

論文 遠心成形PCによるラーメン構造の実験的研究

林 貞夫*1・徐 光*2・山中 憲行*3

要旨：柱、梁ともに遠心力成形したプレストレストコンクリート(PC)部材を用いたラーメン構造の研究である。柱梁接合部は鋳鋼で造った接合金物を用いた。接合金物と柱、梁PC部材との接合は補強リングによる無溶接、無ボルトの接合である。この工法により2階建てのラーメン構造を造り水平加力実験を行った。ラーメンは建築基準法施工令で規定した2.4倍の地震力に対し、接合部、接合金物は損傷が全く無く、層間変形角は1/60程度である。除荷後の変形はほぼゼロとなり、復元力特性は原点指向性が強く残留変形の少ない構造である。接合部の曲げ破壊実験では、接合部に損傷は無くPC部材が曲げ破壊している。

キーワード：遠心成形PC, PC構造, ラーメン構造, 実大実験

1. はじめに

本論文でのPC部材は遠心力成形したプレストレストコンクリートであるので、広義のPCに対し、プレキャストコンクリートでプレストレスが導入されたものを本論文ではPCと呼ぶ。PCは力学的には非常に優れた構造材料であるが、建築構造物にはあまり利用されていない。現場施工の鉄筋コンクリートと比較すると、PCは高価なこと、また、接合部に対する信頼性が欠ける恐れがあること等がその原因と思われる。

PC構造が鉄骨部材のように規格化され、信頼性の高い接合方法があれば、PCの持つ利点から広く普及すると考えられる。

そこで、PHC杭の製法と無溶接継手杭での接合方法を基に低層集合住宅の構造を主用途としたPC部材によるラーメン構造を開発した。この構造のPC部材は遠心力で成形し、オートクレーブ養生で短時間で高品質、高強度の部材であること。柱と梁の接合部は鋳鋼製の接合金物を介して接合し、信頼性が高いこと。この2点の特徴である。

本論文では2階建ての構造を想定して、2層2スパンのラーメンを作製し水平加力実験を行っ

た。さらに、柱、梁部材および接合部の曲げ破壊実験を行った。それらの結果を報告する。

2. 構造概要

2.1 柱、梁部材

柱断面は図-1に示すように400×400mmの正方形で、内部は遠心力成形により直径285mmの円形の空洞になっている。両端はPC鋼棒の定着端板と接合端子を兼ねた鋳鋼によるフランジ付き鋼管になっている(写真-1)。フランジ部は鋼棒の定着端板であり、鋼管部分が接合端子である。

梁断面は図-1に示すように300×300mmの正方形で、内部は直径185mmの円形の空洞になっている。両端は柱と同様の鋳鋼製接合端子が付いている。

接合端子を含めた部材の長さは、柱では2640mm、梁では2540mmである。接合端子の長さは、両部材とも130mmである。

両部材とも遠心力成形し、オートクレーブ養生で製作している。コンクリートの設計圧縮強度は80N/mm²である。遠心成形したコンクリートの圧縮試験結果は、圧縮強度は87.1N/mm²、ヤ

*1 前橋工科大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 ジェーエスディー

*3 前橋工科大学助手 工学部建築学科 工修 (正会員)

ング係数は40.6kN/mm²である。鋼材の材料特性を表-1に示した。コンクリート標準示方書²⁾に基づいて求めた柱、梁の断面性能を表-2に示した。なお、PC鋼棒のヤング係数比は4.93(=200/40.6)とした。

2.2 接合金物

柱と梁の剛接合として図-2に示すような接合金物を用いた。概略は次の通りである。

接合する部材端部の鋼材には溝が設けてあり、この溝に嵌める内リングによって接合する。この内リングは二分割され、脱落を防止するため外リングを被せる。内リングは2つの部材の溝と溝を繋ぐかすがいの役割をしている。引張力は、一方の溝から内リングを介して他方の溝に力を伝達する。テーパー付き外リングを油圧で嵌め込むことにより隙間はゼロとなり、全てが密着する機構であり、充填材や接着剤は全く使用しない。この接合方法は円形断面に適している。

