sup>は楔の初期支圧力や形状がモーメント-回転角関係に及ぼす影響を検討している。前野と鈴木<sup>10)</sup>は架構全体の実大実験を実施し、その結果から柱一貫接合部のモーメント-回転角関係をモデル化した。森迫ら<sup>9)</sup>は、前野と鈴木の実大実験と同一寸法の柱一貫接合部の部分架構について実験を行い、その復元力特性をモデル化している。

柱一貫接合部では、柱と貫の相対回転角の進行に伴い柱が貫や楔にむり込む形で変形が進行するため、木材のむり込み特性が復元力特性に大きな影響を及ぼすと予測される。木材のむり込み特性は相対回転角に応じて変化するが、上記の一連の研究では相対回転角の変化に応じたむり込み特性の変化や、この変化が接合部の復元力特性に及ぼす影響は考慮されていない。また、伝統木造建築物の仕口で用いられることが多い楔や切欠きなど<sup>11-14)</sup>が復元力特性に及ぼす影響については、まだ未解明な点が多く残されている。

本論文では、柱脚のモーメント-回転角関係に関する上谷ら<sup>15)</sup>の手法を参考に、(1) 楔や仕口での切欠きを考慮した上で、柱と貫の相対回転角に応じたむり込み特性に関する実験データを収集し、これらの実験データからむり込み構成則を得ることと、(2) 得られたむり込み構成則から柱一貫接合部のモーメント-回転角骨格曲線をどの程度の精度で推定できるかを、部分架構実験結果との比較を通じて検討することの二点を主たる目的とする<sup>註1)</sup>。また、仕口での切欠きが骨格

曲線に及ぼす影響についても検討を行う。

本研究の具体的な課題は以下の通りである。(1) 要素めり込み実験を行い、めり込み形状と境界反力を関係付ける断面力レベルでの構成則を得る。(2) 上記のめり込み構成則を用いて、柱一貫接合部のモーメント一回転角関係骨格曲線を予測する手法を定式化する。(3) 提案手法による予測骨格曲線と、柱一貫接合部の部分架構実験結果との比較により、提案手法の妥当性を検討する。なお、本論文では典型的な柱一貫接合部<sup>11-14)</sup>の具体的な一例として、図 2.1 に示す前野ら<sup>3,10)</sup>及び森迫ら<sup>9)</sup>と同一寸法、樹種、楔と仕口の切欠きの形状を有する柱一貫接合部を取り上げ<sup>注3)</sup>、その骨格曲線推定手法の妥当性を検討することに研究の焦点を絞り、寸法効果、楔の形状、接合部内での貫の継ぎ手などの影響は今後の研究課題とする。

## 2.2. 基礎式

### 2.2.1. 柱一貫接合部の幾何学的関係

図 2.2 のような二次元柱一貫接合部を考える。各部材は剛体であると仮定する。柱の代表点を  $O$  とし、貫の代表点を  $O'$  とする。貫と柱の材軸の交点を  $O, O'$  の初期位置とする。各部材の材軸から沿って部材座標  $O-xy, O'-x'y'$  をとる。図 2.2 の平面図で貫と接触する柱の端点をそれぞれ  $A, B, C, D$  とし、柱部材座標上の点とする。貫の上下面に点  $O'$  から垂直線を下ろし、その交点をそれぞれ  $P, Q$  とする。

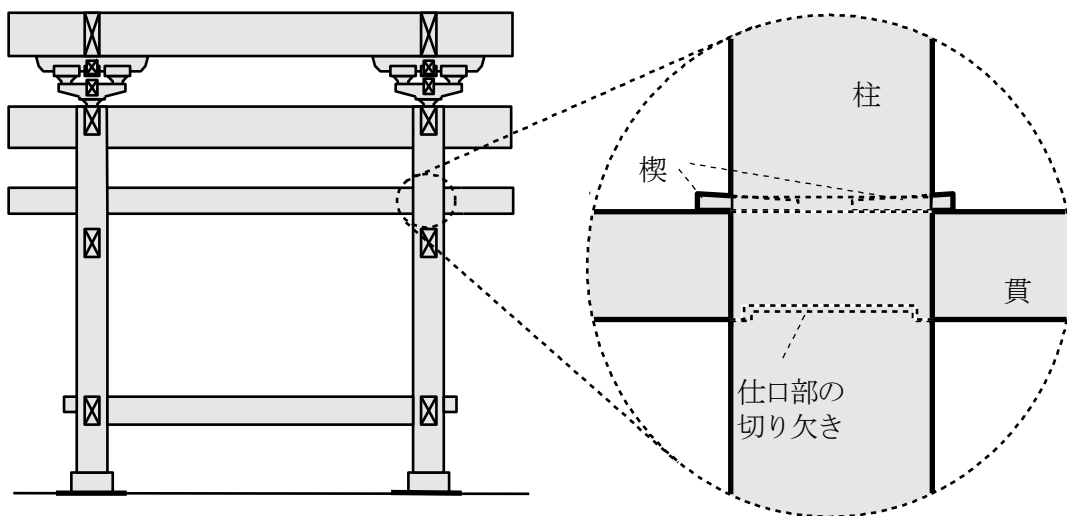


図 2.1 伝統木造建築物の柱一貫接合部の例

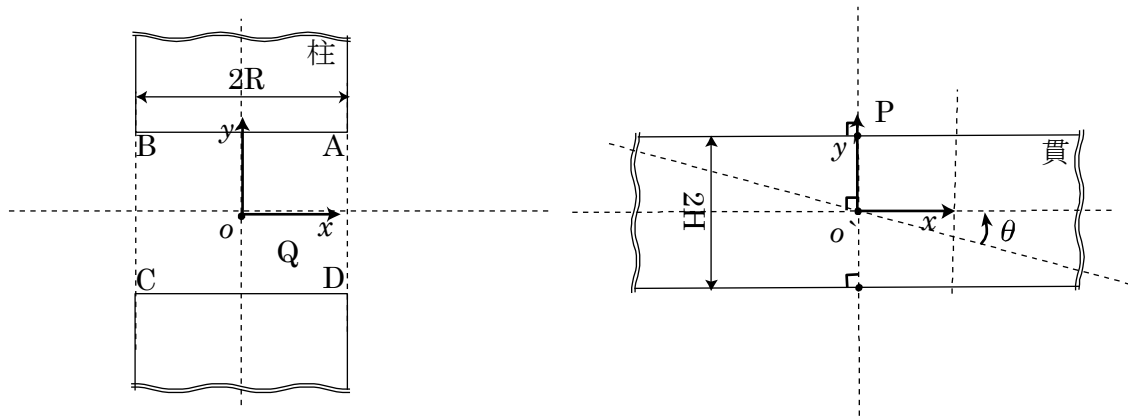


図 2. 2 二次元モデルの柱－貫接合部

ここで各点の定義は以下の通りである。

O	貫と柱の材軸の交点
O	柱の代表点(初期位置は貫材の材軸の交点)
O'	貫の代表点
A	貫上面と接触する柱の端点
B	貫上面と接触する柱の端点
C	貫下面と接触する柱の端点
D	貫下面と接触する柱の端点
P	点 O から貫上面に下ろした垂直線と貫上面との交点
Q	点 O から貫下面に下ろした垂直線と貫上面との交点

柱部材座標上のベクトル  $OA, OB, OC, OD$  を  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  と書く。また、貫部材座標上のベクトル  $O'P, O'Q$  を  $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$  と書く。 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  は  $O$ - $xy$  座標上のベクトルで、 $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$  は  $O$ - $x'y'$  座標上のベクトルである。この時、

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} -R \\ H \end{Bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{Bmatrix} R \\ H \end{Bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{Bmatrix} -R \\ -H \end{Bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{Bmatrix} R \\ -H \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

と書ける。ここで  $R$  は柱の半径であり、 $2H$  は貫の幅の  $1/2$  の長さである。

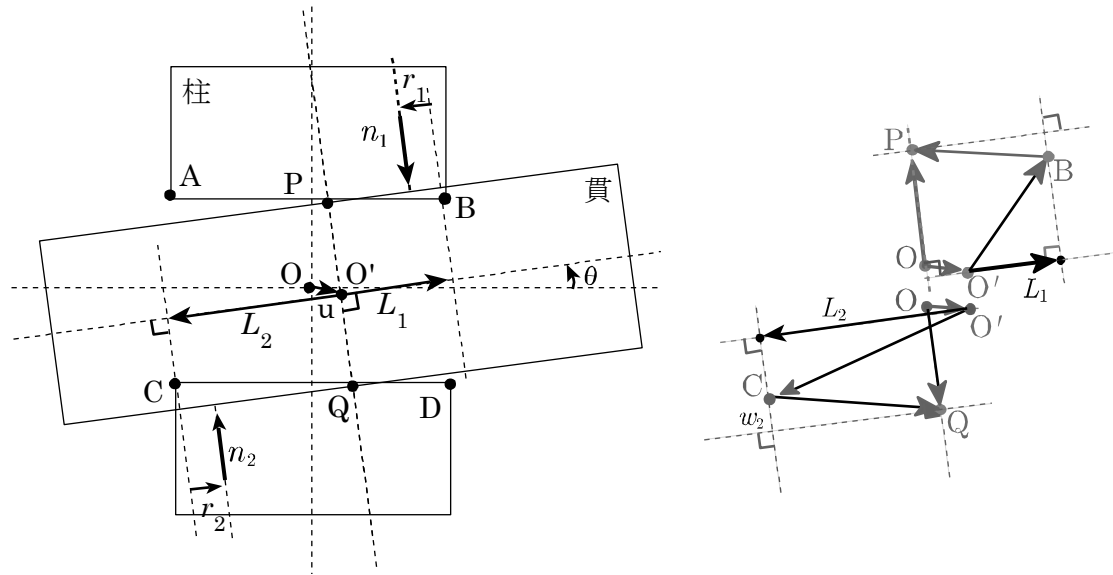


図 2.3 柱-貫接合部の並進、回転モデル

また、 $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$  方向の単位ベクトルをそれぞれ  $e_p, e_q$  と書く。図 2.3 の  $\mathbf{P}, e_p$  は

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ H \end{pmatrix}, e_p = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

また  $\mathbf{Q}, e_q$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ -H \end{pmatrix}, e_q = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

と書ける。

次に、代表点  $O'$  を中心に貫が並進、回転(柱固定)する場合を考える。ここで以下のように変数を定義する。

記号	$N_1$	上部接触面において柱から貫が受ける集中反力
	$r_1$	上部接触面において貫と接触する柱の端点 B からの $N_1$ の作用線の位置
	$w_1$	柱の端点 B からの貫の接触面の位置
	$l_1$	貫の代表点からの $N_1$ 作用線の位置
	$L_1$	貫の代表点からの、貫の接触する柱の端点 B を通る $N_1$ の作用線と平行な直線の距離



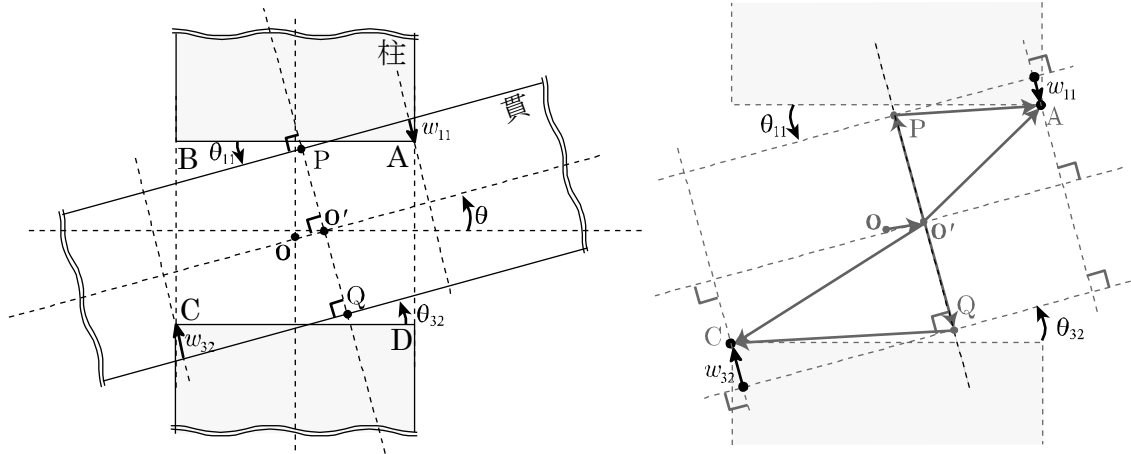


図 2.4 柱－貫接合部の並進、回転モデル(柱固定)

代表点  $O'$  水平、鉛直、回転変位を  $u, v, \theta$  で表す。  $\mathbf{u}$  は

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

と成分表示できる。この時、楔は貫とともに移動するものとする。ここでは、柱部材座標で式を展開する。次に各接触面に関して  $w_k(u, v, \theta), \theta_k(\theta)$  を求める。

貫の上面のめり込み量を  $w_1$ 、下面でめり込み量を  $w_2$  とする。ここで  $w_1$  は  $-e_p$  の方向とベクトル  $\mathbf{AP}$  を直線  $\mathbf{O'P}$  上に投影した長さを持つベクトル、  $w_2$  は  $-e_q$  の方向とベクトル  $\mathbf{DQ}$  を直線  $\mathbf{O'Q}$  上に投影した長さを持つベクトルである。柱部材座標で式を書くと、

$$\begin{aligned} w_1 &= (\mathbf{OO}' + \mathbf{O'P} - \mathbf{OB}) \cdot \frac{\mathbf{O'P}}{\sqrt{\mathbf{O'P}^2}} \\ &= (\mathbf{u} + [\mathbf{T}(\theta)]\mathbf{P} - \mathbf{B}) \cdot [\mathbf{T}(\theta)\mathbf{e}_p] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} w_2 &= (\mathbf{OO}' + \mathbf{O'Q} - \mathbf{OC}) \cdot \frac{\mathbf{O'Q}}{\sqrt{\mathbf{O'Q}^2}} \\ &= (\mathbf{u} + [\mathbf{T}(\theta)]\mathbf{Q} - \mathbf{C}) \cdot [\mathbf{T}(\theta)\mathbf{e}_q] \end{aligned} \quad (2.6)$$

と書ける。また、このモデルでは

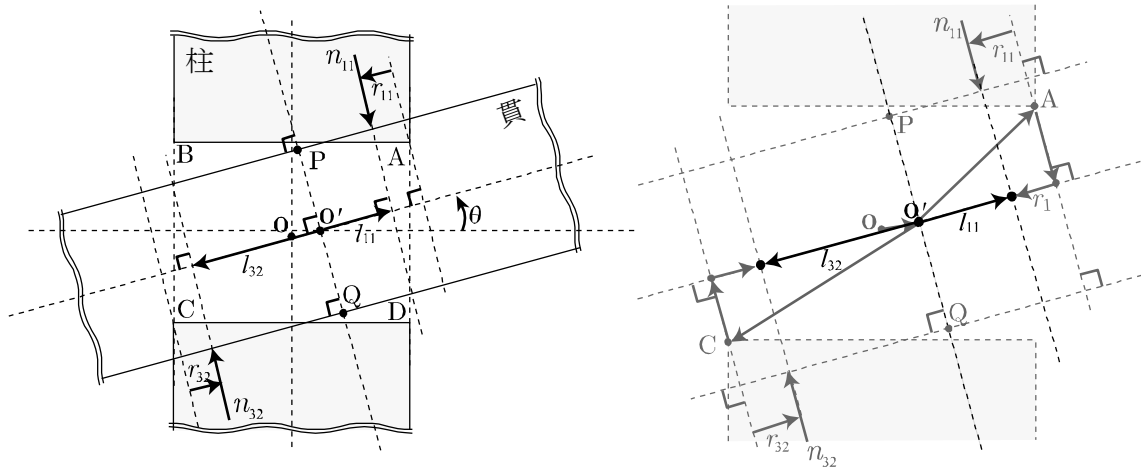


図 2.5 柱－貫接合部の作用線の位置関係

$$\theta_k(u', v', \theta') = \theta' \quad (2.7)$$

である。

ここで  $[\mathbf{T}]$  は回転行列であり、以下のように定める。

$$[\mathbf{T}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

次に、貫の代表点  $O'$  から  $N_1, N_2$  の作用線までの距離  $l_1, l_2$  を求める。貫の代表点  $O'$  から  $N_1$  の作用位置までの距離  $l_1$  は、ベクトル  $O'A$  を、 $N_1$  の作用線と直行方向に投影した長さ  $L_1$  から  $r_1$  を引いた値である。線分  $FE$  と線分  $O'P$  は直行することから、線分  $FE$  の単位ベクトルを  $[\mathbf{T}(\theta + \pi/2)]\mathbf{e}_p$  と表すと、式(2.9)のようになる。

$$\begin{aligned} l_1 &= L_1 - r_1 \\ &= O'B \cdot \left[ \mathbf{T}\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \right] \mathbf{e}_p \\ &= (\mathbf{B} - \mathbf{u}') \cdot \left[ \mathbf{T}\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \right] \mathbf{e}_p - r_1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

同様に貫の代表点  $O'$  から  $N_2$  の作用位置までの距離  $l_2$  はベクトル  $O'D$  を  $N_2$  の作用線と直行方向に投影した長さ  $L_2$  から  $r_2$  を引いた値であることから、式(2.10)のようになる。

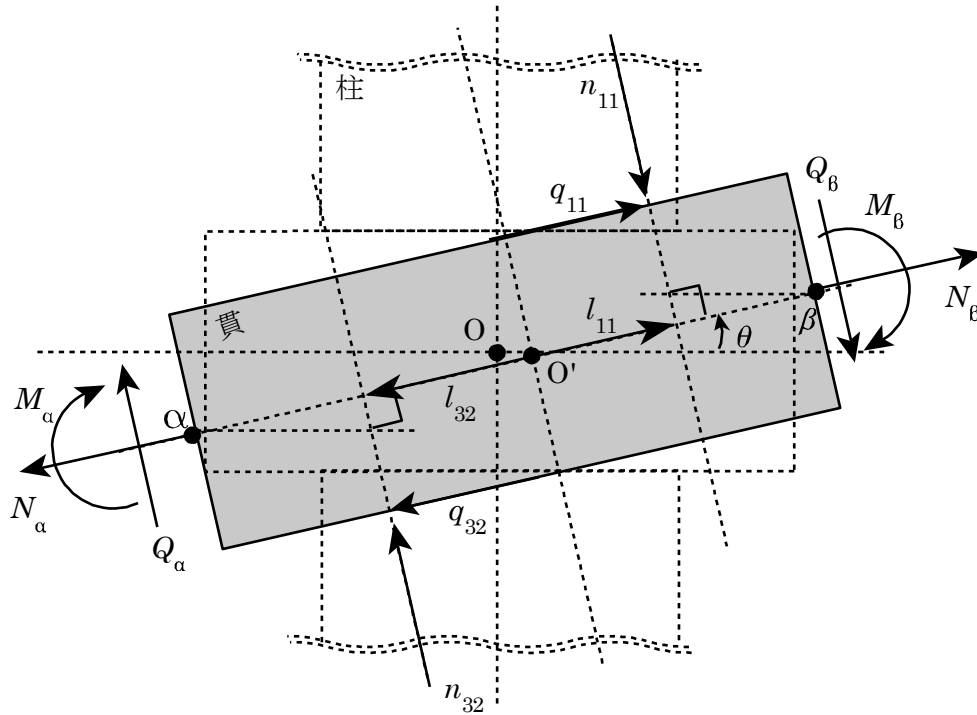


図 2.6 力の釣り合い関係

$$\begin{aligned}
 l_2 &= L_2 - r_2 \\
 &= O'C \cdot \left[ \mathbf{T} \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right] \mathbf{e}_q \\
 &= (\mathbf{C} - \mathbf{u}') \cdot \left[ \mathbf{T} \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right] \mathbf{e}_q - r_2
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

前節で求めた貫の代表点  $O'$  から  $n_1, n_2$  の作用線までの距離  $l_1, l_2$  を用いて、貫部材座標軸方向と  $O'$  回りのモーメントの釣り合式を立てると

$$-N_\alpha + N_\beta = 0 \tag{2.11}$$

$$-Q_\alpha + Q_\beta - n_1 + n_2 = 0 \tag{2.12}$$

$$M_\alpha + M_\beta + Q_\alpha L_\alpha + Q_\beta L_\beta - l_1 n_1 - l_2 n_2 = 0 \tag{2.13}$$

となる。また三つ目の式は  $r_1, r_2$  を用いて

$$M_\alpha + M_\beta + Q_\alpha L_\alpha + Q_\beta L_\beta - (L_1 - r_1) n_1 - (L_2 - r_2) n_2 = 0 \tag{2.14}$$

と書ける。

これらの式から、めり込みモデルを用いた、柱一貫接合部での各部材の剛域の相対変位と剛域間に作用する接触反力の関係を用いた剛域の釣合式が得られる断面力の関係が得られる。これらの関係を用いて第2章後半では柱一貫接合部の接触構成則を求める実験を行う。

### 2.2.2. めり込み構成則の記述

本節では、めり込み形状、めり込みにより生じる境界反力、これらの関係式を記述する。まず、楔や仕口の切欠きがない場合を考える。めり込み形状をできるだけ単純化して記述するため、図2.2のように各部材の接合部周辺部位に仮想剛域を設定し、互いの剛域が重なりあう三角形形状を用いてめり込み形状を記述する<sup>注3)</sup>。柱端部のめり込み量を  $w$  とし、柱と貫の相対変形角度  $\theta$  とすると、めり込み形状は  $(w, \theta)$  を独立変数として表せる。

本モデルでは、柱から貫の接触面に作用する境界分布反力を、静的等価な集中境界反力に置換する。等価集中境界反力の大きさを  $n$ 、柱端部を原点とする作用線位置を  $r$  とすると、この等価集中境界反力は  $(n, r)$  を独立変数として表せる。境界分布反力は接触面の垂直方向成分と接線方向成分に分解できる。本研究ではめり込み特性に焦点を絞るため垂直方向成分のみを考慮し、接線方向成分の影響は2.2節の最後と2.3節で考察を行うに留める。

これらの変数を用いて、めり込み形状と境界反力を関係付けるめり込み構成則を、以下の関数形で定式化する。このようにめり込み形状やめり込み反力を定義することにより、楔や仕口を考慮する場合でも、めり込み形状とめり込み反力をそれぞれ  $(w, \theta)$  と  $(n, r)$  を独立変数として表せる。楔や仕口を考慮する場合の各変数の定義を図2.7に示す。

$$n = f(w, \theta), \quad r = g(w, \theta) \quad (2.15)$$

### 2.2.3. 柱一貫接合部モーメントー回転角骨格曲線の定式化

要素のめり込み実験より式(2.15)のめり込み構成則が得られたとする。この時に、図2.9(a)の柱一貫接合部のモーメントー回転角関係の骨格曲線を推定することを考える。具体的には、柱を固定して貫に繰返し強制変位を与えた時の、柱フューズ位置における貫のモーメントと、貫回転角との関係を推定する。本論文で

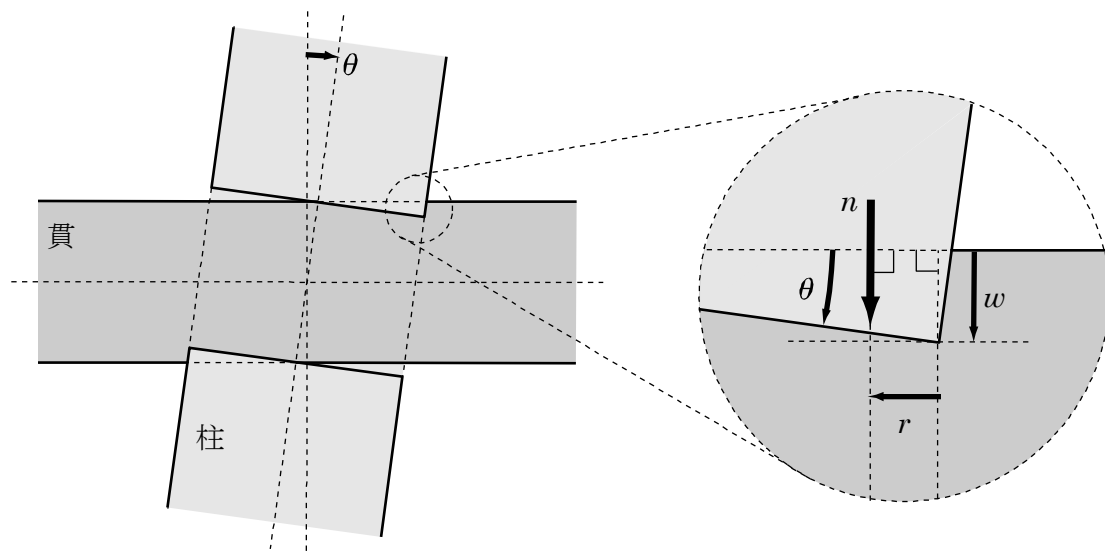


図 2.7 接合部におけるめり込みの記述（楔・仕口の切欠き非考慮）

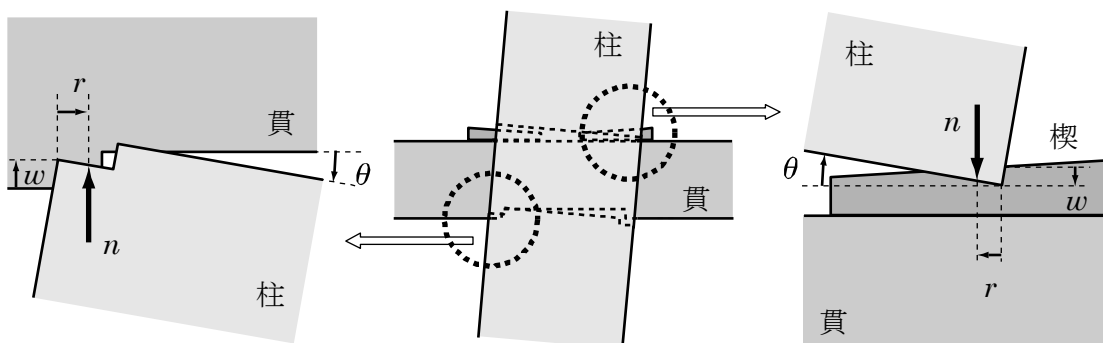


図 2.8 接合部におけるめり込みの記述（楔・仕口の切欠き考慮）

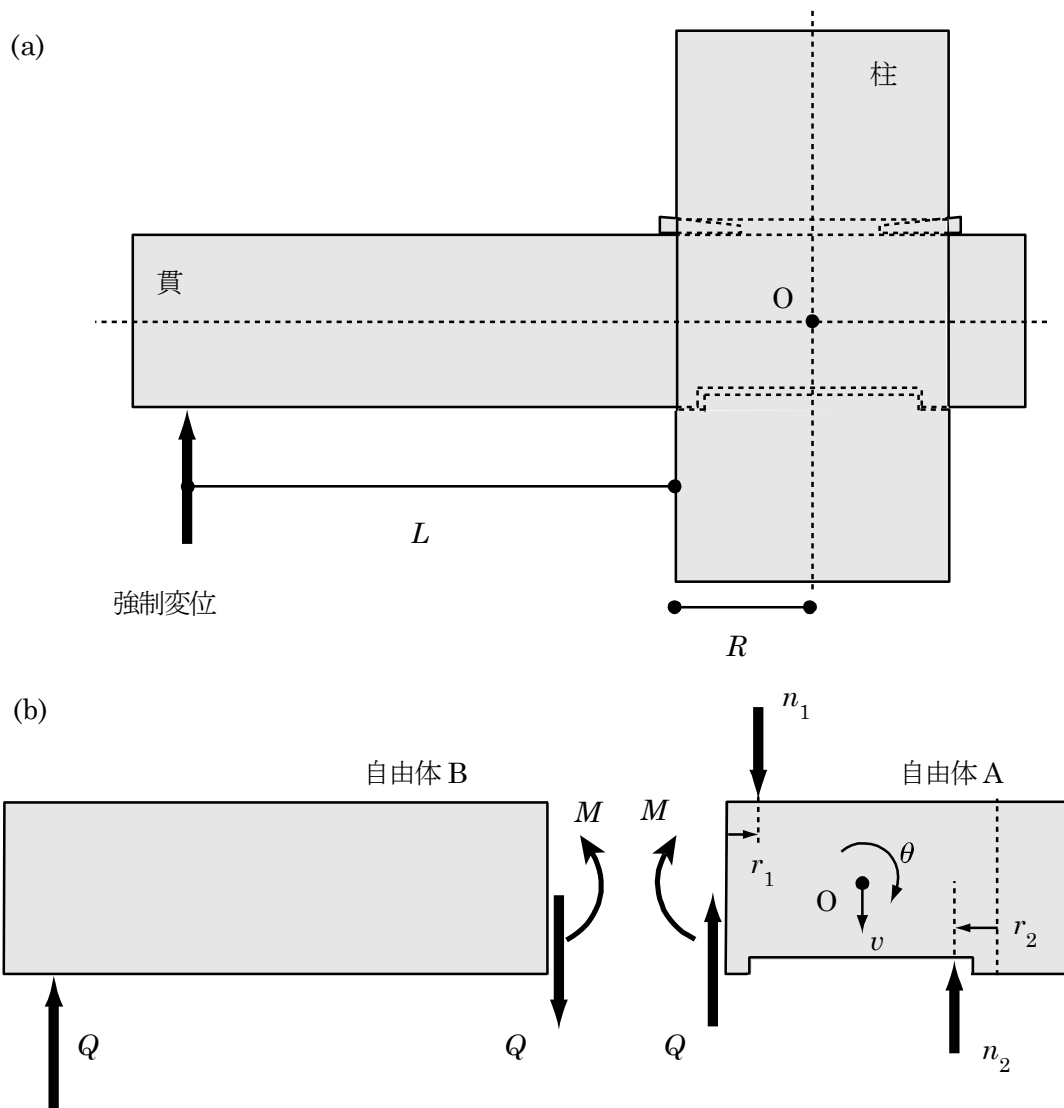


図 2. 9 (a)柱－貫接合部，(b)貫の自由体への分割と釣合

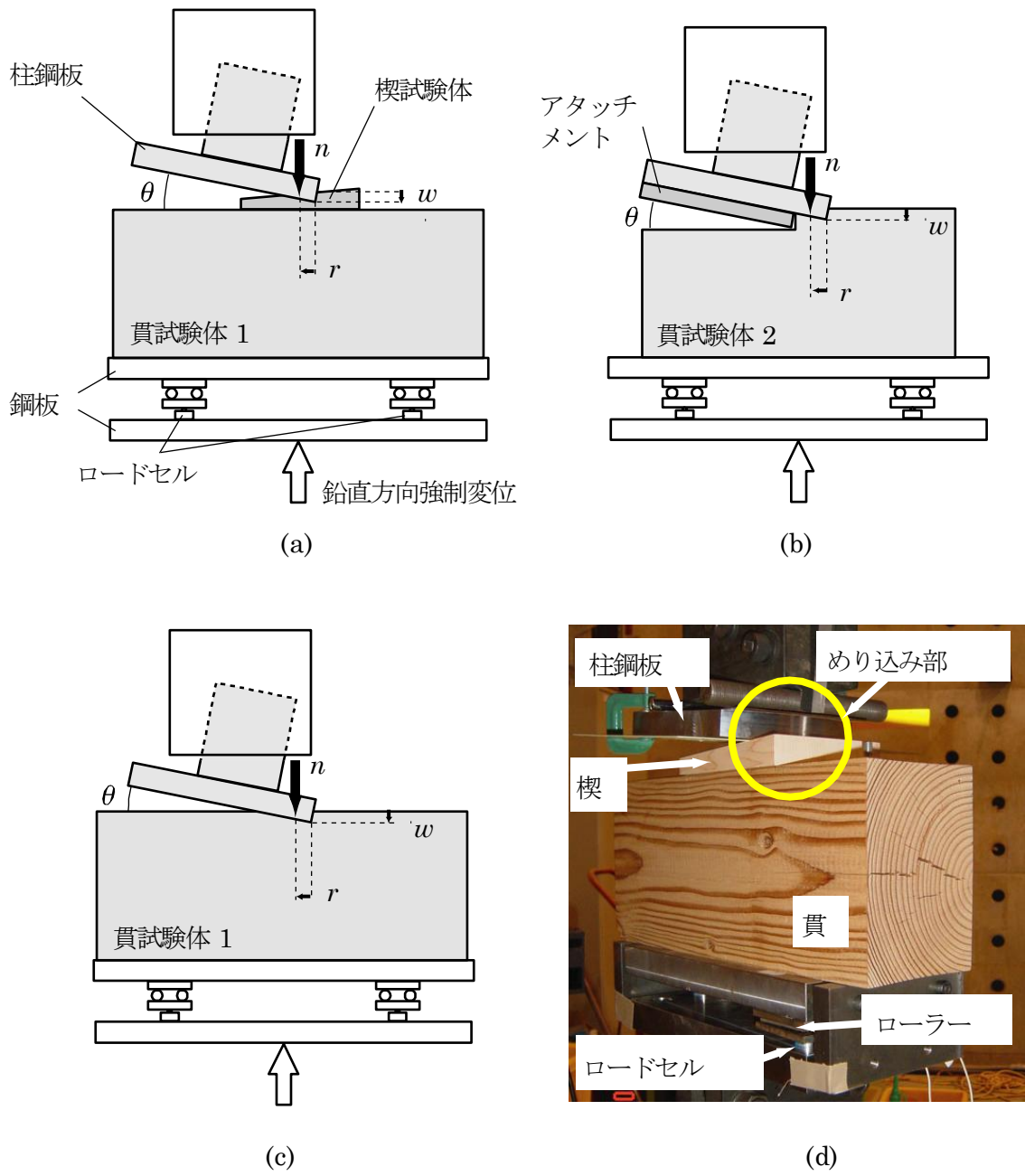


図 2.10 (a)貫上部試験, (b)貫下部試験 (切欠き考慮), (c) 貫下部試験 (切欠き非考慮), (d)貫上部試験写真

は実験との比較を行うため、図 2.9(b)のように貫を仮想的に切断し、めり込み構成則を用いてフェース位置で貫に作用するモーメントを求める。接合部側の自由体を自由体 A とし、载荷点側の自由体を自由体 B と呼ぶ。自由体 A の代表点として点 O を採用する。図 2.9(a)に示すように、変形前に点 O は柱の材軸と貫の材軸の交点に位置する。点 O の鉛直変位と回転角をそれぞれ  $v$  と  $\theta$  とし、柱の半径を  $R$  とする。貫の上部と下部の接触部での諸量を、それぞれ、下添字の 1 と 2 を用いて表す。幾何学的関係から上下接触面での回転角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  について  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  が成り立ち、めり込み量  $w_1$ 、 $w_2$  は以下のように  $\theta$  と  $v$  の関数として表せる。

$$w_1 = -v + R\theta, \quad w_2 = v + R\theta \quad (2.16)$$

$$Q - n_1(w_1, \theta_1) + n_2(w_2, \theta_2) = 0 \quad (2.17)$$

$$M + n_1(w_1, \theta_1)r_1(w_1, \theta_1) - n_2(w_2, \theta_2)\{2R - r_2(w_2, \theta_2)\} = 0 \quad (2.18)$$

$$M - QL = 0 \quad (2.19)$$

ここで  $\theta$  は微小であると仮定し  $\sin\theta = \theta$ 、 $\cos\theta = 1$  の近似を用いた。

各接触面に働く集中反力の大きさを  $n_1$ 、 $n_2$  とし、 $r_1$ 、 $r_2$  を集中反力の作用線位置とする。柱フェース位置でのモーメントを  $M$ 、せん断力を  $Q$  とする。また、载荷点から柱フェース位置までの距離を  $L$  とする。この時、次式が成り立つ。

式(2.19)と式(2.18)は、自由体 A のせん断力とモーメントの釣合式であり、式(2.19)は、自由体 B のモーメントの釣合式である。 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  にめり込み構成則の式(2.19)を代入し、幾何学的関係から  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $w_1$ 、 $w_2$  を消去すると、式(2.17)－(2.19)は  $v$ 、 $\theta$ 、 $M$ 、 $Q$  の 4 個を独立な未知変数とする方程式となる。これらの中で  $\theta$  を指定すれば、方程式の数と未知数の数がいずれも 3 個となり、指定した  $\theta$  に対応する  $M$  が  $v$  や  $Q$  と共に求められる。

### 2.3. 要素めり込み実験

めり込み構成則の式(2.19)の  $f$  と  $g$  の関数形の定式化を目的として、独立変数  $(w, \theta)$  のうち回転角  $\theta$  を固定して強制めり込み実験を行う。



### 2.3.1. 実験概要

実験の概要を図 2.10 に示す。森迫ら<sup>9)</sup> 及び前野と鈴木<sup>3,10)</sup>の実験と同様に、試験体の樹種として、貫要素にはマツ、楔にはヒノキ又はアサメラを用いる。柱一貫接合部における柱のめり込み剛性は、通常、繊維方向の違いから貫と比べて10倍程度高い。このことを考慮し、本論文では柱要素を鋼板で模擬する。以下ではこの鋼板を柱鋼板と呼ぶ。試験体の寸法を図 2.11 に示す。

図 2.10 (a)–(c)に示すように、貫の上下接触面を取り出し、別個にめり込み実験を行う。柱鋼板に回転角 $\theta$ を与え、上部を材料試験機の上側に完全固定する。材料試験機の下側に設置した鋼製治具の上にロードセルを配置し、その上にローラー、ローラー上に鋼板、鋼板上に貫試験体を配置する<sup>注4)</sup>。材料試験装置の下側から鉛直方向の準静的漸増振幅繰返し強制変位を与え、柱鋼板に楔や貫試験体をめり込ませる。貫上部接触面の試験では、図 2.10 (a)に示すように貫の上に楔をさらに設置する。仕口の切欠きを考慮した貫下部接触面をボルト留めし、仕口における柱の切欠きを模擬する。仕口の切欠きを無視した貫下部接触面の試験では、図 2.10 (c)に示すように柱鋼板を直接貫要素にめり込ませる。貫の下の鋼製治具と柱鋼板の相対変位をめり込み量 $w$ として計測する。荷重の計測値と貫に関するモーメントの釣合式から、分布反力の合力 $n$ と重心位置 $r$ が求められる。

### 2.3.2. 実験計画の詳細

以下の4通りの場合について実験を行う。Case A：図 2.10 (a)で楔ヒノキとする場合（貫上部・楔ヒノキ）、Case B：図 2.10 (a)で楔アサメラとする場合（貫上部・楔アサメラ）、Case C：図 2.10 (b)の場合（貫下部：切欠き有）、Case D：図 2.10 (c)の場合（貫下部：切欠き無）。

各 Case について、 $1/10$ ,  $1/15$ ,  $1/30$ ,  $1/60$  (rad) の4通りの固定角度 $\theta$ についてめり込み実験を実施する。本実験で使用する材料試験機の最大荷重（=100(kN)）の制約から、 $n$ が最大で80(kN)程度になるように強制変位を与える。Case A と Case B の試験では、各回転角の値に対して3本の楔に対して試験を行う。予備実験では楔に残留めり込みが生じたが、貫には残留めり込みが生じなかった。そのため、各 Case で同一の貫試験体に対する実験を行った。さらに、Case A, B で用いた貫試験体では目視で残留めり込みが確認できなかったため、Case D でこれらの試験体を用いてめり込み試験を行った。その際には、めり込みが生じる面が Case A, B と反対側になるように試験体を設置した。

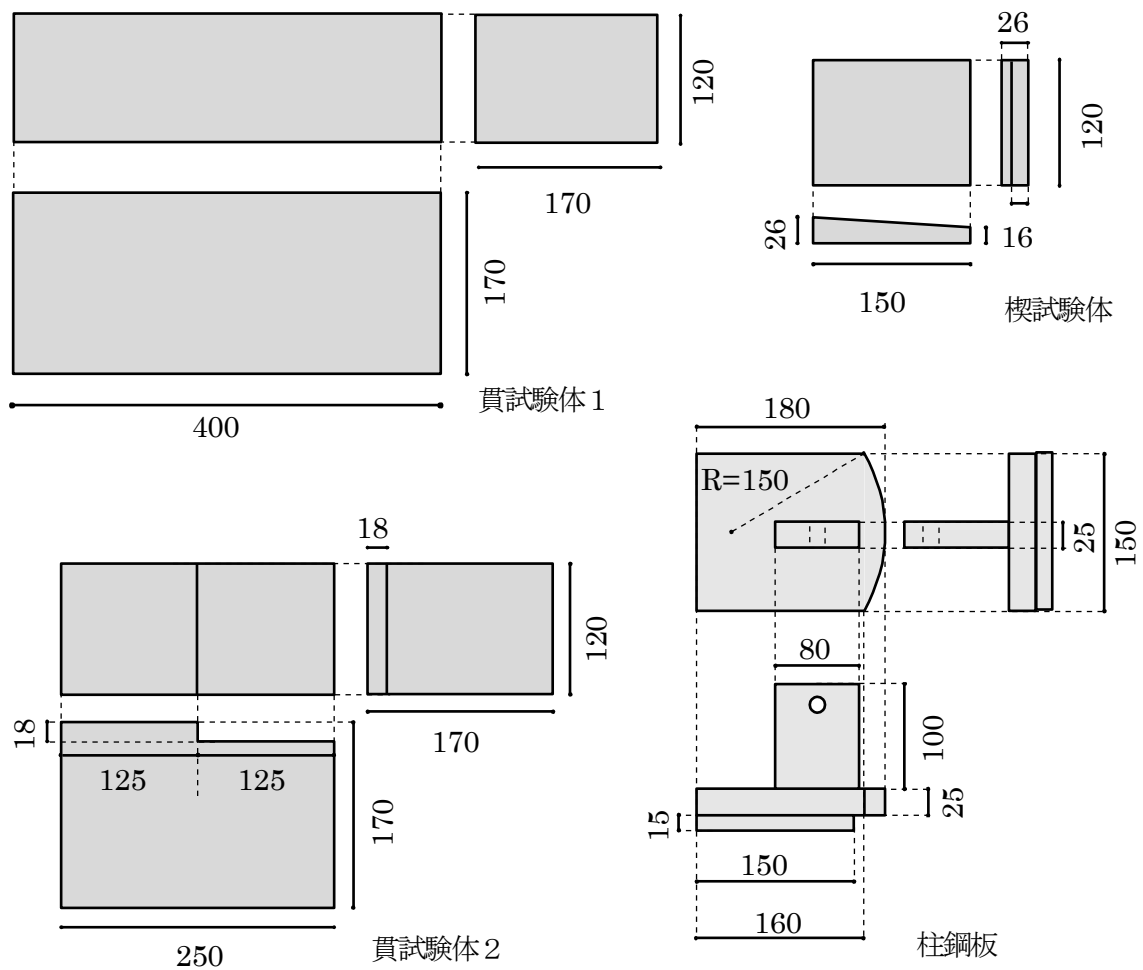


図 2.11 要素めり込み実験で用いる試験体の基準寸法（単位 mm）

表 2.1 めり込み試験の詳細

Case	試験番号	$\theta$	貫試験体番号	楔試験体番号
A	A10-1,A-10-2,A10-3	1/10	n1-1	kh1,kh2,kh3
	A15-1,A-15-2,A15-3	1/15	n1-2	kh4,kh5,kh6
	A30-1,A-30-2,A30-3	1/30	n1-3	kh7,kh8,kh9
	A60-1,A-60-2,A60-3	1/60	n1-4	kh10,kh11,kh12
B	B10-1,B-10-2,B10-3	1/10	n1-5	ka1,ka2,ka3
	B15-1,B-15-2,B15-3	1/15	n1-6	ka4,ka5,ka6
	B30-1,B-30-2,B30-3	1/30	n1-7	ka7,ka8,ka9
	B60-1,B-60-2,B60-3	1/60	n1-8	ka10,ka11,ka12
C	C10-1,C-10-2,C10-3	1/10	n2-1,n2-2,n2-3	
	C15-1,C-15-2,C15-3	1/15	n2-4,n2-5,n2-6	
	C30-1,C-30-2,C30-3	1/30	n2-7,n2-8,n2-9	
	C60-1,C-60-2,C60-3	1/60	n2-10,n2-11,n2-12	
D	D10-1,D-10-2,D10-3	1/10	n1-1,n1-2,n1-3	
	D15-1,D-10-2,D10-3	1/15	n1-4,n1-5,n1-6	
	D30-1,D-10-2,D10-3	1/30	n1-7,n1-8,n1-9	
	D60-1,D-10-2,D10-3	1/60	n1-10,n1-11,n1-12	

