

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560679

研究課題名(和文)性能評価に基づくパイルキャップ接合部の次世代耐震設計法の開発

研究課題名(英文)Development of New-Generation Seismic Design Method for Pile Cap Joints based on Performance Evaluation

研究代表者

岸田 慎司(KISHIDA, Shinji)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10322348

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：パイルキャップは褥筋，ベース筋の補強効果は考慮されておらず，パイルキャップ内の補強筋の効果を明らかにすることで，より経済的で施工が容易となる配筋方法を提案できると考え，「かご筋型」という縦筋とせん断補強筋で配筋されたト形部分架構を有する実験を行い，「かご筋型」でも適切な鉄筋を配筋することで耐力上問題ないことを確認した。パイルキャップのせん断ひび割れ強度とせん断終局強度は，断面を柱とパイルキャップ，あるいは，柱，杭とパイルキャップの平均として，既往の柱梁接合部の設計式を利用することで推定可能である。パイルキャップのせん断補強筋比を増やすことで最大耐力が大きく増加した。

研究成果の概要(英文)：The pile cap is a very important member connecting the column, pile, foundation beams. There are two kinds of vertical members, columns and pile, in a pile cap. So, the seismic behavior of pile cap is more complicated than the beam-column joint. We performed lateral load reversal tested of subassemblages with one pile, column, foundation beam and pile cap, and considered the earthquake resistant performance of pile cap. The diagonal shear crack strength and ultimate shear strength can be estimated by the prediction method for usual RC beam-column joints to apply the vertical member section to the average between the pile, the column and the pile cap section or that between column and pile cap. But in this research, the small diameter pile was applied, which was smaller than the column section in case of the low buildings. The ultimate shear strength was increased by mounting the shear reinforcements.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：パイルキャップ 既製杭 基礎梁 アンカー筋 耐震性能設計 配筋方法 せん断終局強度 接合部

1. 研究開始当初の背景

構造物の自重と外力を支持地盤に伝える役割を果たすのが“基礎”であり、基礎は構造物と支持地盤の間に介在し、構造物を安全に支える必要がある。このため、基礎構造は長期的においても、また地震時においても上部構造の安全性の確保のために重要な部分である。パイルキャップには杭や柱などからの鉛直力、基礎梁からのせん断力や曲げモーメントが複雑に作用している。さらに、複数杭の場合には一本杭の場合とは異なる力の流れがパイルキャップに発生するため、パイルキャップ内の応力伝達が基礎構造全体の性状に影響を及ぼす恐れがあり、この部分の強度と変形を明確にする必要がある。一方で、最近の既製杭を用いた埋込み工法は、杭先端地盤の拡大掘削に伴う先端支持力の増大、節杭を用いた杭周面抵抗力の増大、杭材の高強度化などにより、高支持力化が進んでおり、パイルキャップを介して伝達される応力も増加する傾向にある。パイルキャップを大断面化することで安全性には優れているが、基礎の建設には地盤の掘削などに多くの時間と膨大な費用を必要とするため経済性に劣り、環境を著しく破壊してしまうという欠点を持っている。

基礎構造では、2000年の建築基準法改正以降、告示には地盤の許容応力度および基礎杭の許容支持力の記述しかなく、許容応力度計算を行えば良いと記述されている。上部構造には限界耐力計算を導入しているが、基礎構造では「中程度の地震に対して損傷を受けないことについての検証」に対応する方法が示されているにすぎない。2001年には学会から「建築基礎構造設計指針」が刊行されているが、パイルキャップの模式図が示されているだけで、パイルキャップやその周辺部に関する設計法がまったく示されていない。つまり、耐震設計法を策定する為のバックデータを提供するような各種の基礎的な研究のうち、未解明の研究領域も多く存在するのが現状である。

このように未解明な研究領域の中でも特に重要なものが、パイルキャップの配筋方法である。パイルキャップはコンクリート断面のみでせん断力を負担させる考えに基づいており、配筋詳細に関しては構造規定に基づいて行われている。しかし、パイルキャップ内には各種の鉄筋が複雑に配筋されているが、袴筋やベース筋などフーチング特有の各種鉄筋の効果については考慮されず、設計者の判断と技量、経験によるところが大きく、柱主筋や基礎梁主筋や杭のアンカー筋の定着をどのように確保するかが問題となっている。現在の配筋方法は安全側ではあるものの、パイルキャップ内の各種鉄筋（袴筋、ベース筋など）の補強効果を考慮させることで合理的な設計が可能になると考えられる。パイルキャップの力学的性能や配筋方法に関する研究は、鉛直力の支持性能に関するもの