ラーメン構造の標準的な接点は上下階の柱、

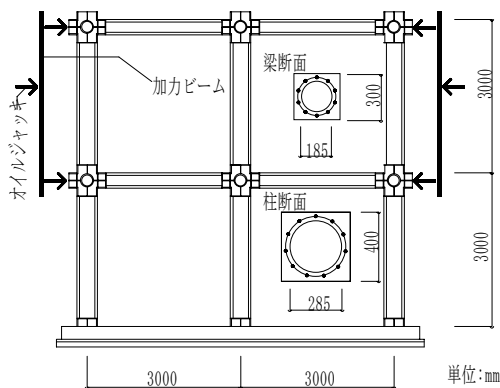


図-1 実験用ラーメンおよび部材断面

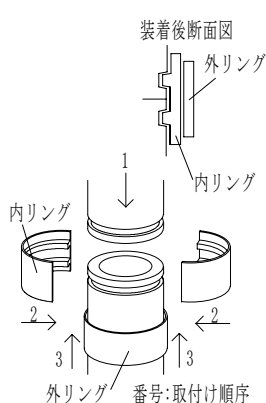


図-2 部材接合部



写真-1 接合金物

左右の梁、これに直交する方向の梁の合計6本の部材が取り付く。そこで、写真-1に示す接合金物を鋳鋼で製作した。接合金物はPC部材端部と同様の接合端子が付いている。この接合端子に柱、梁部材を接合することによってラーメン構造を造った。接合金物の高さは360mm、幅および奥行きは460mmである。

2.3 実験用ラーメン

前述した柱、梁部材、接合金物を用いて図-1に示す実験用ラーメンを造った。ラーメンは2階建て2スパンの田の字型平面フレームで、各階高さは3000mm、各スパンは3000mmである。

このラーメンに想定した建物重量は各階32.4tで、建築基準法施行令による地震層せん断力を算定すると、2階は73.7kN、1階は127.0kNである。この地震力を基に、ラーメンの変形特性、PC部材の強度、接合金物の強度等について実験によって検討を行った。

本構造は短時間で施工できることが特徴であり、実験フレームの組み立てにおいて接合時間の調査を行った。その結果、1箇所数分の短時間で接合が完了している。

3. 実験結果

実験は、ラーメン構造の水平加力実験、柱梁PC部材の曲げ実験、柱、梁接合金物への曲げ実

表-1 鋼材の材料特性

材料名	降伏強度	引張強度	ヤング係数
9.0φ (D種SBPDN)	1466 N/mm ² *	1478 N/mm ²	200 KN/mm ²
10.7φ (D種SBPDN)	1442 N/mm ² *	1479 N/mm ²	200 KN/mm ²
鋳鋼 (SCW480)	384 N/mm ²	588 N/mm ²	206 KN/mm ²

* 0.2%強度のとき

表-2 柱及び梁の断面性能

断面	400×400mm	300×300mm
内径	φ 285mm	φ 185mm
PC鋼棒	11-10.7φ	10-9.0φ
プレストレス	9.1N/mm ²	9.1N/mm ²
コンクリート断面積	962.1cm ²	631.2cm ²
コンクリート換算断面積	1010.8cm ²	662.7cm ²
換算断面2次モーメント	187000cm ⁴	63700cm ⁴
許容曲げモーメント	85.1kN・m	38.6kN・m
ひび割れ発生モーメント	117.4kN・m	54.9kN・m
終局曲げモーメント	219.1kN・m	102.1kN・m
端部鋳鋼断面、鋼管	φ 312×20.5	φ 211×19.5
鋼管断面積	187.73cm ²	177.31cm ²
鋼管断面2次モーメント	20038.8cm ⁴	5433.5cm ⁴