表 2. 2 試験体詳細

試験体番号	心材 or 辺材	年輪幅(mm)	重量(g)	含水率(%)	比重(g/cm)
n1-1	辺材	17	4550	21.0	0.5569
n1-2	辺材	15	4630	19.5	0.5667
n1-3	辺材	16	4560	21.0	0.5581
n1-4	辺材	19	4480	21.5	0.5483
n1-5	辺材	15	4290	20.0	0.5250
n1-6	辺材	16	4620	20.0	0.5654
n1-7	辺材	16	4680	21.0	0.5728
n1-8	辺材	31	4770	18.0	0.5838
n1-9	辺材	28	4610	20.5	0.5642
n1-10	辺材	18	3900	17.0	0.4773
n1-11	辺材	31	4870	20.0	0.5960
n1-12	辺材	35	4620	16.0	0.5654
n2-1	辺材	28	2730	21.5	0.5617
n2-2	辺材	20	2280	17.5	0.4691
n2-3	心材	33	2650	22.0	0.5463
n2-4	辺材	29	2700	15.5	0.5556
n2-5	辺材	16	2550	17.7	0.5247
n2-6	辺材	28	2630	21.5	0.5412
n2-7	心材	23	2290	13.0	0.4712
n2-8	心材	25	2310	13.0	0.4753
n2-9	心材	33	2590	20.0	0.5329
n2-10	辺材	28	2580	16.5	0.5309

n2-11	边材	19	2320	13.5	0.4774
n2-12	心材	19	2260	17.0	0.4650
kh1	心材	6	178	19.0	0.4709
kh2	心材	5	174	19.5	0.4603
kh3	心材	7	174	17.0	0.4603
kh4	心材	6	174	18.0	0.4603
kh5	心材	5	176	19.0	0.4656
kh6	心材	5	176	19.5	0.4656
kh7	心材	5	176	19.5	0.4656
kh8	心材	6	174	19.5	0.4603
kh9	心材	7	190	22.0	0.5026
kh10	心材	11	200	22.0	0.5291
kh11	心材	9	194	20.5	0.5132
kh12	心材	9	192	21.5	0.5079
kh1	边材	22	272	9.5	0.7196
kh2	边材	21	282	11.0	0.7460
kh3	边材	23	274	10.5	0.7249
kh4	心材	24	273	11.0	0.7222
kh5	边材	20	270	8.5	0.7143
kh6	心材	23	272	10.0	0.7196
kh7	心材	26	272	9.0	0.7196
kh8	心材	23	272	9.5	0.7196
kh9	边材	23	274	9.0	0.7249
kh10	心材	21	280	9.0	0.7407
kh11	心材	22	278	9.0	0.7354
kh12	边材	27	288	9.0	0.7619

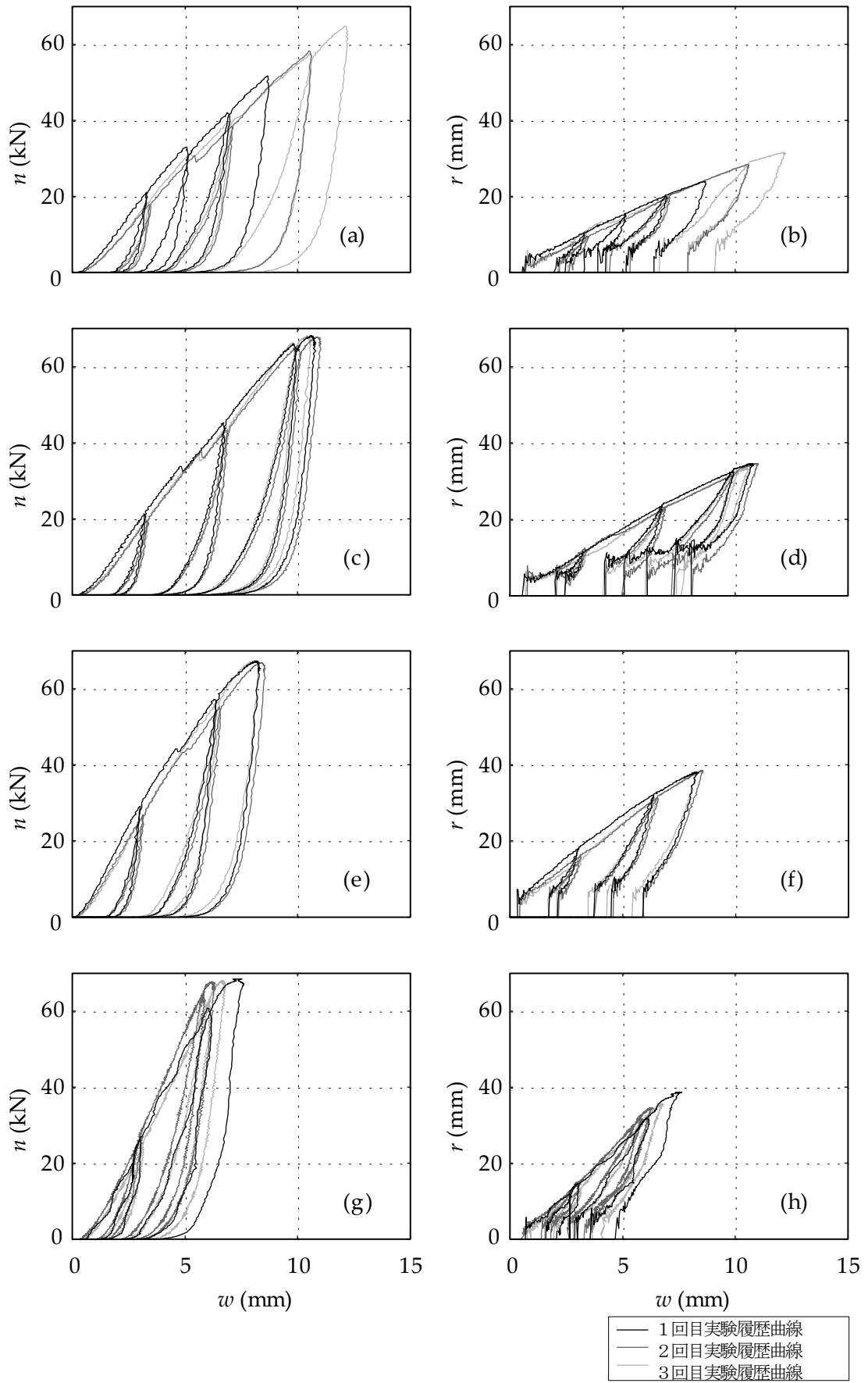


図 2. 12 Case A 実験結果:(a-b)  $\theta=1/10$ , (c-d)  $\theta=1/15$ , (e-f)  $\theta=1/30$ , (g-h)  $\theta=1/60$

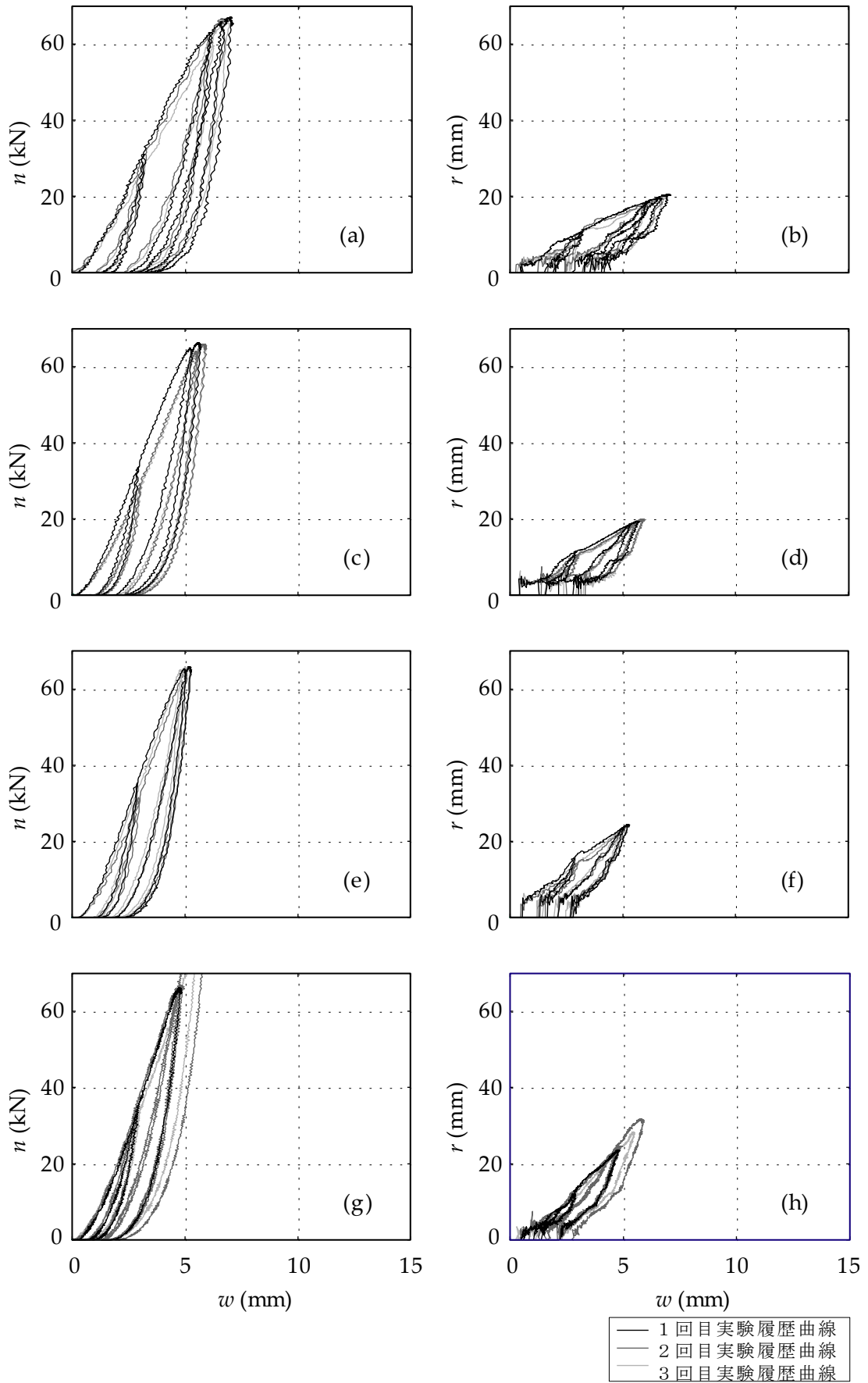


図 2. 13 Case B 実験結果:(a-b)  $\theta=1/10$ , (c-d)  $\theta=1/15$ , (e-f)  $\theta=1/30$ , (g-h)  $\theta=1/60$

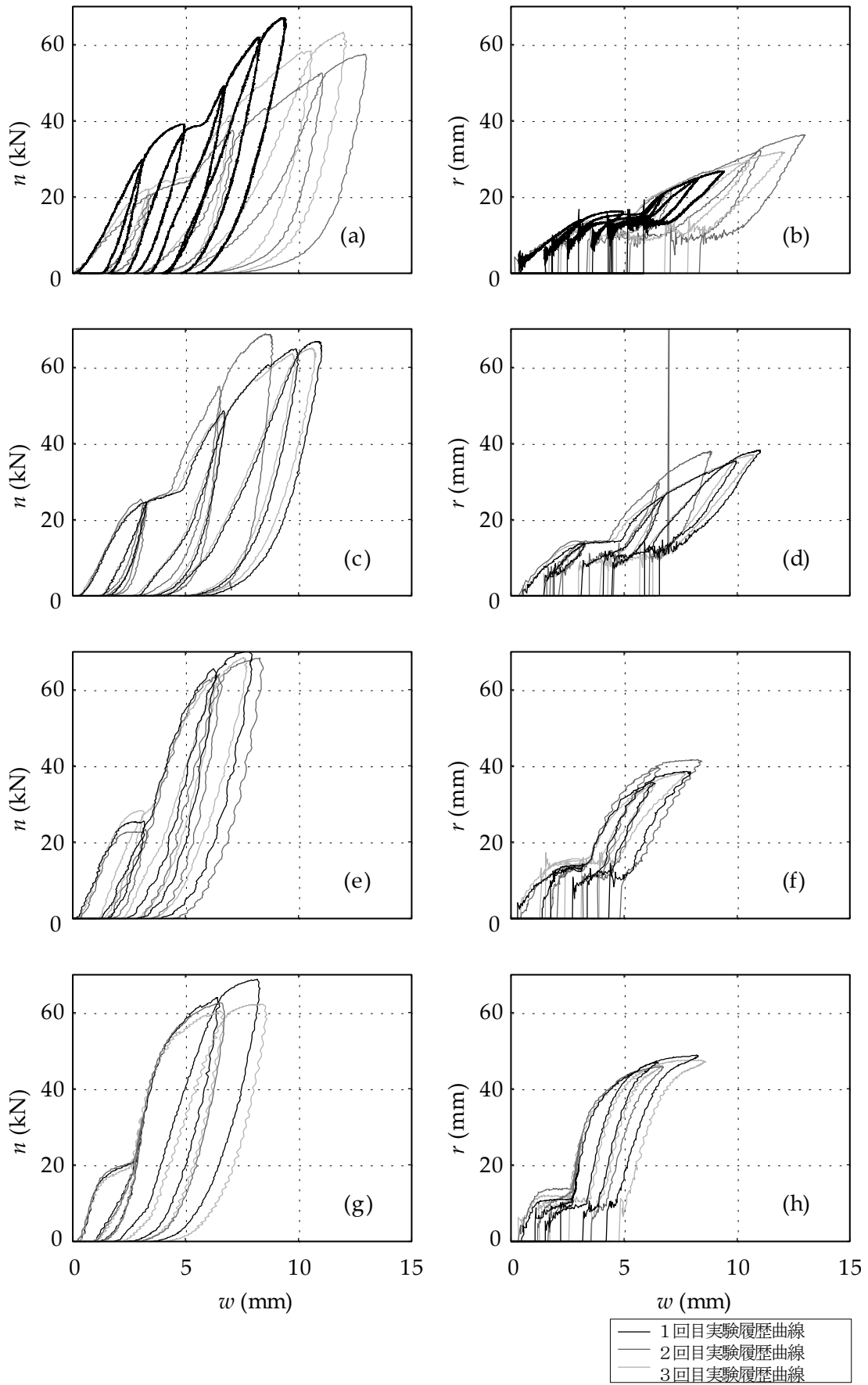


図 2. 14 Case C 実験結果:(a-b)  $\theta=1/10$ , (c-d)  $\theta=1/15$ , (e-f)  $\theta=1/30$ , (g-h)  $\theta=1/60$



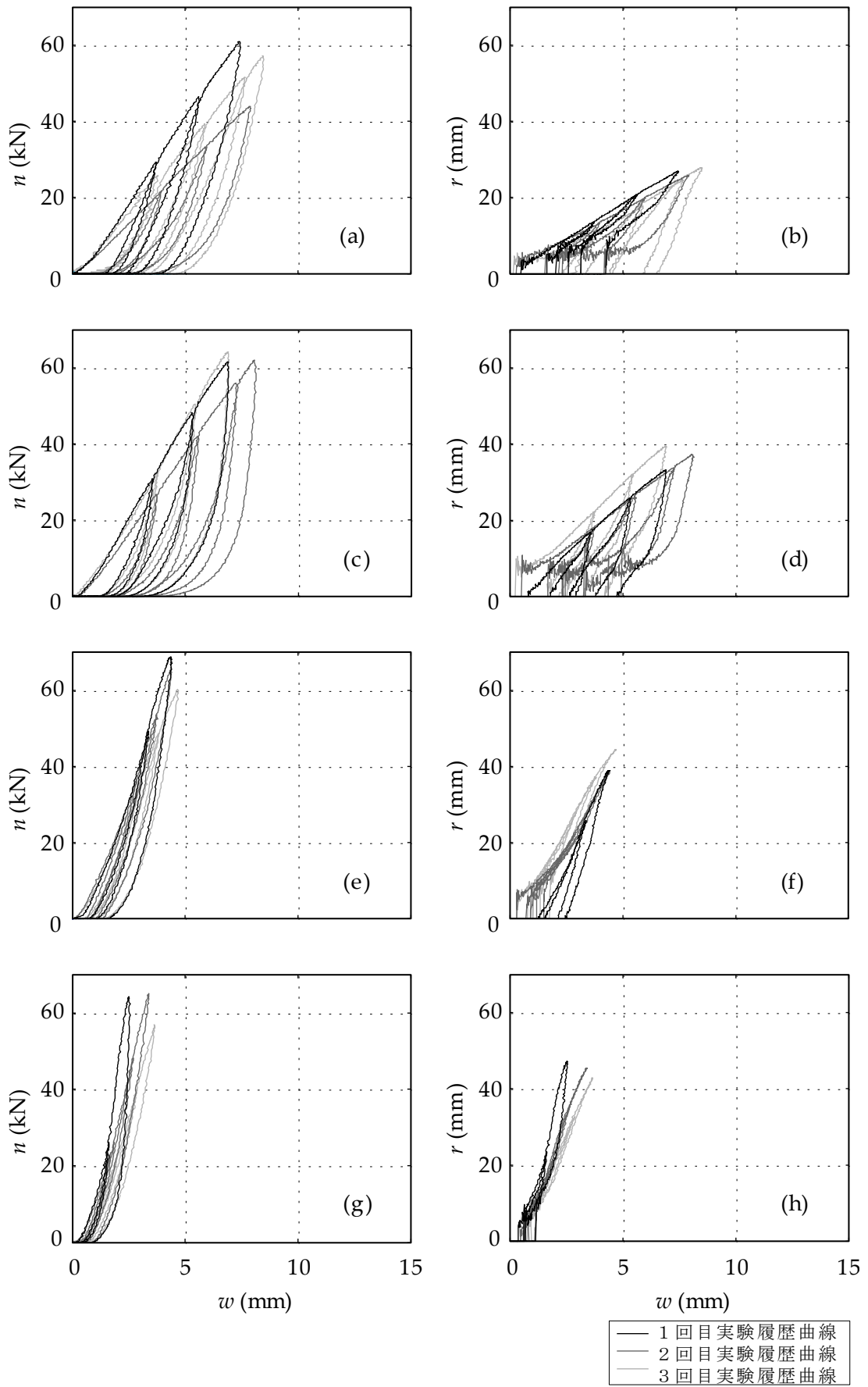


図 2. 15 Case D 実験結果:(a-b)  $\theta=1/10$ , (c-d)  $\theta=1/15$ , (e-f)  $\theta=1/30$ , (g-h)  $\theta=1/60$

### 2.3.3. 実験結果

各 Case の荷重－めり込み関係（ $n-w$ 関係）を図 2. 16～図 2. 18 に，重心位置－めり込み関係（ $r-w$ 関係）を図 2. 20～図 2. 24 に示す。図 2. 16～図 2. 18 の全てのグラフにおいて，縦軸は荷重  $n$  を表し，横軸はめり込み量  $w$  を表す。また，第 1 列目から第 4 列目のグラフは，それぞれ，Case A から Case D の結果を示す。また，第 1 行目から第 4 行目のグラフは，回転角が  $1/10$  から  $1/60$  までの結果をそれぞれ示す。各グラフにおいて，3 本の実線は各試験結果における骨格曲線を表し，一点鎖線は 3 体の平均を示す。各グラフの縦軸が重心位置  $r$  を表す以外は，図 2. 16～図 2. 18 と図 2. 20～図 2. 24 は同様である。これらの図からの観察事項を以下にまとめる。

貫上部接触面の試験では，いずれの楔の場合でも， $n-w$  関係， $r-w$  関係ともに，骨格曲線を直線近似できる。

楔はヒノキの方がアサメラより柔らかいため， $n-w$  関係の傾きは小さい。

切欠きを考慮する貫下部接触面試験では， $n-w$ ， $r-w$  関係ともに  $n < 60$  (kN) の範囲で骨格曲線を 3 本の直線で近似できる<sup>注 5)</sup>。

切欠きを考慮しない貫下部接触面の試験では， $n-w$  関係， $r-w$  関係ともに，骨格曲線を直線で近似できる。

以上の観察結果から，本論文では Case A，B，D における  $n-w$  関係と  $r-w$  関係を図 2. 25(a) と (b) で，Case C における  $n-w$  関係と  $r-w$  関係を図 2. 25(c) と (d) でそれぞれ近似する。図 2. 25(b)，(d) では，幾何学的考察から  $r$  の上限値が存在し，この上限値は柱の半径  $R$  に一致する。図 2. 25(a) と (b) で近似曲線の傾きを  $k_n^q(\theta)$ ， $k_r^q(\theta)$  とする。上添字の  $q$  は各 Case における値であることを表す。図 2. 25 において，他の直線の傾きも同様に表す。また，図 2. 25(c) において  $c_m^c(\theta)$  は，Case C，固定角度  $\theta$  のときの  $n-w$  関係近似曲線の 2 本目の直線の定数項を表す。他の定数項も同様に表す。実験結果より得られた Case A，Case B，Case D の各パラメーターの平均値を表 2. 3 に，Case C の各パラメーターの平均値を表 2. 4 に示す。

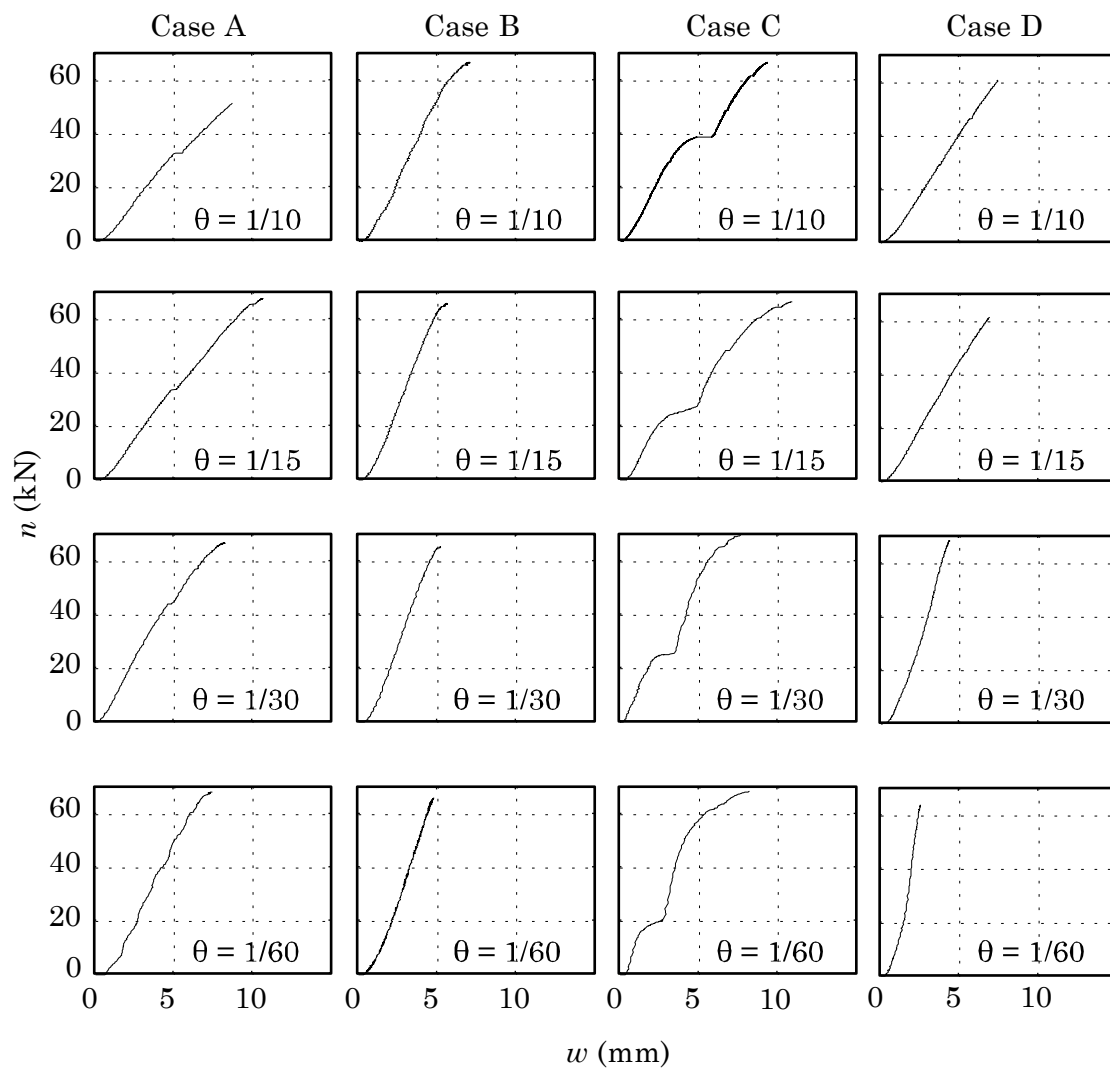


図 2. 16 荷重－めり込み関係の実験結果一回目

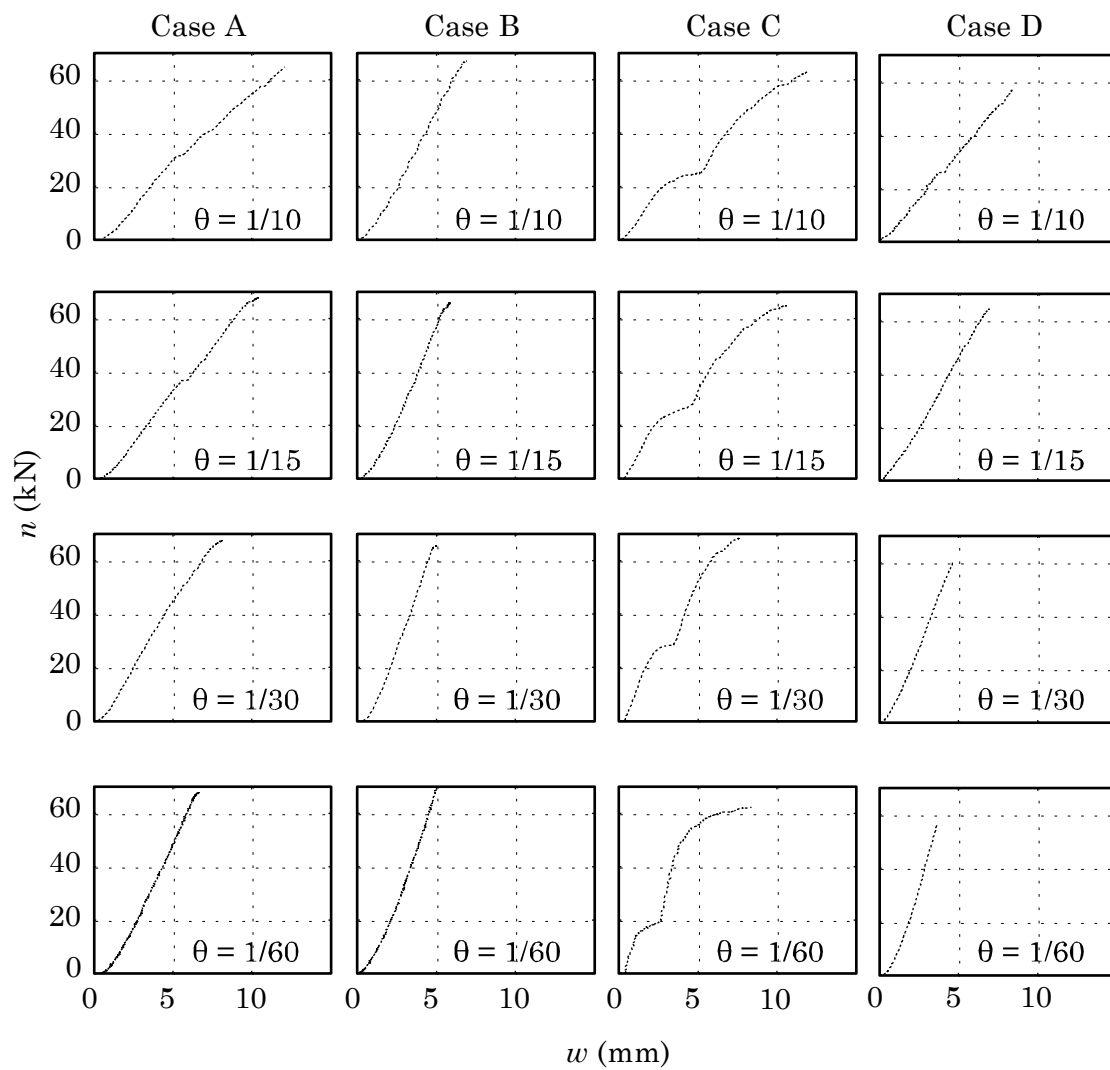


図 2.17 荷重－めり込み関係の実験結果二回目

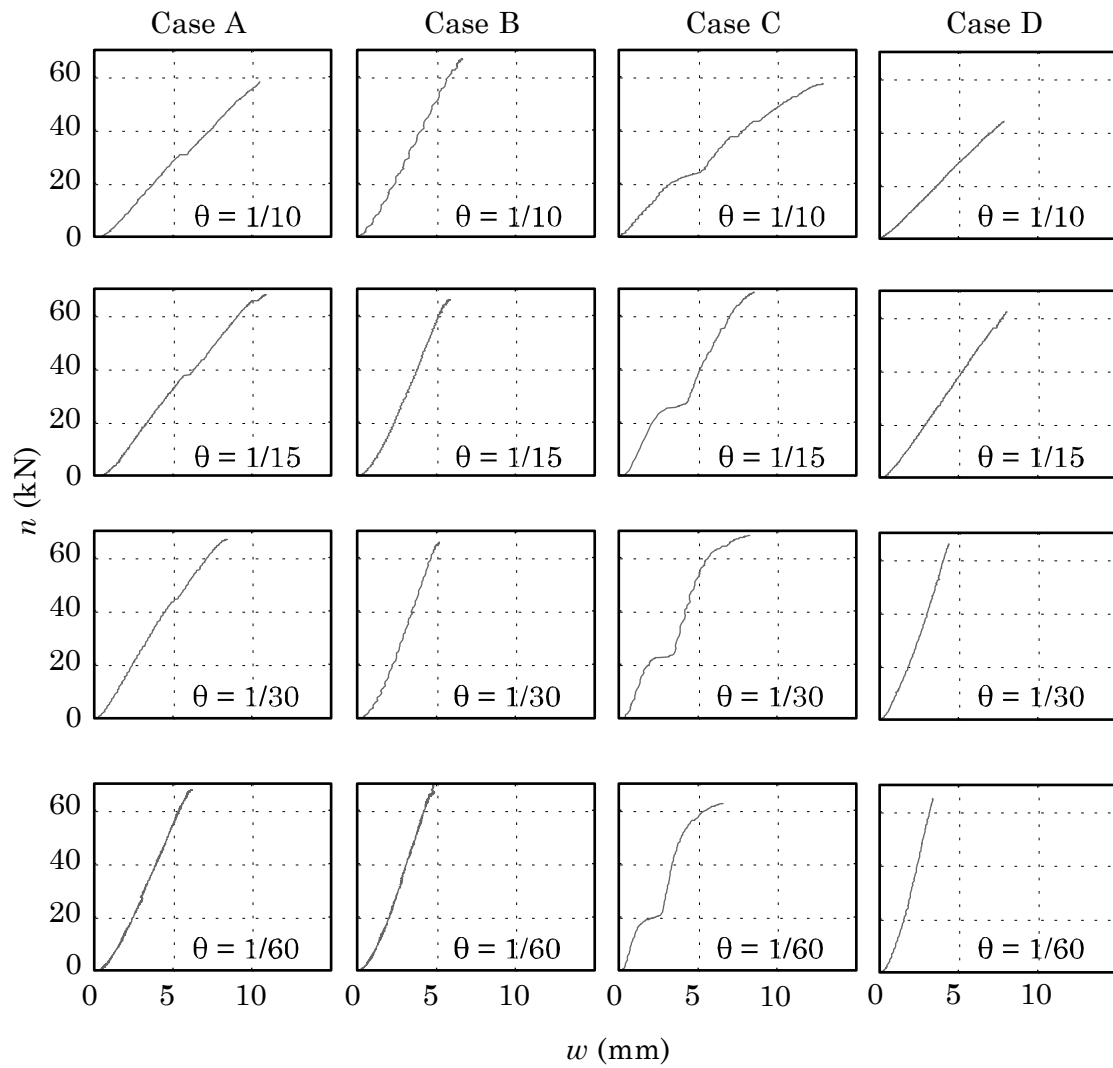


図 2.18 荷重－めり込み関係の実験結果三回目

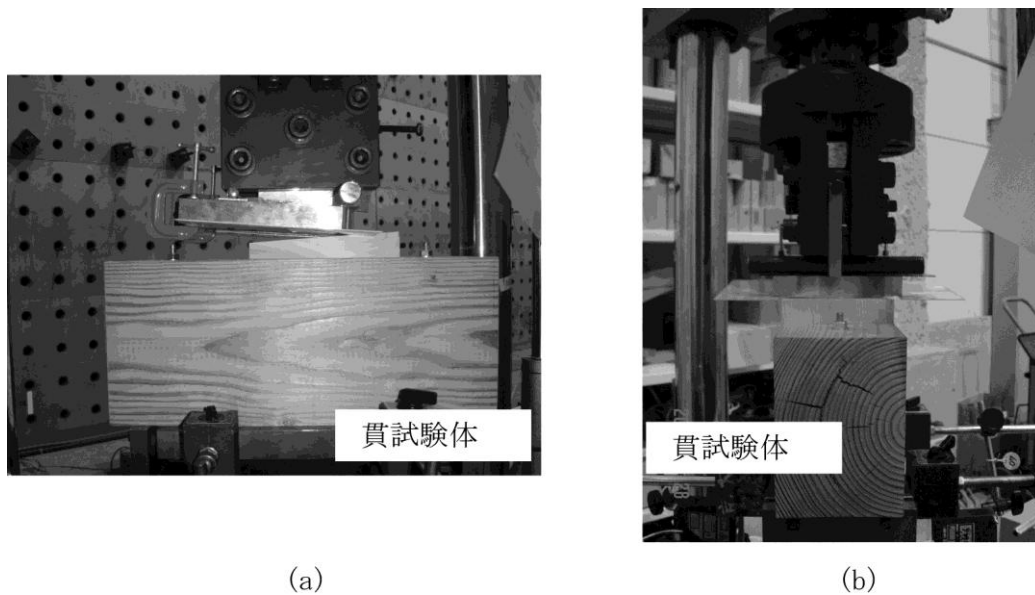


図 2.19 (a)Case A(貫上部・楔ヒノキ) (b)貫部材の割れ目部分

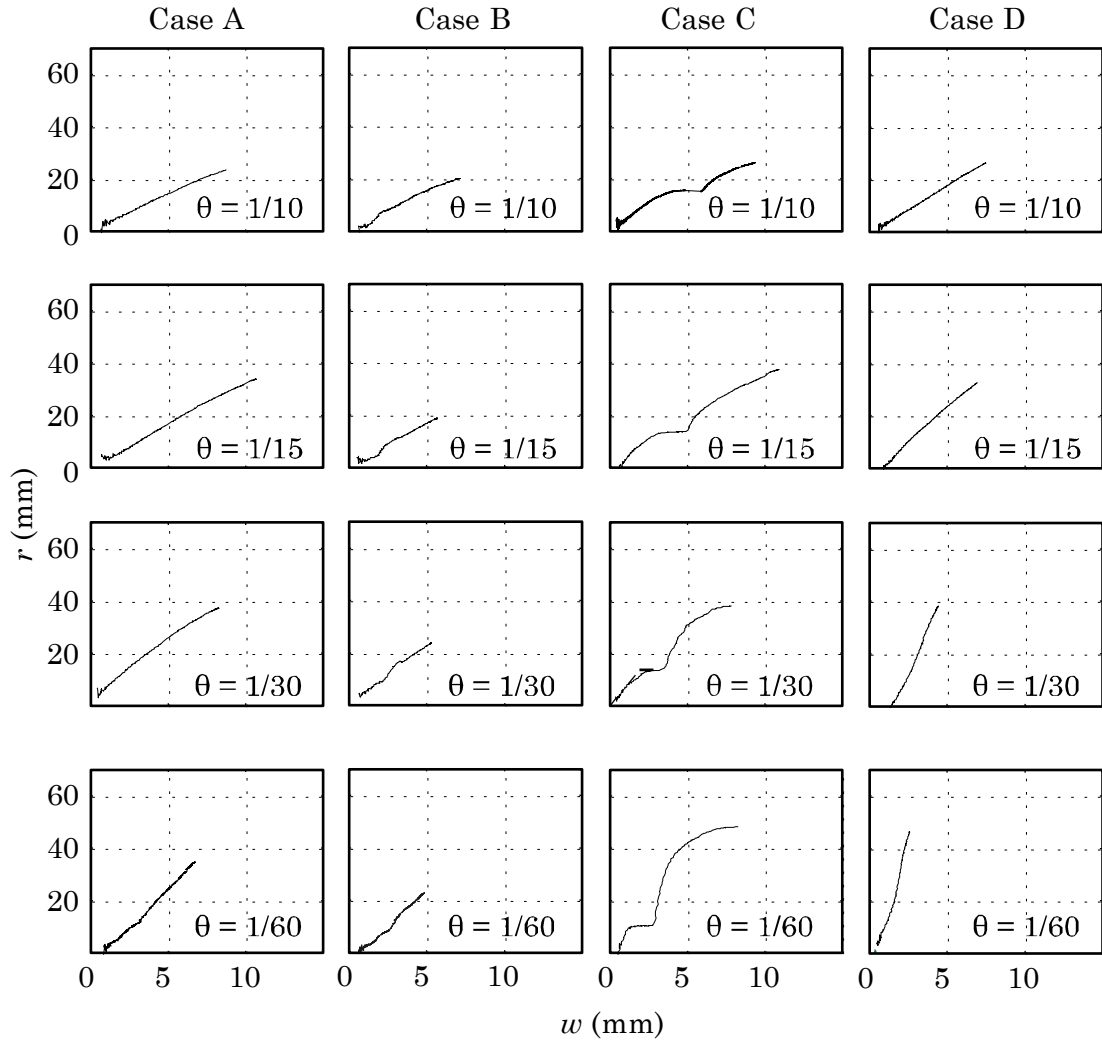
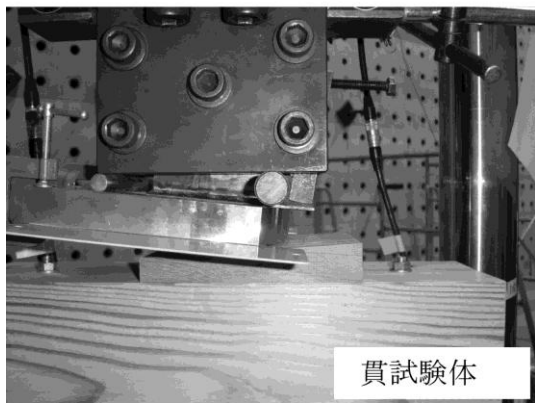


図 2. 20 重心位置－めり込み関係の実験結果一回目



(a)

(b)

図 2. 21 (a)Case B(貫上部・楔アサメラ) (b)貫部材の割れ目部分

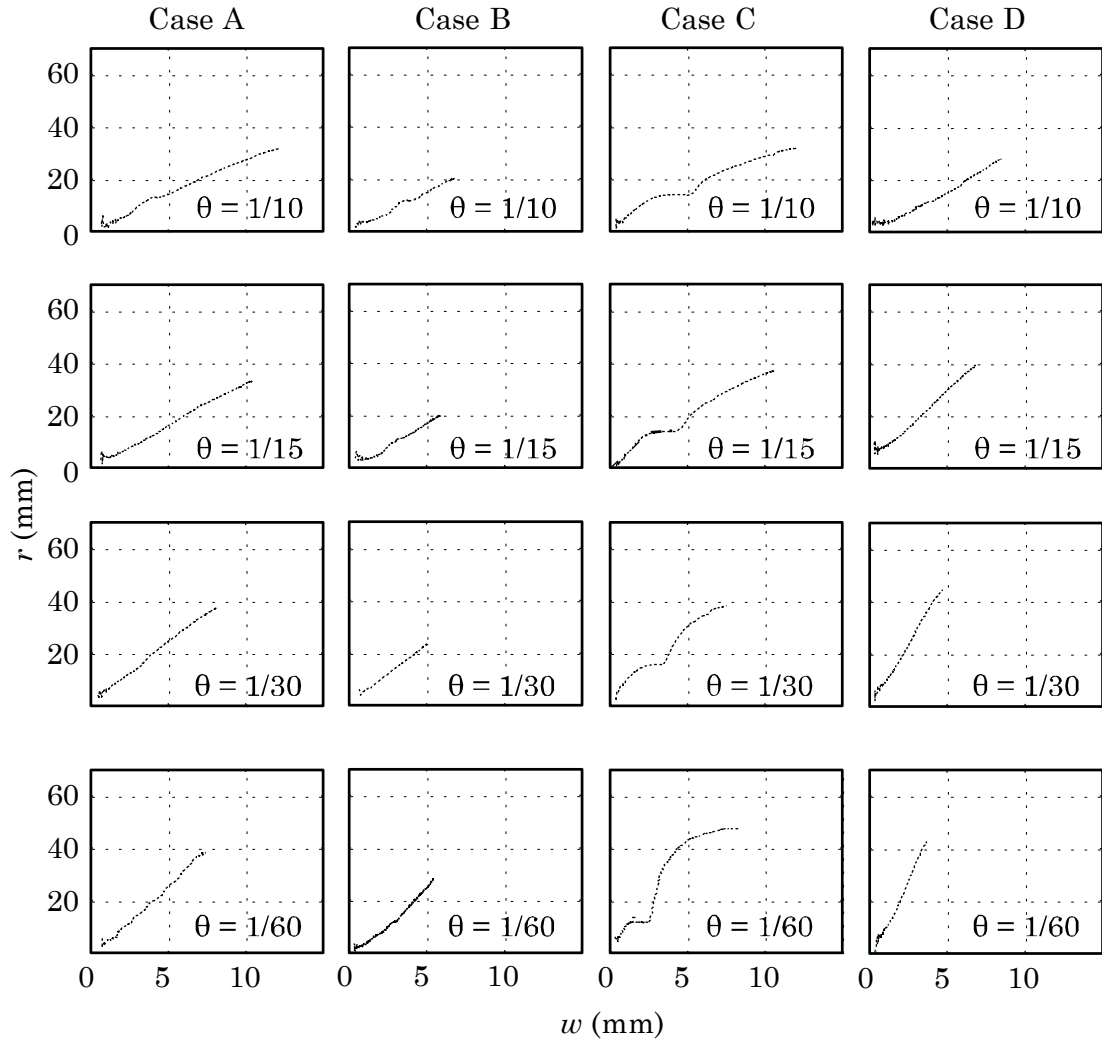
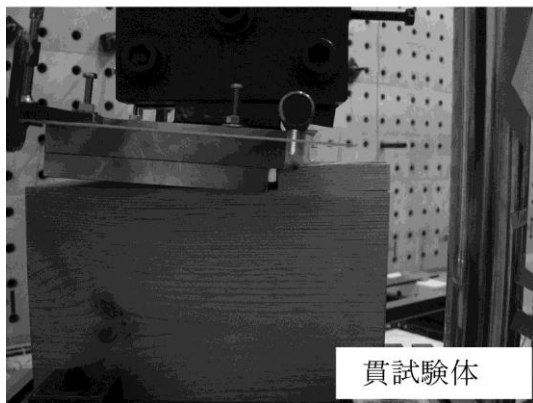


