

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

過去の大地震において、建築物の構造設計時に十分な検討が明示的に求められていない部位での損傷が顕在化し、その結果当該建築物が地震後継続使用できなくなる事例が確認されている。この典型的な被害の一つとして、2016年熊本地震での杭基礎の被害が挙げられる<sup>[1-1]</sup>。現行の建築基準法において一般的な建築物の杭基礎は中小地震における損傷制御を目的とした設計が行われているものの、大地震後の継続使用性を確保するための設計はほとんど行われていない。一方で災害拠点などを対象として当該設計法の検討例が示されつつある<sup>[1-2][1-3]</sup>が、これらの検討例では場所打ちコンクリート杭を採用しており、現在多く流通している既製杭は対象とされていない。高強度コンクリートを用いた既製杭のように脆性的に破壊する杭は、設計時に塑性ヒンジを許容できないために強度型の設計となる。しかし、大地震レベルの外力に抵抗させることを考えると、強度型の杭では断面が相当に大きくなるため、靱性のある場所打ちコンクリート杭が採用されている。このように、大地震後の継続使用性を確保するための設計においては、終局時変形において鉛直方向に変形しづらい靱性杭が必要とされる。

一方、大地震時に対する杭基礎構造を対象とした構造性能評価に資する技術資料<sup>[1-4][1-5][1-7]</sup>が纏められつつある。以下に、それぞれの技術資料で示されている知見や解決されていない課題について示す。

#### 1.1.1 建築研究資料第195号

建築研究資料第195号<sup>[1-4]</sup>では、杭体（PHC杭、PRC杭、場所打ち鉄筋コンクリート杭、場所打ち鋼管コンクリート杭、SC杭）の構造実験と、杭基礎部分架構の構造実験、杭頭接合面の要素実験が実施されており、以下の知見が報告されている。

- ・PHC杭とPRC杭の曲げ実験では、試験体はコンクリートの圧壊またはPC鋼棒の破断によって耐力が決定し、脆性的な破壊であった。
- ・PHC杭とPRC杭のせん断実験では、試験体は通常のせん断破壊の他に軸方向ひび割れを伴う破壊がみられた。両破壊ともに、脆性的な破壊であった。
- ・SC杭や場所打ち鋼管コンクリート杭の曲げ実験では、試験体は鋼管の局部座屈により耐力が決定し、靱性のある破壊とはならなかった。
- ・場所打ち鉄筋コンクリート杭では、試験体はせん断余裕度が低いほど変形性能が低くなる傾向が見られた。

#### 1.1.2 日本建築学会 RC 基礎指針（案）

日本建築学会から発刊されたRC基礎指針（案）<sup>[1-6]</sup>では、場所打ちコンクリート杭や既製杭などを対象に、杭体の曲げ耐力やせん断耐力に対する計算方法が示されている。その一方でそれぞれの計算式の適用範囲は、既往の実験の範囲のみに限定されており、特に高圧縮軸力下または引張軸力下の実験結果が少ないことから、適用範囲が限定的であった。その後発刊された文献<sup>[1-7]</sup>では、主に建築研究資料第195号<sup>[1-4]</sup>の実験結果が反映され、軸力の制限が緩和された。

#### 1.1.3 本研究で取り組むこととした検討課題

紹介した技術資料<sup>[1-4][1-6][1-7]</sup>では、検討課題として下記の3点が課題として挙げられている。

- (a) 既製杭は靱性のある破壊となる杭体はなく、脆性的な破壊となるため、現状では十分な安全率を持った設計が必要となり、その結果大断面部材となる。2次設計を満足する既製杭として、建物の継続使用性を確保するために十分な靱性能を有する杭の開発が望まれる。
- (b) 軸方向ひび割れ耐力の評価は、今回の限られた試験体の実験結果を用いて評価を行っており、追加検討として軸方向ひび割れ耐力評価の精度向上を目的に Yopi 等[1-5]は有限要素法解析を用いた検討を行っているが精度のよい耐力評価式は提案されていない。
- (c) 場所打ち鉄筋コンクリート杭において靱性能を評価するためには、せん断スパン比が地震時に大きく変動する杭において、設計時におけるせん断余裕度の計算方法を含めたモデル化手法の開発が必要である。

本研究では、上記の課題のうち(a)のみを対象に検討を実施する。具体的には、大地震時の変動軸力作用下においても、建物の継続使用性を確保するために十分な靱性能を有する既製杭を用いた杭基礎構造システム（杭体、パイルキャップ、基礎梁から構成されるシステム）の開発を行う。特に圧縮軸力下において十分な靱性を持つ既製杭の開発を目的に研究を実施する。前課題<sup>[1-4]</sup>までの検討において、場所打ちコンクリート杭については(c)の課題はあるものの、靱性のある杭体性能を確認することができた。一方で既製杭では、現在多くの建物で採用されているにもかかわらず靱性に乏しく、継続使用性を確保するための設計では有効な選択肢とならなかった。そのことから、今回の検討では既製杭に着目して検討を行った。なお、(b)については今回対象とする既製杭を鋼管巻きの既製杭としたため、本研究では検討の対象外とした。

## 1.2 既往の研究

本研究以外の既往の研究についての調査を行った。特に、圧縮軸力下において十分な靱性を持つ杭について調査した結果を以下に示す。

### 1.2.1 杭体に変動軸力を作用させた実験

建研資料 No.195<sup>[1-4]</sup>の第6章では、変動軸力を受ける場所打ち鋼管コンクリート杭の曲げ破壊実験が報告されている。試験体は、直径が1200mmで鋼管厚さが9mmの場所打ち鋼管コンクリート杭で、図1.2.1-1のような荷重装置を用いて実験を実施した。この実験では、軸力 $N$ を作用させながらせん断力 $P$ により杭体に曲げモーメントを作用させて曲げ破壊を計画した。軸力は全てせん断力 $P$ に応じて変化する変動軸力とし、最大で圧縮側の軸力比で0.43、引張の軸力比で0.21の軸力であった。ここで、圧縮側の軸力比はコンクリート・鋼管・杭体内の軸方向鉄筋を考慮した軸力比で、引張側の軸力比は、鋼管及び杭体内の軸方向鉄筋のみを考慮した軸力比である。

実験の結果、荷重装置の容量不足で十分に荷重できなかった1体を除く4体の試験体において、試験体鋼管の降伏後に局部座屈（図1.2.1-2の赤枠部分）が発生し、その後鋼管が逆方向の荷重時に引張縁となった際に破断（図1.2.1-3の赤枠部分）が生じたことが報告されている。これは、変動軸力を杭体に与えることで、鋼管端部に大きな圧縮力及び引張力が繰返し作用したためと考えられる。また、試験体の耐力について、文献<sup>[1-6]</sup>を参考とした断面解析により評価した結果、安全側に試験体の最大耐力を評価することができたと報告されている。一方で、試験体の局部座屈については十分な検討ができておらず、今後の検討課題と報告されている。