が多く、例えば田邊ら、及び酒井らの一連の研究があるが、いずれも引張りあるいは圧縮力のみを受けたときのパイルキャップ性能を調べたものである。地震時挙動の実験としては、杭と基礎梁・パイルキャップを対象とした架構実験のうち、場所打ちコンクリート杭を使用した小林らの研究と既製杭を使用した岸田らの研究があるが、試験体数が少ないこともあってパイルキャップの破壊性状、終局強度および変形性状の定量化や統一的な解釈には至っていない。さらに、複数杭が接続されたパイルキャップの周辺架構の耐震性能に関する研究は皆無である。

2. 研究の目的

現在、パイルキャップは構造規定^{1),2)}に基づいて設計されているが、内部に配筋された袴筋、ベース筋の補強効果は考慮されておらず、コンクリート断面のみでせん断力を負担している。この設計法は安全側を考慮しているが、パイルキャップ内の補強筋の効果を明らかにすることで、より経済的で施工が容易となる配筋方法を提案できると考えられる。そこで、本研究では以上のことを考慮し、松本³⁾が提案したかご筋型という縦筋とせん断補強筋で配筋された方法を参考としてト形部分架構を有するパイルキャップの実験を行い、パイルキャップの内部応力状態、各補強筋の解明、及びせん断強度式の評価の検討を目的とした。

3. 研究の方法

(1)試験体概要: 柱、基礎梁、杭からなるト形部分架構を有するパイルキャップの実験を行い、試験体は鉄筋コンクリート造、6~10階建て中層建築物の側柱下部におけるト形部分架構を想定し、約1/2縮小モデルとした。かご筋型による配筋図を図1に、試験体諸元、コンクリート強度を表1に、鋼材の力学的特性を表2に示す。試験体は、パイルキャップ内の配筋方法を変数とし、大和久⁴⁾の試験体No.3を基準に試験体No.4は縦筋を4本とし補強筋をD13に大きくした。試験体No.5は試験体No.3と同様に縦筋を8本とし補強筋をD13に大きくし、パイルキャップ底面のひび割れを補強するためにリング筋を配筋した。

(2) 載荷方法: 加力は試験体の梁端をピ

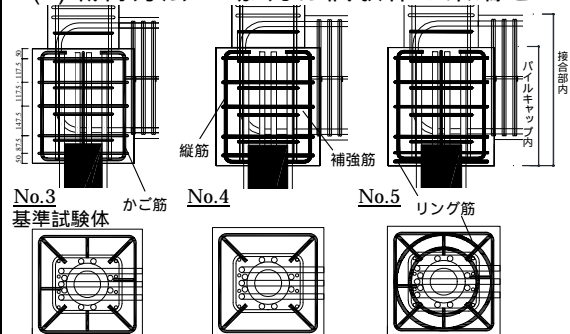


図1 かご筋型による配筋図

ン・ローラー支持、柱頭・杭脚をピン支持とし、柱頭に一定の圧縮軸力を導入後、水平力を与え正負交番繰返し载荷を行った。軸力は松本³⁾、大和久⁴⁾の実験と比較するため軸力比 0.32 で一定とし、水平力は柱頭位置での層間変形角により変位制御とした。接合部内を基礎梁上端からパイルキャップの下端までとし、パイルキャップ内をパイルキャップの上端から下端までとした。

表 1 試験体諸元及びコンクリートの力学特性

試験体名	No.3(基準試験体)	No.4	No.5
軸力	850kN(軸力比0.32)	890kN(軸力比0.32)	970kN(軸力比0.32)
圧縮強度	25.4N/mm ²	26.6N/mm ²	29.0N/mm ²
ヤング係数(×10 ⁴ N/mm ²)	2.40	2.36	2.40
引張強度	1.77N/mm ²	2.37N/mm ²	2.44N/mm ²
引張変形係数	1819(μ)	2123(μ)	2153(μ)
高さ×幅×厚さ	570mm×500mm×500mm		
縦筋	4-D10(SD295A), 4-D13(SD295A)	4-D13(SD295A)	4-D10(SD295A), 4-D13(SD295A)
横補強筋	5-D10(SD295A)	4-D13(SD295A)	5-D13(SD295A)
リング筋			2-D13(SD295A)
せん断補強筋比	0.26%		0.37%