図 2. 22 重心位置－めり込み関係の実験結果二回目



(a)



(b)

図 2. 23 (a)Case C(貫下部・切欠き有) (b)貫部材の割れ目部分

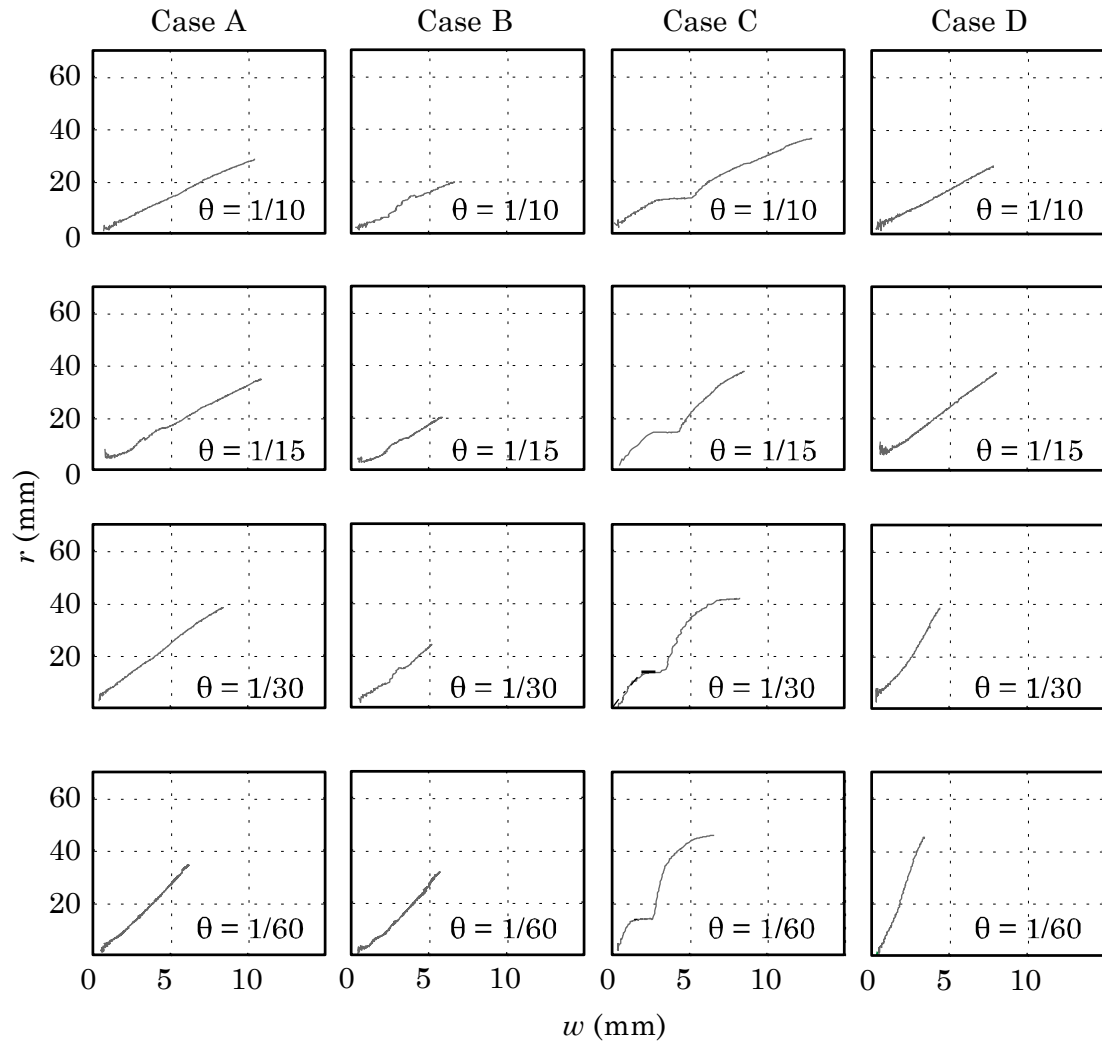


図 2.24 重心位置－めり込み関係の実験結果三回目

表 2.3 パラメーターの平均値 (Case A, Case B, Case D)

Case	符号	$\theta=1/10$	$\theta=1/15$	$\theta=1/30$	$\theta=1/60$
A	$k_n^A$	5.69	6.54	8.59	9.91
	$k_r^A$	2.82	3.29	4.17	4.25
B	$k_n^B$	9.92	11.35	12.64	12.90
	$k_r^B$	3.06	3.42	4.69	4.65
D	$k_n^D$	6.80	8.51	13.51	17.35
	$k_r^D$	3.47	4.43	6.39	10.12



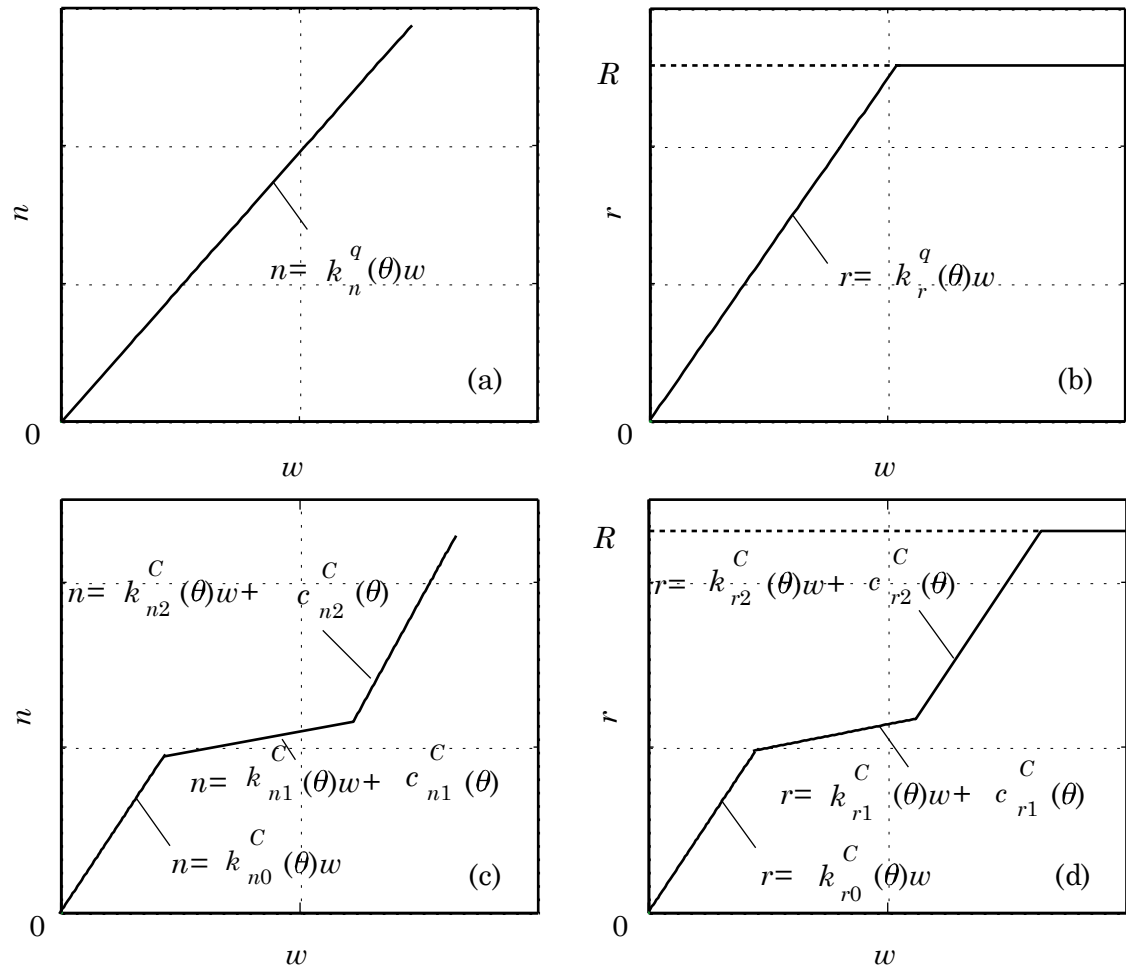


図 2. 25 めり込み実験結果のモデル化

表 2. 4 パラメーターの平均値 (Case C)

Case	符号	$\theta=1/10$	$\theta=1/15$	$\theta=1/30$	$\theta=1/60$
C	$k_{n0}^C$	7.44	7.95	10.38	10.59
	$k_{n1}^C$	1.21	1.92	0.62	2.32
	$k_{n2}^C$	7.80	10.98	17.00	19.76
	$c_{n1}^C$	23.32	18.47	23.58	14.11
	$c_{n2}^C$	-11.71	-20.92	-31.00	-28.99
	$k_{r0}^C$	4.69	5.20	7.15	10.59
	$k_{r1}^C$	-0.04	0.30	0.37	2.32
	$k_r^A$	3.56	5.61	9.17	19.761
	$c_{r1}^C$	14.70	12.90	13.27	14.11
	$c_{r2}^C$	-3.16	-9.11	-13.76	-28.99

### 2.3.4. めり込み構成則

各 Case について、めり込み構成則  $n(w, \theta)$  と  $r(w, \theta)$  を求める。まず、Case A についてめり込み構成則を求めることを考える。 $k_n^A$  と  $k_r^A$  について、以下の考察が成り立つ。(1)  $k_n^A$  と  $k_r^A$  は負の値をとらない。(2)  $\theta$  が 0 の場合は、試験体の垂直めり込み試験として扱えるため、 $k_n^A$  はある有限の値を持つ。(3)  $\theta \rightarrow 0$  への極限において、 $k_r^A$  は無限大に発散する<sup>注6)</sup>。上記の考察結果を反映できる最も簡潔な関数形の一例として、本論文では  $k_n^A - \theta$  関係と  $k_r^A - \theta$  関係を次式で近似する。

$$k_n^A(\theta) = a_n^A (b_n^A)^{-\theta}, \quad k_r^A(\theta) = a_r^A \theta^{-b_r^A} \quad (2.20)$$

これらの関係と図 2.25 より Case A ではめり込み構成則を以下のように近似する。

$$n(w, \theta) = k_n^A(\theta) w, \quad r(w, \theta) = m \left( k_r^A(\theta) w R \right) \quad (2.21)$$

Case B と Case D でも同様に  $n(w, \theta)$  と  $r(w, \theta)$  が得られる。Case A, B, D における傾き及び定数項の平均値と近似曲線を図 2.26 に示す。図 2.26 において、○は実験から得られた平均値を示し、実線は近似曲線を示す。

次に、Case C の場合について考える。この場合、 $k_{n0}^C$ ,  $k_{n2}^C$ ,  $k_{r0}^C$ ,  $k_{r2}^C$  は Case A, B, D と同様に次式で近似する。

$$\begin{aligned} k_{n0}^C(\theta) &= a_n^{C0} (b_n^{C0})^{-\theta}, & k_{r0}^C(\theta) &= a_r^{C0} \theta^{-b_r^{C0}} \\ k_{n2}^C(\theta) &= a_n^{C2} (b_n^{C2})^{-\theta}, & k_{r2}^C(\theta) &= a_r^{C2} \theta^{-b_r^{C2}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

これらの係数と定数を近似した結果を表 2.5 に示す。なお簡単のため、 $k_{n1}^C$ ,  $k_{r1}^C$ ,  $c_{n1}^C$ ,  $c_{n2}^C$ ,  $c_{r1}^C$ ,  $c_{r2}^C$  は定数で近似する。この時、Case C のめり込み構成則は、図 2.25(c) と (d) の 3 本の直線が、以下の 6 式を用いて表せる。

図 2.27 では Case C における傾き及び定数項の平均値を○で示し、これらの近似曲線を実線で示す。

$$\begin{aligned}
 n(w, \theta) &= k_{n0}^C(\theta)w, \quad r(w, \theta) = k_{r0}^C(\theta)w, \quad \text{if } w < w_1 \\
 n(w, \theta) &= k_{n1}^C w + c_{n1}^C, \quad r(w, \theta) = k_{r1}^C w + c_{r1}^C, \quad \text{if } w_1 \leq w < w_2 \\
 n(w, \theta) &= k_{n2}^C(\theta)w + c_{n2}^C, \quad r(w, \theta) = k_{r2}^C(\theta)w + c_{r2}^C, \quad \text{if } w \geq w_2
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

表 2.5 めり込み構成則の係数と定数

p	$a_n^p$	$b_n^p$	$a_r^p$	$b_r^p$
A	10.81	852.62	1.71	0.24
B	13.86	25.09	1.75	0.26
C0	11.60	112.90	1.81	0.40
C2	24.19	92152	0.67	0.76
D	19.99	87197	0.89	0.59

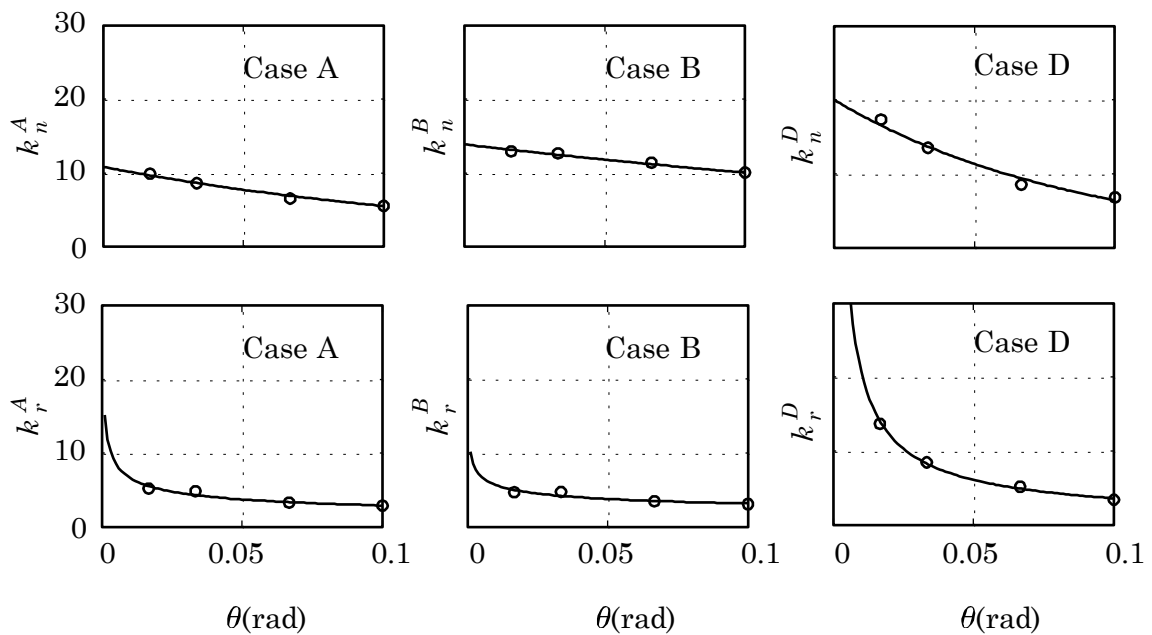


図 2.26 パラメーターの近似曲線 (Case A, Case B, Case D)

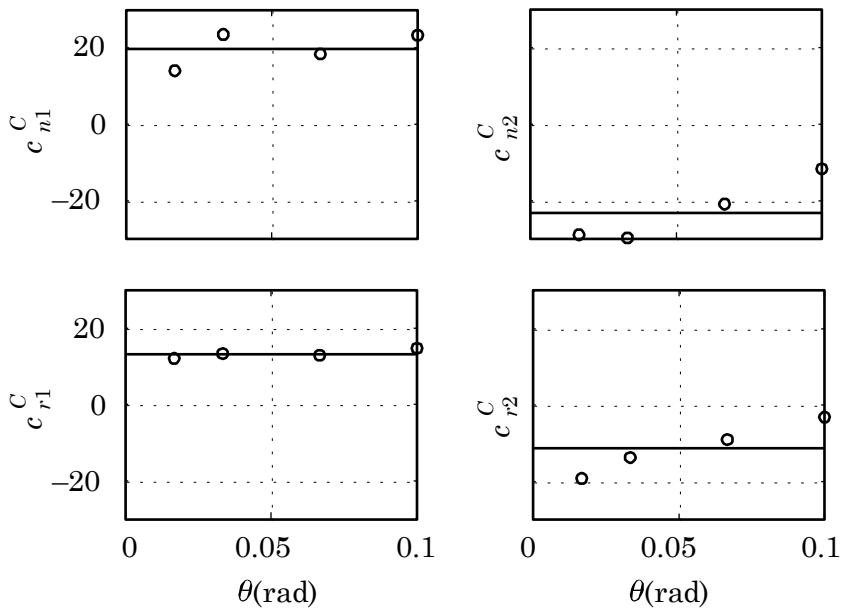
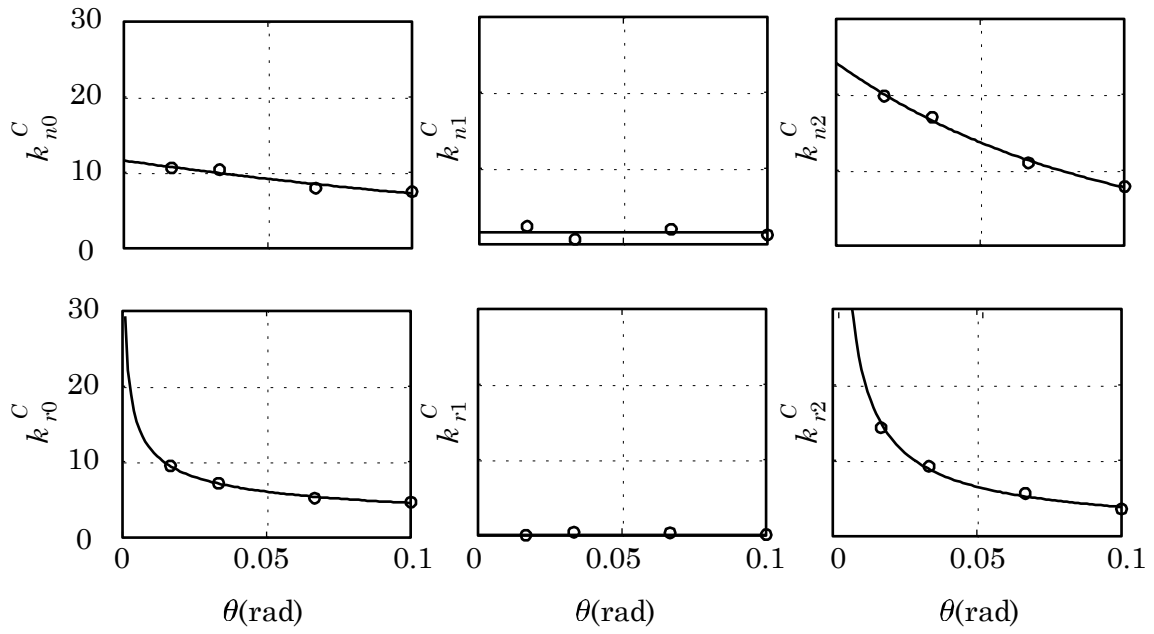


図 2. 27 パラメータの近似曲線 (Case C)

### 2.3.5. モーメント一回転角骨格曲線の推定

前節のめり込み構成則及び式(2.17)-(2.19)を用いて、(a)切欠き無・楔ヒノキ、(b)切欠き無・楔アサメラ、(c)切欠き有・楔ヒノキ、(d)切欠き有・楔アサメラの四通りの柱一貫接合部のモーメント一回転角関係骨格曲線を推定する。式(2.17)-(2.19)を変形することで、以下の関係式が得られる。

$$L(n_1(w_1, \theta) - n_2(w_2, \theta)) + n_1(w_1, \theta)r_1(w_1, \theta) - n_2(w_2, \theta)\{2R - r_2(w_2, \theta)\} = 0 \quad (2.24)$$

式(2.24)にめり込み構成則を代入し、式(2.24)を用いて  $w_1$  と  $w_2$  を消去すると、 $v$  と  $\theta$  を独立な変数とする方程式が得られる。さらに回転角  $\theta$  を指定すれば、式(2.24)は  $v$  のみを未知変数とする 2 次方程式となり、指定した  $\theta$  に対応する未知変数  $v$  が求められ、消去とは逆の順に代入を行うことで  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $M$  が求められる。

図 2.28 から図 2.30 は、柱一貫接合部の集中反力一回転角関係、集中反力作用線位置一回転角関係、モーメント一回転角関係の推定結果をそれぞれ示す。これらの関係を求める際には、森迫ら<sup>9)</sup>の実験を参考に、 $L=600$  (mm),  $R=150$  (mm) とした。

図 2.28 の  $\Delta$  と実線は貫上部側(楔側)の集中反力  $n_1$  を表す。一方、 $\nabla$  と点線は、貫下部側(仕口側)の集中反力  $n_2$  を表す。ここで、 $\Delta$  と  $\nabla$  は、固定角度  $\theta=1/10, 1/15, 1/30, 1/60$  に対応する  $k_n^q$  と  $k_r^q$  を用いて直接算出した値を示す。また、実線と点線は、めり込み構成則を用いて  $\theta$  を連続的に変化させた時に得られる値を示す。図 2.28 の各記号も、図 2.28 と同様の意味を持つ。図 2.30 の  $\circ$  印は、各  $\theta$  に対して  $\Delta$  と  $\nabla$  と同様に得られる  $M$  を表し、同図の実線はめり込み構成則より得られる  $M$  を表す。

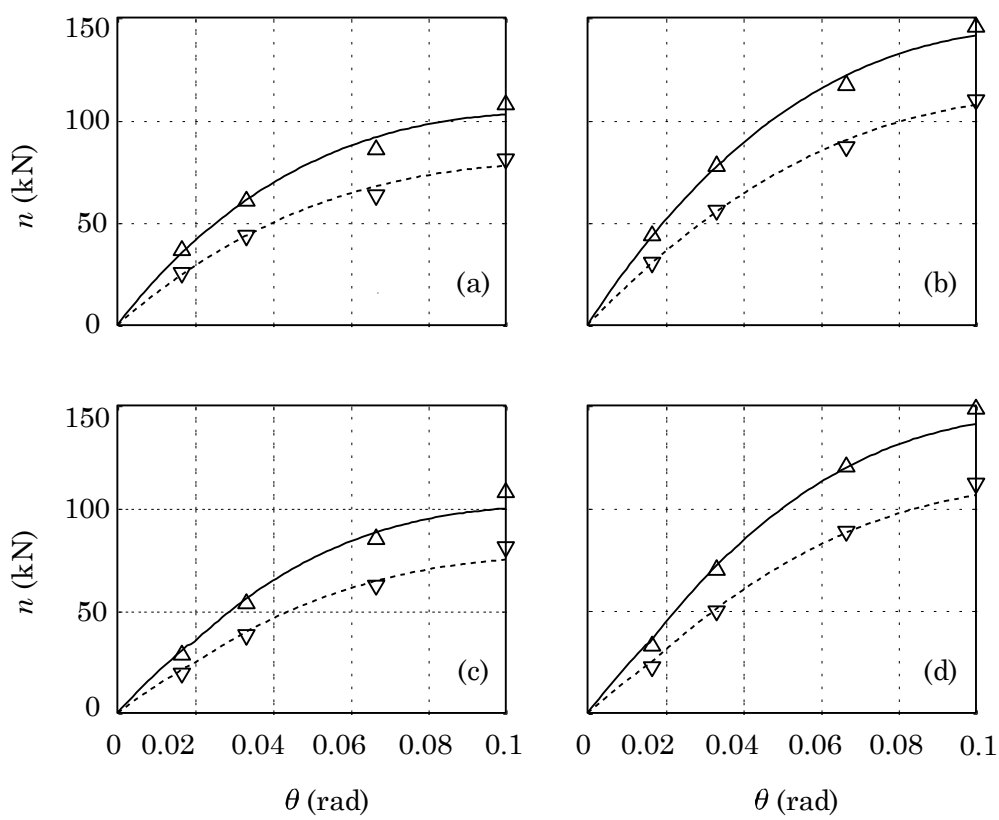


図 2.28 集中反力一回転角関係：(a)切欠き無・楔ヒノキ, (b)切欠き無・楔アサメ  
ラ, (c)切欠き有・楔ヒノキ, (d)切欠き有・楔アサメラ

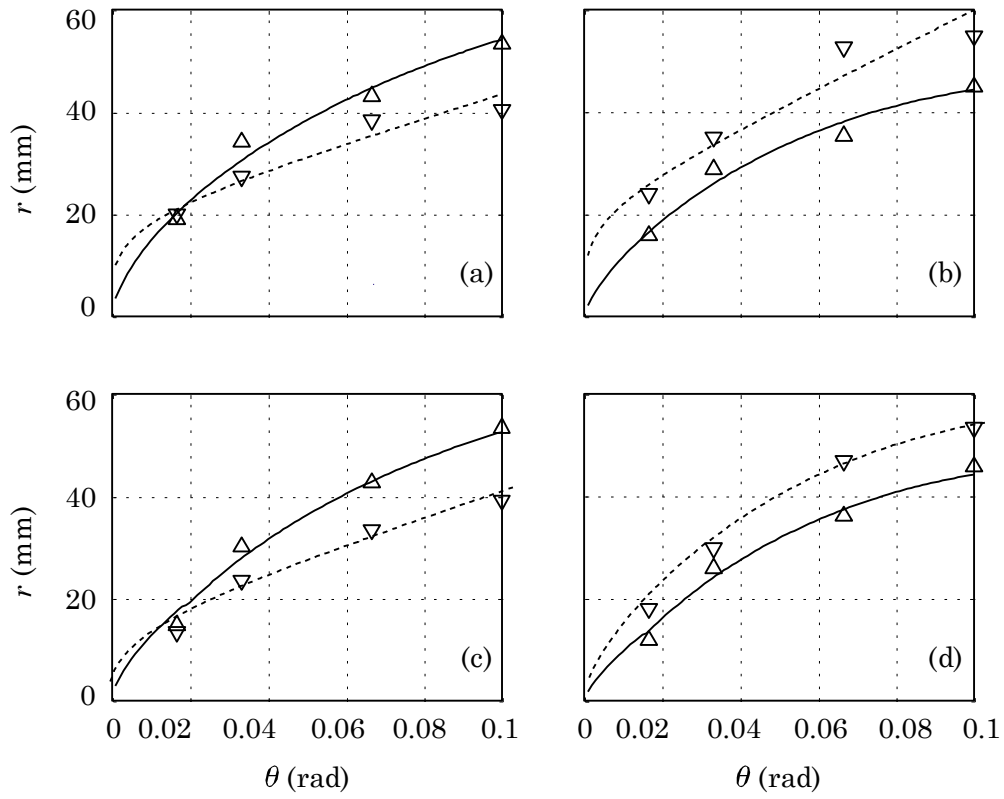


図 2.29 反力作用位置一回転角関係：(a)切欠き無・楔ヒノキ, (b)切欠き無・楔アサメラ, (c)切欠き有・楔ヒノキ, (d)切欠き有・楔アサメラ

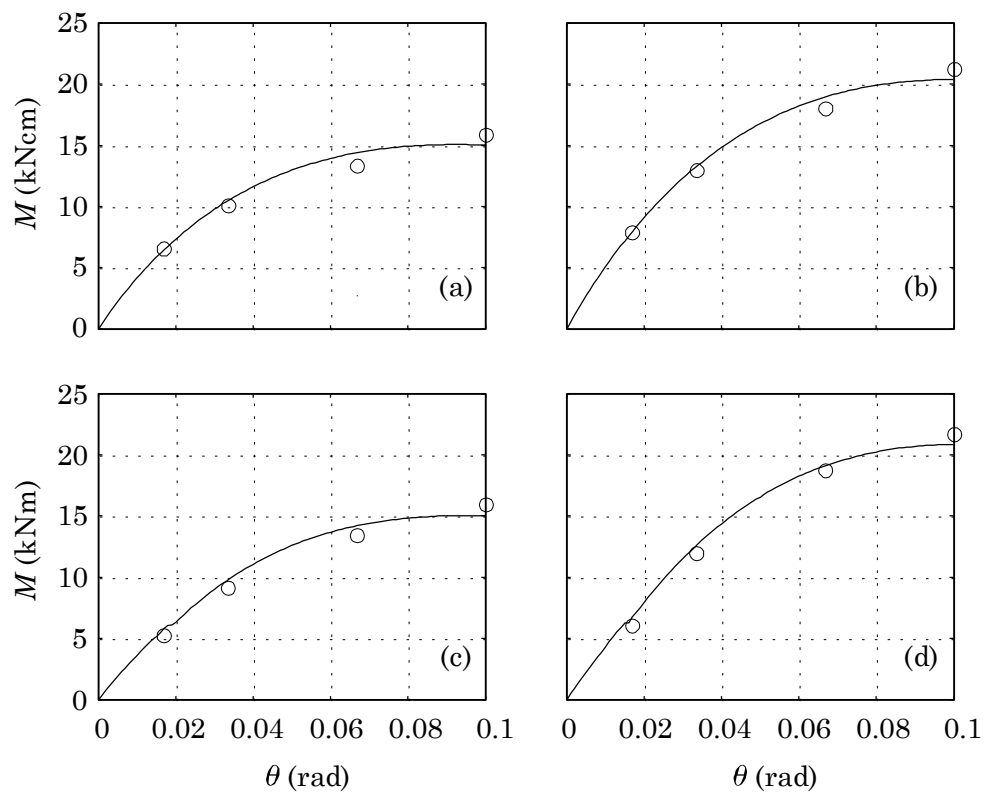


図 2.30 モーメントー回転角関係 : (a)切欠き無・楔ヒノキ, (b)切欠き無・楔アサメラ, (c)切欠き有・楔ヒノキ, (d)切欠き有・楔アサメラ



## 2.4. 部分架構実験

提案手法の妥当性の検証を目的として、図 2. 31 に示す柱－貫接合部の片振り繰返し載荷実験を行う。また、仕口の切欠きの有無がモーメント－回転角関係に与える影響についても検討を行う。

### 2.4.1. 実験概要

本実験では図 2. 31 のようにH形鋼を介して反力フレームに柱をボルトで固定する。柱の材軸が水平となるように柱試験体を設置する。次に貫を柱の仕口に差込み、貫切欠き部を柱仕口中の凸部に掛ける。そして、楔を貫と柱の仕口の隙間に楔を押し、楔を釘で固定する<sup>註7)</sup>。その後に貫の上部に片振りの繰返し強制変位を与える。図 2. 31 に示す貫の 2 点の変位をレーザー変位計で計測し、これらの差を計測点間距離で除した値を回転角  $\theta$  とする。この際、貫の部材としての曲げ変形により生じる回転角は接合部で生じる貫の回転角と比べて十分に小さいと仮定をする。柱フェース位置でのモーメント  $M$  は、ジャッキのロードセルで計測した水平荷重値に、貫の載荷点からフェース位置までの距離  $L$  を掛けることにより得ることができる。

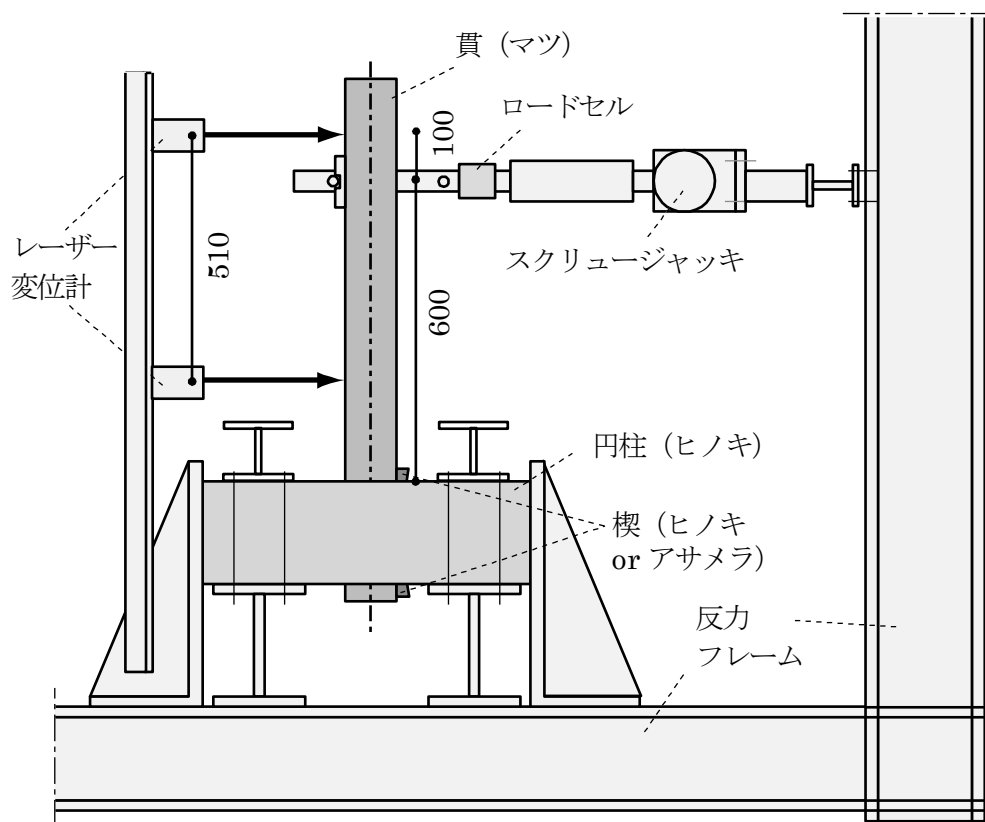


図 2. 31 部分架構実験の載荷および計測方法

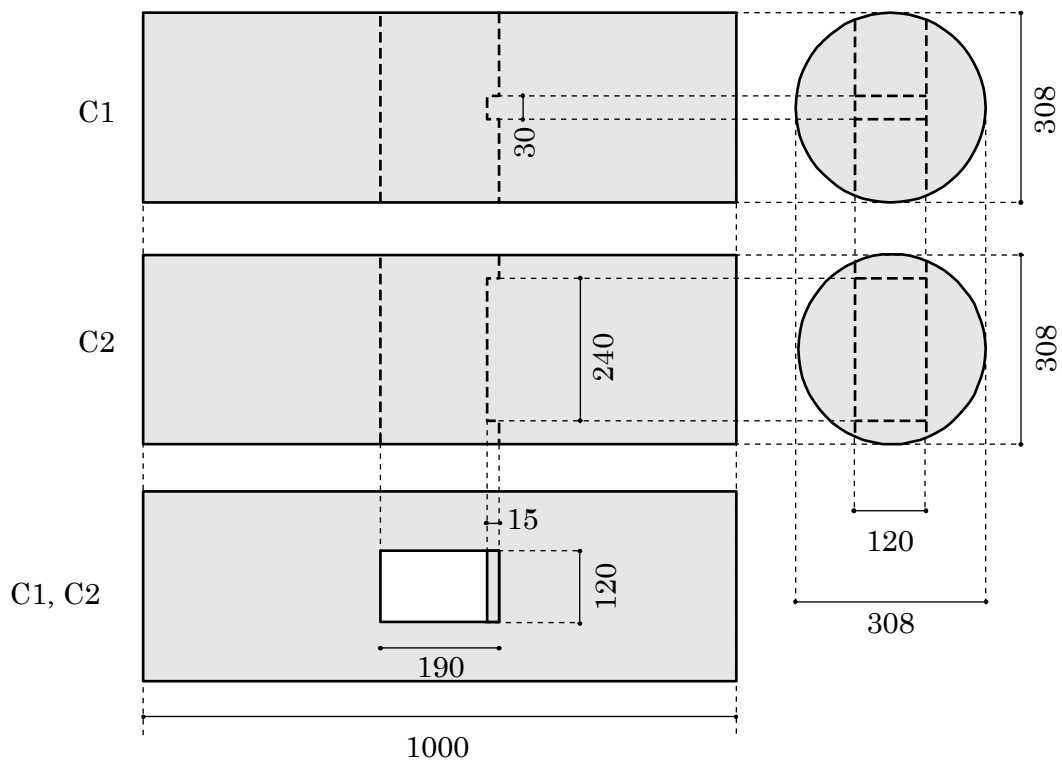


図 2. 32 柱部材の寸法

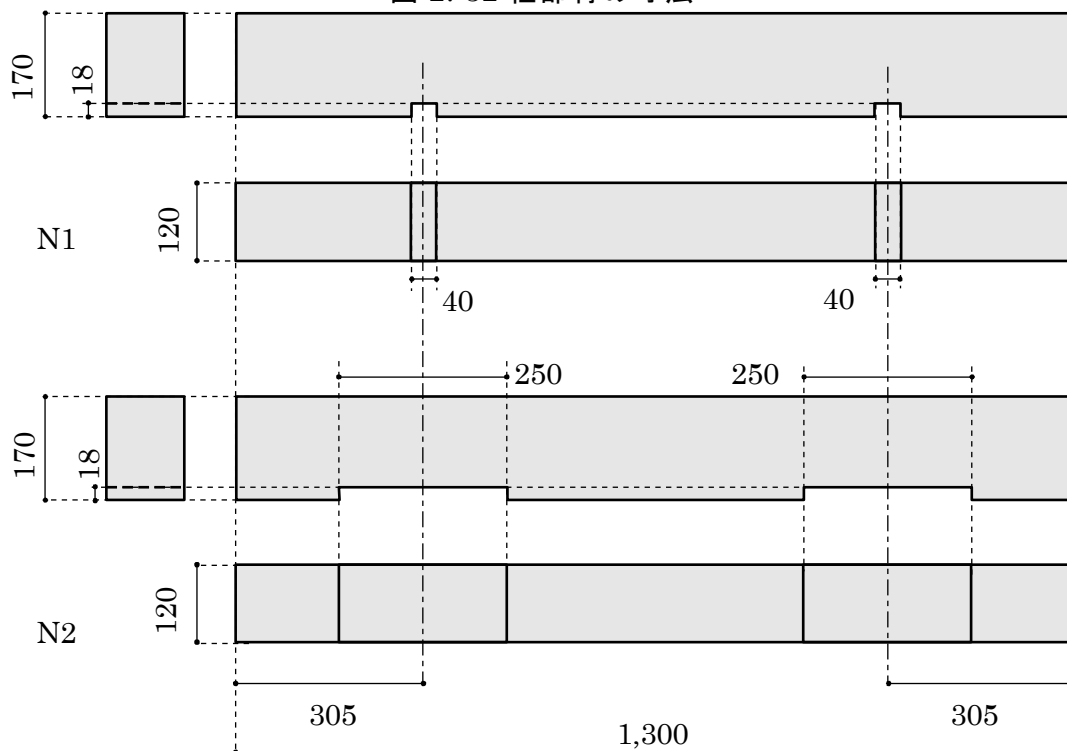


図 2. 33 貫試験体 : N1→切欠き無 (模擬), N2→切欠き有

本実験で用いた柱と貫の試験体の詳細を図 2.32 と図 2.33 にそれぞれ示す。本実験で用いた荷重システムでは、柱と貫の方向が実際の建物から 90 度回転しているため、貫を掛けるための切欠きを完全になくすることが難しい。そこで本実験では、切欠き部の幅を小さくすることにより切欠きが無い場合を模擬する。ここで図 2.32 の C1 は切欠きが無い場合を模擬する試験体であり、C2 は通常の切欠きのある場合に対応する試験体である。図 2.33 の N1 と N2 も同様である。以下では、切欠きが無い場合を模擬した試験体を、単に「切欠き無」の試験体と呼ぶ。