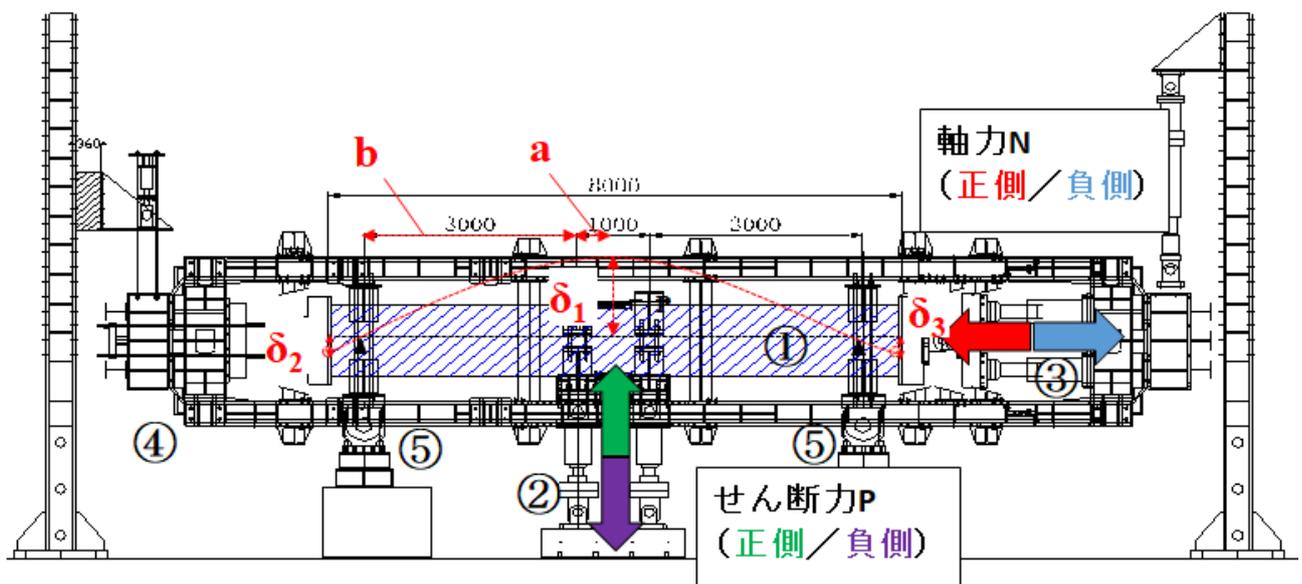


図 1.2.1-1 荷重装置図面<sup>[1-4]</sup>



図 1. 2. 1-2 杭体載荷点付近の鋼管座屈発生状況<sup>[1-4]</sup>

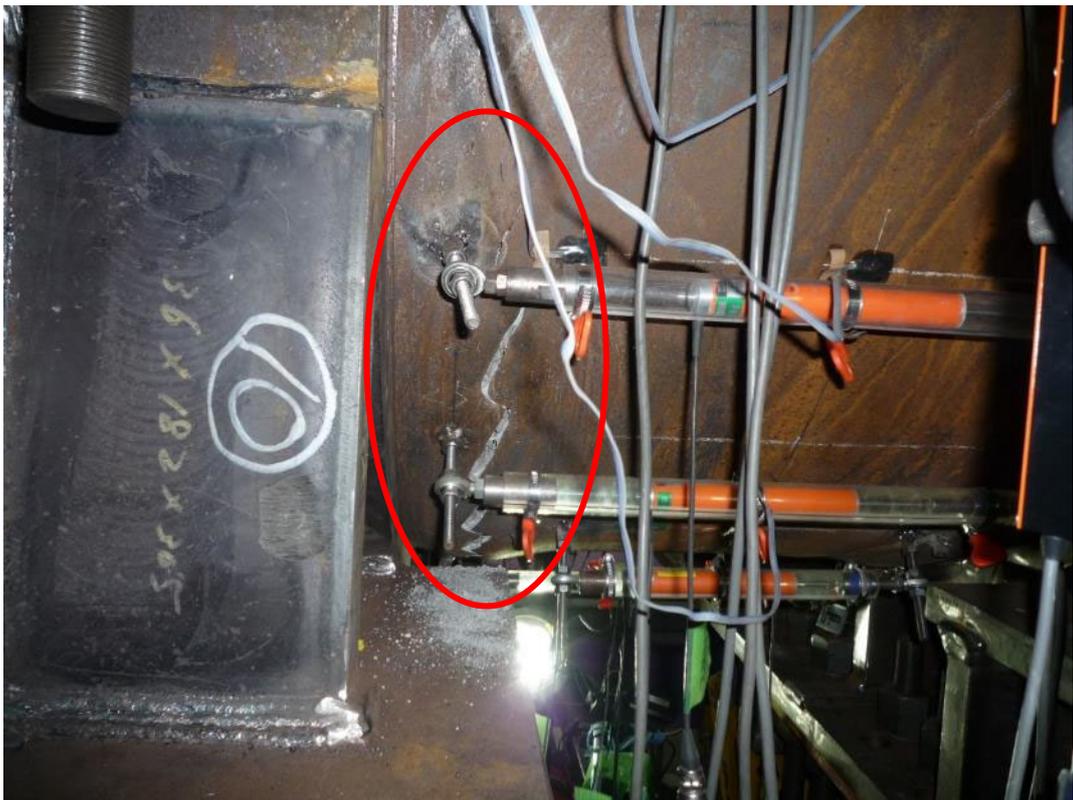


図 1. 2. 1-3 杭体載荷点付近の鋼管破断発生状況<sup>[1-4]</sup>

1.2.2 アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究

佐藤等<sup>[1-6]</sup>は、コンクリート部材の靱性能を確保することを目的に、アンボンド型充填鋼管コンクリート構造部材（以下、アンボンド部材）を提案している。図 1.2.2-1 にアンボンド部材の概要図を示す。アンボンド部材は、鋼管とコンクリートの間に分離材を介在させて、鋼管に軸方向応力を負担させないようにした構造部材である。