表 2 鋼材の力学特性

鋼材	使用箇所	降伏強度	引張強度	降伏ひずみ	ヤング係数
		N/mm ²	N/mm ²	μ	N/mm ²
D10(SD295A)	パイルキャップ	361.5	492.0	2072	174800
D13(SD295A)	パイルキャップ	355.9	515.5	2221	175500
D13(SD685)	柱	766.1	969.0	4312	184500
D22(USD980)	基礎梁、アンカー筋	1015.4	1125.3	7273	192600
U9.0ウルボン	柱	1312.5	1393.8	9263	180700

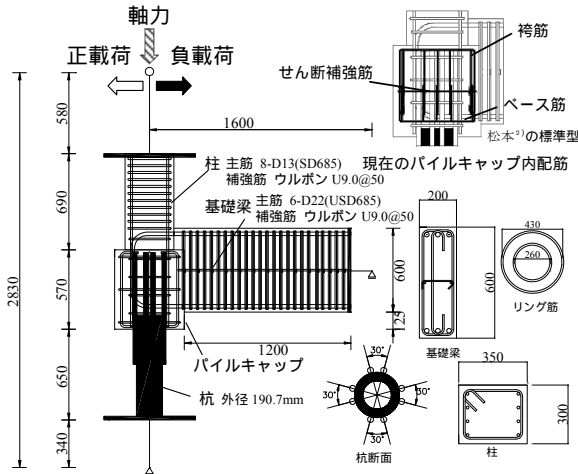


図 2 試験体概要

4. 研究成果

(1) 層せん断力(Q) - 層間変形角(R)関係:

図 3 に層せん断力(Q) - 層間変形角(R)関係を示す。試験体 No.3 では正載荷時の方が負載荷時より最大耐力が 20%程度大きくなっているが試験体 No.4, No.5 では正載荷時と負載荷時の最大耐力の差は 7% ~ 10%程度まで減少した。パイルキャップのせん断補強筋比を増やすことで負載荷時の耐力が正載荷時の耐力と比べ大幅に上昇したため載荷方向における耐力差は減少する結果となった。また、全試験体で最大耐力以降の耐力低下が正載荷時では緩やかに低下するが、負載荷時には急激に低下した。最大耐力において正載荷時の方が負載荷時に比べて大きくなる事が確認され、これは接合部内に発生する圧縮ストラット抵抗機構が異なりパイルキャップのひび割れ状況に違いが生じたためだと考えられる。

(2) リング筋効果による杭の変形: 図 4 に杭の層せん断力(Q)-変位(δ)関係、写真 1 に最

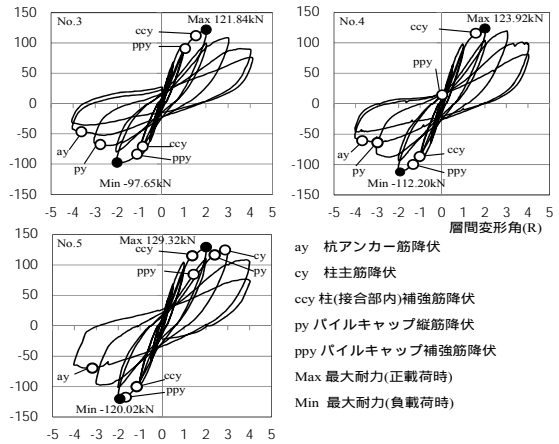


図 3 層せん断力(Q) - 層間変形角(R)関係

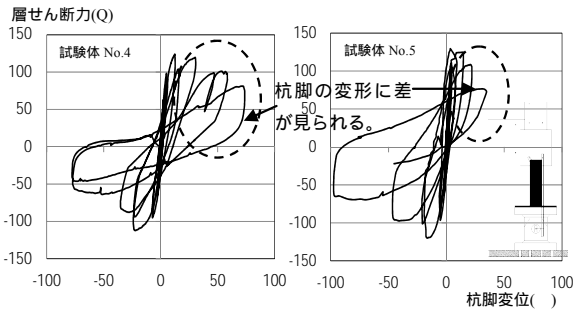
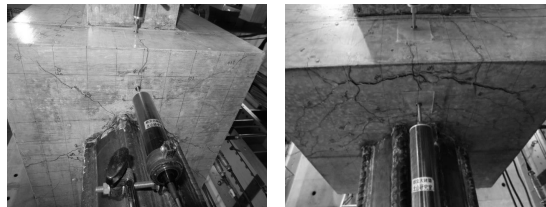
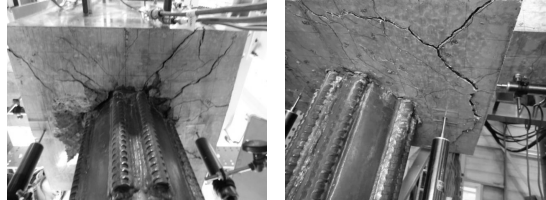