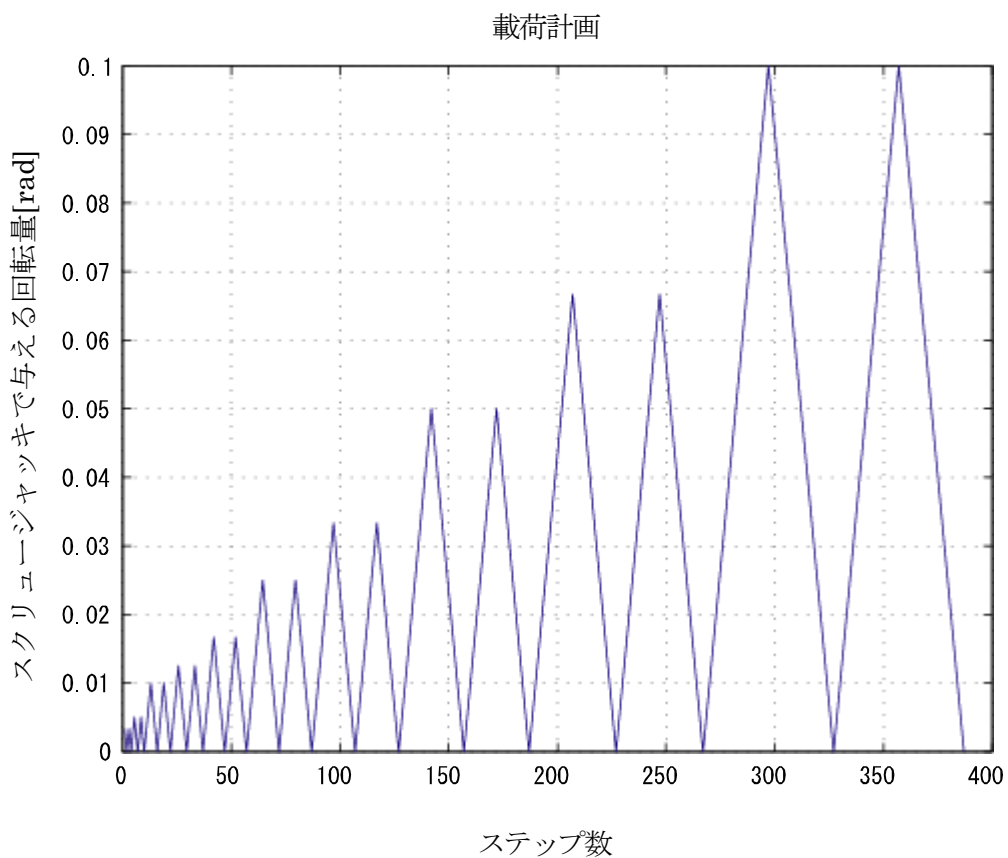


図 2.34 部分架構実験の荷重サイクル

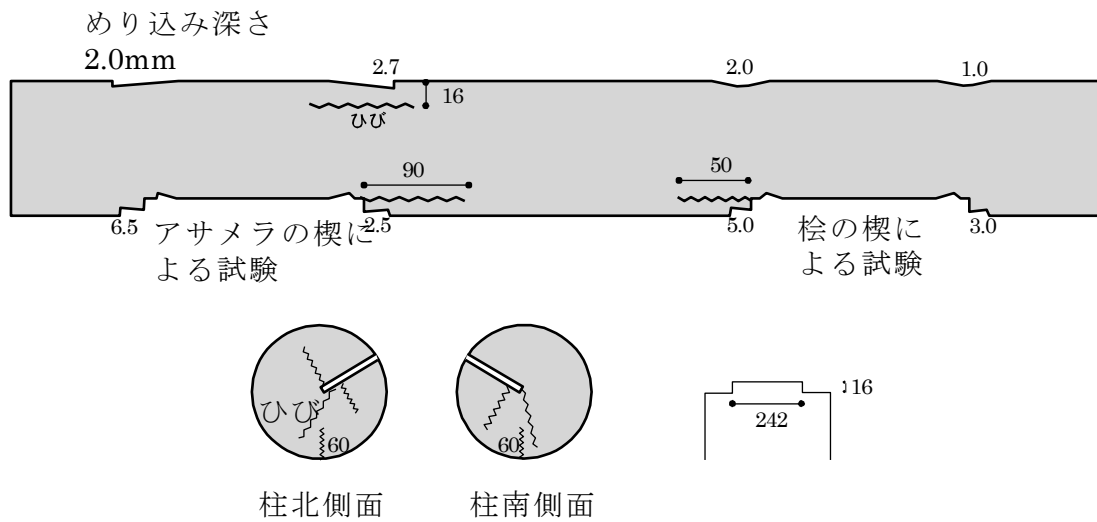


図 2. 35 部分架構実験による損傷

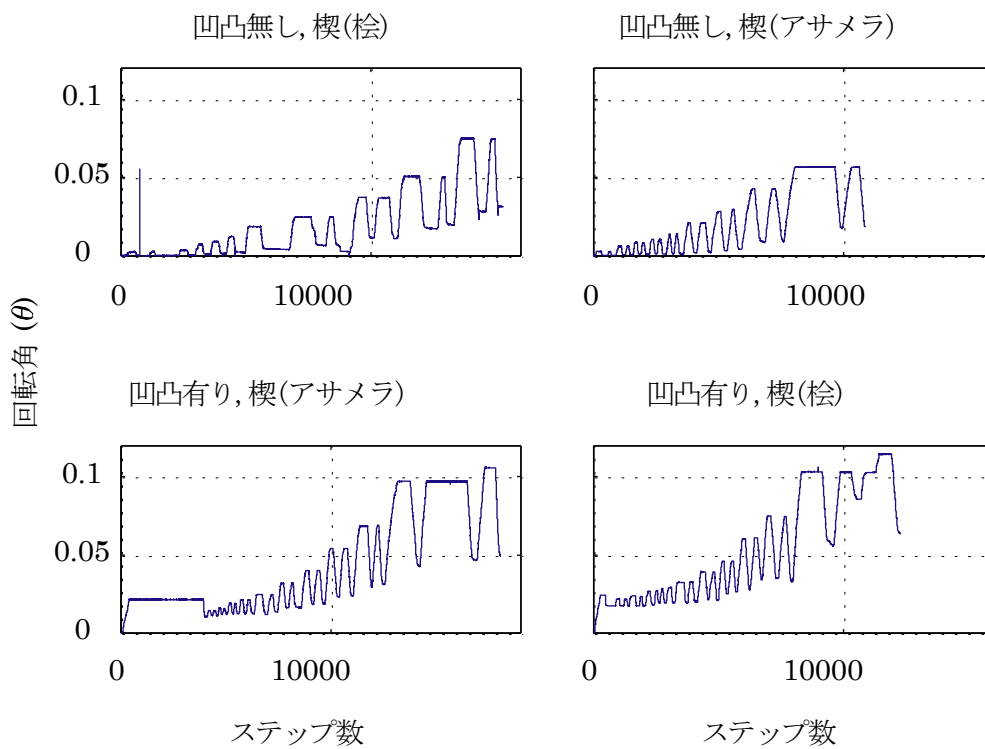


図 2. 36 部分架構実験による載荷経路

## 2.4.2. 実験結果

切欠きの有無と楔の樹種(ヒノキ or アサメラ)に応じて4種類の組み合わせで実験を行った結果を図 2. 37 に示す。図 2. 37(a)は切欠き無・楔ヒノキ, (b)は切欠き無・楔アサメラ, (c)は切欠き有・楔ヒノキ, (d)は切欠き有・楔アサメラの結果を表す。本実験より得られた観察結果は以下の通りである。

1. 切欠きの有無がモーメント-回転角曲線に与える影響は、各種の要因による結果のバラツキと比較して無視できるほど小さい。
2. ヒノキの楔を用いた場合、楔に大きな残留めり込みが生じたが、貫上部(楔設置側)の残留めり込み量は目視では確認できないほど小さかった。一方、アサメラの楔を用いた場合は、楔の残留めり込みは小さかったが、貫には目視でわかるほどの残留めり込みが生じていた。

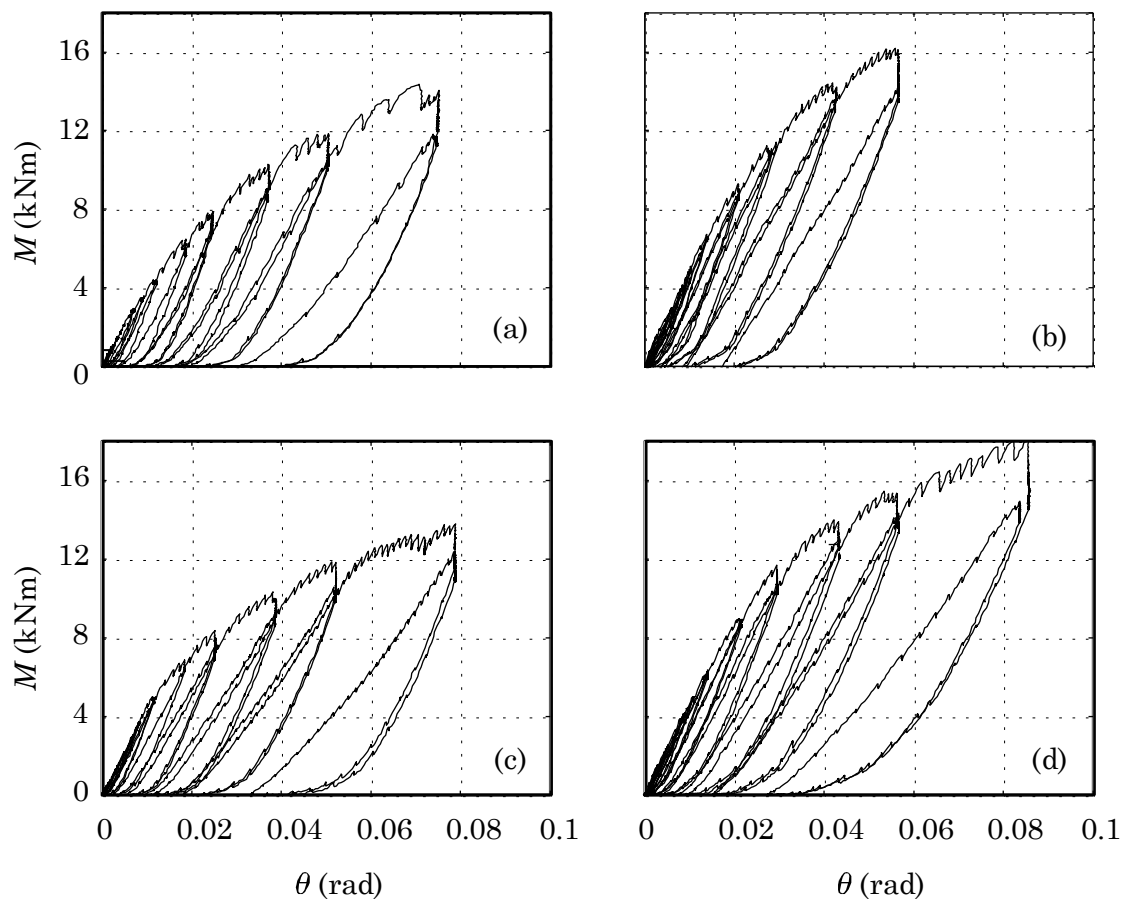


図 2. 37 実験結果 : (a)切欠き無・楔ヒノキ, (b)切欠き無・楔アサメラ, (c)切欠き有・楔ヒノキ, (d)切欠き有・楔アサメラ

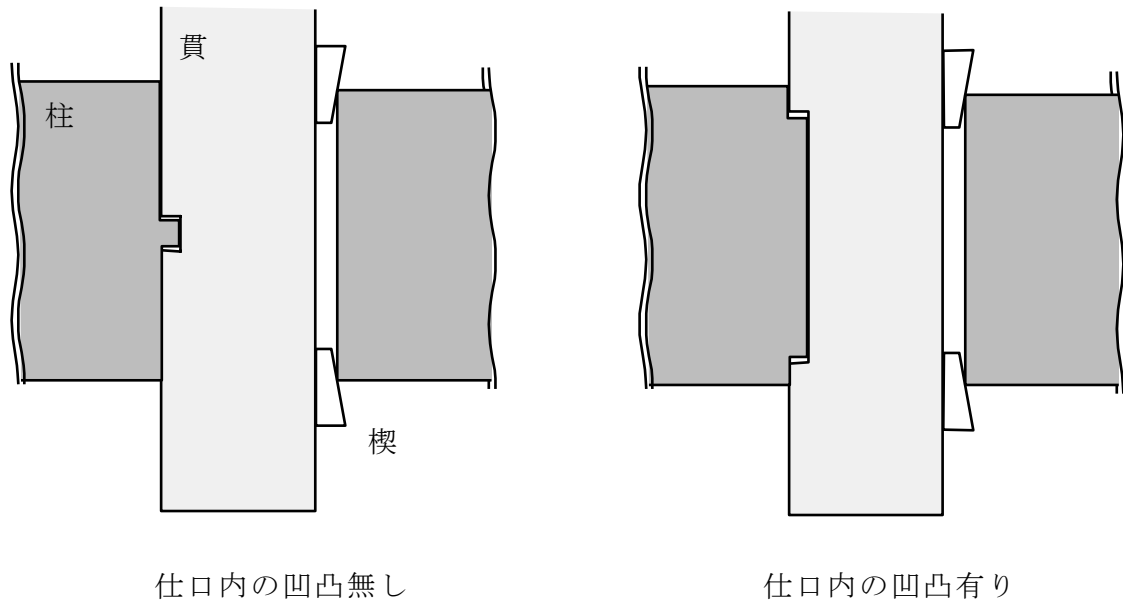


図 2. 38 切欠き無と切欠き有の部分モデル

3. 貫下部(切欠き側)では切欠きの有無にかかわらず、目視ではっきりわかるほどの残留めり込みが生じた。
4. 柱下部では回転角が大きくなるに伴い、貫表面に対して垂直方向のみでなく接線方向にもめり込み変形が生じた。この場合、接線方向にも大きな反力が生じていると考えられる。このようなめり込みでは滑りは生じず、摩擦係数が 1 を超える可能性があるため、クーロン摩擦で反力を直接予測することはできない。

#### 2.4.3. めり込み実験からの推定結果との比較

2.3 節の手法によりめり込み実験から骨格曲線を予測した結果と、部分架構実験より得られた結果との比較を図 2. 39 に示す<sup>注8)</sup>。図 2. 39 において、実線は 2.5 節で推定したモーメントー回転角関係を示す。また、破線は部分架構実験のモーメントー回転角関係の骨格曲線を表す。図 2. 39 から、2.5 節の手法により良好な精度でモーメントー回転角関係が予測できていることが観察される。

しかし、貫表面の接線方向の反力成分を無視しているにもかかわらず、予測が部分架構実験結果と同等かこれを上回っている場合があり、回転角が 0.09 (rad) 以上では、モーメントがわずかに減少していく場合があるなど、課題が残る。これらの原因としては、回転角が大きい (0.04(rad)を超える) 範囲ではめり込み反

力がめり込み実験の近似の範囲（60(kN)）を超えていることと、めり込み実験では鋼板で柱を模擬したために柱剛性を過剰に評価していることが考えられる。また、柱と貫の接触部にテフロンをはさむ事で接線方向の反力成分（摩擦力）を低減した場合に、低減しない場合と比較して耐力モーメントが大きくなることが報告されている事例<sup>18)</sup>があるなど、接線方向の反力成分の扱いには未解明な点が残る。そのため接線方向反力の扱いに関しては、更なる検討が必要である。

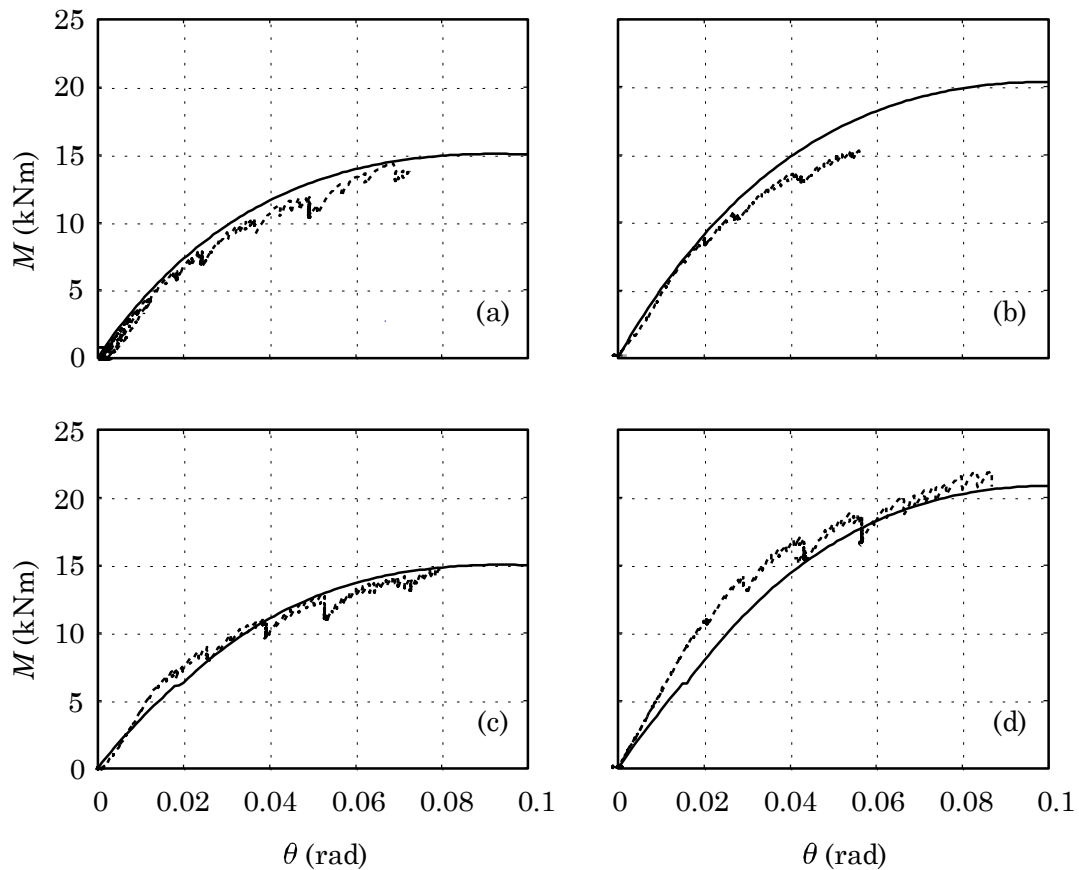


図 2.39 部分架構実験結果とめり込み実験からの予測曲線との比較：(a)切欠き無（模擬）・楔ヒノキ，(b)切欠き無（模擬）・楔アサメラ，(c)切欠き有・楔ヒノキ，(d)切欠き有・楔アサメラ

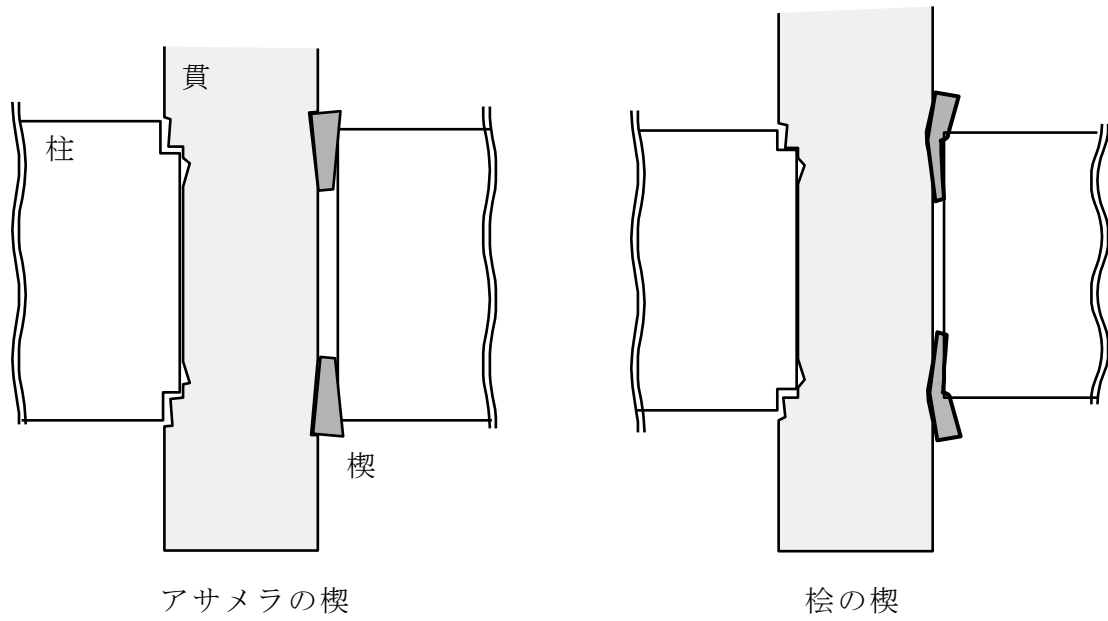


図 2. 40 切欠き無と切欠き有の変形状態

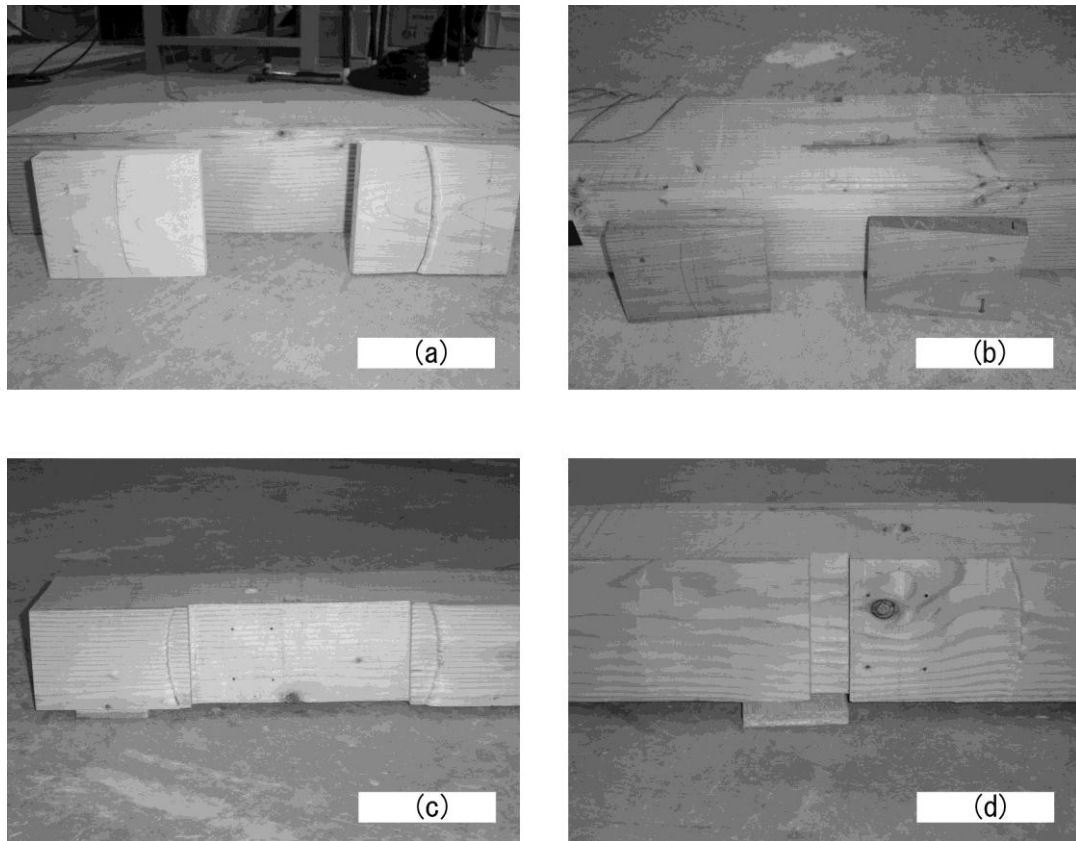


図 2. 41 部分架構実験結果による貫・楔：(a)切欠き無（模擬）・楔ヒノキ，(b)切欠き無（模擬）・楔アサメラ，(c)切欠き有・楔ヒノキ，(d)切欠き有・楔アサメラ



## 2.5. 結論

本論文で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 楔や仕口での切欠きを考慮した上で、めり込み形状、めり込みにより生じる境界反力、それらの関係を数値モデル化した。
- 2) めり込み接触の生じる部分要素のみを取り出した実験を行い、めり込み形状と境界反力を関係付けるめり込み構成則を得た。荷重が **60(kN)** 程度までの範囲では、荷重-めり込み関係、重心位置-めり込み関係ともに、その骨格曲線は直線近似もしくは区分直線近似が可能であることを明らかにした。
- 3) 上記のめり込み構成則を用いて、柱一貫接合部のモーメント-回転角関係骨格曲線を予測する手法を定式化した。
- 4) 回転角が **0.1 (rad)** 以下の範囲では、提案手法により部分架構実験の結果を良好な精度で予測できた。なお、回転角が **0.09 (rad)** 以上でモーメントがわずかに減少していく結果を得た。この原因としては、この範囲ではめり込み反力がめり込み実験から得られる近似の範囲を超えていることと、反力の接線方向成分を無視していることの二点が挙げられる。しかし原因は必ずしも明確ではないため、更なる検討が必要である。
- 5) 接線方向反力、寸法効果、繰返し特性、木材同士の接触、楔の形状、接合部内における貫の継手などについて、今後、有限要素解析などを用いた検討が必要である。本研究で得られためり込み実験データは、できるだけ少ない材料実験の下で接合部の復元力特性を有限要素解析などにより予測するための基礎データとしても有用である。

## 注

- 注1). 本研究論文の内容の一部は文献 16,17)に発表済である。文献 16)と比較して、本論文では 2.4 節の内容を新たに追加し、式(1)のめり込み構成則を陽な形で表現している点が抜本的な改善点である。また以下の二つの実験結果を新たに追加し、データを大幅に整備拡充した。(1)試験体のバラツキを考慮するために試験体数を一体から三体にして行っためり込み実験、(2)仕口の切欠きの有無が接合部の復元力特性に与える影響を考慮しためり込み及び部分架構実験。さらに、文献 16)のめり込み実験では、載荷方法の不備により荷重が 40(kN)以上の領域では妥当な実験結果が得られない場合があったが、本論文ではこの不備を解消した。
- 注2). 柱一貫接合部では仕口に切欠きを持たない場合も多くあるが、本論文では特に社寺建築の通貫で用いられることの多い、渡りあごと呼ばれる切欠きを持つ柱一貫接合部の形式<sup>11-14)</sup>を採用した。
- 注3). 図 2.7, 図 2.8, 図 2.9 では簡単のため貫のめり込みの余長部における引き込みを無視した図を用いてめり込み量を表す変数の定義を行っている。しかし、めり込み実験ではめり込みの余長部における引き込みは(当然ながら)生じている。そのため、めり込み実験から得られるめり込み構成則には、めり込みの余長部の影響が自動的に含まれている。
- 注4). 当初は柱鋼板から貫試験体に作用する接線方向力は無視できると仮定し、ローラーを設置せずにめり込み試験を行った。その結果、鉛直力  $n$  の作用位置  $r$  が柱の半径  $R$  を超えるという物理的に矛盾した観測結果を得た。そのためローラーを設置して実験を行うと、 $n$ が 0 の場合に  $r$ が 0 となり  $r < R$  になるという物理的に整合した結果が得られた。そこで本論文では、常にローラーを設置してめり込み実験を行った。
- 注5). 柱鋼板と貫表面の接触で初期剛性が、貫表面エッジ部の降伏で二次剛性が、アタッチメントと貫切欠き部との接触で三次剛性が決まる。
- 注6). 本めり込み実験では、角度がある程度以上の値を持つ場合を想定して、片側の楔においてのみ柱との接触が生じると仮定してめり込み実験を行った。そのため、本実験システムを用いると角度が 0 でも  $k_r^*$ が有限値を持つ実験結果が得られると考えられる。しかし、実際の柱一貫接合部では、図 2.1 に示すように二つの楔が対称に楔が位置しているため、角度  $\theta$ が 0 の場合は、

めり込み量  $w$  の値に関わらず等価反力の作用位置が柱の中心となり  $r=R$  となる。図 2.25(b)より、これは  $\theta$  が 0 の極限において  $k_r^A$  が無限大になることを意味する。

注7). 引張側となる楔が重力で抜け落ちるのを防ぐために楔を釘で固定した。

注8). 第 2.4 節の部分架構実験で行った実験結果の再現性を確かめるため、森迫ら<sup>9)</sup>との結果の比較を行った。図 2.39 の実線は本実験結果の近似式、点線は森迫ら<sup>9)</sup>の結果の近似式を示す。比較的良好な精度でこれらの結果は一致しているが、全体的に本実験の結果が多少上回っている。その理由としては、材のバラツキや、ジャッキとの接合部分のめり込み詳細の差異などが考えられる。森迫ら<sup>9)</sup>の実験では貫に孔をあけ、そこに鋼棒を通してジャッキに接続していたため、孔の部分でめり込みが生じた。一方、本論文の実験では、孔を貫の外側に出した上で鋼棒と貫との間に鋼板を設置することで、めり込みの発生を回避する改善を行っている。

## 参考文献

- 1) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル—限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法，学芸出版，2004
- 2) 松本慎也，藤本義信，野島千里，岩佐裕一，樫原健一：伝統構法建築物の地震応答解析，構造工学論文集，日本建築学会，Vol.48B，pp. 251-257，2003
- 3) 前野将輝：寺院建築物における伝統木造軸組の構造力学特性と耐震性能，京都大学博士論文，2007
- 4) 坂静雄：寺社骨組みの力学的研究（第二部貫の耐力），建築学会論文集(大会号)，日本建築学会，pp. 259-268，1941
- 5) 後藤一雄：貫通仕口による木造ラーメン(大黒柱)構造の研究—その1：仕口の挙動に関する実験的研究—，日本建築学会構造系論文，No. 366，pp. 119-125，1986
- 6) 稲山正弘：木材のめり込みとその応用，東京大学博士学位論文，1991
- 7) 北守顕久，加藤泰世，片岡靖夫，小松幸平：伝統木造における貫接合部の耐力発現モデルの提案と実験的検証，木材学会誌，Vol. 49，No. 3，pp. 179-186，2003
- 8) 加藤泰世，小松幸平，北守顕久：木構造柱—貫接合部の剛性・耐力に及ぼす楔の役割，木材学会誌，Vol. 48，No. 2，pp. 84-91，2003
- 9) 森迫清貴，三宅祐子，北尾聡子：伝統木造架構の柱—貫仕口部の繰り返し載荷実験に基づく履歴曲線のモデル化，構造工学論文集，日本建築学会，Vol. 51B，pp. 503-512，2005
- 10) 前野将輝，鈴木祥之：伝統木造軸組の実大実験による柱—横架材接合部の曲げモーメント抵抗に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 601，pp. 113-120，2006
- 11) 佐藤日出男：社寺建築の工法，理工学社，1983
- 12) 住吉寅七，松井源吾：木造の継手と仕口，鹿島出版会，1989
- 13) 鶉功：図解社寺建築—各部構造編，理工学社，1993
- 14) 深谷基弘，鈴木紘子：図解／木造建築伝統技法辞典，彰国社，2001
- 15) 上谷宏二，荒木慶一，吉田亘利，家倉優人：伝統木造建築物柱脚の接触モデルに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 582，pp. 117-122，

2004

- 16) 荒木慶一，船津昌史，李東潤，吉田亘利，上谷宏二：仕口を考慮した木材要素めり込み試験からの伝統木造柱－貫半剛接合部のモデル化，第 12 回日本地震工学シンポジウム，論文番号 0165，pp. 766-769，2006
- 17) 遠藤俊貴，李東潤，吉田亘利，荒木慶一，上谷宏二：仕口を考慮しためり込み試験に基づく伝統木造柱－貫接合部復元力特性の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，C1，pp. 415-416，2007
- 18) 藤田香織，坂本功，大橋好光：伝統的木造建築における柱貫接合部の実験的研究（その 1） ，日本建築学会大会学術講演梗概集，C1，pp. 103-104，1996
- 19) 李東潤，荒木慶一，遠藤俊貴，吉田亘利，上谷宏二：めり込み実験に基づく伝統木造柱－貫半剛接合特性の推定，日本建築学会構造系論文集，Vol. 73，No. 631，pp. 1577-1584，2008.9

## 第3章 むり込み実験に基づく柱脚モデルの復元力特性

### 3.1 序

地震動に対する伝統木造建築物の抵抗機構の中で、大きな径を持つ柱の傾斜復元力が重要な役割を果すことが知られている<sup>1-18)</sup>。傾斜復元力とは、柱が傾斜することによって柱より上部の部分が持ち上げられることにより得られる水平方向の抵抗力であり、柱の径が大きいほど最大耐力が大きくなることが知られている。

傾斜復元力に関しては、坂<sup>1)</sup>がその先駆的研究において、鉛直荷重作用時の骨組の水平方向変位と水平方向復元力の関係を実験的に求め、柱が完全な剛体である場合の理論予測と比較して、最大耐力が小さくなることを指摘している。河合<sup>2-4)</sup>は柱上端及び下端にむり込みが生じているとして円柱と角柱のモデル化を行い、柱のロッキング前後における柱傾斜復元力の定式化を提案している。また最近、鈴木と前野ら<sup>10-12,14-15)</sup>により伝統木造骨組の実大実験が行われ、その復元力特性や振動特性が調べられている。

これらの研究<sup>1-15)</sup>は柱全体を含む部分架構としての傾斜復元力を求めるのが目的であり、骨組全体の挙動を予測する上で貴重な資料を提供している。しかし、柔軟なモデル化を行うには、柱材と柱材の周辺部材との接合部を個別にモデル化することも重要である。木材のむり込み特性に着目すれば、部分架構の実験を行うことなく部材のごく一部の要素実験を行うのみで、部分架構の復元力が得られると期待される。この考え方に基づけば、柱の傾斜復元力特性は、(1)木材のむり込み特性から得られる柱脚と柱頭のモーメント-回転角関係、(2)線材としての柱の弾性変形、(3)柱頭に作用する鉛直力によるP- $\Delta$ 効果を用いて、力学的により明確な根拠に基づき表現できる。

上谷ら<sup>16-17)</sup>は上記の考えに基づき、柱脚を半剛接バネとしてモデル化し、その特性を求めることを目的として、柱脚要素に一定鉛直力と強制回転角を与える実験を実施している。しかし、柱脚部復元力特性と木材のむり込み特性との関係は明確にされておらず、断面形状も円形に限られていた。また、実験装置の制約のため与えられる鉛直荷重や強制回転角の範囲が限定されており、鉛直荷重の大きさが柱脚のモーメント-回転角関係に与える影響や、大回転角時の挙動を明らかにすることもできなかった。さらに、柱材の寸法に関しては、実大試験の1/3の縮小試験体のみを対象としており、実寸大の柱脚要素との比較検証も行われていない。

本章では文献<sup>18)</sup>の手法を参考に、伝統的木造建築物の柱脚部を対象として、木材のめり込み実験から柱脚のモーメントー回転角関係を予測する手法を提示することを目的とする。めり込み実験では材料試験機を用いて、固定角度を実験パラメータとして1/3スケールの円柱及び角柱の試験体を礎石にめり込ませる。得られた実験データからめり込み構成則を定式化し、めり込み構成則を用いて柱脚のモーメントー回転角関係を予測するための手法を提示する。本実験を通じて、鉛直荷重の大きさが柱脚のモーメントー回転角関係に与える影響を明らかにする。また実寸大の柱脚要素の頂部に一定鉛直力と繰返し強制水平変位を与える実験を通じて、提案手法の妥当性を検証し、寸法効果についても検討を行う。本めり込み実験のような形での材軸方向のめり込み特性に関する実験データは既往の文献では見当たらない。そのため、めり込み実験から得られるデータは、今後、有限要素法などで柱脚モデルを構築する際に有用である。

## 3.2 基礎式

### 3.2.1 傾斜復元力

本節では柱の傾斜復元力の基本的な定式化を示す。図 3.1 (a)に示す 2 本の剛柱と剛床からなる平面骨組を考える。柱の高さを  $H$ 、柱の幅を  $B$  とする。床の重量を  $W$  とし、柱の重量は床の重量に対して無視できるほど小さいとする。この骨組の床の重心に水平力  $Q$  を作用させると図 3.1 (b)のように変形する。この時の柱の回転角を  $\theta$  とする。この時、図 3.1 (c)に示す柱に関するモーメントの釣合より次式が得られる。

$$Q(B \sin \theta + H \cos \theta) = W(B \cos \theta - H \sin \theta) \quad (3.1)$$

$\theta \ll 1$ を仮定すると  $\cos \theta = 1$ 、 $\sin \theta = \theta$  となり、次式が成り立つ。

$$\frac{Q}{W} = \frac{B}{H} - \theta \quad (3.2)$$

ここで、 $\theta B/H \ll 1$ を仮定した。この関係を図 3.2 (a)に実線で示す。柱が剛体ではなく変形体の場合、柱脚や柱頭で柱のめり込みが生じ、傾斜復元力は図 3.2 (a)の点線のように変化する。床重量  $W$  が大きいほど、 $Q/W$  の最大値は小さくなる。

### 3.2.2 むり込み構成則

本節では、円柱断面を対象に定式化の基本概念を示す。角柱についても同様に定式化が行える。柱材の柱脚部分を自由体として取り出す。礎石上の柱脚自由体に鉛直荷重と強制回転を与えると、図 3.2 (b)のグラフの右の図のように変形が柱脚底部に集中する。柱脚の回転角を  $\theta$ 、柱の半径を  $R$  とする。礎石から柱脚に作用する鉛直分布力と等価な集中力の大きさを  $n$ 、その作用位置  $r$  とする。 $n$  は柱に作用する軸力と一致する。また、無次元化量  $\bar{r}$  を次式により定義する。

$$\bar{r} = r/R \quad (3.3)$$

この時  $\bar{r}$  は、以下のように  $n$  と  $\theta$  の関数として表せる。

$$\bar{r} = f(\theta, n) \quad (3.4)$$

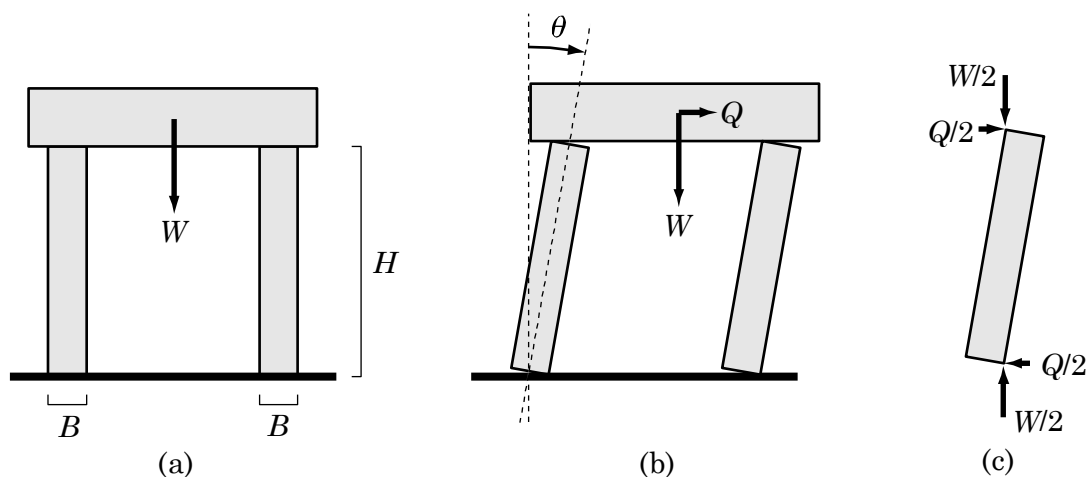


図 3.1 剛体からなる骨組の変形と力の釣合



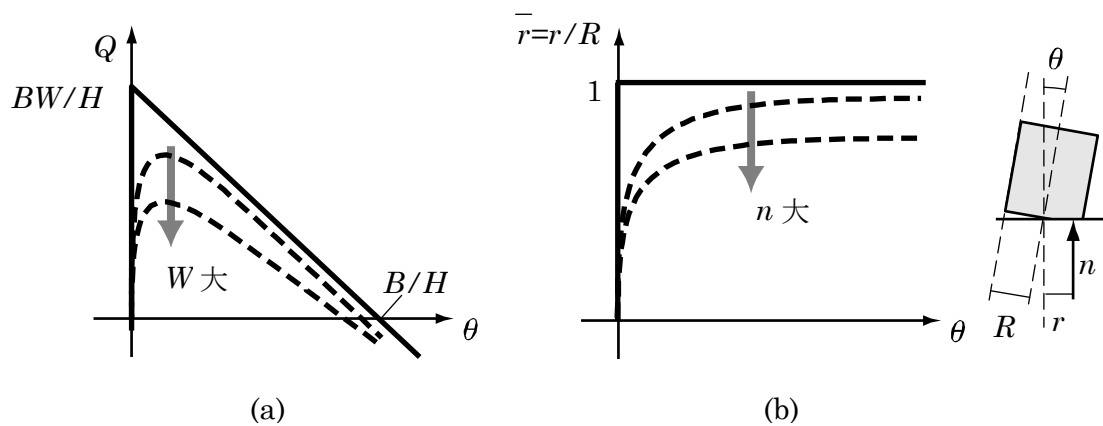


図 3.2 傾斜復元力と柱脚での集中反力作用位置の関係

この関係は、柱脚が剛体の場合は図 3.2 (b)のグラフの実線で、変形体の場合は点線で表せる。本論文では、回転角を固定して柱脚要素を礎石にめり込ませる実験を行い、回転角をパラメトリックに変更した結果を式(3.4)のめり込み構成則の形で整理する。めり込み構成則が得られれば、柱脚に作用するモーメント  $M$  は次式により得られる。

$$M(\theta, n) = nRf(\theta, n) \quad (3.5)$$

### 3.3 めり込み実験

#### 3.3.1 実験計画

本研究では材料試験機を用いて軸力  $n$  と回転角  $\theta$  のうち  $\theta$  を固定して強制鉛直変位を与える要素めり込み実験を行う。 $\theta$  を実験変数としてパラメトリックに変更した一連の実験結果を内挿することで、柱脚のめり込み構成則を表す式(3.4)の  $f$  の関数形を定式化する。

**載荷方法**：実験装置と試験体の立面図を図 3.3 (a)に、写真を図 3.4 に示す。本実験ではこれらの図のように、柱材の上部の変位と回転角  $\theta$  を固定して、下部の礎石を押し上げることで連続的に  $n$  を変化させる。試験方法としてはまず、礎石と柱脚の接触面に角度決定用楔を挟んで柱脚要素上部治具の角度を固定する。そして角度決定用楔を取り外した後に、載荷試験機の下側から鉛直方向の準静的漸増振幅振り返し強制変位を与え、柱脚に礎石をめり込ませる。本実験では固定角度  $\theta$  として、 $1/10, 1/15, 1/30, 1/60(\text{rad})$  の 4 通りの角度を採用した。

試験体：図 3.5 に示す寸法を持つヒノキ柱材と礎石の試験体を対象に実験を行う。礎石はびしゃん仕上げとする。上谷ら 16,17)の実験と同様に、柱材試験体は鈴木と前野ら 10-12, 14,15)の実大実験の 1/3 のスケールとした。図 3.5 (b)の平面図に示すように、試験体は円柱断面もしくは正方形断面を持つ。図 3.5 (b)では灰色部分が礎石、白色部分が柱材を表す。角柱試験体に関しては傾斜の方向により結果が異なるため、断面の一辺が接する方向に強制回転角を与える場合と、これと 45 度の方向に強制回転角を与える場合について実験を行う。以下ではこれらの試験体の断面と角度の組合せを、Case A：円柱，Case B：角柱（辺接触），Case C：角柱（角接触）と呼ぶ。