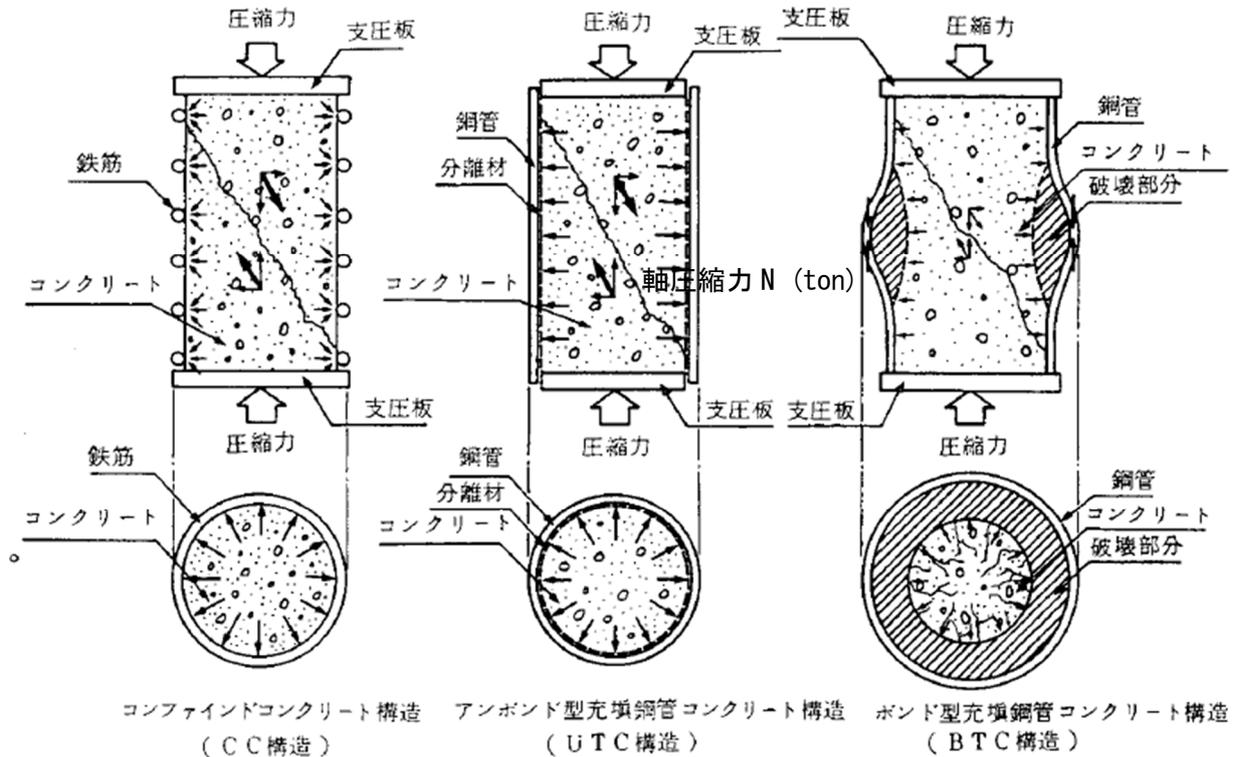


図 1.2.2-1 アンボンド部材の概念図（中央）と類似構造形式の概念図（左図，右図）<sup>[1-6]</sup>

(1) 中心軸圧縮試験によるアンボンド部材の軸圧縮性状評価

佐藤等<sup>[1-6]</sup>はアンボンド部材の軸圧縮性状を把握するために、中心軸圧縮試験を行った。比較用試験体として、鋼管とコンクリートを同時に圧縮したボンド型試験体とアンボンド部材の鋼管とコンクリート間に分離材を塗布していない試験体の2体を併せて製作した。試験体の直径は114.3mm、高さは600mmで共通である。コンクリートの圧縮強度は50MPa～60MPa程度であり、鋼管の降伏強度は350MPa～400MPa程度である。鋼管厚は3.2mmと5.2mmの2種類としている。

軸圧縮力ー軸圧縮ひずみ関係において、アンボンド部材試験体は鋼管厚に依らず、他の試験体と比較して剛性が低いが最大耐力は大きかった。鋼管厚が3.2mmのボンド部材試験体は、最大耐力後に急激な耐力劣化が生じたが、アンボンド部材試験体では安定した挙動を示した。また、鋼管とコンクリート間に分離材が無い場合のアンボンド部材試験体は、ボンド部材試験体より軸耐力は大きくなるものの、分離材を用いたアンボンド部材試験体の軸耐力よりは小さい結果となっている。

(2) 鋼管厚，コンクリート強度，試験体直径，高さ，分離材の厚みを変数としたアンボンド部材の中心軸圧縮試験

佐藤等<sup>[1-6]</sup>は、高い靱性能を示したアンボンド部材を対象に鋼管厚・コンクリート圧縮強度・試験体直径，高さ，分離材の厚さを変数とした中心軸圧縮試験を行った。実験方法は(1)で示した方法と同様であ

る。

軸圧縮力－軸圧縮ひずみ関係では、(a)鋼管厚を変数とした試験体では、初期剛性は鋼管厚による影響が殆ど見られなかった。最大耐力は鋼管厚が大きい試験体程、大きい結果となっている。最大耐力後の挙動は、鋼管厚に依らず比較的安定している（鋼管厚が  $t=5.8\text{mm}$  の試験体は、最大耐力確認後荷重を止めている）。(b)コンクリート圧縮強度を変数とした場合、圧縮強度が  $50\text{MPa}$  程度、 $80\text{MPa}$  程度の2体とも最大耐力後の挙動は比較的安定していると報告されている。コンクリート圧縮強度が  $80\text{MPa}$  程度の大きい試験体では、最大耐力後の耐力劣化が他の試験体より顕著にみられる。

佐藤等は、降伏耐力時のコンクリートの等価降伏時拘束率  $C$  を評価するため、図中の式(1.2.2-1～1.2.2-3)を用いて検討している（降伏耐力は、鋼管の等価応力が降伏応力に達した場合の軸力値（Mises の降伏条件）としている）。鋼管表面で歪ゲージにより測定した歪から降伏耐力時の鋼管の軸応力度、周方向応力度を求め、式(2)から等価降伏時拘束率  $C$  を逆算している。 $C$  は、 $2.45\sim 3.91$  の範囲で分布しており、最小自乗法によると  $2.94$  となっている。

$$N_y = cf_y \cdot cA + s\sigma_z \cdot sA \quad (\text{式 1.2.2-1})$$

ここで、 $cf_y$ : 降伏耐力時のコンクリートの圧縮応力

$cA$ : コンクリートの断面積

$sA$ : 鋼管の断面積

$$cf_y = F_c + c \cdot f_2 \quad (\text{式 1.2.2-2})$$

ここで、 $F_c$ : コンクリートのシリンダー強度

$c$ : 等価降伏時拘束率

$f_2$ : 拘束応力

$$f_2 = \frac{1}{R} \cdot s\sigma_\theta \quad (\text{式 1.2.2-3})$$

ここで、 $cf_y$ : 降伏耐力時のコンクリートの圧縮応力

$cA$ : コンクリートの断面積

$sA$ : 鋼管の断面積

### (3) 一定軸力下におけるアンボンド部材試験体の逆対称曲げせん断実験

伊藤等<sup>[1-6]</sup>は、軸力比を変数としたアンボンド部材試験体の逆対称曲げせん断実験を行っている（曲げせん断実験では充填コンクリート部に主筋を配筋している）。試験体の鋼管部分は、左右端にそれぞれ  $10\text{mm}$  ずつ隙間部を設けている。また、充填コンクリート部に配筋されている主筋は、中央で  $50\text{mm}$  のスペースをもって切断されている。全試験体で直径は  $216\text{mm}$ 、鋼管厚は  $3.2\text{mm}$  で、せん断スパン比は約  $2.5$  である。