図 4 層せん断力(Q) - 杭脚変位(δ)関係

大耐力時、最終変形時のパイルキャップ底面の破壊状況を示す。試験体 No.4 は試験体 No.5 に比べて正載荷時の変形が大きくなり、このことは試験体 No.5 の杭頭部周辺にリング筋を配筋したことで杭頭周辺が拘束されたことが影響した。試験体 No.5 は試験体 No.4 より、最大耐力時(層間変形角 R=2%時)に正載荷時で 72%、負載荷時には 27%変位が抑えられており、最終変形時(層間変形角 R=4%時)には正載荷時で 62%変位が小さく、負載荷時には 27%変位が大きい結果となった。最大耐力時では、パイルキャップ底面にリング筋を配筋した試験体 No.5 で杭の変位を小さく抑えられていることが確認されたが、パイルキャップ底面のひび割れが顕著となった最終変形時では、リング筋の効果が見られず、変位が大きくなった。



試験体 No.4 最大耐力時(層間変形角 2%) 試験体 No.5



試験体 No.4 最終変形時(層間変形角 4%) 試験体 No.5
写真 1 パイルキャップ底面の破壊状況

(3)試験体の破壊性状： 全試験体で梁主筋の降伏は見られず、最終変形時の層間変形角 $R = 3 \sim 4\%$ 時において柱主筋、パイルキャップ縦筋、杭アンカー筋の降伏が見られた。破壊形式は、正載荷時、負載荷時ともに層間変形角 $R = 2\%$ 時に最大耐力となり、同時にパイルキャップせん断補強筋、柱(接合部内)補強筋が降伏したことからパイルキャップのせん断破壊とした。

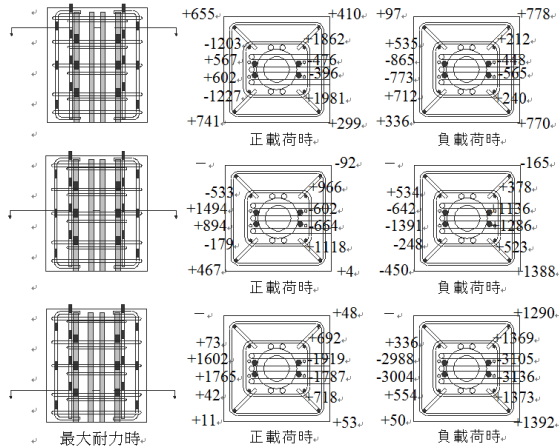


図5 パイルキャップ内縦筋の歪み分布(試験体 No.4)

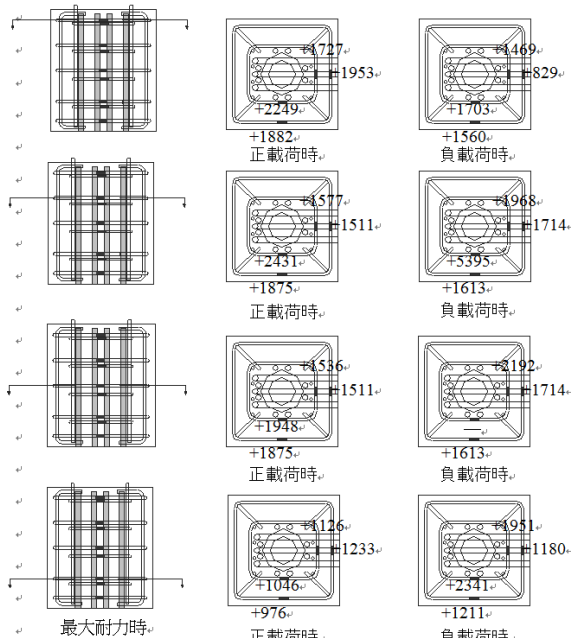


図6 パイルキャップ内補強筋の歪み分布(試験体 No.4)