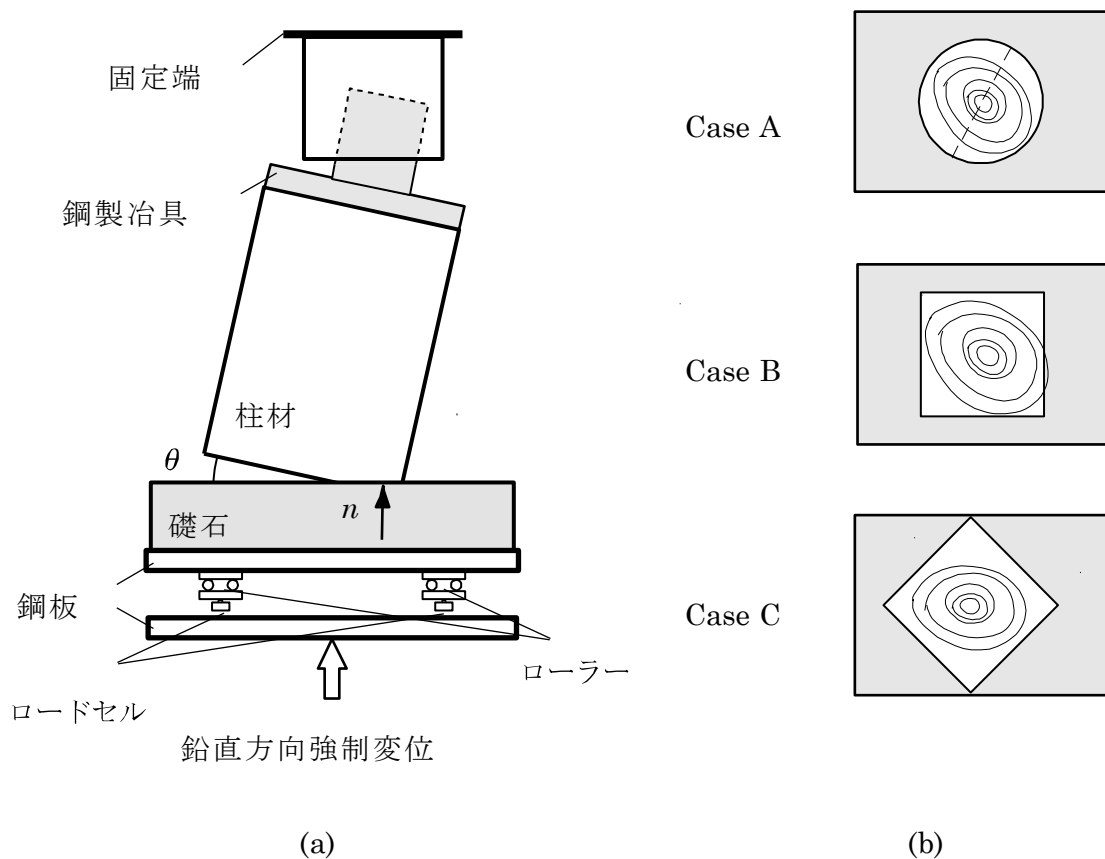


図 3.3 めり込み実験における礎石と柱材の位置関係

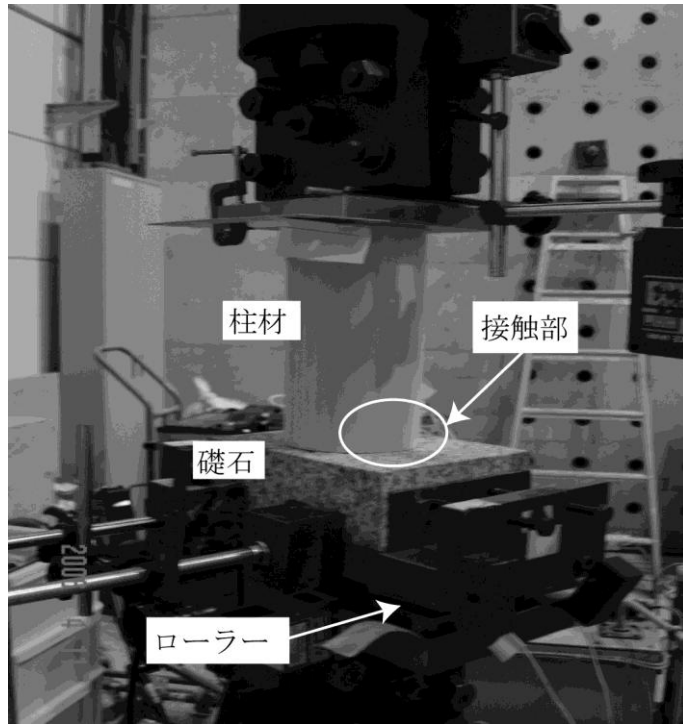


図 3. 4 円柱試験体の設置状況

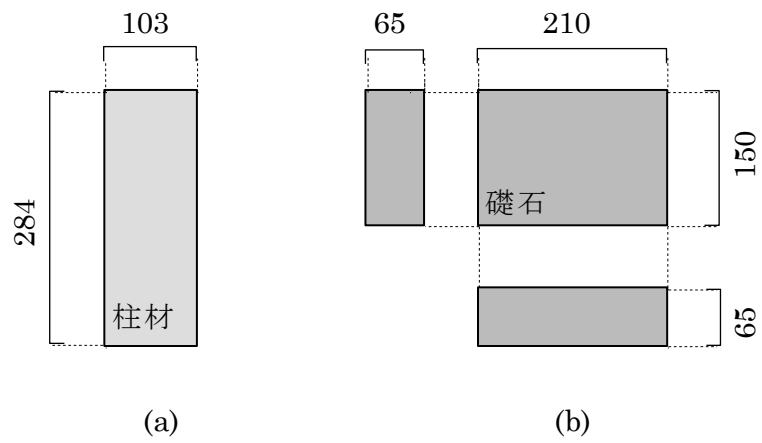


図 3. 5 試験体の寸法 : (a)柱材, (b)礎石

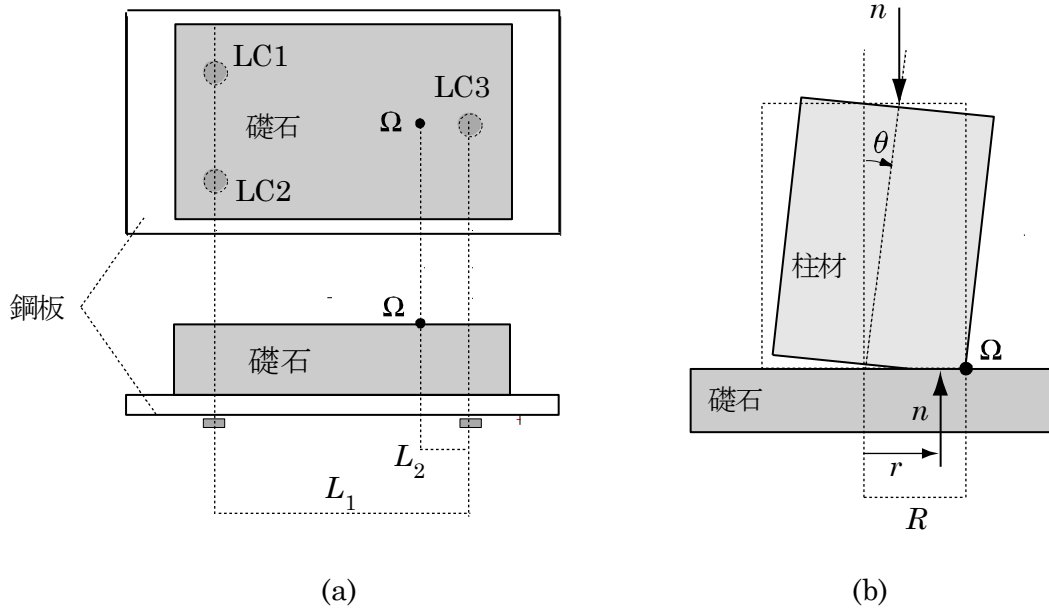


図 3. 6(a)柱材と礎石の関係, (b)ロードセル配置図

計測方法：図 3. 6 に示すように二等辺三角形の頂点に配置した容量 20(kN)のロードセル 3 個を用いて、礎石下側に作用する反力を計測する。ロードセル LC1, LC2, LC3 における計測値を  $n_1, n_2, n_3$  として、礎石と鋼板に作用する力とモーメントの釣合から  $n$  と  $r$  を求める。ロードセル LC1 から LC3 までの距離を  $L_1$ 、柱と礎石の接触面の端点  $\Omega$  からロードセル LC3 までの距離を  $L_2$  とすると、次式により  $n$  と  $r$  を求めることができる。

$$n = n_1 + n_2 + n_3, \quad r = R + L_2 - \frac{n_1 + n_2}{n} L_1 \quad (3.6)$$

### 3.3.2 実験結果

各 Case の集中反力の大きさ  $n$  とその作用位置  $r$  の関係の骨格曲線の実験結果を図 3. 7~図 3. 9 に示す。各 Case, 各  $\theta$  について、3 回ずつ実験を行った。 $n = 4\text{kN}$  と  $n = 36\text{kN}$  に対する  $\bar{r}$  の値の平均値を表 1 に示す。実験結果から観察事項と考察を以下にまとめる。

$n - \bar{r}$  関係の傾きは、Case B > Case A > Case C の順に大きい。この理由は、Case B > Case A > Case C の順で  $r$  方向の単位長さ当たりの接触面積が大きいためであると考えられる。

全体的に  $n$  が 0 に近い領域では、 $n - \bar{r}$  関係が不安定な動きを示している。その原因は、2.1 節の計測方法で述べたように礎石と鋼板の力とモーメントの釣合から式(3.6)を

用いて分布荷重の作用位置  $r$  の値を算出しており、 $r$  の計算式の右辺第 3 項が分母に  $n$  を持つためである。

図 3. 7~図 3. 9 の実験結果から回転角が  $\theta=1/60$  (rad) の場合は実験データの偏差が、他の回転角の場合より大きい。その原因としては、礎石に接する面積が広く、びしゃん仕上げを行った礎石の上面の凹凸のために接触位置のバラツキが大きいことが考えられる。軸力  $n$  を 9 倍にすることで、Case A の円柱の場合は一割弱、Case C の角柱の角接触の場合は二割弱程度、 $\bar{r}$  の最大値が小さくなった。一方、Case B の角柱の辺接触の場合は、軸力の影響はほとんど見られなかった。

表 3. 1 柱脚の要素めり込み試験詳細

Case	試験番号	$\theta$	w(mm)	l(mm)
A	A10-1, 2, 3	1/10	2.6,2.2,2.6	101,100,101.5
	A15-1, 2, 3	1/15	2.6,2.2,2.4	90.5,91.5,91
	A30-1, 2, 3	1/30	1.6,1.8,2.0	80.5,80.5,80.5
	A60-1, 2, 3	1/60	1.4,1.6,1.4	72,70.5,75.5
B	B10-1, 2, 3	1/10	2.6,2.2,2.6	102,100,102.5
	B15-1, 2, 3	1/15	2.2,2.2,2.0	92,90.5,88
	B30-1, 2, 3	1/30	1.6,1.6,1.6	80.5,79,77
	B60-1, 2, 3	1/60	1.2,1.4,1.6	72,73,75
C	C10-1, 2, 3	1/10	2.6,4,5	84,80.5,85
	C15-1, 2, 3	1/15	4,3.4,3.4	71.5,72,75
	C30-1, 2, 3	1/30	2.2,2.8,2.6	59,63,63
	C60-1, 2, 3	1/60	2.0,1.8,2.4	55,58,58

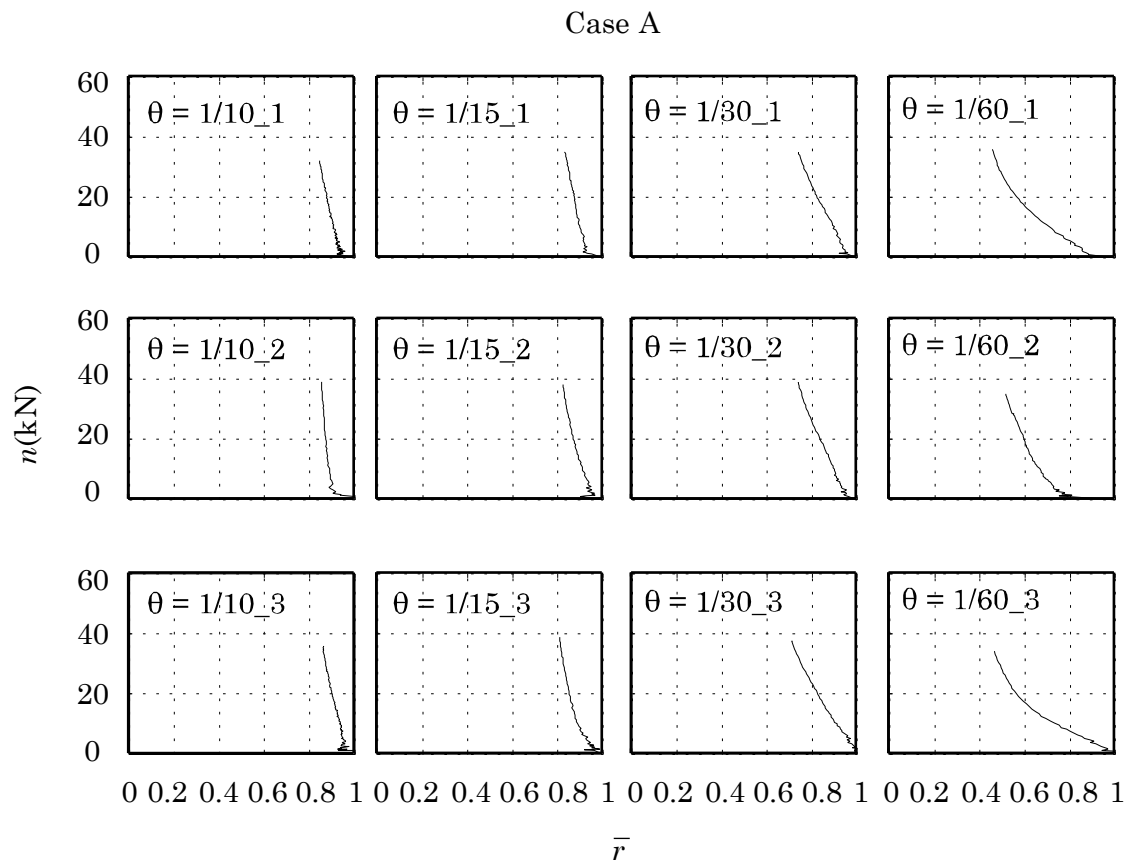


図 3. 7 Case A 実験結果の骨格曲線

Case B

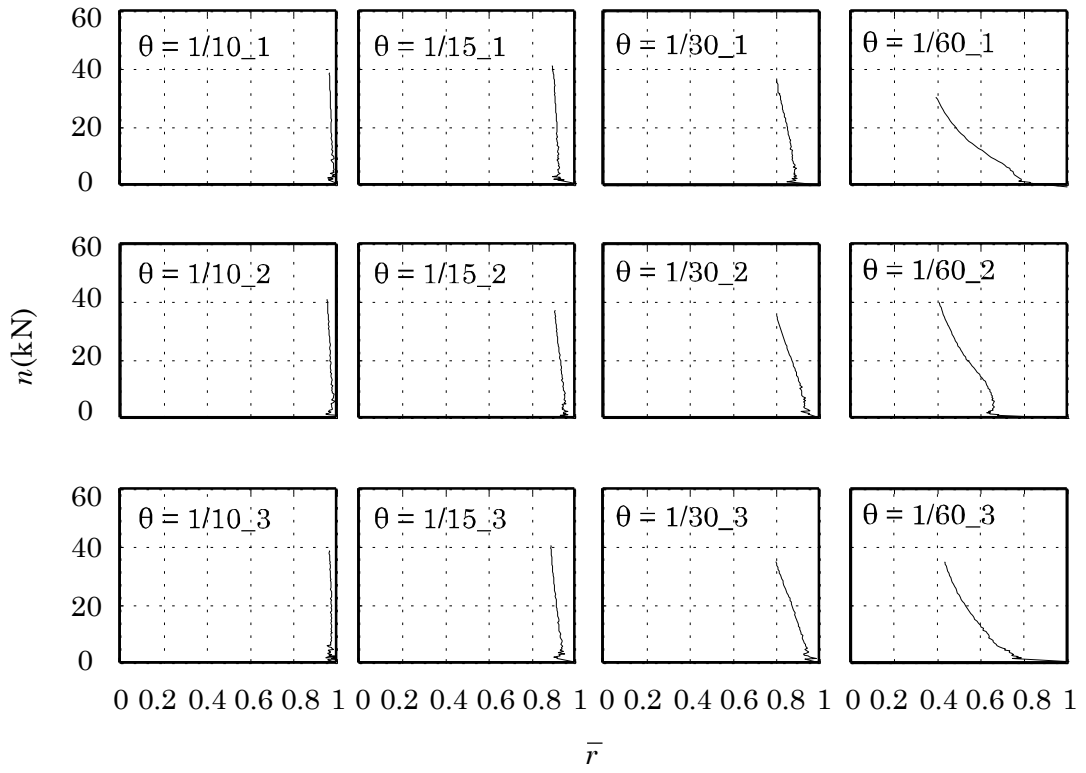


図 3. 8:Case B 実験結果の骨格曲線

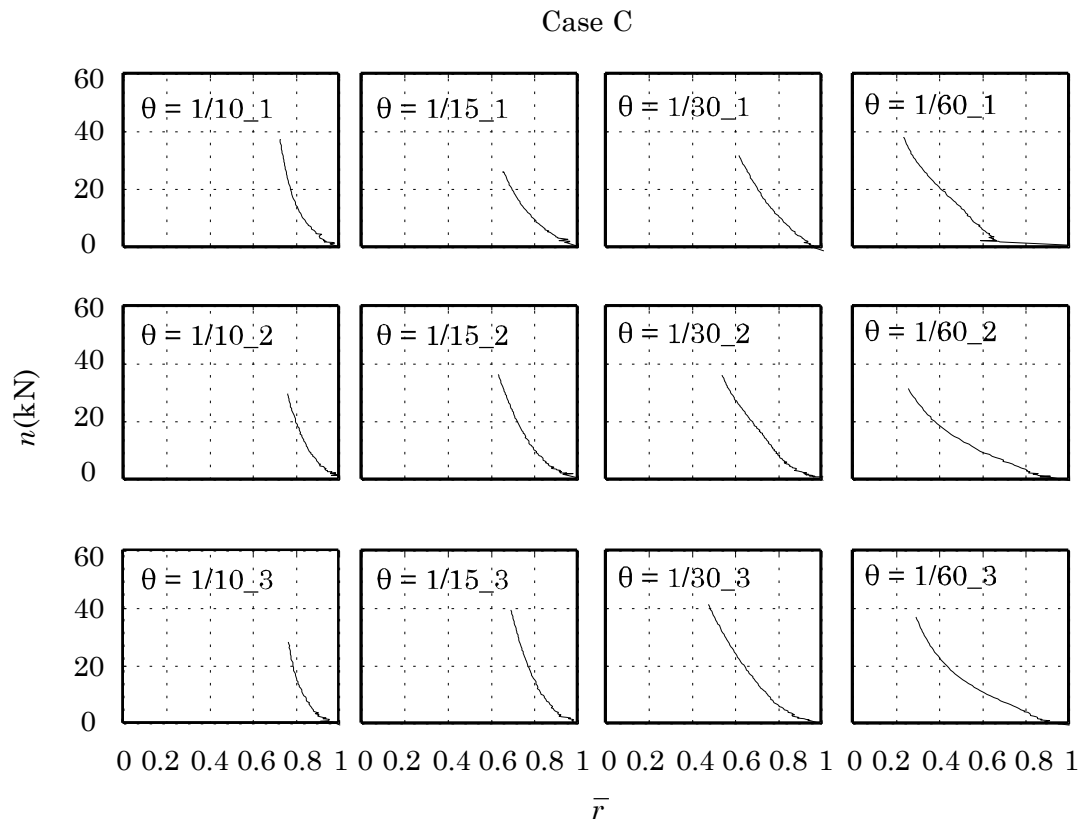


図 3.9 Case C 実験結果の骨格曲線



表 3.2 集中反力の重心位置の平均値

Case	$n(\text{kN})$	$\bar{r}$			
		$\theta=1/10$	$\theta=1/15$	$\theta=1/30$	$\theta=1/60$
A	4	0.93	0.93	0.94	0.81
	36	0.85	0.82	0.73	0.48
B	4	0.98	0.93	0.92	0.70
	36	0.95	0.89	0.80	0.52
C	4	0.91	0.89	0.88	0.74
	36	0.72	0.67	0.52	0.27

表 3.3  $k_1^{ca}(n)$  と  $k_2^{ca}(n)$  の近似データ

Case	$n$	$k_1^{ca}$	$k_2^{ca}$
A	4	0.92	96.35
	9	0.89	74.04
	18	0.88	60.23
	25	0.86	52.03
	36	0.86	45.65
B	4	0.96	121.77
	9	0.95	98.35
	18	0.95	75.23
	25	0.94	62.22
	36	0.94	53.34
C	4	0.88	96.14
	9	0.83	71.81
	18	0.79	48.26
	25	0.76	34.80
	36	0.77	25.30

表 3.4  $a_1^{ca}$ ,  $b_1^{ca}$ ,  $a_2^{ca}$ ,  $b_2^{ca}$  の近似データ

q	Case A	Case B	Case C
$a_1^{ca}$	-0.10	-0.04	-0.16
$b_1^{ca}$	0.25	0.23	0.31
$a_2^{ca}$	-75.35	-95.19	-66.86
$b_2^{ca}$	-0.35	-0.38	-0.56

### 3.4 柱脚めり込み構成則

#### 3.4.1 定式化

本論文では、上谷ら<sup>16,17)</sup>の定式化を参考に、次式により式(3.6)のめり込み構成則を近似する。

$$f(\theta, n) = k_1^{ca}(n) \left( 1 - e^{-k_2^{ca}(n)\theta} \right) \quad (3.7)$$

ここで  $k_1^{ca}(n)$  と  $k_2^{ca}(n)$  は軸力  $n$  の関数であり、 $q$  は Case A では A、Case B では B、Case C では C である。軸力  $n$  を指定すると、各回転角  $\theta$  ( $=1/10, 1/15, 1/30, 1/60$ ) について、図 3.7~図 3.9 の実験結果の各グラフからこれに対応する  $r$  の値が定まる。具体例として  $n=4, 9, 36$  (kN) の場合に 3 体の試験体について  $r$  を求め、その平均を求めた結果を白丸でプロットしたグラフを図 3.10 に示す。これらの点と式(3.7)を用いて最小二乗近似を行うと、指定した  $n$  に対応する  $k_1^{ca}(n)$  と  $k_2^{ca}(n)$  を求めることができ、図 3.10 の実線の  $r-\theta$  関係が得られる。比較のため  $n=4$  (kN) の場合について、上谷ら<sup>16,17)</sup>の結果を図 3.10 (a) に点線で示す。上谷らの結果と本研究のめり込み実験結果からの予測結果との差はわずかである。

各 Case において、5 通りの軸力  $n=4, 9, 18, 25, 36$  (kN) について  $k_1^{ca}(n)$  と  $k_2^{ca}(n)$  を求めた結果をに示す。の結果に基づき、 $k_1^{ca}-n$  関係と  $k_2^{ca}-n$  関係の近似曲線を求めることを考える。

この時、以下の考察が成り立つ。

(1)  $k_1^{ca}$  と  $k_2^{ca}$  は負の値をとらない。

(2)  $n$  が 0 に近いほど、剛体の結果に近くなるため、 $f$  の最大値を規定するパラメータ  $k_1^{ca}$  は 1 の値に近づく。また  $f$  の初期剛性を規定するパラメータ  $k_2^{ca}$  は無限大に発散する。上記の二点の考察に適合する簡潔な関数形の一例として、本論文では  $k_1^{ca} - n$  関係と  $k_2^{ca} - n$  関係を(3.7)式で近似する。

$$k_1^{ca}(n) = a_1^{ca} n^{b_1^{ca}} + 1, \quad k_2^{ca}(n) = a_2^{ca} n^{b_2^{ca}} \quad (3.8)$$

ここで、 $a_1^{ca}$ ,  $b_1^{ca}$ ,  $a_2^{ca}$ ,  $b_2^{ca}$  は係数である。実験結果より求めた式(3.8)の各係数の値を表 3.4 に示す。また、実験データと近似曲線の比較を図 3.11 に示す。図 3.11 において、○は Case A の円柱、□は Case B の角柱（辺接触）、◇は Case C の角柱（角接触）の実験結果の平均値を表す。また、実線、点線、一点鎖線は、それぞれ Case A, B, C の近似曲線を表す。

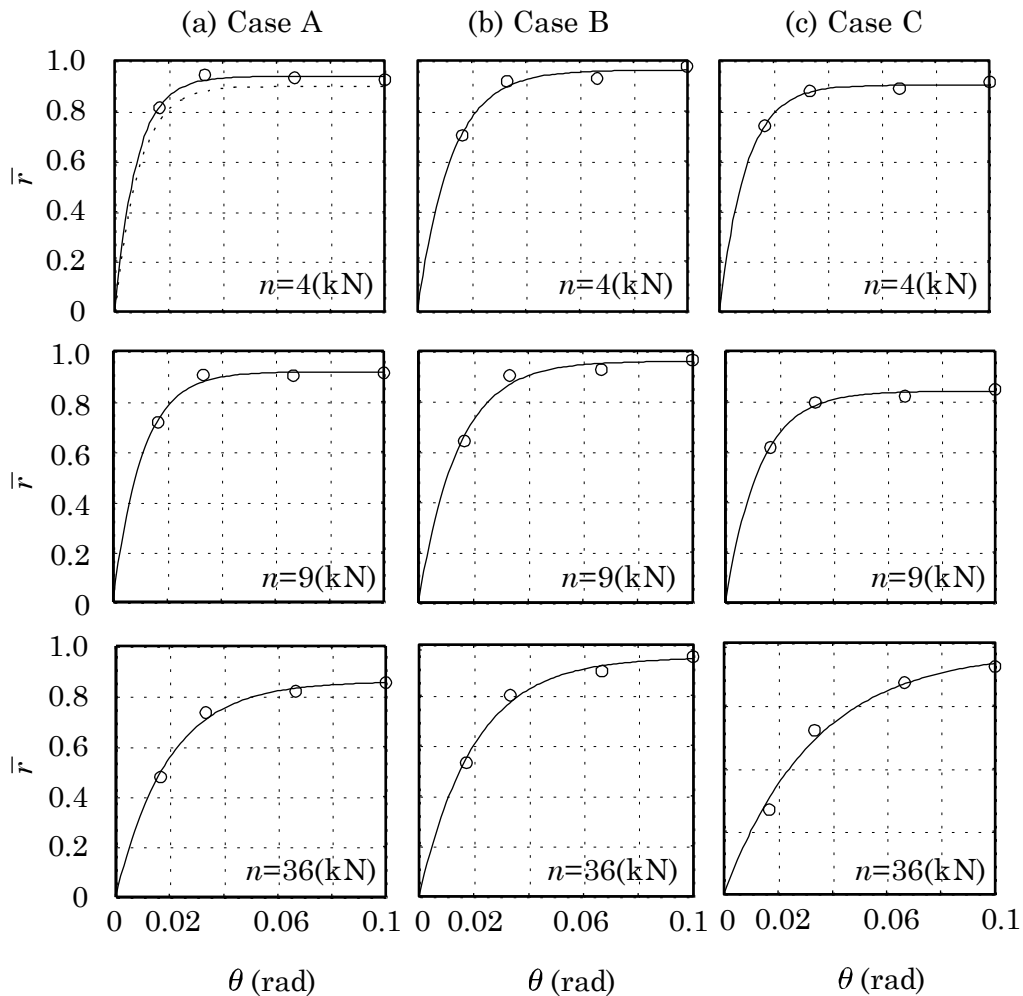


図 3.10  $n = 4, 9, 36$  (kN) の場合の  $\bar{r} - \theta$  関係

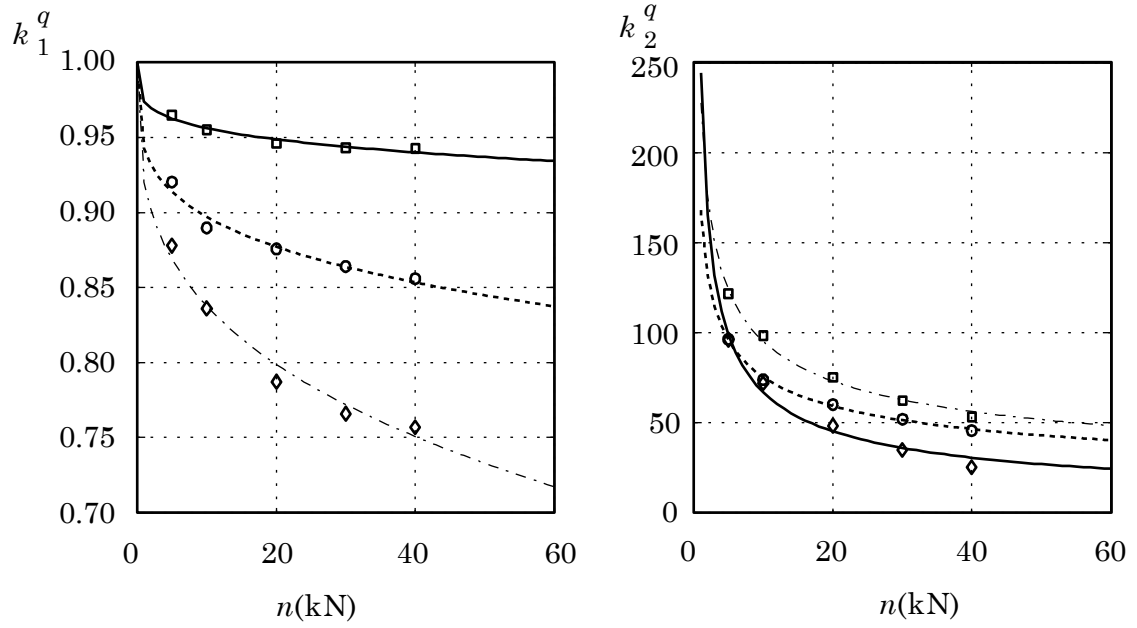


図 3.11  $k_1^{ca}(n)$  と  $k_2^{ca}(n)$  の近似曲線

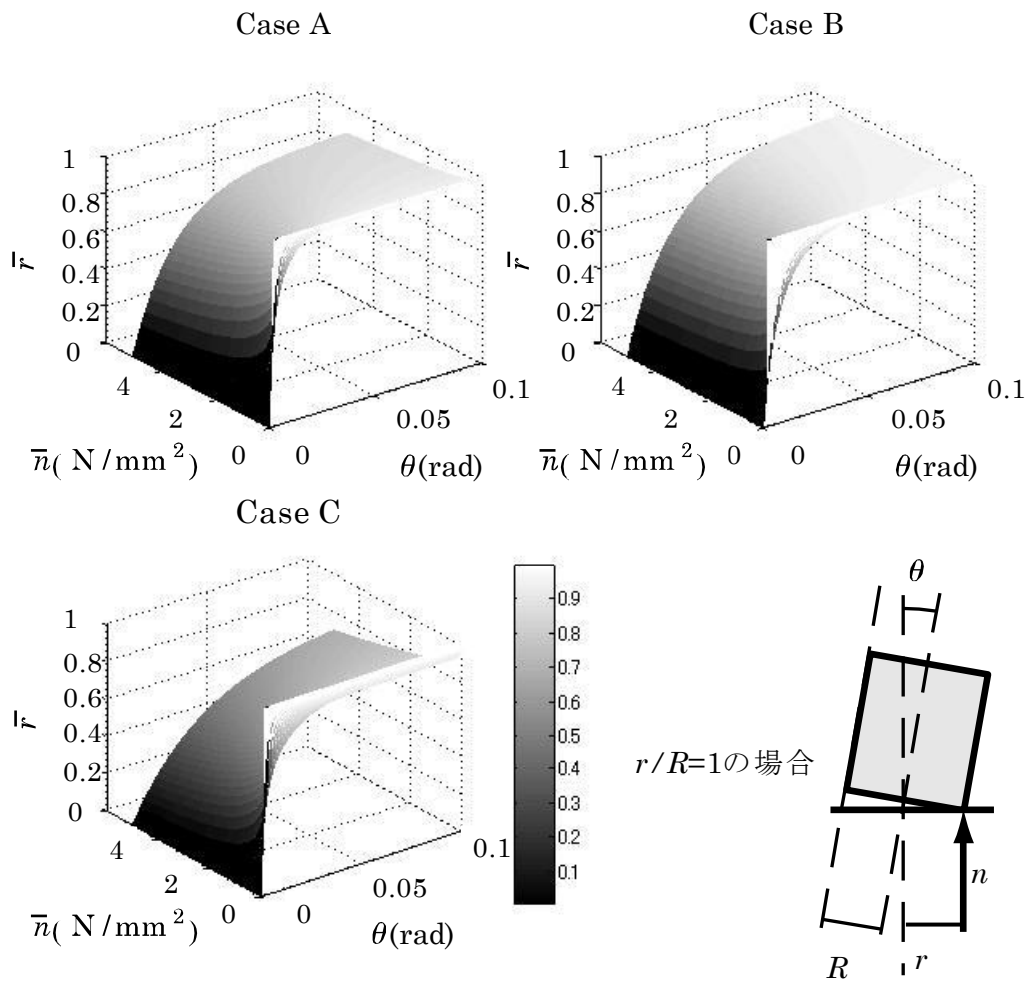


図 3.12 構成則  $r(\theta, \bar{n})/R$  のグラフ

### 3.4.2 寸法効果

前節までは、寸法効果を考慮せずに定式化を行ったが、本節では寸法効果について検討を行う。柱の断面積を  $A$  として、平均応力  $\bar{n}$  を次式で定義する。

$$\bar{n} = n/A \quad (3.9)$$

以下では、平均応力  $\bar{n}$  が同じであれば、相似則に基づき応力分布に対する仮定を設けることで、寸法効果に依存しない以下の形でめり込み構成則を表現できることを示す。

$$\bar{r} = \bar{f}(\theta, \bar{n}) \quad (3.10)$$

ある寸法の断面を持つ柱に作用する軸力を  $n_0$ 、底面における分布反力を  $\sigma_0(x, y)$ 、断面積を  $A_0$  で表す。また、この断面と相似形で一辺の長さを  $a$  倍した断面を持つ柱に作用する軸力を  $n_1$ 、底面における分布反力を  $\sigma_1(x, y)$ 、断面積を  $A_1$  で表す。この時、以下の関係が成り立つ。

$$A_1 = a^2 A_0 \quad (3.11)$$

座標系  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  を次式により定義する。

$$(\tilde{x}, \tilde{y}) = (ax, ay) \quad (3.12)$$

相似形で対応する位置における分布反力が等しいと仮定する。

$$\sigma_0(x, y) = \sigma_1(\tilde{x}, \tilde{y}) \quad (3.13)$$

この時、以下の関係式が成立する。

$$\begin{aligned}
n_0 &= \int_{A_0} \sigma_0(x, y) dx dy = \int_{A_0} \sigma_1(ax, ay) dx dy \\
&= \frac{1}{a^2} \int_{A_0} \sigma_1(ax, ay) a dx a dy = \frac{1}{a^2} \int_{A_1} \sigma_1(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y} \quad (3.14) \\
&= \frac{1}{a^2} n_1
\end{aligned}$$

式(3.11), (3.14)より, 平均応力に関して以下の関係が成り立つ。

$$\frac{n_0}{A_0} = \frac{n_1}{A_1} \quad (3.15)$$

これより, 式(3.13)の反力分布の仮定の下では, 平均応力は寸法に関わらず一定値をとる。そのため, 式(3.15)の形でめり込み構成則を定義しておけば, 式(3.13)の仮定が成り立つ限り, 寸法に依存しない形のめり込み構成則が得られる。

ある断面積を持つ柱要素のめり込み実験結果からは, 以下のようにして寸法非依存のめり込み構成則が得られる。まず, めり込み実験で用いた柱要素の断面積を  $A^*$ , 得られためり込み構成則を  $\bar{r} = f^*(\theta, n)$  とする。この時, 無次元化しためり込み構成則は以下の式(3.16)により得られる。

$$\bar{r} = \bar{f}(\theta, \bar{n}) = f^*(\theta, \bar{n}A^*) \quad (3.16)$$

上式より得られためり込み構成則の結果を図 3. 12 に示す。Case A の円柱の断面積  $A^*$  は  $\pi R^2$ , Case B および Case C の角柱の断面積  $A^*$  は  $4R^2$  である。断面積が  $A^{**}$  の断面を持つ柱の柱脚でのめり込み構成則は次式により得られる。

$$\bar{r} = f^{**}(\theta, n) = \bar{f}(\theta, n/A^{**}) = f^*(\theta, \bar{n}A^*/A^{**}) \quad (3.17)$$

### 3.5 実大柱脚実験との比較による提案手法の妥当性の検証

#### 3.5.1 実験計画

要素めり込み実験結果から得られためり込み構成則の妥当性を検証するため、実寸規模の円形断面ヒノキ材柱脚に一定鉛直荷重と水平方向の漸増振幅繰返し強制変位を与える静的載荷実験を行う。図 3. 13 に示すように、鈴木と前野ら<sup>10-12,14,15)</sup>の実験を参考に、びしょん仕上げの礎石の上に、高さが  $H=852(\text{mm})$ 、半径が  $R=154(\text{mm})$  の円柱断面を持つヒノキ柱脚試験体を設置する。ジャッキ、鋼製冶具、試験体の寸法を図 3. 15 (a) に示す。図 3. 15(a)において、 $S_1=1,095(\text{mm})$ 、 $S_2=1,280(\text{mm})$ 、 $L_1=115(\text{mm})$ 、 $L_2=355(\text{mm})$  である。

載荷条件としては荷重をモニターしながら手動で、鉛直ジャッキにより  $n=36(\text{kN})$  の一定鉛直荷重を与え、水平ジャッキを用いて漸増振幅繰返し強制変位を与える。なお、載荷は準静的となるように載荷速度の制御を試みたが、載荷装置の制約から除荷時において変位制御が正確に行われず、動的な変位が生じる結果となった。

計測については、ジャッキに接続されたロードセルで荷重を測定し、試験体の 2 点における水平変位をレーザー変位計で測定した。鉛直ジャッキと水平ジャッキの荷重測定値を、それぞれ  $p_1$  と  $p_2$  とする。水平変位の測定値を測定間距離で除した値を回転角  $\theta$  とする。

回転角  $\theta$  が非零の時の、試験体と鋼製冶具に作用する力と変形を図 3. 15 (b) に示す。図 3. 15 (b)において、 $n$  と  $q$  は礎石から柱脚に作用する鉛直方向と水平方向の分布反力と等価な集中力、 $r$  はこれらの集中力の作用位置（柱の中心を原点とする）、 $\theta_1$  と  $\theta_2$  はそれぞれ鉛直ジャッキと水平ジャッキの回転角である。図 3. 15 (b)より、 $\theta$  が微小であれば以下の幾何学的関係が成り立つ。

$$\theta_1 = \frac{H+L_1}{S_1}\theta, \quad \theta_2 = \frac{R+L_2}{S_2}\theta \quad (3.18)$$