荷重－変形角関係において、圧縮軸力比が  $0.43$  の試験体は部材角  $R=6.0\%$  まで安定した挙動を示していた。圧縮軸力比が  $0.43$  の繰り返し荷重を行った試験体 D4C では、部材角  $R=4.0\%$  以降に剛性および耐力低下がみられた。このことから本構造システムの場合高靱性ではあるが軸力比が高いと靱性能が低下する可能性がある。

### (4) せん断スパン比が小さい場合のアンボンド部材試験体の曲げ挙動

伊藤等<sup>[1-6]</sup>は、せん断スパン比が小さい場合のアンボンド部材試験体の曲げ挙動を確認するため、せん断スパン比が  $1$  と  $2$  の2体に対して曲げせん断実験を行っている。試験体直径は  $406\text{mm}$  であり、鋼管

## 第1章 序論

厚は 5.9mm である。コンクリート圧縮強度は約 55MPa であり、鋼管の降伏強度は約 376MPa、主筋の降伏強度は約 419MPa である。軸力比は、圧縮で 0.4 としている。載荷では上下のスタブが常に平行を保つように制御している。

曲げモーメント-部材角関係では、両試験体とも部材角  $R=2.5\%$  程度で最大耐力を迎え、その後は安定した挙動を示している。せん断スパン比が 2 の試験体 UMO では、部材角  $R=10\%$  まで耐力劣化は少ない。

### 1.2.3 アンボンド部材を用いた柱梁接合部実験に関する既往研究

文献[1-10]では、実建物に適用することを視野に入れ、アンボンド部材を柱に用いた鉄筋コンクリート造（RC造）柱梁接合部の挙動を実験により検討している（梁，スラブ：RC，柱：アンボンド部材）。試験体は全6体で、5体はスラブ付き十字形試験体，残りの1体はト形試験体である。十字形試験体では，軸力比・柱梁曲げ耐力比・直交梁の取り付け方を変数としている。

荷重－変形角関係では，全試験体で大変形時まで安定した挙動を示している。柱が先行して降伏するように設計した試験体 J1 では，他の試験体より最大耐力到達時変形角が大きく，アンボンド柱部材特有の安定した挙動を示している。

また，黒瀬ら<sup>[1-10]</sup>は，接合部試験体に対して各部材に取り付けた変位計から各部材の変形を分離し，アンボンド柱部材の骨格曲線モデルを検討している。RC部材と同様に，第一折れ点を曲げひび割れ点，第二折れ点を曲げ降伏点として設定することで，アンボンド柱部材の骨格曲線を再現できるとしている。

#### 1.2.4 杭頭端部の応力や損傷を低減する杭に関する研究

平石らが実施した、大地震後においても杭体に損傷が少ない杭の開発に関して、一連の研究の紹介を行う。

平石らは、文献[1-6]において降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の実験結果を報告している。これは、杭頭部のヒンジ領域において、コンクリートの損傷を低減するために主筋の付着を除去し、曲げモーメントとせん断に抵抗するために補助主筋を配した杭である。この中で、杭頭部にはテーパ形状の切り込みを入れた試験体の実験も実施している。また平石らは、文献[1-6]において降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の杭頭部のディテールを改善した試験体の実験を実施している。

二宮らは、文献[1-6]において杭頭浮き上がり基礎回転系架構の提案を行っている。この基礎回転系とは、上部構造に損傷が生じる前に杭頭部の主筋の伸びにより基礎が回転する構造である。この構造では、上部構造の変位は基礎の回転による剛体回転が支配的となり、上部構造は小さいベースシアでも大地震に耐えることが可能としている。また、浮き上がりに伴う主筋の降伏により減衰を付与することができるため、地震時の応答変位が少なくなることが期待される。地震後、上部構造が自重により戻ること、建物自体に残留変形が生じないとしている。一方で、このような基礎回転系架構では、基礎の浮き上がり時に圧縮側の杭に高圧縮軸力が作用するため、これに耐えるための杭の開発が必要である。また、この杭は高引張軸力下においても杭体に損傷が生じず、大きな主筋の伸びに耐えうる必要がある。この文献では、文献[1-6][1-6]で示された降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の他に、減圧鉄筋を用いた杭の実験をそれぞれ実施している。この減圧鉄筋を用いた杭では、曲げモーメントに抵抗する主筋とは別に、軸力の一部を負担する減圧鉄筋を配筋している。文献[1-6]では、杭頭部の中心から片側半分のほぼ図心にあたる半径の1/3だけ内側にずらした位置にこの減圧鉄筋を配筋し、ヒンジ領域では付着を除去している。その後、文献[1-6]、文献[1-6]、文献[1-6]ではそれぞれ減圧鉄筋を用いた杭の杭頭部のディテールを変えた実験を行い、その結果を報告している。なお、杭頭部に隙間を設けた文献[1-6]の試験体では、杭径400mmに対して25mmの隙間を設けている。

これらの一連の研究により、最終的に文献[1-6]で報告している減圧鉄筋を用いた杭の実験結果において、以下のような知見を報告している。

- ・基礎の回転角  $1/150$  以上の変形を繰り返しても圧縮側の杭体にはほとんど損傷が生じなかった。
- ・軸力比  $0.5$  において回転角  $1/33$  を繰り返す経験しても、杭体の構造性能を著しく低下させるような損傷は発生せず、良好なエネルギー吸収能力を有し、安定した履歴性状を示した。

1.2.5 鋼管コンクリート杭の軸圧縮性状の確認を目的とした軸圧縮実験

文献[1.21]～[1.23]では、鋼管コンクリート杭の軸圧縮性状の把握を目的に、コンクリートの肉厚や中空部のコンクリート打設の有無、鋼管厚などを変数とした計 19 体の軸圧縮実験を実施している。試験体諸元を表 1.2.5-1， 載荷装置概要を図 1.2.5-1 に示す。

表 1.2.5-1 試験体諸元

(a) 実験①

試験体	コンクリート厚 tc (mm)	コンクリート圧縮 強度 f'c (MPa)	鋼管降伏強度 fy (MPa)	コンクリートのみの 径厚比 $\tau [(D-2ts)/tc]$
SC-1	22.7	99.3	325	8.61
P-SC2	37.7	103.2	290	5.18
SC-3	57.7	99.3	325	3.39