(4)パイルキャップ内縦筋の歪み分布： 図5にパイルキャップ内縦筋の歪み分布(試験体 No.4)を、図6にパイルキャップ内補強筋の歪み分布(試験体 No.4)を示す。パイルキャップ内縦筋において、正載荷時、負載荷時ともにパイルキャップ下部における内部の鉄筋(アンカー筋)の歪みが、外部の鉄筋(パイルキャップ縦筋)に比べて顕著であった。また、パイルキャップ内補強筋においても内部の鉄筋(柱接合部内補強筋)の歪みが、外部の鉄筋(パイルキャップ補強筋)の歪みに比べて顕著であっ

た。これらはパイルキャップ内部の応力が内側に集中していることから生じたと考えられる。

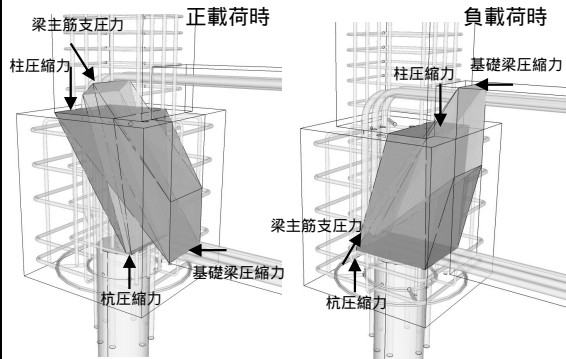


図7 パイルキャップ内応力伝達状況(試験体 No.5)

(5)圧縮ストラット機構の検討(予想される抵抗機構)： 正載荷時にはパイルキャップ内のストラット抵抗機構が基礎梁-柱方向と杭-柱方向の2方向に形成され、柱の圧縮力が分散する。負載荷時にはストラット抵抗機構が重なり1方向に形成され、柱と基礎梁の圧縮力が異なる。また、基礎梁と柱の圧縮力位置が重なるため、正負載荷時に最大耐力に差異が生じると考えられる。

(6)圧縮ストラット機構の検討(応力伝達状況)： 図7に試験体 No.5におけるパイルキャップ内応力伝達状況を示す。各種応力、圧縮域深さは主筋の歪みから部材の寸法を考慮して算出した。パイルキャップ内の柱補強筋が、正載荷時にはパイルキャップ上端付近、負載荷時には杭付近で最大耐力時に降伏歪みに達しているのに対し、パイルキャップせん断補強筋では降伏歪みに達しているが柱補強筋の歪みに比べて小さい。このことから、ストラットが重なっている場所でより圧縮合力を受けていること、奥行方向でストラット抵抗機構が異なるということが考えられ、応力伝達状況にも対応していることがわか

$$V_{ju} = T - V_c \quad \dots (1)$$

T：基礎梁主筋引張力
V_c：柱せん断力

$${}_j V_{ju} = \kappa \phi F_j b_j D_j \quad \dots (2)$$

κ ：接合部の形状による係数 = 0.7
 ϕ ：直交梁有無による補正係数 = 0.85
 b_j ：接合部有効幅 = 262mm
 D_j ：90度折曲げ筋水平投影長さ = 300.5mm
 F_j ：接合部のせん断強度の基準値 = $0.8\sigma_B^{0.7}$

$$P_{jw} = \frac{A_{jw}}{b_c \cdot j} \quad \dots (3)$$

j：梁の上下主筋の重心間距離(mm)
b_c：柱幅(mm)
 ΣA_{jw} ：区間内の柱とパイルキャップの補強筋総断面積(mm²)
区間は梁の上下主筋の距離とした。

接合部せん断補強筋比 p_{jw} は靱性保証型耐震設計指針・同解説 1999,pp268 ~ pp270 を参考にし算出した。

る。

(7) パイルキャップせん断強度式の評価：図8にパイルキャップせん断強度 接合部補強筋比関係を示す。図中には本実験結果と松本³⁾、大和久⁴⁾の実験による試験体も合わせて示す。パイルキャップせん断強度 V_{ju} は梁危険断面位置の歪みから算出した。全試験体でコンクリート強度が異なるのでパイルキャップせん断強度 V_{ju} は靱性保証型 min 式で除した値を示す。正載荷時では接合部補強筋比を上げたことによる影響は小さいが、負載荷時では接合部補強筋比を上げると耐力が大きく上がる結果となり、負載荷時の層せん断力が増加したこととつながる。今後補強筋の効果を定量的に評価することを必要と考える。