鉛直方向と水平方向の力の釣合式は以下のように表せる。

$$n = p_1 - p_2\theta_2, \quad q = p_1\theta_1 + p_2 \quad (3.19)$$

さらに、点 O まわりのモーメントの釣合から次式が導ける。

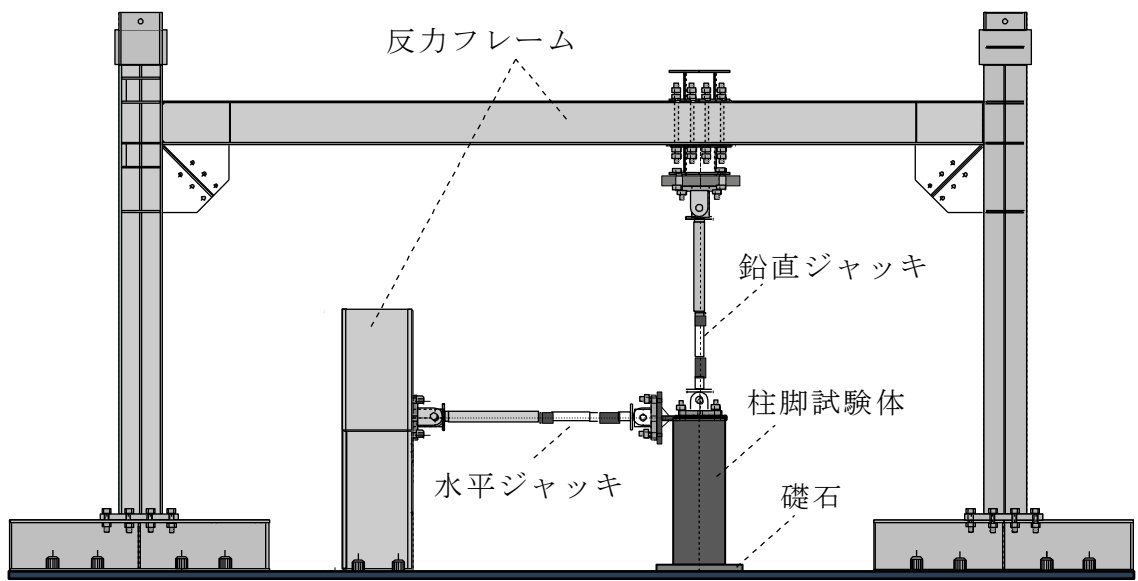


図 3.13 強制回転角実験装置

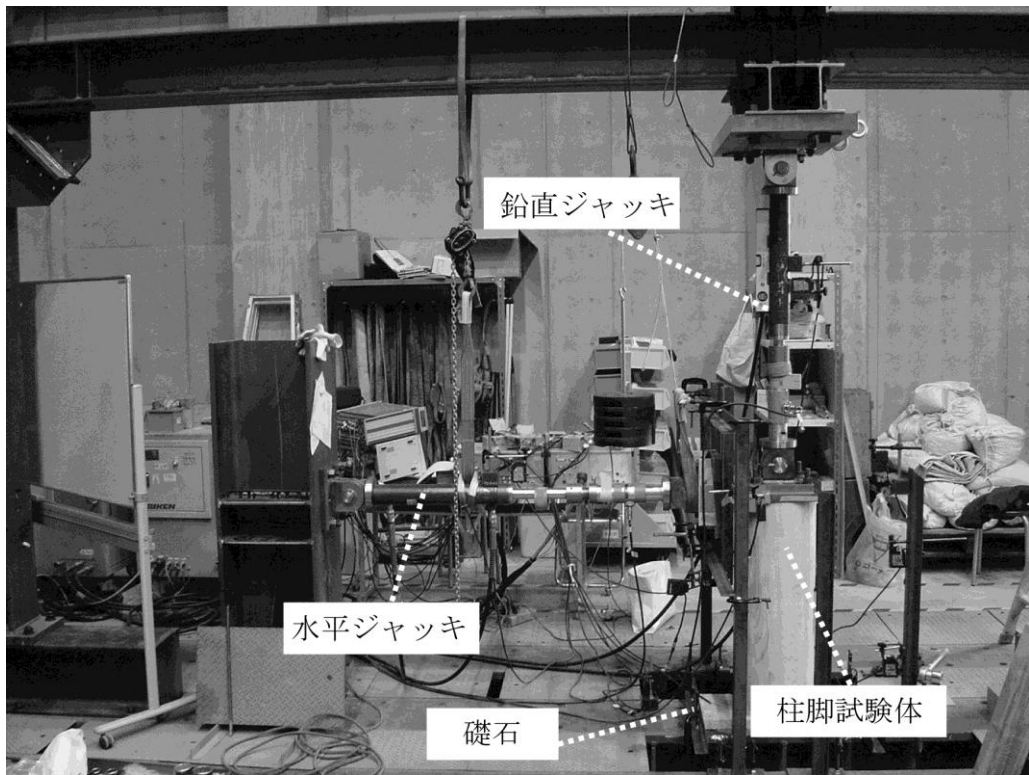


図 3.14 強制回転角実験装置の写真



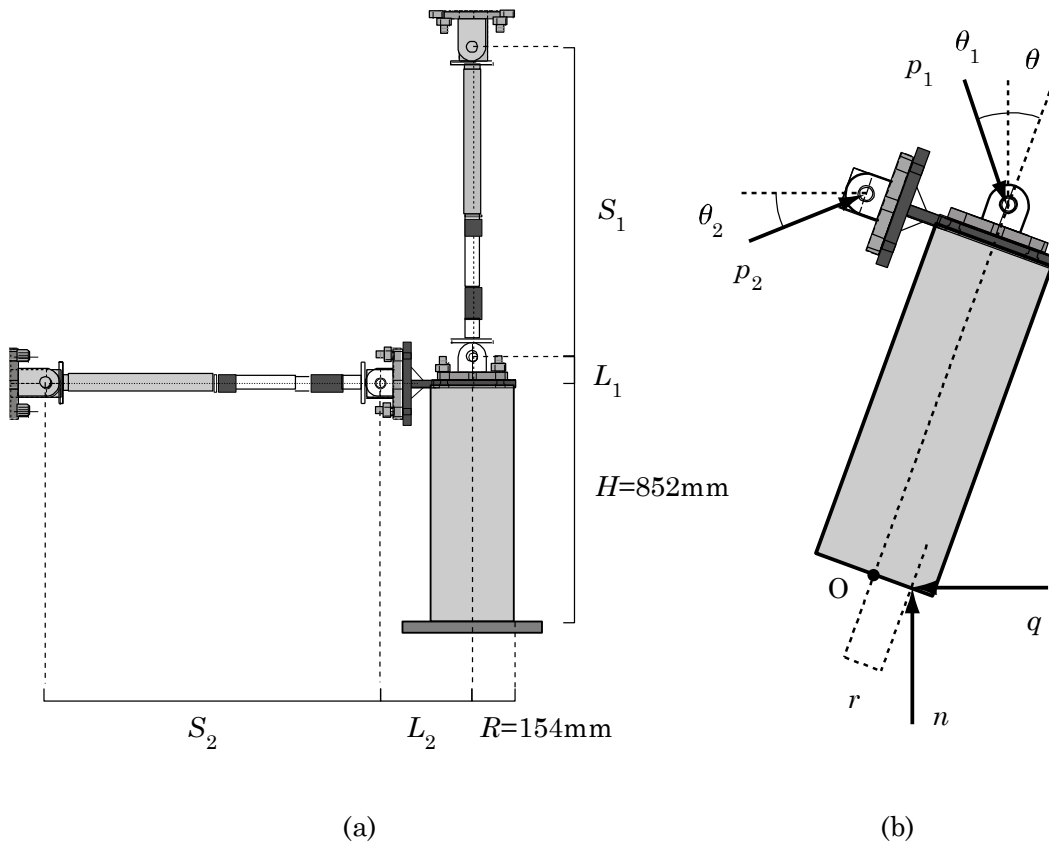


図 3.15 載荷装置と試験体の寸法と試験体にかかる力と変形の関係

$$r = \frac{p_1(H + L_1)(\theta + \theta_1) + p_2(H + L_2\theta) + p_2\theta_2(L_2 - H\theta)}{n - q\theta} \quad (3.20)$$

式(3.18), (3.19)を式(3.20)に代入して $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $n$ ,  $q$ を消去すれば, 変数 $\theta$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ のみを用いて $r$ を表すことができる。これに計測値 $\theta$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ を式(3.20)代入すれば $r$ を求めることができる。

### 3.5.2 実験結果

図 3.16 は鉛直ジャッキの荷重値  $p_1$  と回転角  $\theta$  の関係を示す<sup>註1)</sup>。同図の点線は 36kN である。載荷時はほぼ一定で加力できていたが, 除荷時の荷重制御が不安定であった。図 3.19 は実大実験から得られた水平力  $p_2$  と回転角  $\theta$  の関係を, 図 3.21 は無次元化した等価集中反力の作用位置  $\bar{r}$  と回転角  $\theta$  の関係を示す。また, 1/3 スケールの試験体より得られためり込み構成則から予測される  $\bar{r} - \theta$  関係の比較を図 3.22 に, 傾斜復元力

特性(水平力  $q$  と回転角  $\theta$  の関係)の予測値と実大実験結果の比較を図 3. 23 に示す。それぞれの図において点線は予測曲線を表し、実線は負荷時の実験結果を表す。 $\bar{r}$  の予測には式(3.17)を用い、水平力  $q$  の予測には次式を用いた。

$$q = \left( \frac{\bar{r}R}{H} - \theta \right) n \quad (3.21)$$

なお図 3. 22, 図 3. 23 では、後述の考察 3 に基づき最大値と最小値の midpoint が零点となるようにシフトさせた。これらの図からの観察事項と考察を以下にまとめる。

図 3. 19 より、回転角が  $\theta=0.07$  (rad) 程度に至ると水平力  $p_2$  が負となる。実験では、この点を超えると面外方向の変位が生じ、水平変位の制御が不安定となった。そのため、これ以上の回転角での実験は実施しなかった。

図 3. 19 において、同一回転角における負荷時と除荷時の水平力を比較すると、除荷時の値が小さくなった。この原因は以下のとおりである。まず、前節で述べたように除荷時は載荷装置の制約から動的に変位が生じた。除荷の前は一定軸力を与えるために鉛直ジャッキを縮めていたので、この状態から回転角が 0 となるように動的に変位すると、鉛直ジャッキのコントロールが追いつかず、柱試験体に作用する鉛直荷重が指定値よりも小さくなる。この鉛直荷重の低減に応じて水平荷重も低減したと考えられる。

図 3. 21 から、前章までのめり込み構成則により、実大実験の結果を良好な精度で予測できている。

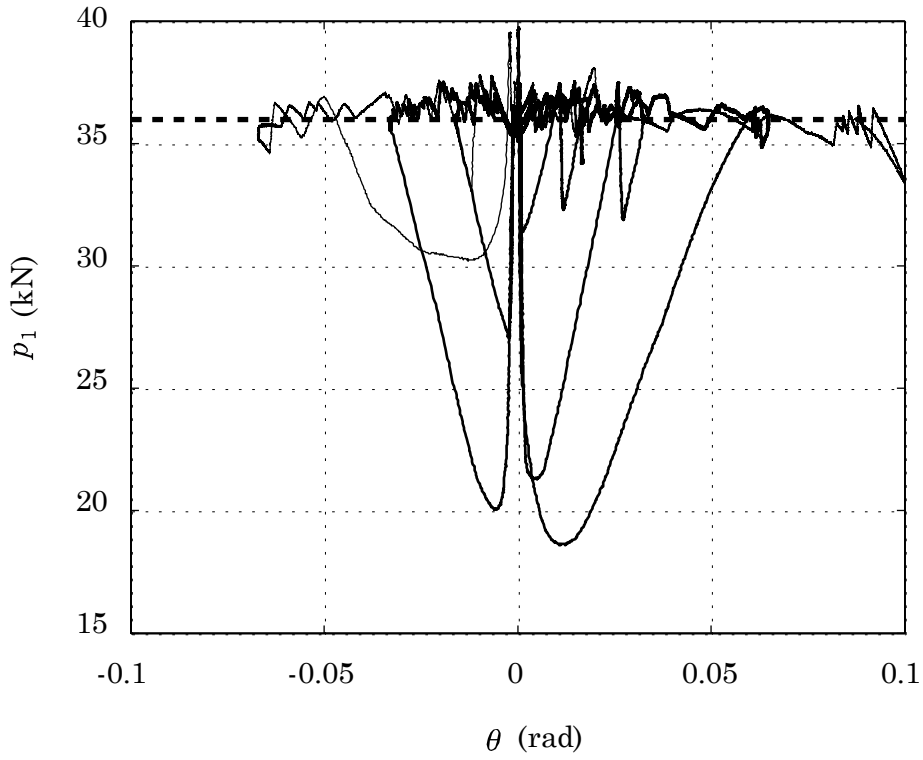


図 3. 16 鉛直ジャッキの荷重値  $p_1$  と回転角  $\theta$  の関係

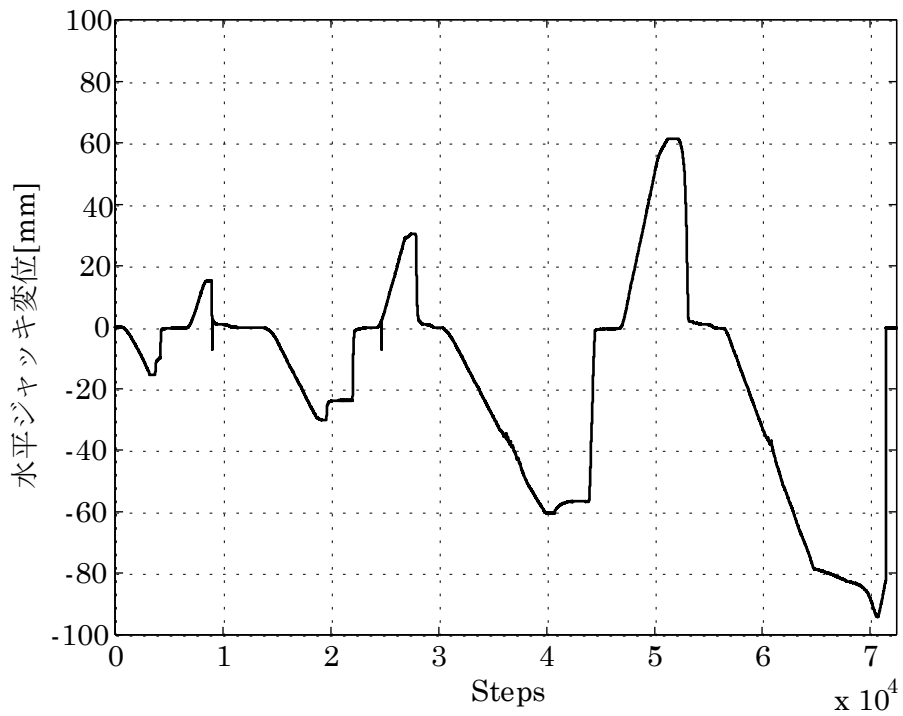


図 3. 17 水平ジャッキの変位サイクル

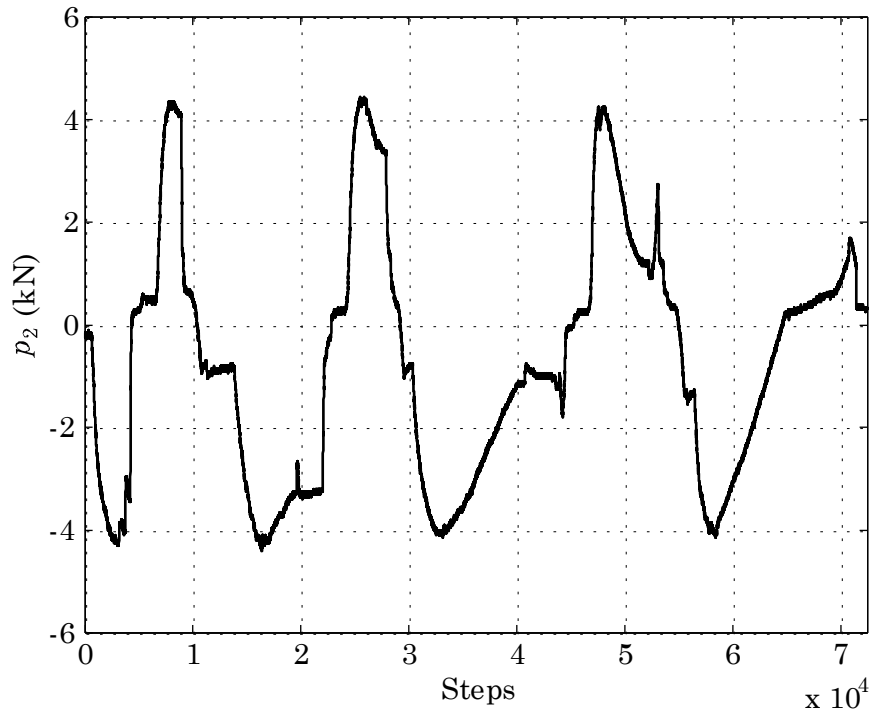


図 3. 18 水平ジャッキの荷重値  $p_2$  のサイクル

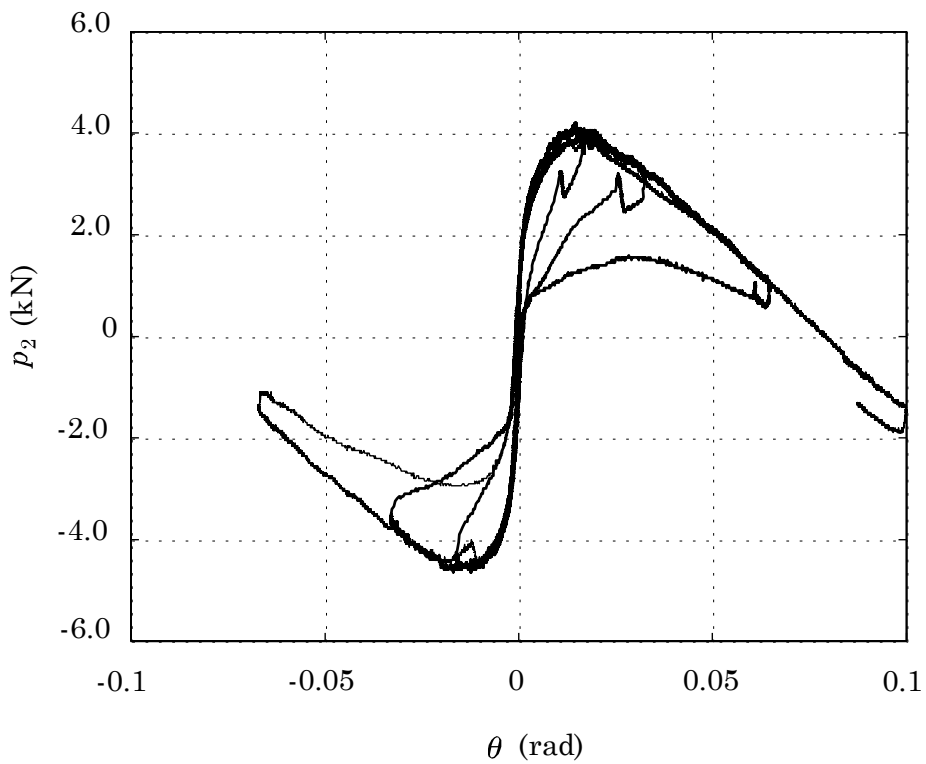


図 3. 19 水平ジャッキの荷重値  $p_2$  と回転角  $\theta$  の関係

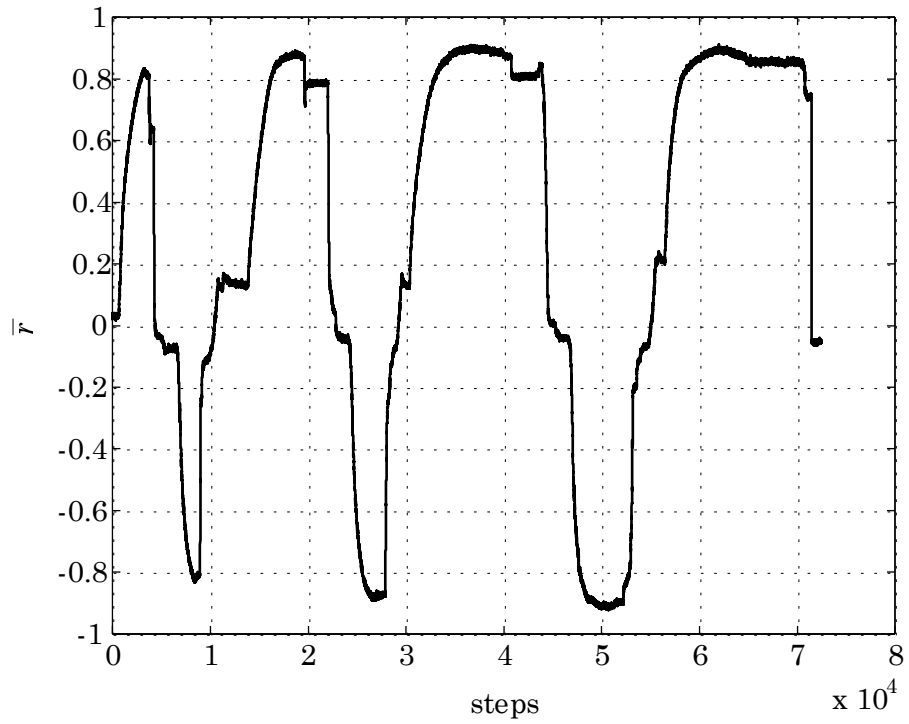


図 3.20 無次元化等価集中作用位置 $\bar{r}$ サイクル

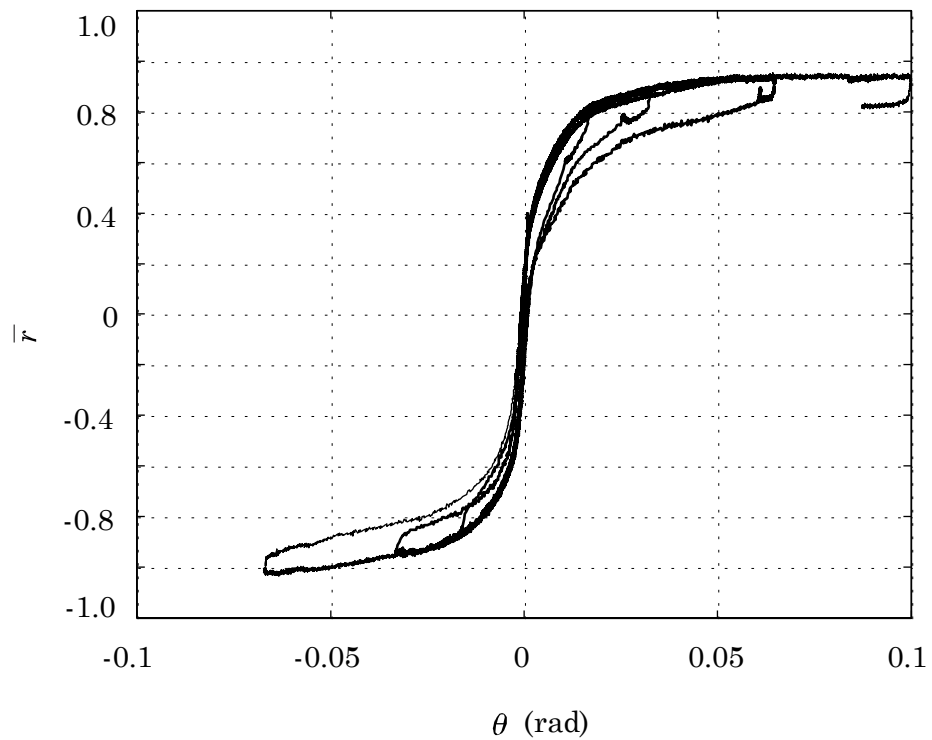


図 3.21 無次元化等価集中作用位置 $\bar{r}$ と回転角 $\theta$ の関係

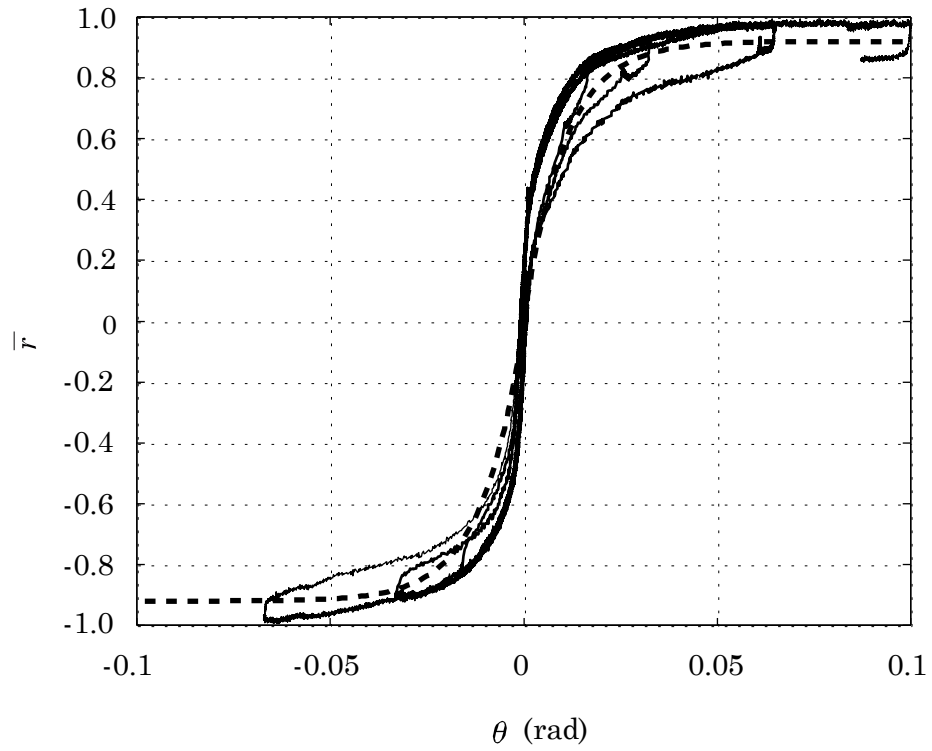


図 3. 22 無次元化等価集中作用位置  $r$  の予測値と実験結果の比較

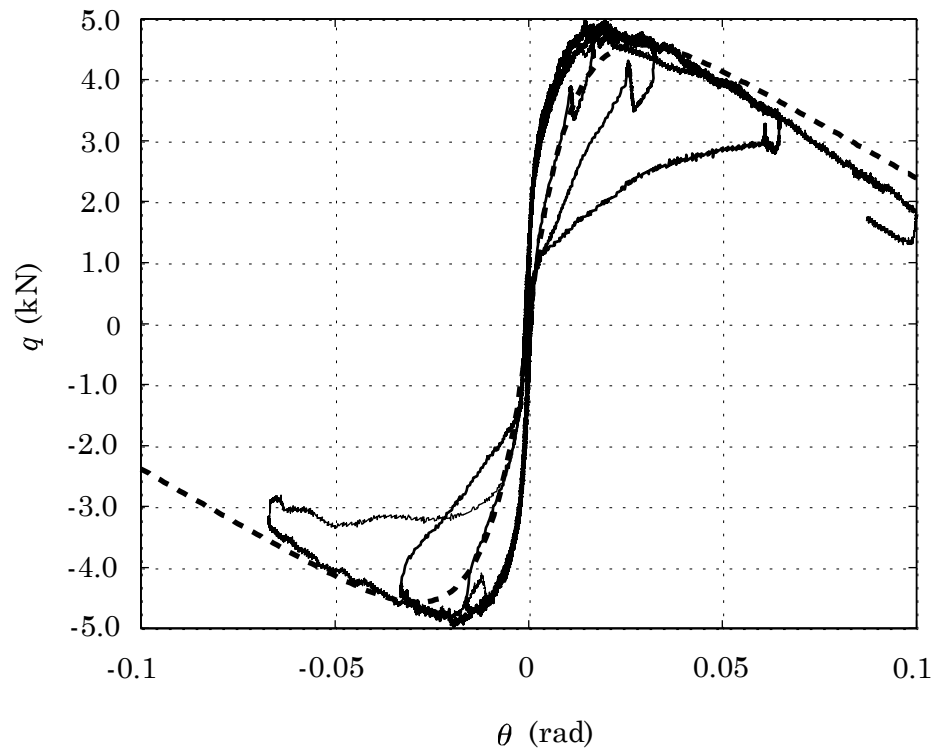


図 3. 23 水平方向復元力特性の予測値と実験結果の比較

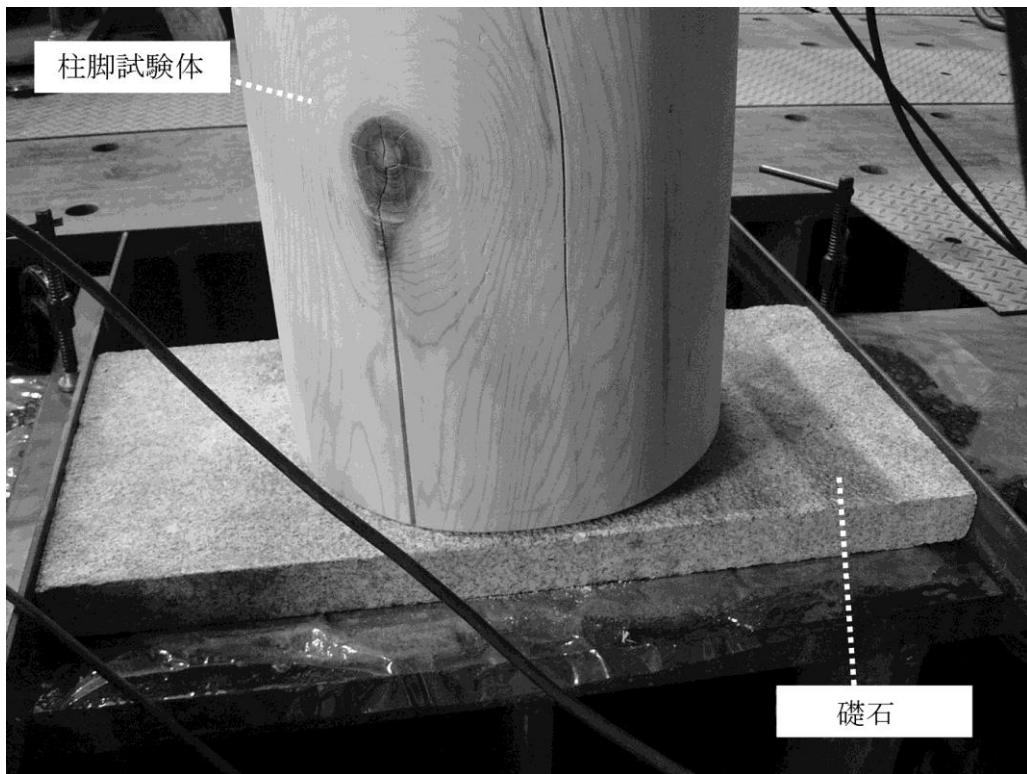
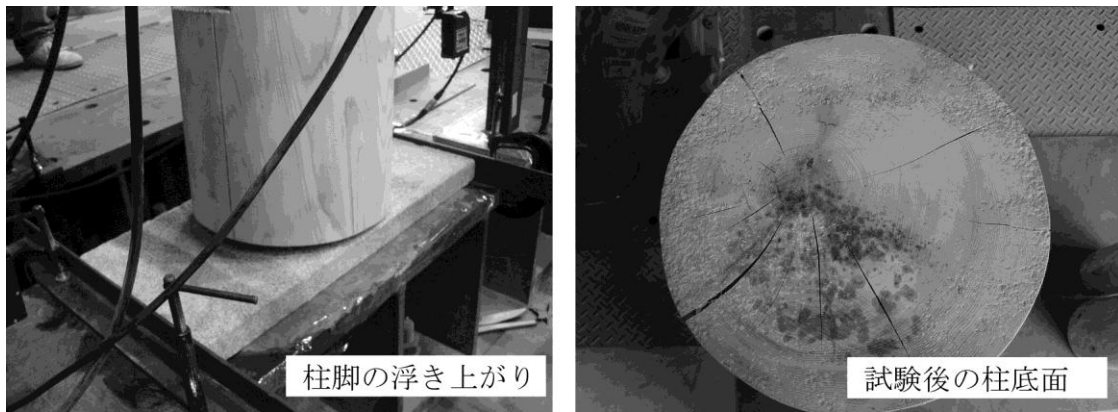


図 3. 24 強制回転角時の柱脚部分と礎石



(a)

(b)

図 3. 25 (a)強制回転角時の柱脚部分と礎石(b)試験後の柱脚底面の状態

### 3.6 結論

本章で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 縮小試験体のめり込み実験から、伝統木造柱脚におけるモーメント－回転角関係を予測する手法を提案した。
- 2) 本手法では、まず、角度を固定した柱脚要素を礎石にめり込ませるめり込み実験を複数の固定角度で実施する。これらの結果から、礎石から柱脚要素に作用する鉛直方向の等価集中反力の作用位置を、回転角と軸力の関数としてめり込み構成則を得る。めり込み構成則が得られれば、これに等価集中反力の大きさと作用位置の積として柱脚に作用するモーメントの値が得られる。
- 3) 円柱と角柱の 1/3 スケールのヒノキ縮小試験体に対してめり込み実験を実施し、無次元化しためり込み構成則を得た。本構成則は平均軸方向応力（＝軸力／断面積）が  $0\sim 5(\text{N}/\text{mm}^2)$  の範囲であり、応力分布相似の仮定が成り立つ範囲では、寸法に依存せず適用が可能である。
- 4) 実寸規模の円柱の実大柱脚試験体に対して一定鉛直荷重と試験体頂部に繰返し水平強制変位を与える静的載荷実験を実施し、提案手法により 1/3 スケールの試験体から得られためり込み構成則から実大実験結果を精度良く予測できることを例証した。



## 注

- 1) 鉛直ジャッキの荷重値  $p_1$  と回転角  $\theta$  の関係及び鉛直反力  $n$  と回転角  $\theta$  の関係を図 3.26 に示す。履歴曲線の戻りの場合はジャッキの荷重制御が不安定になり、回転角が 0 となるように動的に変位すると、鉛直ジャッキのコントロールが追いつかず、柱試験体に作用する鉛直荷重が指定値より小さくなっている。

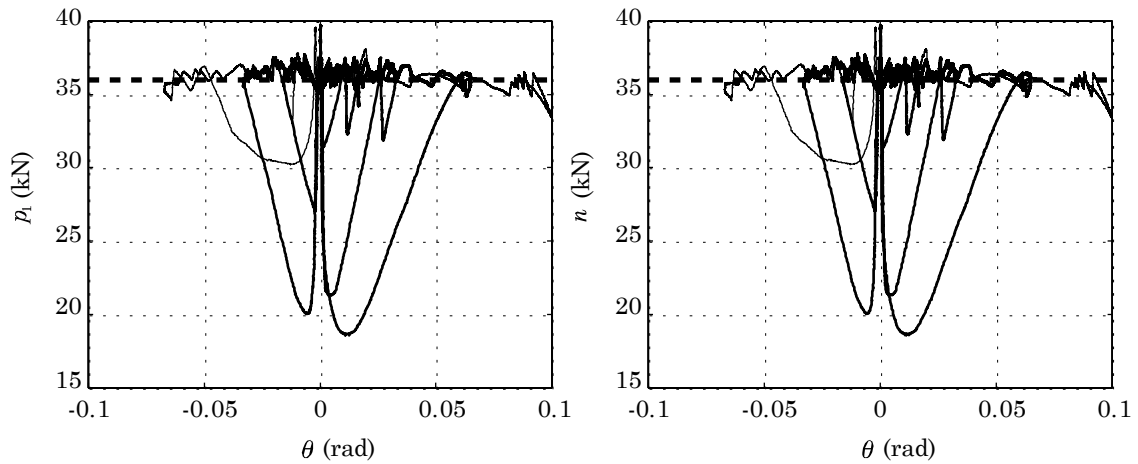


図 3.26 実験の比較, (a)  $p_1 - \theta$  関係, (b)  $n - \theta$  関係

## 参考文献

- 1) 坂静雄：寺社骨組の力学的研究（第1部柱の安定復元力），日本建築学会論文集，第21号，pp. 252-258，1941
- 2) 河合直人：古代木造建築の柱傾斜復元力に関する模型実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 91-92，1991
- 3) 河合直人：古代木造建築の柱傾斜復元力と耐力壁の効果に関する実大実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1021-1022，1993
- 4) N. Kawai: Column rocking resistance in Japanese traditional timber buildings, *Proceedings of the International Wood Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 183-190, 1996
- 5) 中尾好明，丹羽博亨：古代木造建物における柱，頭貫，肘木などからなる部分構造例の縮尺模型実験・解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1019-1020，1993
- 6) 林知行，軽部正彦，原田正樹，高橋義男，木村勉：古代伝統木造架構の実大水平加力実験，その1：概要と斗組架構実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 C1，pp. 267-268，1998
- 7) 軽部正彦，林知行，原田正樹，高橋義男，木村勉：古代伝統木造架構の実大水平加力実験，その2：実大架構実験と履歴性状，日本建築学会大会学術講演梗概集 C1，pp. 269-270，1998
- 8) 中原洸二，長瀬正：伝統的木造架構における柱傾斜復元力モデルの地震応答解析に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1，pp.141-142，2000
- 9) 佐分利和宏，長瀬正：伝統的木造架構における柱傾斜復元力に関する構造解析，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1，pp.143-144，2000
- 10) 鈴木祥之，後藤正美，大下達哉，前野将輝：伝統木造軸組の柱傾斜復元力特性に関する実大静的・動的実験，第11回日本地震工学シンポジウム，pp. 1361-1366，2002
- 11) 大下達哉，前野将輝，後藤正美，鈴木祥之：伝統木造軸組の実大振動実験（その21）静的・動的実験による柱傾斜復元力特性，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1，pp.243-244，2002

- 12) 西塔純人, 前野将輝, 清水秀丸, 鈴木祥之: 寺院建築における伝統木造軸組架構の耐震性能評価(その3) 柱傾斜復元力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.19-20, 2004
- 13) 前田達彦, 長瀬正: 伝統的木造建築物の地震応答解析における傾斜復元力スケルトン近似モデルに関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.473-474, 2006
- 14) 前野将輝: 寺院建築物における伝統木造軸組の構造力学特性と耐震性能, 京都大学博士論文, 2007
- 15) 前野将輝, 西塔純人, 鈴木祥之: 伝統木造軸組の実大実験による柱に加わる力の釣合関係と柱傾斜復元力特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 615 号, pp. 153-160, 2007
- 16) 家倉優人, 上谷宏二, 荒木慶一, 吉田亘利: 伝統木造建築物の柱脚-礎石接触モデルに関する実験的及び解析的研究(その1) 実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.261-262, 2002
- 17) 上谷宏二, 荒木慶一, 吉田亘利, 家倉優人: 伝統木造建築物柱脚の接触モデルに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 582 号, pp. 117-122, 2004
- 18) 荒木慶一, 船津昌史, 李東潤, 吉田亘利, 上谷宏二: 仕口を考慮した木材要素めり込み試験からの伝統木造柱-貫半剛接合部のモデル化, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 論文番号 0165, pp. 766-769, 2006
- 19) 李東潤, 荒木慶一, 吉田亘利, 上谷宏二: 伝統的木造建築物の柱脚-礎石接触面に関するめり込み実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.108-109, 2006
- 20) 李東潤, 荒木慶一, 遠藤俊貴, 吉田亘利, 上谷宏二: 柱脚-礎石接触面のめり込み実験に基づく伝統木造柱脚復元力特性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 639, pp. 865-872, 2009.5

## 第4章. 柱脚－礎石接触面の摩擦性状に関する静的実験

### 4.1. 序

兵庫県南部地震以降，日本のみならず世界的に見ても大規模な地震が頻発しており，これらの地震において寺社を含む伝統木造建築が甚大な被害を受けた事例が少なからず報告されている。そのため，伝統木造建築の耐震性能を的確に評価し，必要に応じてその耐震性能を向上するための取り組みへの社会的な要請が高まっている<sup>1,2)</sup>。日本の伝統木造建築の地震応答を支配する主な要因として，大径柱の傾斜復元力，柱貫接合部におけるモーメント抵抗，礎石と柱脚の間の滑りなどがあげられる<sup>1,2)</sup>。

柱を単に礎石の上に置くだけの石場立ち工法は，日本の伝統木造の大きな特徴の一つである。限界耐力計算などを用いた簡便な設計法を用いて伝統木造建築を設計するには，ごく稀に発生する地震動においても柱脚と礎石の間に滑りが生じないようにする必要がある<sup>3)</sup>。そのため，礎石と柱脚の滑りを適切に評価することは重要な研究課題である。

伝統木造については，傾斜復元力や柱貫接合部の特性についてはこれまでに多くの研究が行われ，研究資料の蓄積が進んでいる。しかし，柱脚と礎石の間の滑りについては，著者らの知る限り上谷ら<sup>4)</sup>による静摩擦係数に関する予備的検討と，向坊ら<sup>5,6)</sup>による動摩擦係数に関する振動台実験の結果が報告されているのみであり，特に静摩擦係数に関する系統的な研究資料は見当たらない。なお，木質材料の摩擦係数に関する文献はいくつか存在するが，これらは木材加工に関連するものか，構造用合板や鋼材と木材の間の摩擦係数を調査しているものに限られている<sup>7,8)</sup>。

本章では，伝統木造柱脚と礎石の間の静摩擦実験の結果を報告する。本実験では，鈴木と前野ら<sup>9,10)</sup>の実大実験の1/3スケールのヒノキ柱を用いて，柱断面形状，柱回転角，載荷サイクル数などが静摩擦係数に及ぼす影響を検討する。また，伝統木造建築の耐震改修では柱脚が礎石から落下するのを防ぐため，コンクリートにより礎石を拡張する例が少なからず見受けられる<sup>1,2)</sup>。そのため本章では，ヒノキ柱脚と市販のコンクリートブロックの間の静摩擦係数についても，同様の実験を行い静摩擦係数についての検討を行った結果についても報告を行う。

## 4.2. 実験計画

### 4.2.1. 実験システム

実験システムの概要を図 4.1 と図 4.2 に示す。反力床の上に H 形鋼①を設置し、H 形鋼①の上に礎石と柱材 C1, C2, C3 を設置する。柱材は上部が H 形鋼②に固定されており、H 形鋼②を介してジャッキに接続される。H 形鋼②の上にこれに直行する方向に H 形鋼③を設置し、H 形鋼③の上にさらにコンクリートマスを設置する。このように載荷フレーム、コンクリートマス、柱材、礎石を配置することで、ジャッキの伸縮に伴い柱材と礎石の間に滑りが生じる。

図 4.3 に礎石と柱材の固定方法を示す。H 形鋼①の上に鋼製治具 A をボルトで固定し、その上にローラーを介して鋼製治具 B を設置する。鋼製治具 B の水平方向の移動は、鋼製治具 A に固定されたボルトを締めることで水平ロードセル(LC)を両面から押し付け、約 5kN のプレストレスを与えて拘束する。鋼製治具 B の上に鉛直ロードセル(LC)を設置し、その上に鋼製治具 C を設置する。鋼製治具 B と鋼製治具 C の間の水平方向の相対変位を拘束するため、ボルトをシアキーとして用いる。鋼製治具 C 下面の削孔部に、治具 B に固定したボルトを挿入することで、鋼製治具 B と鋼製治具 C の間の水平方向の相対変位のみを拘束し、鉛直方向の相対変位は拘束しない設計となっている。礎石はボルトを用いて鋼製治具 C に完全固定する。柱材はボルトを使って上部の鋼製治具 D に固定されており、鋼製治具 D はさらに上部の H 形鋼②に固定される。柱材に角度を与える場合は、角度固定用楔を図 4.3 (b)のように挿入してから柱材をボルトで鋼製治具 D に固定する。

なお、本実験システムは礎石以下の部分と柱材以上の部分で完全に分離できる。礎石以下の部分は下から順に反力床に固定した。柱材以上の部分は別途作成した鋼製フレームの上で製作を行い、クレーンを用いて礎石の上に設置した。なお図 4.2 には示していないが、柱材より上部の部分の水平面内回転を拘束するために、ジャッキ載荷方向以外の水平変位を拘束する面外止めを設置している。