(b) 実験②<sup>1.22)</sup>

シリーズ	試験体名	主な変数		試験体 高さ H (mm)	鋼管厚 ts (mm)	コンクリート厚 tc (mm)	コンクリート 圧縮強度 f'c (MPa)
1	SCN1	基準SC		300	2.3	25	120
	SCN2					40	
	SCR1	中詰め 緩衝材無				25	
	SCR2					40	
	SCR3	中詰め 緩衝材有				25	
	SCR4					40	
	SCU1	アンボンド 型鋼管				25	
	SCU2					40	
2	TCR1	中実の 耐震杭 (手打設)	300	2.3	-	45	
	TCR2		600				
	TCR3		300				
	TCR4		600				
	SCh1	中空の SC杭 (手打設)	300	2.3	40	120	
	SCh2		600		40		
	SCh3		300		40		
	SCh4		600		40		
3	C1	コンク リート 試験体	SCN SCU SCR	300	-	25	120
	C2					40	
	C3					25	
	C4					40	
	S1	鋼管 試験体	300	2.3	-	-	
	S2		600				
	S3		300				
	S4		600				

※耐震杭：場所打ち鋼管コンクリート杭を模擬した試験体であるが、鋼管内側にリブ等は設けていない。

※中詰め緩衝材有：SC杭のコンクリートの内壁にグリースを塗布し、中空部にコンクリート打設を施した試験体

※アンボンド型鋼管：SC杭のコンクリート部にのみ圧縮力を加えた試験体

表 1.2.5-1 試験体諸元 (c) 実験③<sup>1.23)</sup>

No.	Specimen Name	D [mm]	$t_s$ [mm]	$t_c$ [mm]	Conc. Infill	Infill	Soil
						Load ed	Cem ent
1	SC25	190.8	2.3	25.8			
2	SC25s	190.6	5.3	26.1			
3	SC25ss	190.9	7.0	26.6			
4	SC50	190.6	2.3	50.2			
5	SC50s	190.7	5.3	51.3			
6	SC25r	190.4	2.3	25.5	✓		
7	SC25r2	190.5	2.3	25.5	✓	✓	
8	SC25ru	190.5	2.3	25.4	✓		✓
9	SC25r2u	190.8	2.3	25.8	✓	✓	✓
10	SC25sr	190.7	5.3	26.3	✓		
11	SC25ssr	191.2	7.0	26.5	✓		
12	SC25r3	190.5	2.3	25.4	✓*		

\*Normal-strength (45 MPa) concrete infill. Other infill is high-strength (120 MPa).

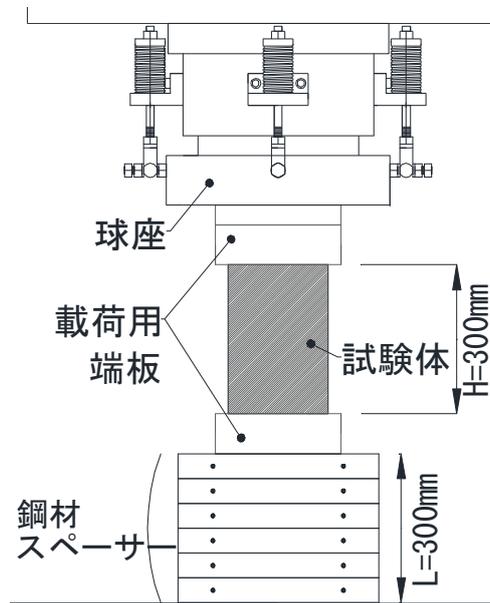


図 1.2.5-1 試験体および圧縮試験装置の概要<sup>1.22)</sup>

図 1.2.5-2 に代表的な試験体の軸圧縮力-軸縮み関係を示す。試験体 SCN1, SCN2, SCR2, TCR1 では、最大耐力を迎える前に鋼管が軸方向および水平方向で降伏歪、またコンクリートは圧縮強度時ひずみに達していたことが報告されている。アンボンド試験体 SCU2 では、最大耐力後に鋼管が軸方向および水平方向で降伏ひずみに達しており、横拘束がより効果的で耐力が上昇する結果となった。各試験体の最大耐力と劣化後の耐力の比を耐力残留率とすると、試験体 SCN2, SCR2, TCR1 の順に耐力残留率が

きいことが示されている。この時、耐震杭中のコンクリートの中詰めコンクリートとして考えると、杭体中空部に詰めるコンクリート断面積が大きいほど耐力残留率が上昇しており、杭体内部のコンクリート強度差が少ないほど耐力残留率は更に上昇することが報告されている。

図 1.2.5-3 に軸圧縮耐力の実験値/計算値—鋼管軸耐力寄与分を示す。同図中には中実部材である CFT 柱の軸圧縮試験結果<sup>1.19)</sup>も引用されており、鋼管の軸力寄与分が小さい場合、実験値は計算値を下回り、鋼管の軸力寄与分が大きい場合、計算値を上回るが  $N_s/N_{cal\_1}$  が 0.6 程度から実験値と計算値の耐力比が頭打ちになっている。SC 杭の軸耐力実験結果は計算値を下回る傾向にあり、実験値/計算値が 0.8 程度となるような実験結果も示されている。