表3 パイルキャップせん断強度実験結果一覧

せん断補強筋比検討	正載荷時		負載荷時		接合部せん断補強筋比 P_{jw} [%]
	接合部入力せん断力 V_{ju} [kN]	靱性保証型 min 式 jV_{ju} [kN]	接合部入力せん断力 V_{ju} [kN]	靱性保証型 min 式 jV_{ju} [kN]	
	2013	No.4 479.8	371.6	459.7	
	No.5 490.3	394.8	463.2	394.8	0.37
	No.1 431.6	360.2	312.1	360.2	0.23
2012大和久	No.2 430.1	360.2	334.1	360.2	0.23
	No.3 458.5	360.2	398.3	360.2	0.27
2010松本	かご筋型 487.1	414.8	390.3	414.8	0.27
	標準型 547.7	414.8	434.4	414.8	0.19
	大径杭型 575.4	502.3	502.7	502.3	0.19
	縮小型 379.1	336.2	413.8	336.2	0.16

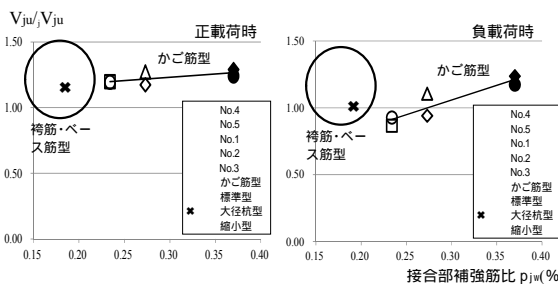


図8 パイルキャップせん断強度 - 接合部補強筋比

(8) 結論：本研究で以下の通りの知見が得られた。

- ・パイルキャップのせん断補強筋比を上げたことで負載荷時の最大耐力が大きく増加し、正載荷時と負載荷時の最大耐力差が試験体 No.3 では 20%程度であったが試験体 No.4、No.5 では 7% ~ 10%程度まで減少した。
- ・杭頭部周辺にリング筋を配筋した試験体 No.5 は最大耐力時(層間変形角 $R=2\%$ 時)までは杭の変形を抑えることができたが、最終変形時(層間変形角 $R=4\%$ 時)にはパイルキャップ底面のひび割れがリング筋状に発生したため、杭の変形が大きくなった。
- ・パイルキャップ内縦筋、補強筋の歪み分布からパイルキャップ内部の鉄筋(アンカー筋、柱補強筋)の歪みが、パイルキャップ外部の鉄筋(パイルキャップ縦筋、補強筋)の歪みと比べて大きくなり、梁主筋による応力が大きく影響した。
- ・パイルキャップ内応力伝達機構から、加力方向によりストラット抵抗機構の形成が異なることで、最大耐力に差異が生じたと考えられる。またパイルキャップ内の歪みの結果

から、パイルキャップの奥行方向でストラットの応力が異なると考えられる。

・負載荷時では接合部補強筋比の影響が大きいことが確認でき、正載荷時と負載荷時では応力のメカニズムが異なることが確認できた。

(9) 参考文献：

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，2001
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2002
- 3) 松本玄徳ほか：軸力を受けるト形部分架構におけるパイルキャップの耐震性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.445-446，2010.9
- 4) 大和久貴義ほか：ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究(その1，その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.695-698，2013.9

【謝辞】首都大学東京の大型構造物実験棟を使用させて頂きました。本研究において、首都大学東京の北山和宏教授をはじめ、多くの方々の方々の多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

大和久貴義，上坂宜嗣，岸田慎司，林 静雄，ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に及ぼす基礎梁位置の影響，査読有り，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.260 -264，2013.7

〔学会発表〕(計 4 件)

岸田慎司，小原拓，ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究(その3リング筋による影響)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造-，pp. -，2014.9.12 ~ 14，神戸大学 (発表予定)

小原拓，岸田慎司，ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究(その4パイルキャップのせん断強度式の検討)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造-，pp. -，2014.9.12 ~ 14，神戸大学 (発表予定)

富山善太，大和久貴義，上坂宜嗣，岸田慎司，林 静雄，ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究(その1実験概要と結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造-，pp.695-696，2013.8.30 ~ 9.1，北海道大学

大和久貴義，富山善太，上坂宜嗣，岸田慎司，林 静雄，ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究(その2実験結果と考察)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造-

pp.697-698, 2013.8.30 ~ 9.1, 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸田 慎司 (KISHIDA Shinji)

芝浦工業大学・工学部建築学科・准教授

研究者番号：10322348