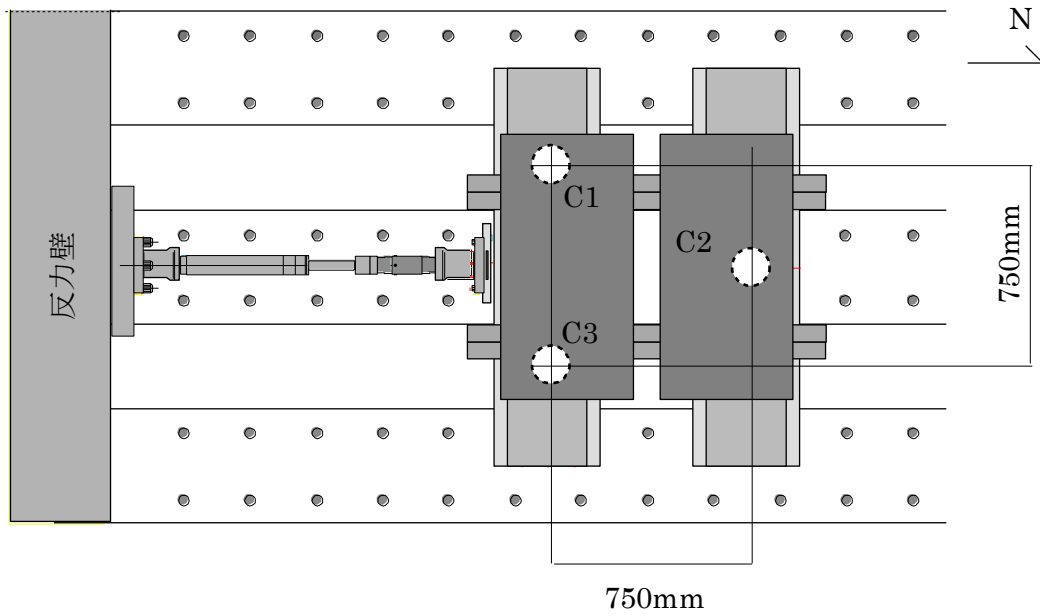


図 4.1 実験システム概要：平面

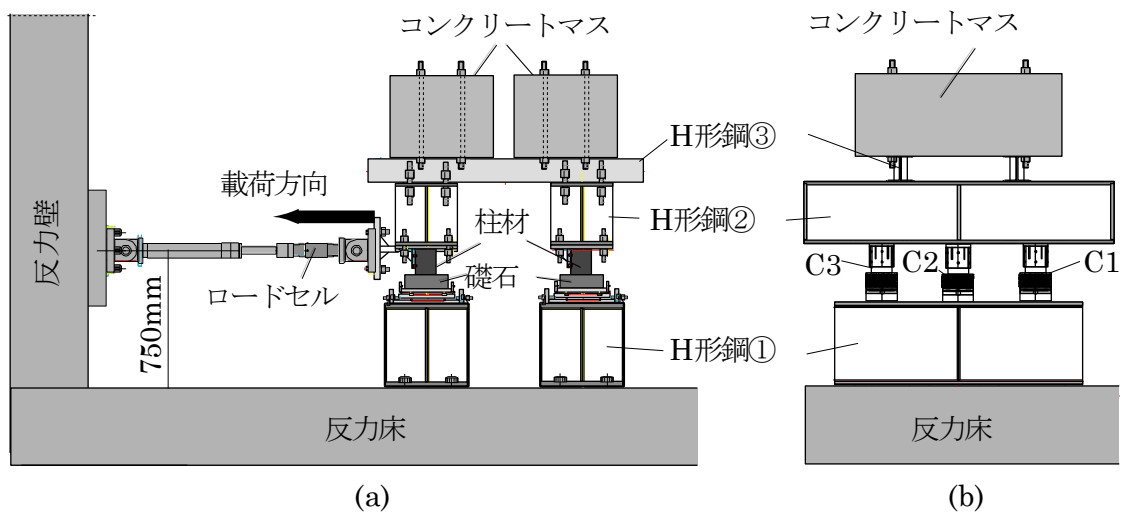


図 4.2 実験システム概要：(a)東立面，(b)北立面

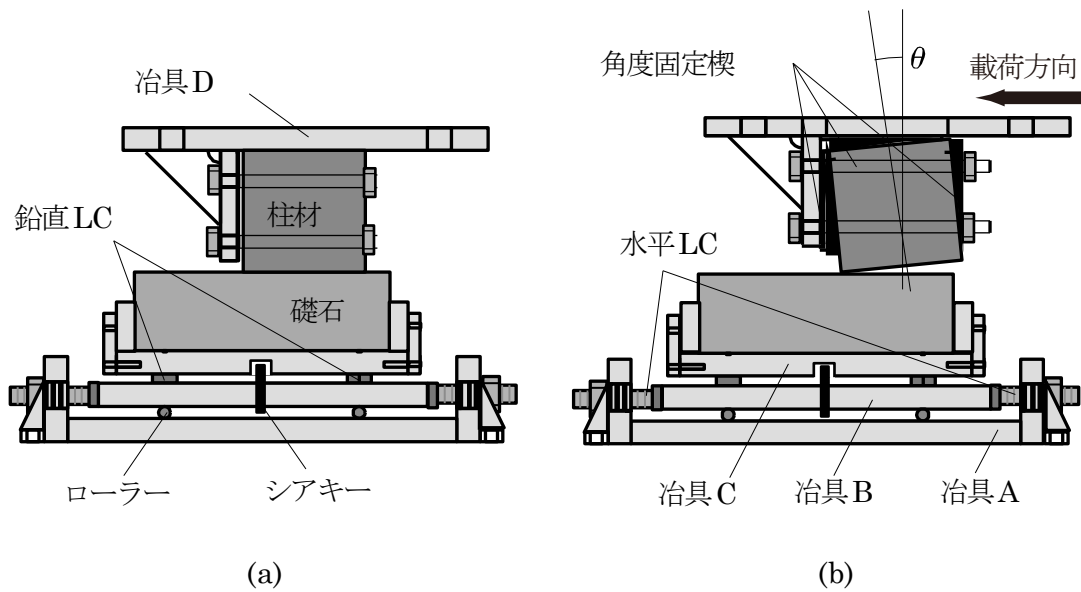


図 4.3 礎石と柱材の固定方法

#### 4.2.2. 試験体

試験体として高さが 120mm のヒノキ柱材を用いる。柱材は円形もしくは正方形の断面を持つ。円の直径と正方形の一辺の長さは共に 100mm である。柱材の側面は鉋をかけてあるが、礎石接触面は鋸で切断した後、特別な処理は施していない。礎石の寸法は 210x150x65mm であり、柱材との接触面にはびしゃん仕上げを施してある。コンクリートブロックは市販のものを用いた。コンクリートブロックの寸法は 210x100x60mm であり、表面に特別な処理は施していない。円柱の場合はその形状から载荷方向に対する依存性は十分に小さいと仮定できるが、角柱の場合はこのような仮定が成立するかは明確でない。そこで角柱については、図 4.4 に示すように 1 辺で接触する場合と、これと 45 度回転した角で接触する場合についても実験を行う。以下では、円柱の場合を Case A、角柱の 1 辺で接する場合を Case B、角柱の角で接する場合を Case C と呼ぶ。また、Case A から Case C までは各断面形状の柱材とびしゃん仕上げの礎石の間の摩擦を対象としたのに対し、円柱の柱材とコンクリートブロックの間の摩擦を対象とする場合を Case D と呼ぶ。

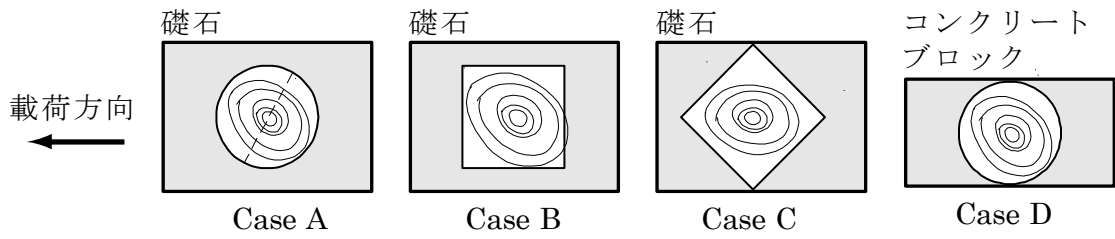


図 4.4 碓石及びコンクリートブロックと柱材の配置

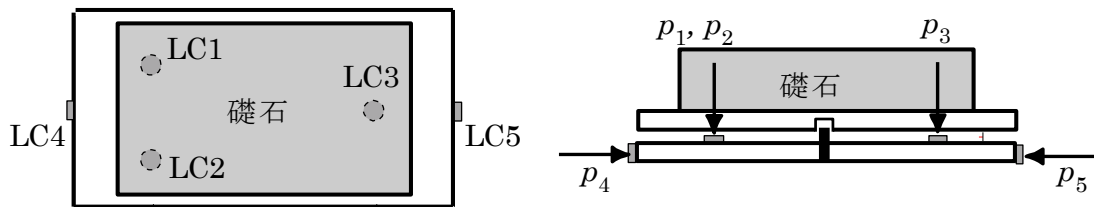


図 4.5 荷重の計測方法

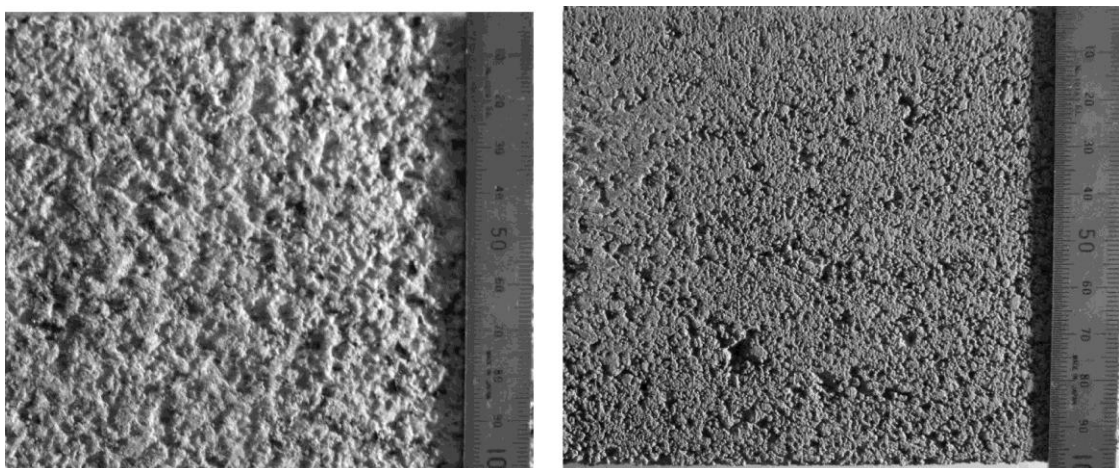


図 4.6 (a)碓石表面, (a)コンクリートブロック表面



#### 4.2.3. 載荷方法

柱材より上部の H 形鋼とコンクリートマスにより，ジャッキで強制変位を与える前の基準位置において，柱材 C1 と C3 に 4kN，C2 に 5.5kN，合計  $N=13.5\text{kN}$  の鉛直荷重を作用させる。この時，C1 と C3 では平均垂直応力が円柱  $0.51\text{N/mm}^2$ ，角柱  $0.40\text{N/mm}^2$ ，C2 では円柱  $0.70\text{N/mm}^2$ ，角柱  $0.55\text{N/mm}^2$  となる。H 形鋼①を介して礎石以下の部分を反力床に固定し，H 形鋼②を介して柱材に接続したジャッキを縮めることで，礎石と柱材の間に図 4.3 (b)に示す載荷方向の滑りを与える。なお，通常，地震時には柱が傾いている方向にのみ滑りが生じると考えられるため，角度固定楔を用いて柱材に角度を与える場合，ジャッキを縮める方向に柱を傾斜させる。柱の傾斜角を  $\theta$  とし， $\theta=0, 1/60, 1/30, 1/10$  の四通りの場合について実験を行う。ロックン<sup>注1)</sup>が生じない範囲で，20～30mm 程度の滑り量为目标に，ジャッキの制御を手動で行った。手動制御のために載荷速度の正確な制御は行えないが，準静的な載荷速度となるように配慮した。本実験では2回の繰返し載荷を行うが，2回目の載荷の前には柱材より上部をクレーンで吊り上げて1度目の載荷の初期位置に戻し，その後に2度目の載荷を行う。これは，クレーンで吊り上げることなくジャッキを伸ばして初期位置に戻すと，柱材底面に繊維方向の割れが生じるが，地震時にこのような状態は生じないと考えられるためである。

#### 4.2.4. 計測方法

柱材と礎石面の接触部に作用する荷重は，柱材と礎石の各ペアについて，図 4.5 に示す LC1～LC5 の 5 個のロードセルを用いて計測する。LC1～LC5 の 5 個のロードセルで計測される値を，それぞれ順に  $p_1\sim p_5$  とし，圧縮をこれらの正の方向とすると，接触面における鉛直力  $n$  とせん断力  $q$  は次式より得られる。

$$n = p_1 + p_2 + p_3, \quad q = p_4 - p_5 \quad (4.1)$$

これらとは別に図 4.2 (b)に示すようにジャッキに接続したロードセルを用いて水平荷重  $Q$  を計測する。C1, C2, C3 のそれぞれの柱についての  $n$  と  $q$  の計測量を下添え字の 1, 2, 3 を用いて表すとすると，釣合式より鉛直荷重  $N$  と水平荷重  $Q$  は次式のよ

$$N = n_1 + n_2 + n_3, \quad Q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (4.2)$$

なお、本実験では  $N$  の値としては接触面より上部をクレーンで吊り上げた際に別途ロードセルで計測した値を用い、 $n$  の値としては LC1～LC3 のロードセルで計測した値を用いる。礎石と柱材の間の滑り量  $u$  は、H 形鋼①に設置したレーザー変位計で計測を行う。本実験では以下の二種類のロッキング挙動により柱の浮き上がりが生じないように配慮を行った。一つ目のロッキング挙動は、柱脚－礎石接触面（滑り面）より上部のロッキングである。予備実験ではジャッキ設置位置の高さと接触面の高さの差が図 1 よりも大きく、滑りより先に接触面上部のロッキングが生じ、C2 の柱が浮き上がる事例が観察された。そのため可能な範囲でジャッキ設置位置を下げ図 4.2 の配置とした。なお、この種のロッキングを避けるためには、ジャッキ設置位置の高さと接触面の高さを一致させる必要がある。二つ目のロッキング挙動は、図 4.3 の治具 C と礎石のロッキングである。このロッキングが生じると、LC3 のロードセルで浮き上がりが生じる。本実験では計測装置の制約から、治具 C と礎石を一つの自由体とみなしたモーメントの釣合式より LC3 で浮き上がりが生じない柱脚と礎石の接触位置の範囲を求め、接触位置の移動がこの範囲に収まるように载荷を行った。この問題を本質的に解決するには、シアキーのボルトを治具 C にも固定し、このボルトに作用する引張軸力を計測する必要がある。

表 4.1 試験計画の詳細

Case	回転角 $\theta$	回数	断面積 $mm^2$	高さ $mm$
A	0	2	$2\pi \times 50$	126
	1/60	2	$2\pi \times 50$	114
	1/30	2	$2\pi \times 50$	120
	1/10	2	$2\pi \times 50$	121.4
B	0	2	$50 \times 50$	126
	1/60	2	$50 \times 50$	114
	1/30	2	$50 \times 50$	120
	1/10	2	$50 \times 50$	121.4
C	0	2	$50 \times 50$	126
	1/60	2	$50 \times 50$	114
	1/30	2	$50 \times 50$	120
	1/10	2	$50 \times 50$	121.4
D	0	2	$2\pi \times 50$	126
	1/60	2	$2\pi \times 50$	114
	1/30	2	$2\pi \times 50$	120
	1/10	2	$2\pi \times 50$	121.4

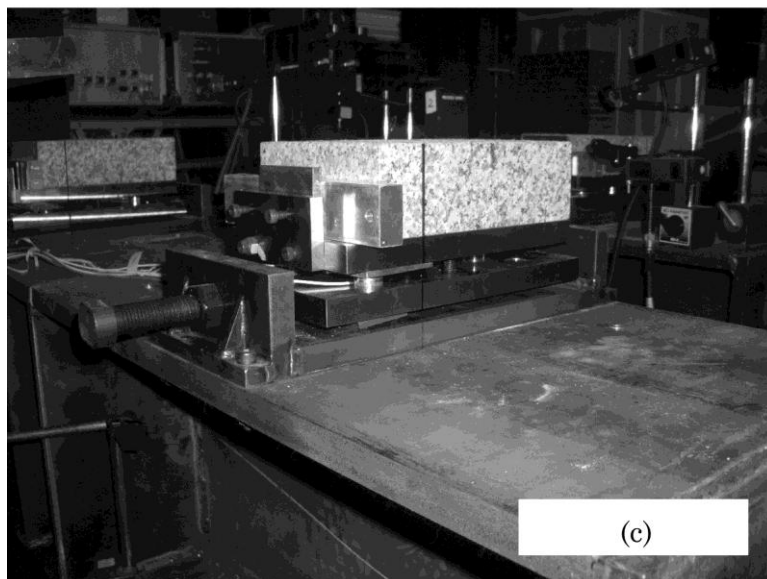
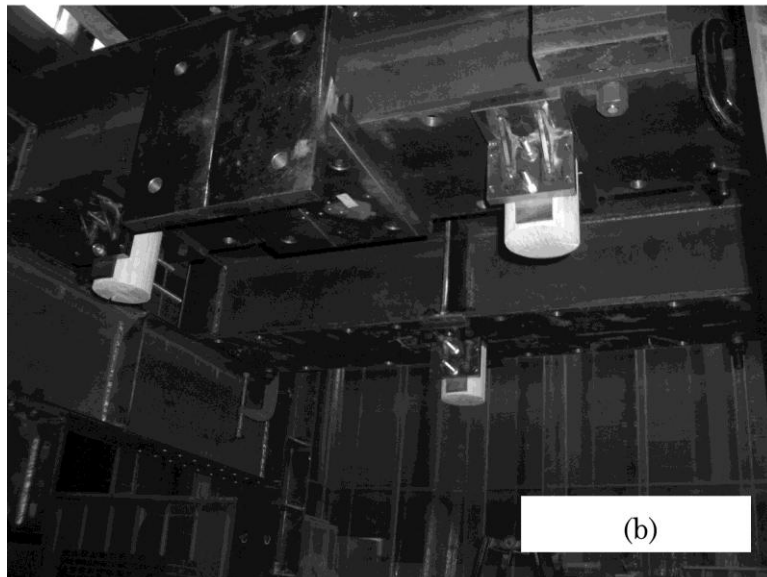
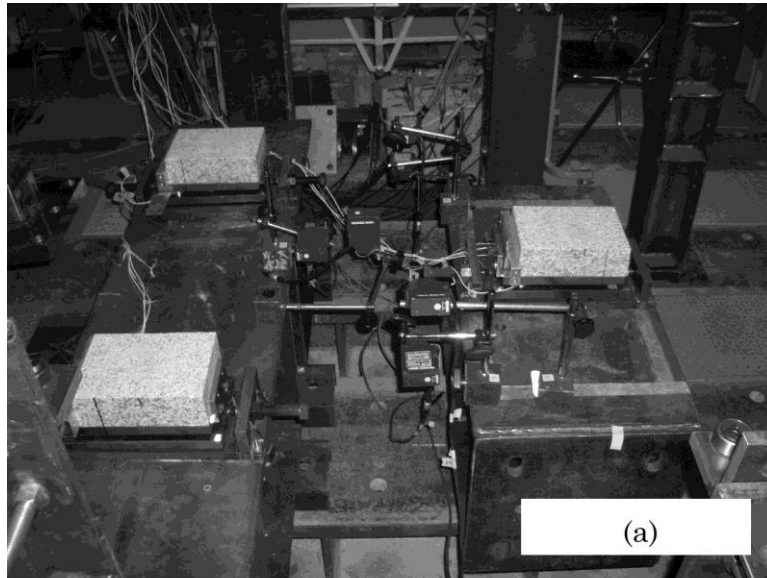


図 4. 7(a)礎石の載荷装置, (b)柱の載荷装置, (c)ロードセルの装置

### 4.3. 実験結果

図 4.9 から図 4.16 に、各 Case における摩擦係数  $\mu$  と滑り量  $u$  との関係を示す。

図 4.9 において、第 1 行は  $\theta=0$ 、第 2 行は  $\theta=1/60$ 、第 3 行は  $\theta=1/30$ 、第 4 行は  $\theta=1/10$  の場合の結果を示し、第 1 列から第 3 列はそれぞれ C1 から C3 の柱材の結果を、第 4 列は全体の結果を示す。各グラフにおいて、細線は第 1 回目の載荷時の結果を表し、太線は第 2 回目の結果を表す。図 4.10 から図 4.16 におけるグラフの配置及び太線と細線の表示は図 4.9 と同様である。また、図 4.17 から図 4.20 に全体の摩擦係数  $\mu_0 = Q/N$  の最大値  $\mu_{0\max}$  と回転角  $\theta$  の関係を○でプロットしたグラフを示す。左列は 1 回目、右列は 2 回目の載荷時の結果を示す。第 1 行～第 4 行は、それぞれ Case A～Case D の結果を示す。

**本実験からの主な観察事項及び考察は以下の通りである。**

全体の摩擦係数  $\mu_0$  の値は、おおよそ 0.6 から 0.9 の間で変動する。 $\mu_0$  は概ね滑り量  $u$  に対する単調減少関数である。1 回目の載荷では  $\mu_0$  の減少量が顕著な場合が多いが、2 回目の載荷では  $\mu_0$  の減少量はわずかである場合が多い。

回転角  $\theta$  が大きいほど、1 回目の載荷における最大摩擦係数の減少量大きい。これは、柱材と礎石の接触面積が小さいほど、1 回目の載荷において柱材の接触部が摩擦により削られやすいためと考えられる。参考として、摩擦をあたえていない角柱底面の表面と、 $\theta=1/10$  で礎石との摩擦を与えた後の角柱底面の写真を図 4.22 に示す。

Case A～Case C の結果より、柱断面の形状が静摩擦係数に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。

礎石を用いた場合の  $Q/N$  に対する 1 回目の載荷時の最大摩擦係数値  $\mu_{0\max}^{(1)}$  を定数、2 回目の載荷時の最大摩擦係数値  $\mu_{0\max}^{(2)}$  を  $\theta$  の線形関数とすると、以下の近次式が得られる。ここで  $\sigma^{(1)}$  と  $\sigma^{(2)}$  は標準偏差である。図 4.21 の第 1 行目から第 3 行目のグラフにおいて、平均を実線で、標準偏差を点線で表す。

$$\mu_{0\max}^{(1)} = 0.81, \sigma^{(1)} = 0.04, \mu_{0\max}^{(2)} = 0.77 - 1.23\theta, \sigma^{(2)} = 0.04 \quad (4.3)$$

コンクリートブロックを用いた場合は 1 回目の載荷の滑り開始時の摩擦係数が約 0.9 と高い値を持つのにに対し、2 回目の載荷では傾斜角度に依存せず摩擦係数が約 0.6 へと大きく低減した。これは、コンクリートブロックの表面は空隙が多く、木材のみならずコンクリートブロックの表面が削られることと、コンクリートブロック表面の空隙部に木屑がたまっただけに滑りやすくなったためと考えられる。

コンクリートブロックを用いた場合の $\mu_{0\max}^{(1)}$ と $\mu_{0\max}^{(2)}$ はどちらも定数で近似でき、次式で表せる。図 4.14 の第 4 行目のグラフにおいて、平均を実線で、標準偏差を点線で表す。

$$\mu_{0\max}^{(1)} = 0.88, \sigma^{(1)} = 0.03, \mu_{0\max}^{(2)} = 0.61, \sigma^{(2)} = 0.01 \quad (4.4)$$

向坊ら<sup>4,5)</sup>は振動台実験から同定された動摩擦係数が 0.3~0.5 の間で分布する事を報告しており、これは本実験の静摩擦係数と比較してかなり低い。文献<sup>7)</sup>では動摩擦係数が静摩擦係数の 0.6~0.9 倍であった事が報告されているため、本実験結果と向坊ら<sup>4,5)</sup>の結果の間に大きな矛盾は無いと考えられるが、動摩擦係数との対応について、さらなる検討が必要である。

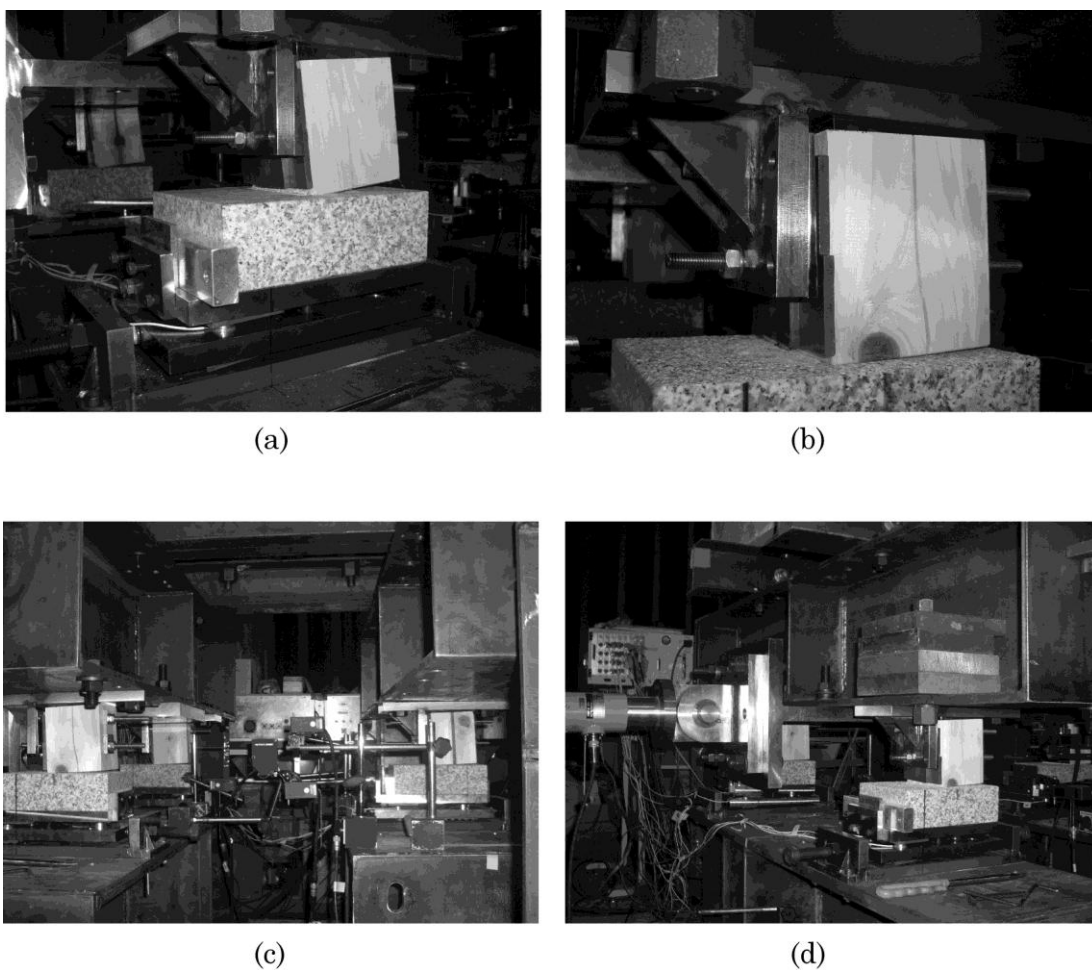


図 4.8, 柱脚と礎石間の接触部分(詳細写真)

表 4. 2 処女載荷時の各摩擦係数の値及び平均値

Case	No	固定角度における摩擦係数 $\mu$			
		$\theta=0$	$\theta=1/60$	$\theta=1/30$	$\theta=1/10$
A	c1,c2,c3	0.88,0.89,0.89	0.79,0.79,0.84	0.84,0.71,0.91	0.84,0.78,0.8
	C	0.84	0.78	0.78	0.78
B	c1,c2,c3	0.93,0.93,0.92	0.77,0.87,0.80	0.70,0.69,0.69	0.61,0.65,0.74
	C	0.87	0.82	0.70	0.69
C	c1,c2,c3	0.81,0.76,0.70	0.79,0.81,0.87	0.78,0.61,0.86	0.74,0.84,0.76
	C	0.74	0.84	0.76	0.81

表 4. 3 2 回目載荷時の各摩擦係数の値及び平均値

Case	No	固定角度における摩擦係数 $\mu$			
		$\theta=0$	$\theta=1/60$	$\theta=1/30$	$\theta=1/10$
A	c1,c2,c3	0.70,0.86,0.87	0.77,0.87,0.80	0.86,0.74,0.93	0.87,0.87,0.82
	C	0.87	0.87	0.82	0.81
B	c1,c2,c3	0.87,0.85,0.86	0.76,0.87,0.81	0.70,0.69,0.69	0.61,0.56,0.59
	C	0.84	0.87	0.70	0.66
C	c1,c2,c3	0.77,0.76,0.66	0.79,0.65,0.77	0.70,0.56,0.70	0.78,0.74,0.70
	C	0.78	0.74	0.70	0.63