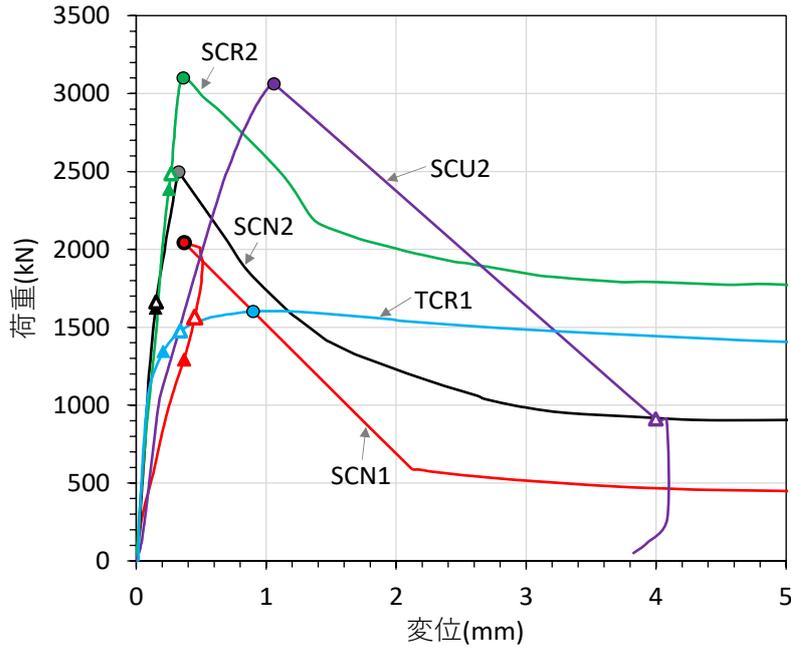


図 1.2.5-2 荷重変形関係の概要<sup>1.22)</sup>

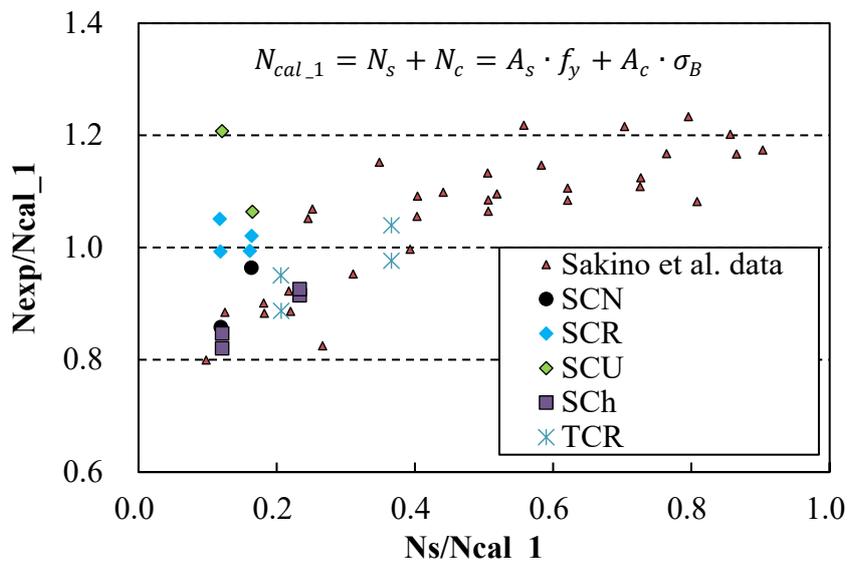


図 1.2.5-3 軸圧縮耐力の実験値および計算値比較<sup>1.22)</sup>

### 1.2.6 既往研究のまとめ

1.2.1 項では、変動軸力を作用させた場所打ち鋼管コンクリート杭の曲げ破壊実験に関する文献を紹介した。変動軸力を杭体に与えた結果、試験体の鋼管端部に大きな圧縮力及び引張力が繰返し作用することで、鋼管に局部座屈が発生し、その後鋼管が破断したことが報告されている。このように、場所打ち鋼管コンクリート杭の実験では、靱性のある結果が得られなかった。

1.2.2 節及び 1.2.3 節では、アンボンド部材に関する文献を紹介した。鋼管に軸力を負担させず、拘束力に対して有効に効かせることで、高い靱性能を有する結果が得られることが分かった。佐藤等の一連の研究では、上記の他に耐火性能実験が行われている。また、解析では、M-N インタラクションのモデル化や荷重-変形角関係のモデル化について検討が行われている。一方、これらの研究では圧縮軸力下での検討はあるものの、引張軸力下での検討は行っていない。また、軸力は一定軸力の実験のみであり、実験中に軸力変動させた実験は実施していない。

1.2.4 節では、杭頭端部の応力や損傷を低減するために、杭に軸力のみを負担させる芯鉄筋と杭頭端部のコンクリートの損傷を抑えるための様々なディテールを施した杭に関する研究を紹介した。

1.2.5 節では、鋼管コンクリート杭の軸圧縮挙動評価を目的とした鋼管コンクリートの軸圧縮試験結果を紹介した。SC 杭に対して、鋼管厚やコンクリート厚を大きくすることで軸圧縮耐力後の変形性能の改善を図ったが、中実の鋼管コンクリート杭の変形性能ほどの十分な軸圧縮靱性は得られていない。軸耐力においても計算値を下回る傾向にあった。これは中実断面を有する CFT 柱についても同様の結果であり、鋼管の軸力寄与分が小さいと計算値を下回る傾向にあり、鋼管の軸力寄与分を大きくしても計算値との耐力比の頭打ちが確認されている。さらに、中空部に普通コンクリートを中詰めした補強 SC 杭の軸圧縮試験も実施されているが期待したほどの靱性能は得られず、鋼管の座屈を抑制可能な中実断面のコンクリート杭の開発が望まれる。

大地震時には、杭に大きな変動軸力が作用し、場合によっては引張軸力になることが想定される。これを想定し、本研究では 1.2.2 節及び 1.2.3 節で紹介した鋼管に軸力を負担させない研究を参考に、変動軸力下においても靱性能を持つ杭基礎構造システムの開発を実施する。

### 1.3 各章の概要

本研究では、鋼管巻き中実杭を有する基礎構造システムの開発を目的に、4種類の実験を実施した。それぞれの実験の内容を、それぞれ2章～5章に示す。それぞれの実験について、各章の概要を以下に示す。

#### 1.3.1 2章 杭の中心一軸圧縮実験

2章では、大地震時の変動軸力作用下においても、建物の継続使用性を確保するために十分な靱性能を有する杭体の開発を行うため、特に圧縮靱性に着目し、基本的な杭の圧縮挙動を確認することを目的に一軸圧縮実験を実施した。

一軸圧縮実験では、基本的な圧縮靱性能を確認するための基礎的な試験体をAシリーズとして、中空断面を持つ既製コンクリート杭を模した試験体、既往の文献を参考に既製コンクリート杭の外側に端部に隙間部を設け鋼管を取付けた試験体、上部構造の圧縮靱性のあるRC柱を模した試験体を対象とした。

また、既製コンクリート杭は中空断面で圧縮靱性を発揮することが難しいと考えられたため、中実断面となる既製コンクリート杭を想定した試験体での検討をBシリーズとした。

2.1節では、1章で示した研究背景を踏まえ、2章の実験との関係を説明する。

2.2節では、実験の概要として、試験体や載荷装置、計測方法などを示す。

2.3節では、A,Bシリーズの実験結果として、実験により得られた荷重一軸変位関係および荷重一軸ひずみ関係、破壊経過や損傷状況、試験体の変形状況、試験体のひび割れ性状、鋼管の降伏判定、および、鋼管、軸方向鉄筋の負担力について示す。