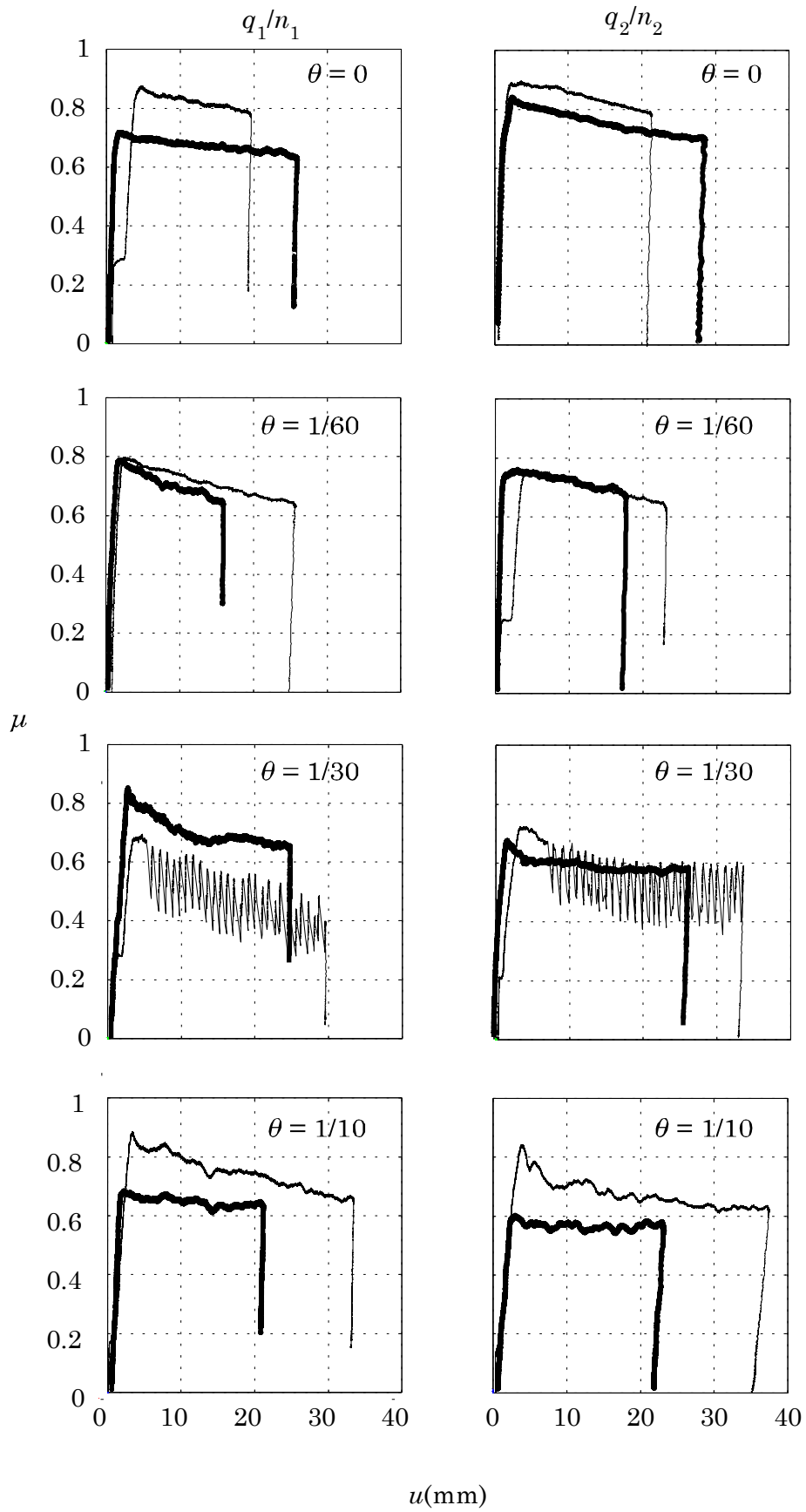


図 4.9 Case A(円柱・礎石)の摩擦係数



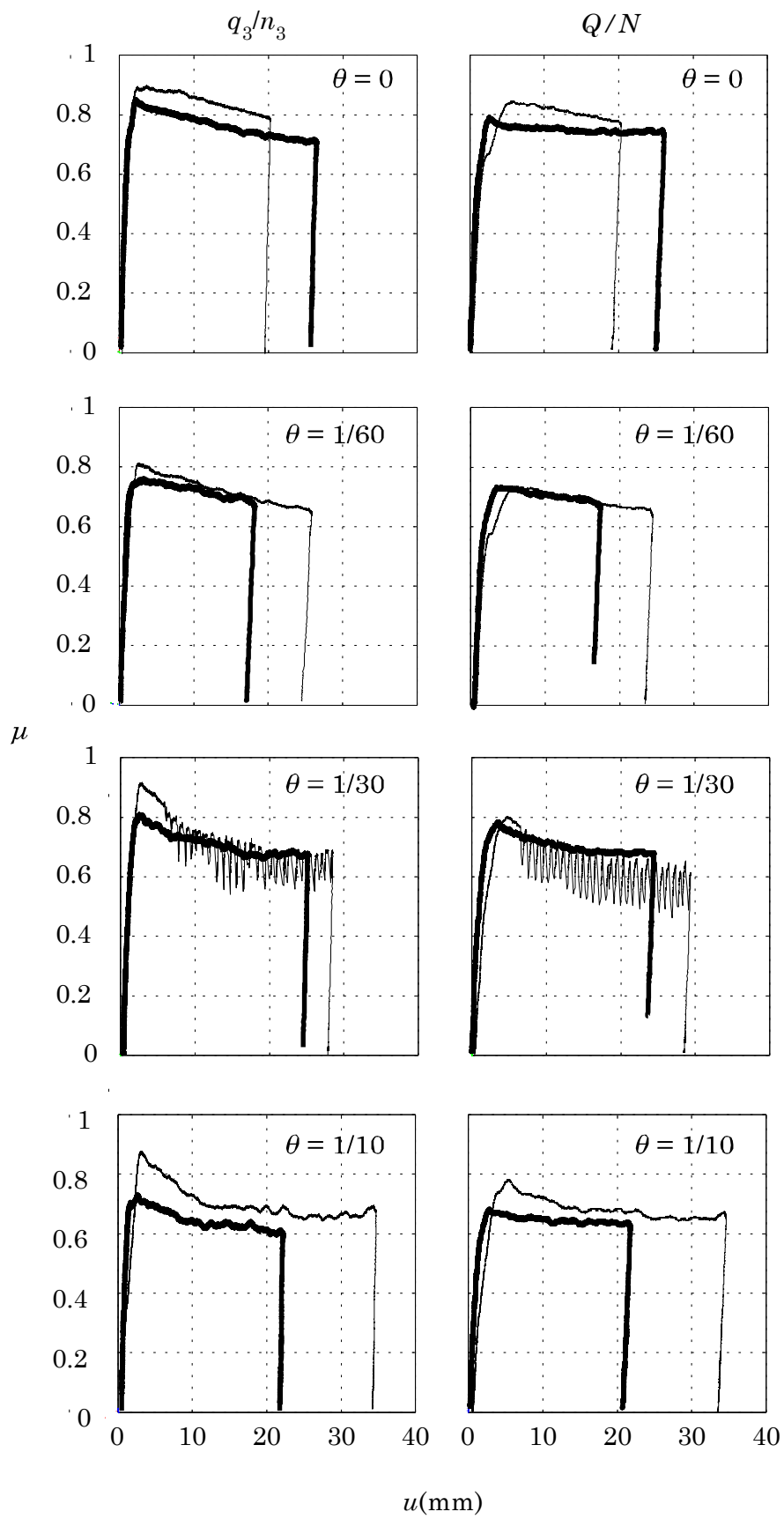


図 4. 10 Case A(円柱・礎石)の摩擦係数

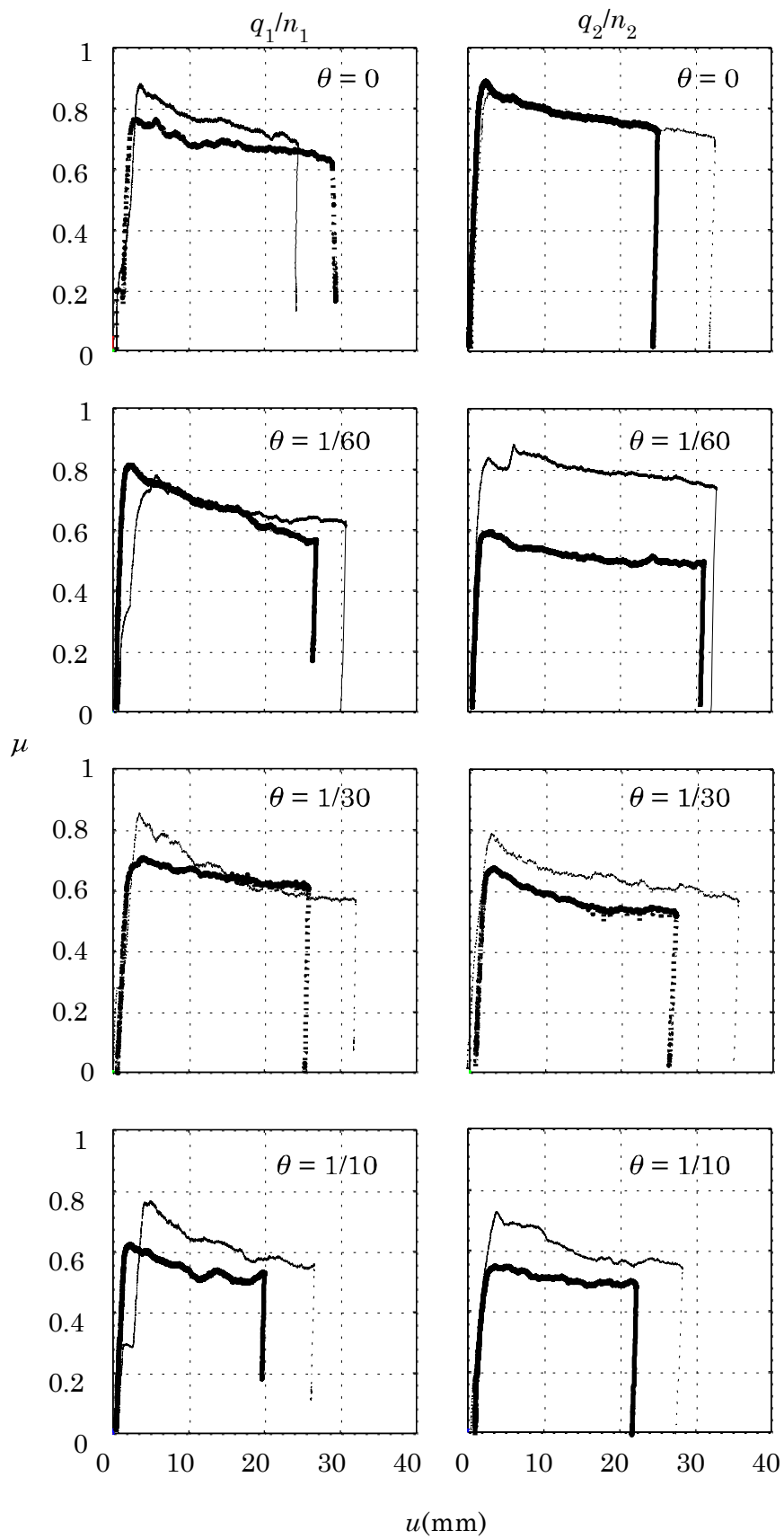


図 4. 11 Case B(角柱辺接触・礎石)の摩擦係数

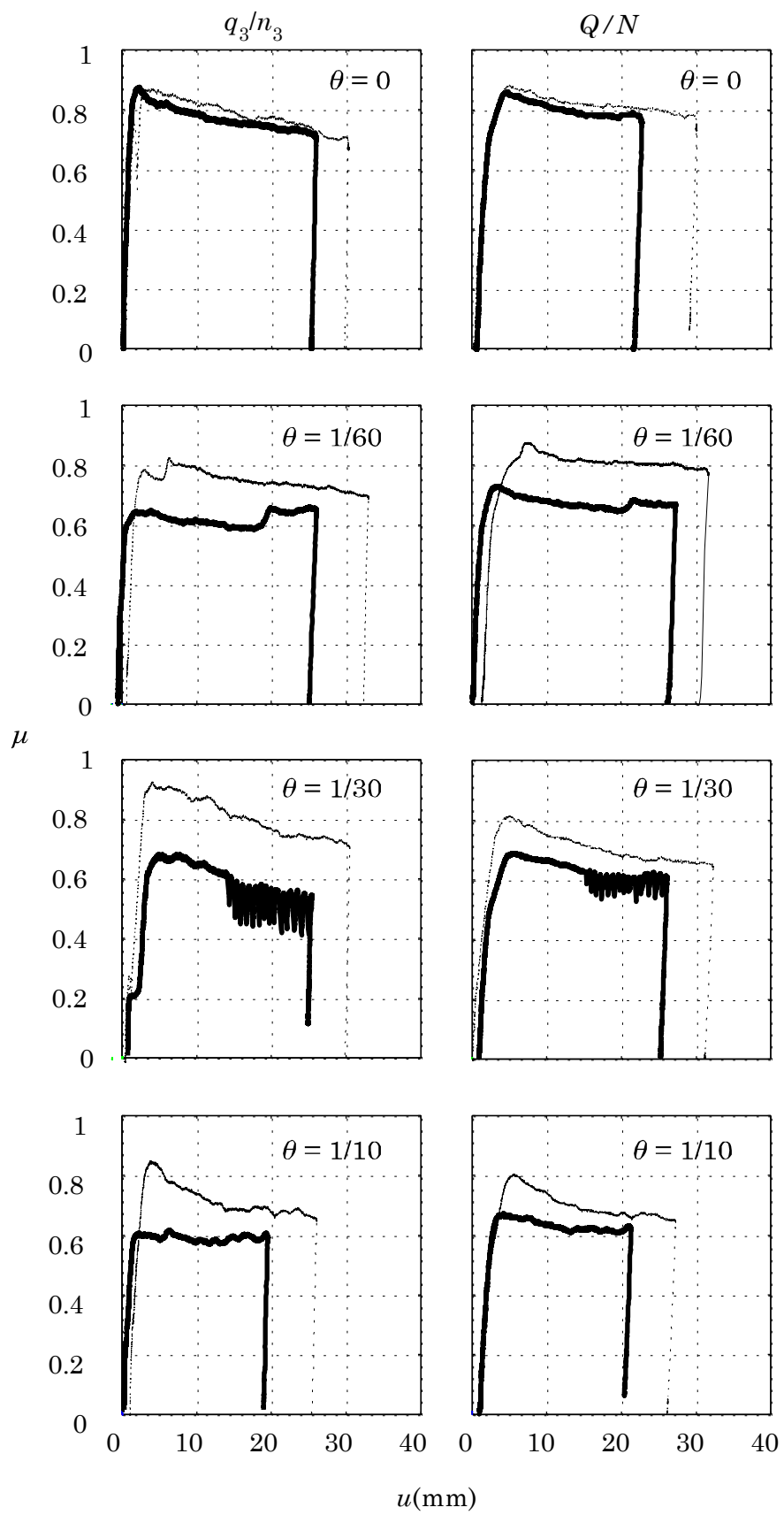


図 4. 12 Case B(角柱辺接触・礎石)の摩擦係数

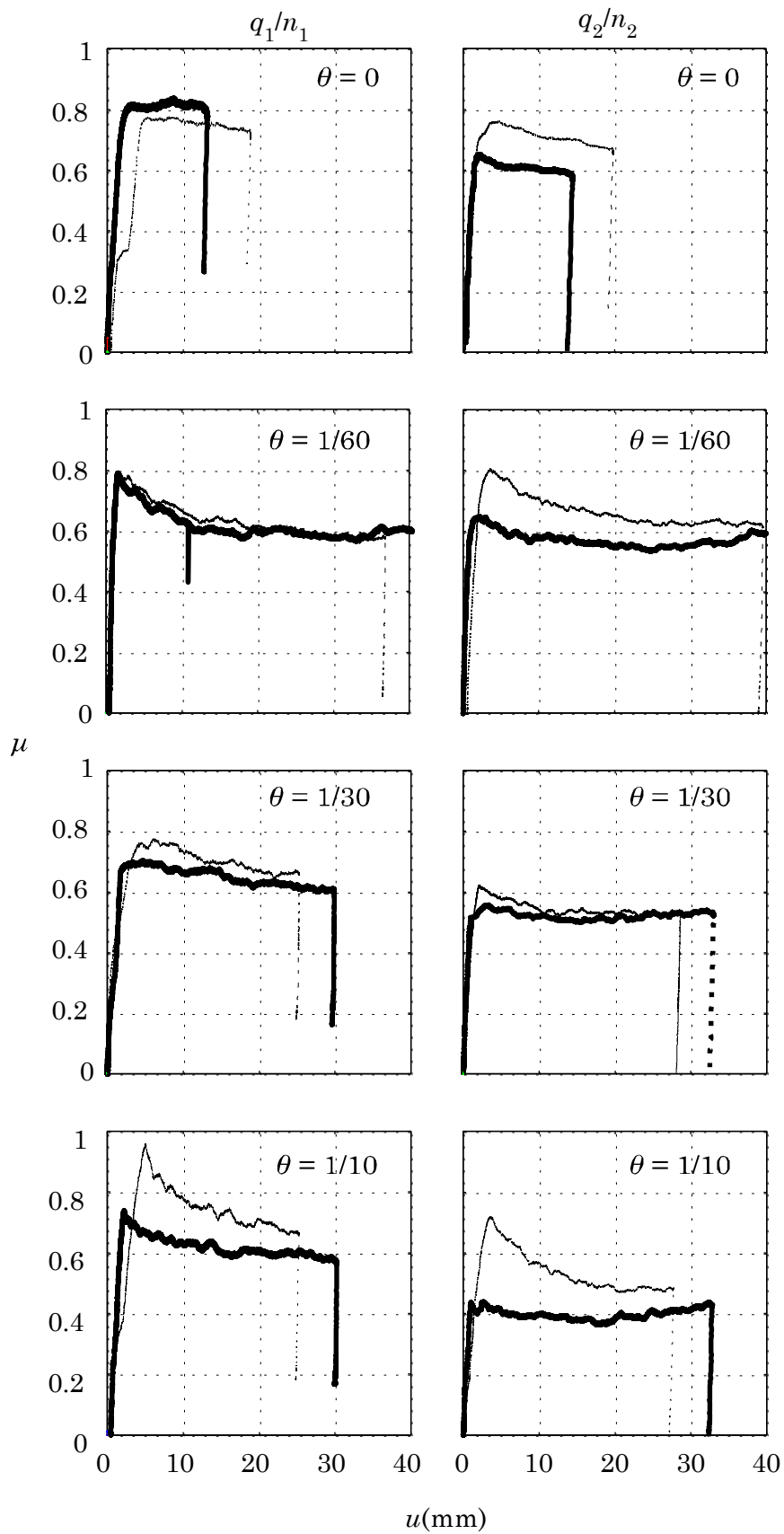


図 4. 13 Case C(角柱角接触・礎石)の摩擦係数

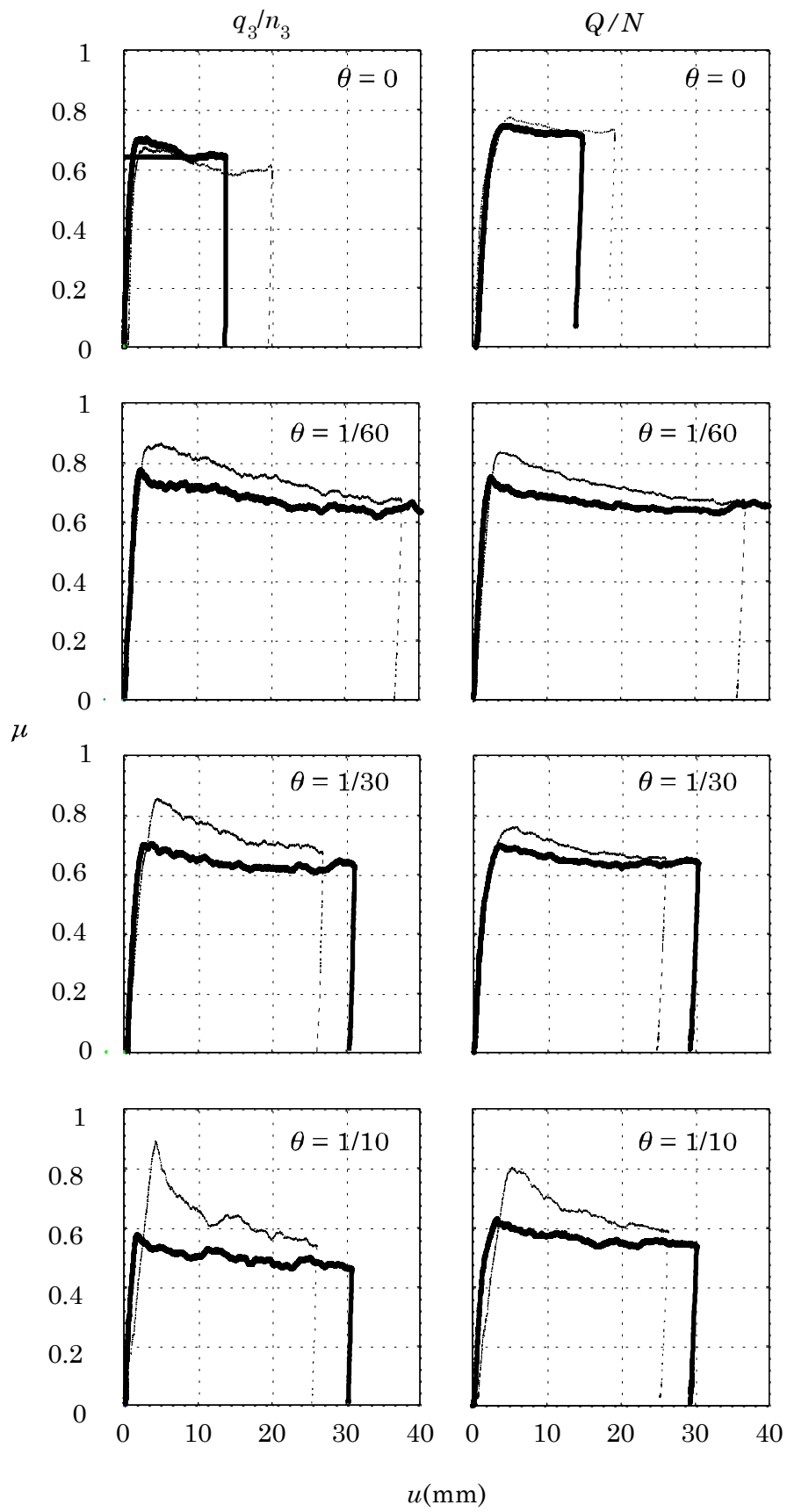


図 4. 14 Case C(角柱角接触・礎石)の摩擦係数

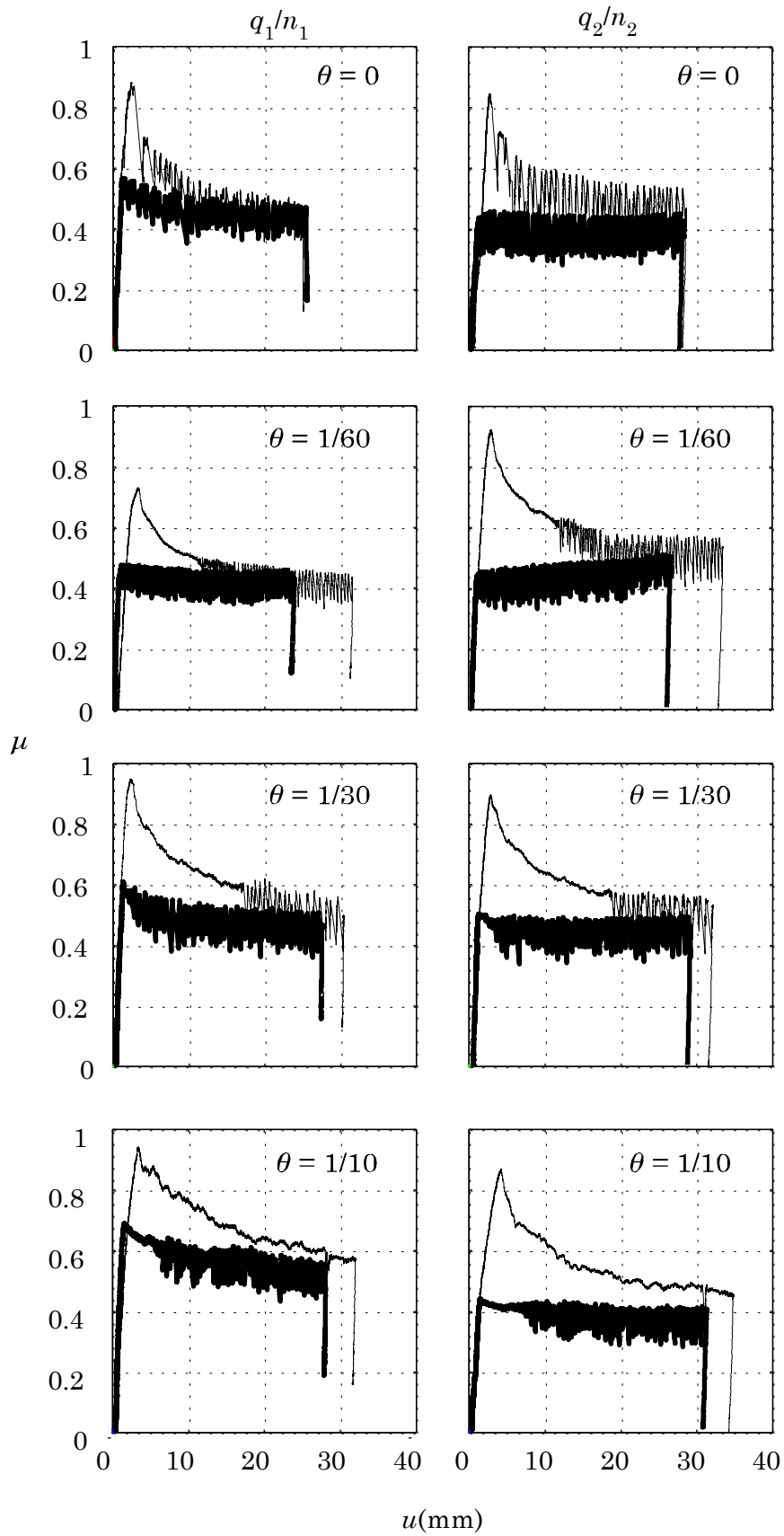


図 4. 15 Case D(円柱・コンクリートブロック)の摩擦係数

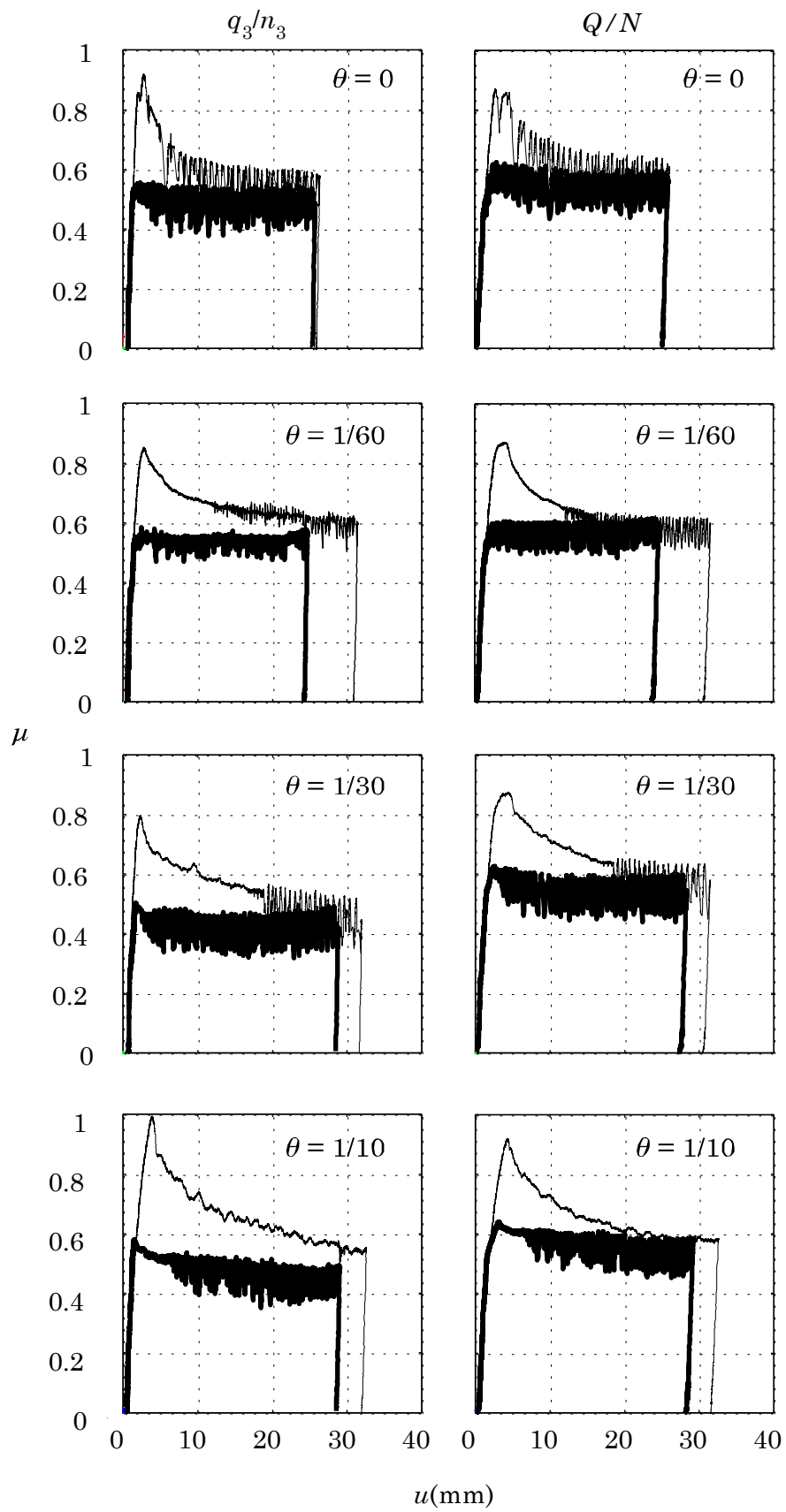


図 4. 16 Case D(円柱・コンクリートブロック)の摩擦係数

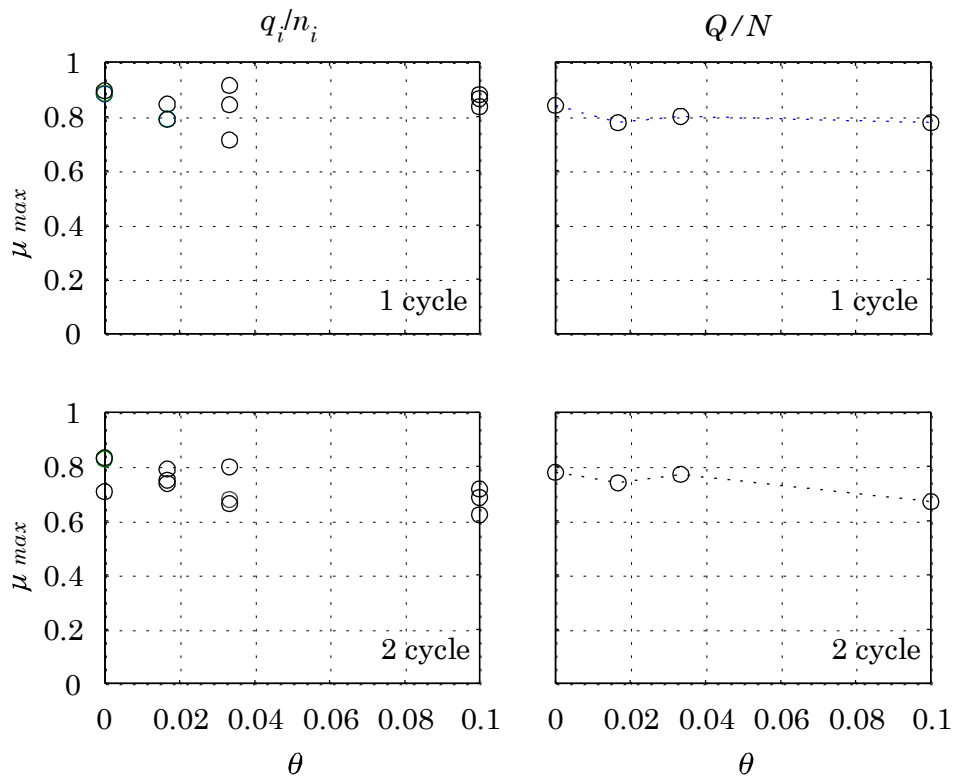


図 4.17 Case A(円柱・礎石)による最大摩擦係数

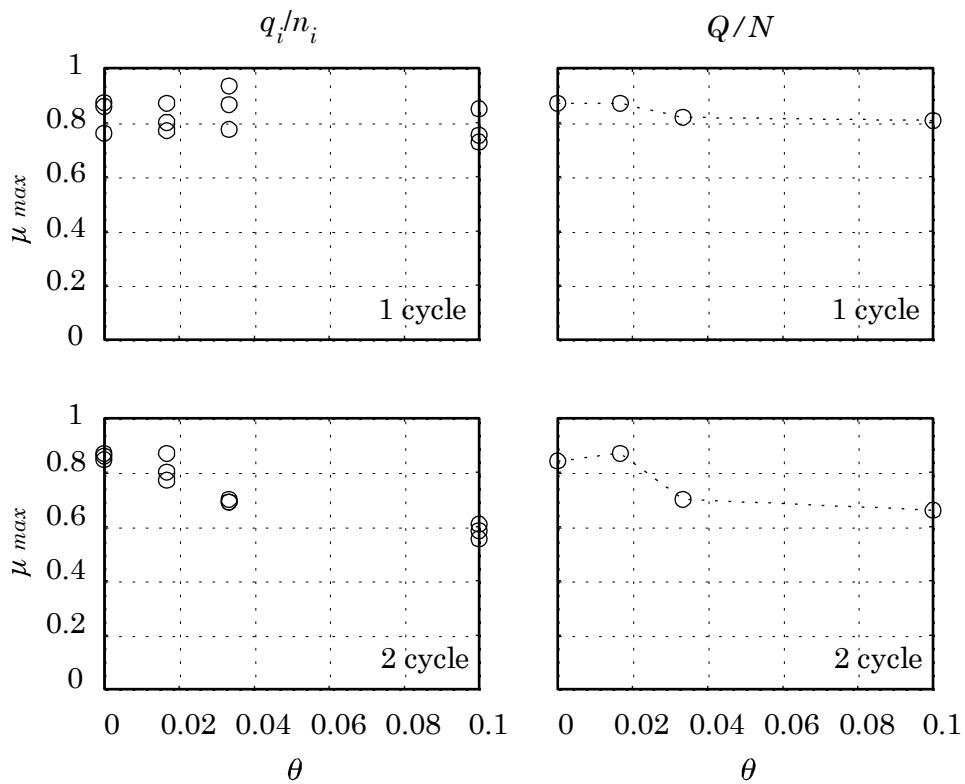


図 4.18 Case B(角柱辺接触・礎石)による最大摩擦係数



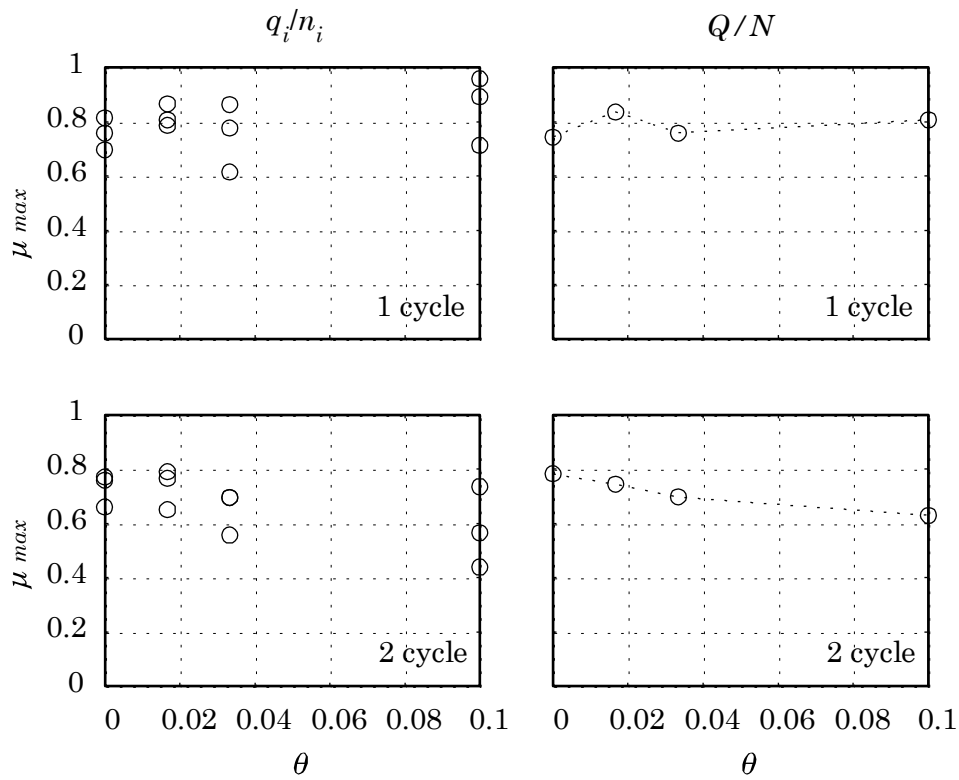


図 4.19 Case C(角柱角接触・礎石) による最大摩擦係数

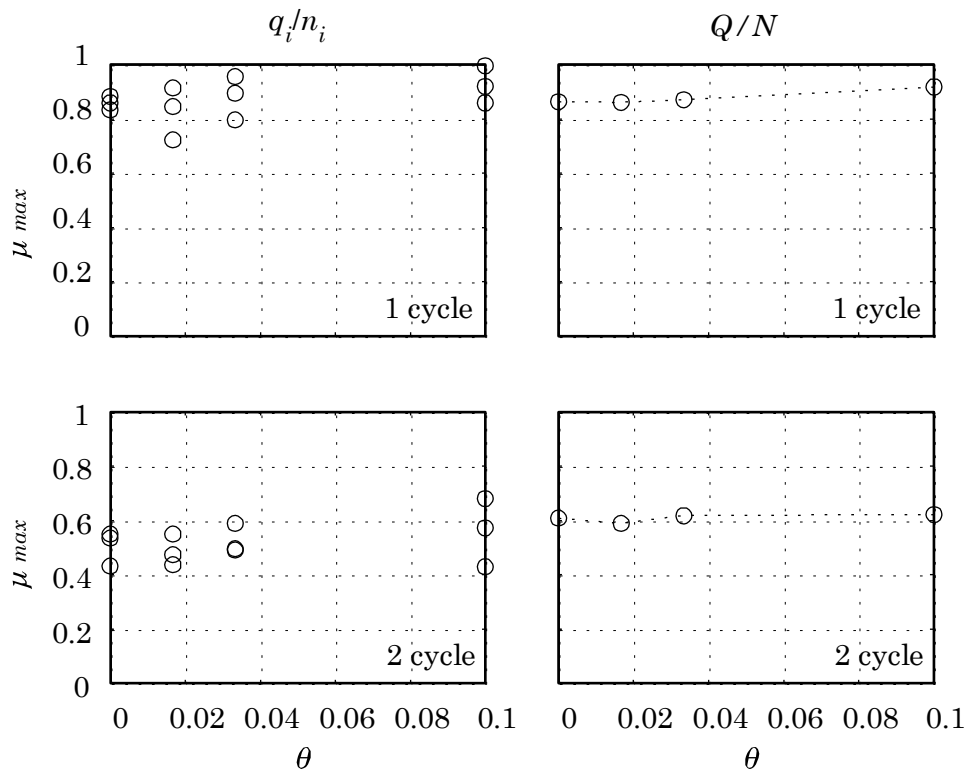


図 4.20 Case D(円柱・コンクリートブロック) による最大摩擦係数

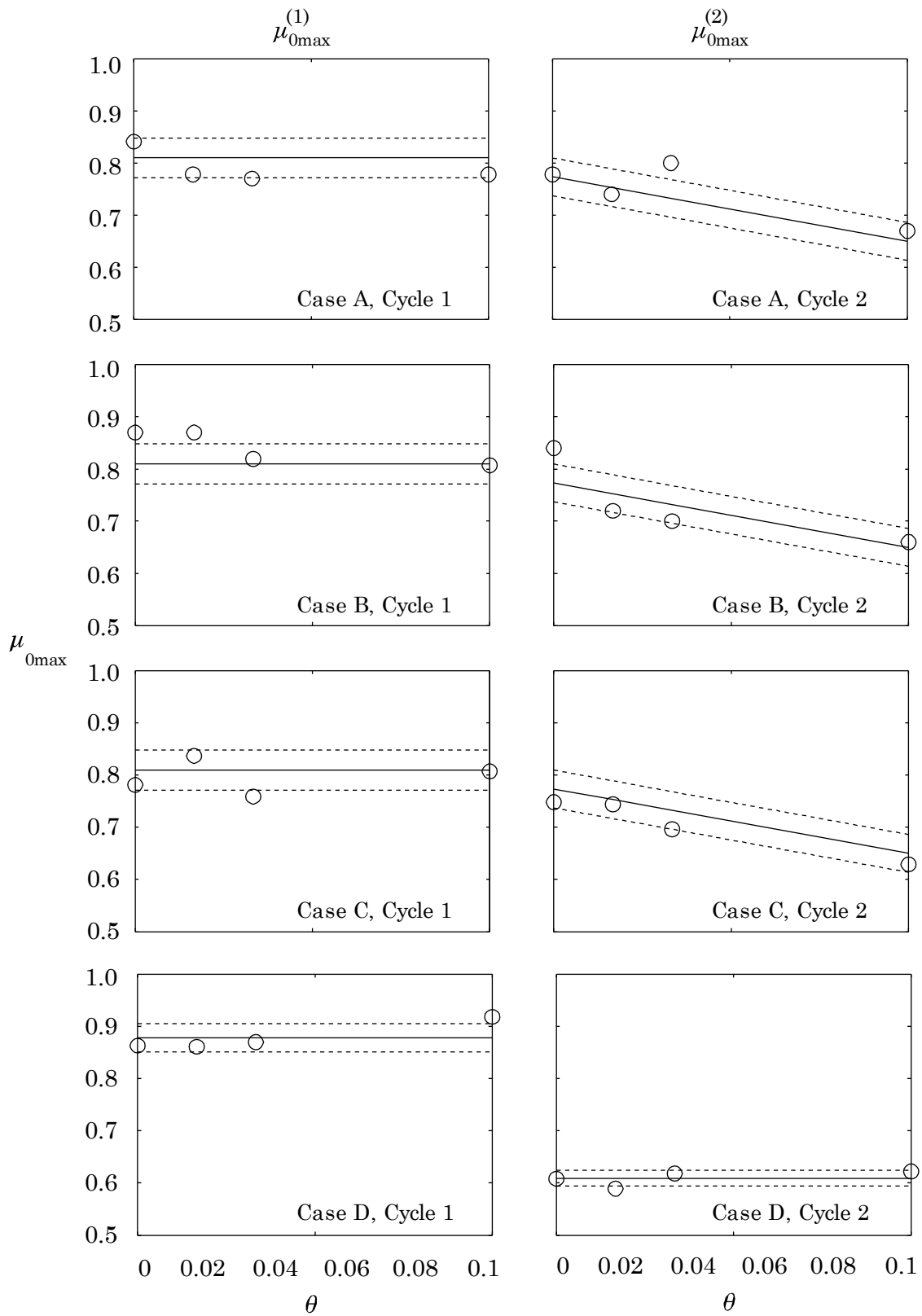


図 4. 21 全体の最大摩擦係数の変化

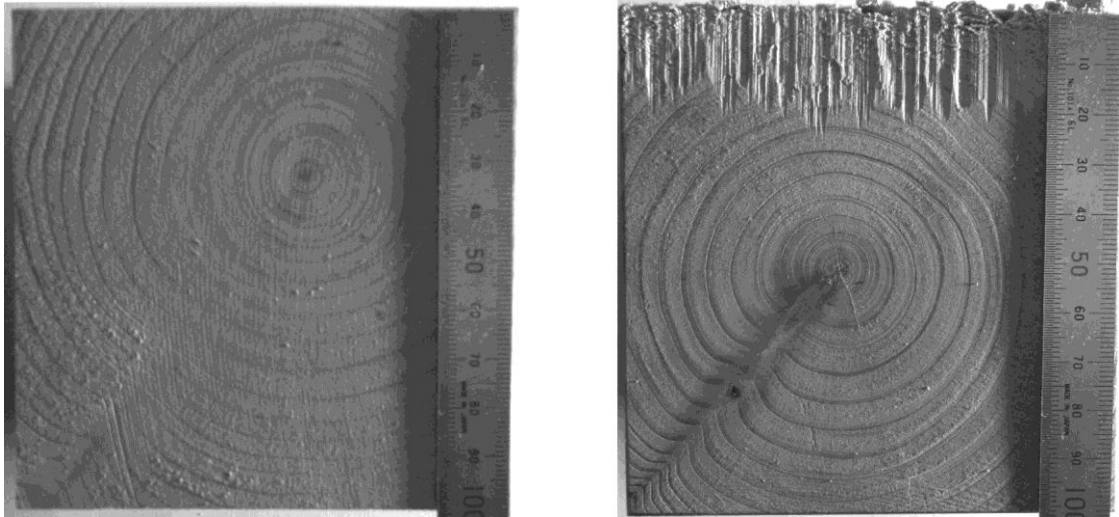


図 4.22 (a)摩擦を与えていない角柱底面表面, (b)礎石との摩擦を与えた角柱底面表面( $\theta=1/10$ )

#### 4.4. 結論

本研究では伝統木造建築物の柱脚と礎石、柱脚とコンクリートブロックの間の静摩擦実験を実施し、断面形状、繰返し載荷数、回転角などが静摩擦係数に及ぼす影響を検討した。実験結果より、柱脚に下面の平均垂直応力が  $0.4\sim 0.7\text{N/mm}^2$  の範囲の最大摩擦係数の近似式として、礎石の場合は式(4.3)、コンクリートブロックの場合は式(4.4)を得た。なお、動摩擦係数との対応と、さらに高い垂直応力レベルにおける静摩擦係数については、今後更なる検討が必要である。

本論文で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 縮小試験体の摩擦実験から、伝統木造柱脚におけるすべり有無によるモーメントー回転角関係を予測する手法を提案した。本手法では、まず、角度を固定した柱脚要素を礎石に載せ、強制水平変位を与えて実験を複数の固定角度で実施する。これらの結果から、礎石から柱脚接触面に作用する摩擦特性を得る。摩擦係数が得られれば、摩擦の影響によるモーメントの値が得られる。
- 2) 円柱と角柱の 1/3 スケールのヒノキ縮小試験体に対して静的摩擦実験を実施し、各固定回転角による摩擦係数を求めた。

## 注

- 注1). 伝統木造の礎石にはダボが設けられる場合が多いが、本研究では摩擦係数に関する基礎資料を得るためダボを設けない礎石を対象とした。
- 注2). 本実験では以下の二種類のロッキング挙動により柱の浮き上がりが生じないように配慮を行った。一つ目のロッキング挙動は、柱脚－礎石接触面（滑り面）より上部のロッキングである。予備実験ではジャッキ設置位置の高さと接触面の高さの差が図 4.2 よりも大きく、滑りより先に接触面上部のロッキングが生じ、C2 の柱が浮き上がる事例が観察された。そのため可能な範囲でジャッキ設置位置を下げ図 4.2 の配置とした。なお、この種のロッキングを避けるためには、ジャッキ設置位置の高さと接触面の高さを一致させる必要がある。二つ目のロッキング挙動は、図 4.3 の治具 C と礎石のロッキングである。このロッキングが生じると、LC3 のロードセルで浮き上がりが生じる。本実験では計測装置の制約から、治具 C と礎石を一つの自由体とみなしたモーメントの釣合式より LC3 で浮き上がりが生じない柱脚と礎石の接触位置の範囲を求め、接触位置の移動がこの範囲に収まるように载荷を行った。この問題を本質的に解決するには、シアキーのボルトを治具 C にも固定し、このボルトに作用する引張軸力を計測する必要がある。

## 参考文献

- 1) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル,学芸出版社, 2004
- 2) 檜原健一, 河村廣：木造住宅の耐震設計—リカレントな建築をめざして, 技報堂出版, 2007
- 3) 伝統的な軸組構法を主体とした木造住宅・建築物の耐震性能評価・耐震補強マニュアル, (社)日本建築構造技術者協会関西支部, 2009.9
- 4) 上谷宏二, 荒木慶一, 吉田亘利, 家倉優人：伝統木造建築物柱脚の接触モデルに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 582 号, pp. 117-122, 2004
- 5) 川上沢馬, 向坊恭介, 山田耕司, 鈴木祥之：柱脚を固定しない木造建物のロッキングと滑り, 日本地震工学会大会梗概集, pp.286-287, 2007.11
- 6) 向坊恭介：伝統工法木造建物の地震応答と耐震性能に関する研究, 京都大学博士論文, 2008
- 7) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック第 4 版, 丸善, pp.329-346, 2002
- 8) 孟慶軍, 平井卓郎, 小泉章夫：木材と各種構造用面材との摩擦係数, 木材学会誌, 第 54 卷, 第 5 号, pp.281~288, 2008
- 9) 鈴木祥之, 前野将輝, 西塔純人, 北原昭男, 後藤正美, 須田達, 大下達哉：伝統木造軸組の柱傾斜復元力特性に関する実大静的・動の実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 574 号, pp.135~142, 2003
- 10) 前野将輝：寺院建築物における伝統木造軸組の構造力学特性と耐震性能, 京都大学博士論文, 2007
- 11) 荒木慶一, 李東潤, 遠藤俊貴, 吉田亘利, 上谷宏二：伝統木造柱脚—礎石間の静摩擦係数, 日本建築学会技術報告集, Vol. 15, No. 30, pp. 405-409, 2009.6

## 第5章. 結論

### 5.1. 本論文のまとめ

本論文では、伝統的木造での半剛接合部の特性が建築物全体の応答を大きく支配することと、接合部の挙動がめり込み特性に依存することに着目し、木材のめり込み特性に基づき柱脚部と柱-貫接合部における復元力特性を予測する方法に関して、主として実験に基づく検討を行った。第2章及び第3章では、柱脚と柱-貫接合部の幾何学的関係を基礎としてめり込み構成則のモデル化を行い、めり込み実験結果に基づき柱-貫接合部と柱脚のモーメント-回転角骨格曲線を予測する手法を定式化した。第4章では柱脚底面と礎石間に生じる摩擦性状に関する静的実験を行った。以下に本論文の結論をまとめて示す。

第2章では、楔や仕口での切欠きを考慮した上で、めり込み形状、めり込みにより生じる境界反力、それらの関係をモデル化した。めり込み接触の生じる部分要素のみを取り出した実験を行い、めり込み形状と境界反力を関係付けるめり込み構成則を得た。荷重が60(kN)程度までの範囲では、荷重-めり込み関係、重心位置-めり込み関係ともに、その骨格曲線は直線近似もしくは区分直線近似が可能であることを明らかにした。さらに上記のめり込み構成則を用いて、柱-貫接合部のモーメント-回転角関係骨格曲線を予測する手法を定式化した。

第3章では、縮小試験体のめり込み実験から、伝統木造柱脚におけるモーメント-回転角関係を予測する手法を提案した。本手法では、まず、角度を固定した柱脚要素を礎石にめり込ませるめり込み実験を複数の固定角度で実施する。これらの結果から、礎石から柱脚要素に作用する鉛直方向の等価集中反力の作用位置を、回転角と軸力の関数としてめり込み構成則を得る。めり込み構成則が得られれば、これに等価集中反力の大きさと作用位置の積として柱脚に作用するモーメントの値が得られる。円柱と角柱の1/3スケールのヒノキ縮小試験体に対してめり込み実験を実施し、無次元化しためり込み構成則を得た。実寸規模の円柱の実大柱脚試験体に対して一定鉛直荷重と試験体頂部に繰返し水平強制変位を与える静的載荷実験を実施し、提案手法により1/3スケールの縮小

試験体から得られためり込み構成則から実大実験結果を精度良く予測できることを例証した。

第4章では伝統木造柱脚と礎石の間の摩擦性情を実験により検討した。柱脚試験体として、前章までと同様に1/3スケールのヒノキ材を用いた。また、びしょん打ちを施した礎石を用いて実験を行った。その結果、おおよそ0.6から0.9の間の静摩擦係数を得た。円柱のみならず角柱についても実験を行った結果、柱断面の形状が静摩擦係数に及ぼす影響は小さかった。

## 5.2. 今後の課題

本研究では、木材のめり込み実験から柱脚部と柱一貫接合部におけるモーメント一回転角関係の骨格曲線を予測する手法について検討を行った。この手法に関する今後の研究課題としては、(1)木材同士の摩擦の影響を取りこむこと、(2)より汎用的な利用を可能とするために、有限要素法などを用いた予測が可能となる手法を扱うこと、(3)より多くの樹種についての検討を行うことなどが挙げられる。また、柱脚と礎石の滑りについては、告示波のごく稀に発生する地震動に対して、伝統木造が建物として滑り挙動を呈するか否か、滑り挙動を呈するとすれば、これをどのように設計に取り込むかについて、更なる検討を行う必要がある。

## 発表論文一覧

### 全文査読論文

- 1) 李東潤, 吉富信太, 上谷宏二: スパン長を設計変数とする鋼構造平面骨組の最適設計, 日本鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, 2005.11
- 2) 荒木慶一, 船津昌史, 李東潤, 吉田亘利, 上谷宏二: 仕口を考慮した木材要素めり込み試験からの伝統木造柱一貫半剛接合部のモデル化, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 論文番号 0165, pp. 766-769, 2006
- 3) 李東潤, 荒木慶一, 遠藤俊貴, 吉田亘利, 上谷宏二: めり込み実験に基づく伝統木造柱一貫半剛接合特性の推定, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 631, pp. 1577-1584, 2008.9
- 4) 李東潤, 荒木慶一, 遠藤俊貴, 吉田亘利, 上谷宏二: 柱脚一礎石接触面のめり込み実験に基づく伝統木造柱脚復元力特性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 639, pp. 865-872, 2009.5
- 5) 荒木慶一, 李東潤, 遠藤俊貴, 吉田亘利, 上谷宏二: 伝統木造柱脚一礎石間の静摩擦係数, 日本建築学会技術報告集, Vol. 15, No. 30, pp. 405-409, 2009.6

### 梗概

- 6) 李東潤, 吉富 信太, 上谷宏二: スパン長を設計変数とする鋼構造平面骨組の最適設計, 日本鋼構造シンポジウム, 第 13 巻, 2005.9
- 7) 李東潤, 荒木慶一, 吉田亘利, 上谷宏二: 伝統的木造建築物の柱脚一礎石接触面に関するめり込み実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.108-109, 2006
- 8) 荒木慶一, 船津昌史, 李東潤, 吉田亘利, 上谷宏二: 仕口を考慮した木材要素めり込み試験からの伝統木造柱一貫半剛接合部のモデル化, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 論文番号 0165, pp. 766-769, 2006
- 9) 遠藤俊貴, 李東潤, 吉田亘利, 荒木慶一, 上谷宏二: 仕口を考慮しためり込み試



験に基づく伝統木造柱一貫接合部復元力特性の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C1, pp. 415-416, 2007

10) 遠藤俊貴, 李東潤, 吉田亘利, 荒木慶一, 上谷宏二: めり込みを利用した純木製制震機構のフィージビリティスタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 構造Ⅲ, pp.217-218, 2008

11) 荒木慶一, 遠藤俊貴, 李東潤, 吉田亘利, 上谷宏二: 木材弾塑性めり込み挙動の有限要素モデルに関する基礎研究(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 構造Ⅲ, pp.267-268, 2008

## 謝辞

本論文は、京都大学大学院博士課程在籍中の4年間に行っためり込み特性に基づく伝統木造の柱脚と柱一貫接合部の力学特性の解明に関する研究をまとめたものです。本論文をまとめるにあたりご指導を頂いた数多くの方々に感謝致します。

京都大学工学研究科建築学 教授 上谷宏二先生には、修士課程から研究室に配属されて以来から博士課程にわたって自由な研究環境を与えて頂き、多大なるご指導をいただきました。また、修士課程の時、自分の研究や健康上の問題により、筆者が1年間休学を余儀なくされたとき、快く送り出して頂き、その後復学に際しては温かく迎えて頂きました。研究生生活を通じて得られた成果を、本論文の形にまとめることが出来たのも、上谷先生が私を常に激励して下さったおかげです。ここに、改めて深く感謝の意を表します。

京都大学工学研究科建築学 准教授 荒木慶一先生には、博士課程の全般にわたってご指導を頂きました。修士課程では鋼構造の最適化解析に関する研究をしていたにもかかわらず、伝統木造に関する研究分野に誘って頂き、実験と解析、研究発表など研究内容についてご指導いただくともに、研究の多面的なアプローチから貴重な助言を頂き、研究の方向性を導いて下さいました。ここに記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

京都大学工学研究科建築学 山川 誠先生には、解析プログラム作成に関するアドバイスやデータ処理の分析方法などを教えて頂き、私が研究を進める中で生じた問題や苦難を解決するためのご助言を頂きました。また、研究室での全般的なことにおいても配慮していただき、研究だけに専念できるような環境を作って頂きました。ここに改めて、深く感謝致します。

京都大学工学研究科 技術職員 吉田亘利には、博士課程の研究の実験遂行における計測機器の設置や取り扱いなどで数多くのご協力を頂きました。ここに記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

当時，京都大学上谷研究室の先輩であった李有震氏には，研究や生活中で生じた問題や悩みなどで励ましの言葉を頂，厚く御礼申し上げます。

京都大学工学研究科建築学博士課程 遠藤 俊貴氏ならびに研究室の皆様には，本論文に関する議論だけではなく実験や計測にご協力いただくとともに，過ごしやすい研究環境を与えていただきました。深く感謝致します。

最後に，本論文の執筆が終わるまで温かく見守ってくれた妻，筆者に心の安らぎを与えてくれた娘と，今日まで筆者の研究活動を支えてくれ，博士号取得を心待ちにし，激励してくれた両親に深く感謝します。

2010年8月

李 東潤