2.4節では、試験体の破壊性状や圧縮靱性、鋼管とコンクリート間の固着正常などの検討結果を示す。

2.5節では、試験体の耐力を評価することを目的として、既往の評価式を用いて最大耐力を評価した結果を示す。

2.6節では、2.1節～2.5節の検討により得られたまとめと今後の検討課題を示す。

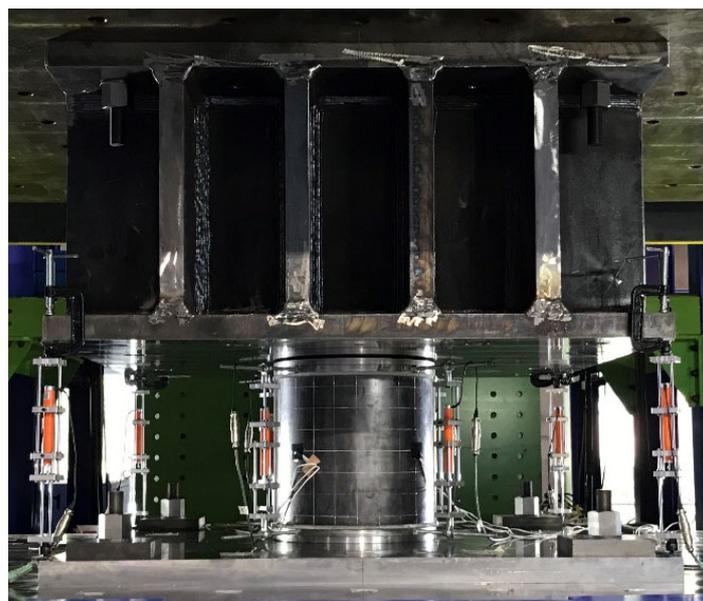


図 1.3.1-1 一軸圧縮実験試験体

### 1.3.2 3章 杭の曲げせん断実験

3章では、2章で示した一軸圧縮実験により圧縮靱性の高い隙間部を設けた鋼管巻き中実杭の、曲げせん断挙動を確認することを目的に、鋼管巻き中実杭に曲げせん断力を作用させる静的載荷実験を実施した。試験体は全3体（Cシリーズ）で、2章の鋼管巻き中実杭（非接合）試験体の仕様に基づき作製した鋼管巻き中実杭の試験体2体と、比較のためのSC杭の試験体1体である。3体の杭は全て曲げ破壊するように設計を行った。大地震の杭の挙動を考慮し、試験体に作用させた軸力は水平力に連動して変動させた。また、鋼管巻き中実杭は、比較のために用意したSC杭と同等以上の曲げ性能となるように設計を行った。なお、杭体内の配筋は高密配筋となるため、工場で品質管理された状態で製造することを想定している。

3.1節では、2章で示した一軸圧縮の実験結果を踏まえ、2章の実験との関係を説明する。

3.2節では、実験の概要として、試験体や載荷装置、計測方法などを示す。

3.3節では、Cシリーズの実験結果として、実験により得られた試験体脚部モーメントー変位角関係および試験体頭部モーメントー変位角関係、破壊経過や損傷状況、試験体の変形状況、鋼管および軸鉄筋の降伏判定について示す。

3.4節では、試験体の耐力を評価することを目的として実施した非線形断面解析の結果を示す。ここでは、コンクリートの鋼管による拘束効果を変化させた解析を実施し、それぞれの結果と実験結果との比較を行った結果について示す。

3.5節では、3.1節～3.4節の検討により得られたまとめと今後の検討課題を示す。



図 1.3.2-1 曲げせん断載荷実験概要

### 1.3.3 4章 既製鋼管巻き中実杭の曲げ実験

4章では、2章～3章までの一連の研究によって開発された鋼管巻き中実杭を用いた曲げ性能評価を目的とした実験を実施した。試験体は全2体（Dシリーズ）で、D-1試験体については、3章のC-1試験体、C-2試験体と同じ仕様とした。D-2試験体については、設計隙間幅120mmとし、D-1試験体の比較試験の位置付けとした。この実験では、拘束効果を期待した鋼管巻き中実杭の曲げ性能を特定するために、曲率分布等の変形状態および曲げ耐力について検討を行った。

4.1節では、3章で示した曲げせん断実験の結果を踏まえ、3章の実験との関係を説明する。

4.2節では、実験の概要として、試験体や荷重装置、計測方法などを示す。

4.3節では、実験結果として、実験により得られた荷重－変形関係、破壊経過や損傷状況、試験体の変形状況、試験体のひび割れ性状、軸方向鉄筋の降伏範囲、鋼管の拘束効果について示す。

4.4節では、試験体の耐力を評価することを目的として、弾塑性断面解析を行いその結果を示す。

4.5節では、4.1節～4.4節の検討により得られたまとめと今後の検討課題を示す。

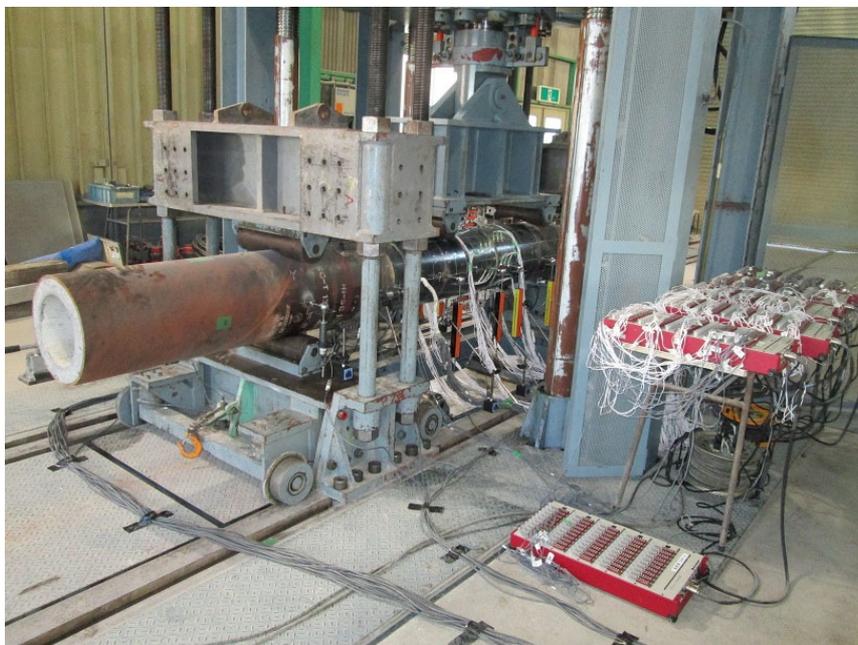


図 1.3.3-1 曲げ荷重実験概要

### 1.3.4 5章 鋼管巻き中実杭部分架構実験

5章では、2章～4章までの一連の研究によって開発された鋼管巻き中実杭を用いた杭基礎部分架構実験を実施した。この実験では、鋼管巻き中実杭が実際の建築物と同じような杭基礎部分架構でどのような破壊性状となるか検討することを目的に実験を実施した。杭基礎部分架構内試験体は1体で、図1.3.4-1のような鋼管巻き中実杭、基礎梁、1階柱、パイルキャップからなるト形部分架構試験体である。実験では、大地震時の転倒モーメントによる変動軸力が作用することを想定し、試験体に変動軸力を作用させた。ただし、载荷装置の都合により2章～4章までで実施した杭径400mmの鋼管巻き中実杭ではなく、縮尺を小さくした杭径165.2mmの鋼管巻き中実杭を用いて実験を実施する。

5.1節では、2章～4章で示した実験と5章の実験との関係を説明する。

5.2節では、実験の概要として、試験体や载荷装置、計測方法などを示す。

5.3節では、実験結果として、実験により得られた荷重－変形関係、破壊経過や損傷状況、試験体の変形状況、試験体のひび割れ性状、軸方向鉄筋の降伏範囲、鋼管の拘束効果について示す。

5.4節では、試験体の耐力を評価することを目的として、弾塑性断面解析を行いその結果を示す。

5.5節では、5.1節～5.4節の検討により得られたまとめと今後の検討課題を示す。

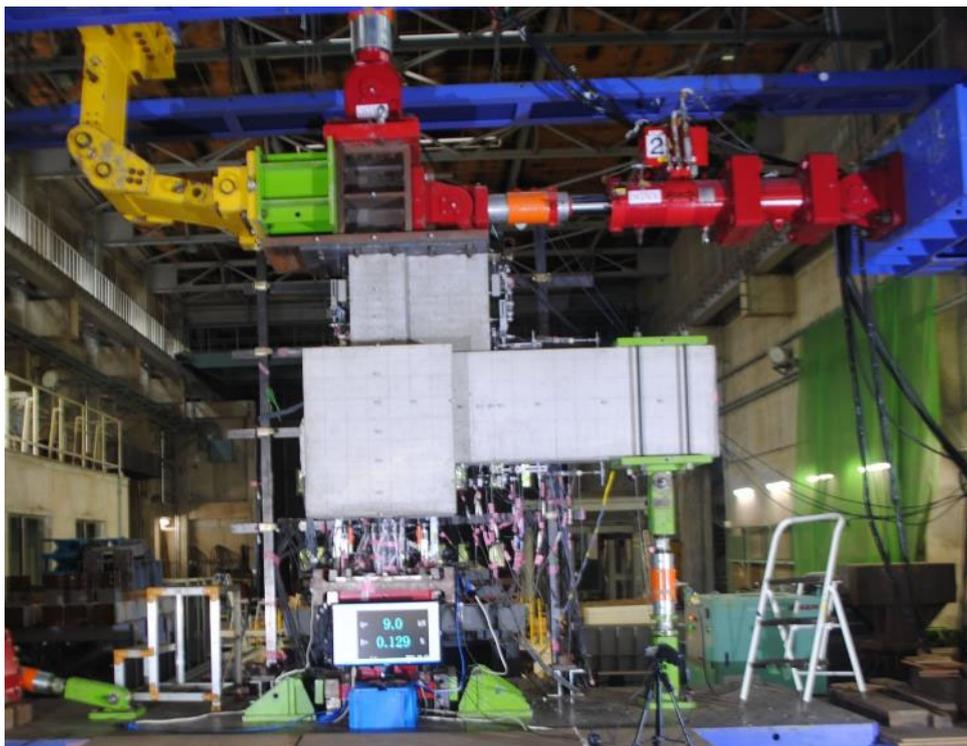


図 1.3.4-1 部分架構実験概要

## 参考文献

- [1-1] 渡邊秀和ほか4名：2016年熊本地震により被災したRC造庁舎における基礎構造部材の損傷調査，第15回日本地震工学シンポジウム，pp.1844~1853，2018.12
- [1-2] 喜々津仁密ほか7名：地震後の継続使用性を確保した新築建築物の設計・耐震性能評価 その1～その6，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.45-56，2015.9
- [1-3] 草刈崇圭ほか5名：地震後の継続使用性を確保した新築建築物の設計・耐震性能評価 その7～その11，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.43-52，2016.8
- [1-4] 向井智久ほか16名：大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究，建築研究資料第195号，2019.10
- [1-5] Yopi Prabowo Oktiovan ほか7名：Shear performance evaluation of PHC piles under different levels of axial load ratio, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Volume51, Issue9, pp. 2091-2112, 25 July 2022
- [1-6] 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説，2017.3
- [1-7] 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能，2022.3
- [1-8] 伊藤徹ほか5名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その1.原理，構成及び実験計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1417-1418，1986.8
- [1-9] 下戸芳寛ほか5名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その2.ボンド型と比較した中心圧縮実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1419-1420，1986.8
- [1-10] 中島秀雄ほか5名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その3.諸条件に関する中心圧縮実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1421-1422，1986.8
- [1-11] 伊藤徹ほか5名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その5.変形吸収部を有するUTC部材の曲げ実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1297-1298，1987.10
- [1-12] 斎藤豊ほか4名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その11.変形吸収部を有するUTC部材のせん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1375-1376，1988.10
- [1-13] 塚越英夫ほか4名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その15.UTC柱RC造梁接合部の実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.553-554，1989.10
- [1-14] 黒瀬行信ほか4名：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 その16. UTC柱RC造接合部の実験結果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.555-556，1989.10
- [1-15] 平石久廣，武争也，南谷知輝，平岡太一：降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発，コンクリート工学論文集，第20巻，第3号，pp.59-66，2009
- [1-16] 平石久廣，南谷知輝，平岡太一，藤原章弘：杭頭に接合部を設けた降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発，コンクリート工学論文集，第22巻，第1号，pp.23-31，2011
- [1-17] 二宮大樹，平石久廣，佐古智昭：杭頭浮き上がり基礎回転系架構の構造性能に関する研究，コンクリート工学年論文集，第34巻，第2号，pp.325-330，2012
- [1-18] 佐古智昭，平石久廣，二宮大樹：杭頭浮き上がり基礎回転系対応型杭の開発研究，コンクリート工学年次論文集，第34巻，第2号，pp.745-750，2012
- [1-19] 天野元樹，平石久廣，渋谷圭介，二宮大樹：緩衝材を有する杭頭浮き上がり基礎回転系構造の構造システムに関する耐震実験研究，コンクリート工学年論文集，第35巻，第2号，pp.321-336，2013

## 第1章 序論

- [1-20] 渋谷圭祐, 平石久廣, 劉詩琦 : 沈み込みを伴う基礎回転系架構の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第37巻, 第2号, pp.1393-1398, 2015
- [1-21] 古川佳純, 小原拓, 河野進, 宮原清, Thusoo Shreya, Mukai David : SC杭の軸圧縮性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.575-576, 2020.9
- [1-22] 古川佳純, Jasinda Clarissa, 安藤諒, 小原拓, 河野進, Mukai David, 渡辺臣 : SC杭および耐震杭の軸圧縮性状に関する実験的研究その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.603-606, 2021.7
- [1-23] Xuechun HUANG, Clarissa JASINDA, Taku OBARA, Susumu KONO, David MUKAI, Hiroshi HATTA : Uniaxial Compressive Behavior of Hollow Circular High-strength Precast Concrete-filled Steel Tubular Piles Part 1 and Part 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.485-488, 2022.9
- [1-24] 崎野健治, 山口達也, 中原浩之, 向井昭義 : コンクリート充填円形鋼管短柱の中心圧縮耐力, 日本建築学会構造工学論文集, vol.48B, pp.231-236, 2002.3