験、柱接合金物への引張実験を行った。実験は、最初にラーメン構造の実験を行い、次に、実験後のラーメンから試験体を採取し、すなわち一度利用した部材を用いて曲げ実験および引張実験を行った。実際の実験順序とは逆であるが、まず、柱及び梁の曲げ実験、接合部の曲げ実験および引張実験の結果について述べ、次にラーメン構造の実験結果について述べる。

3.1 柱、梁PC部材の曲げ実験

ラーメン構造に使用した柱、梁の一部を用いて図-3に示す曲げ実験を行った。

図-4に柱及び梁のスパン中央の荷重-変形関係を示した。図中の計算値は、PC部材のヤング係数 $E_c=40.6\text{kN/mm}^2$ および表-1に示した断面性能によって求めた。

柱のひび割れ発生荷重の実験値は303kNで、最大耐力518kNである。梁のひび割れ発生荷重の実験値は150kNで、最大耐力237kNである。

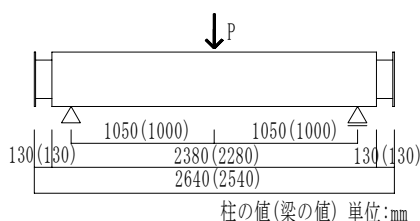


図-3 柱及び梁の曲げ実験

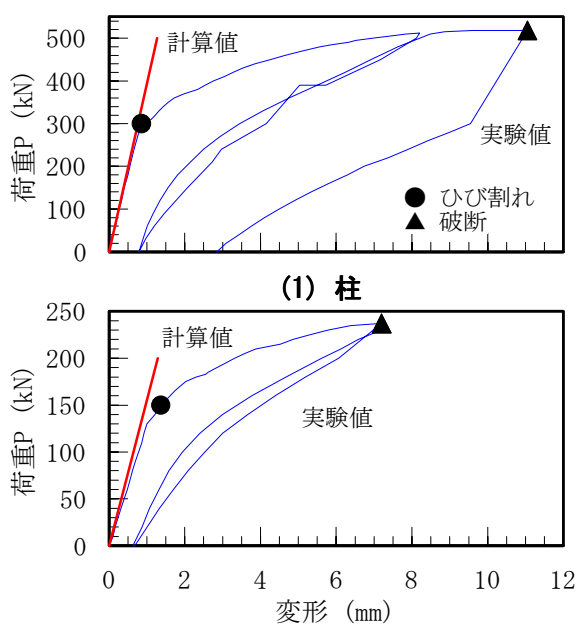


図-4 荷重-変形関係
(柱及び梁の曲げ実験)

実験結果から求めた柱の弾性限荷重は300kNである。その時の変形は、実験値では0.86mm、計算値では0.76mmである。梁の弾性限荷重は実験結果から130kNである。その時の変形は、実験値では1.00mm、計算値では0.84mmである。両部材とも、実験値と計算値の変形はほぼ一致していることがわかる。

3.2 接合部の曲げ実験、引張実験

接合部に最大モーメントが生じるような単純梁形式の曲げ実験を行い、接合金物の曲げ耐力を調べた。図-5に接合部の曲げ実験を模式的に示した。測定は、載荷点のたわみ、定着端板から100mm離れた点のコンクリートのひずみ、接合部外リングの円周方向のひずみについて行った。

図-6に、接合部の曲げ実験の載荷点の荷重-変形関係を示した。図中のA(計算値)は、PC部材、鋳鋼部分（接続部、剛域、接続部）、PC部材の5部材が剛接合と仮定し、断面性能は表-2の

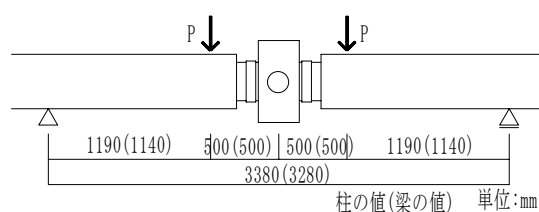


図-5 接合部の曲げ実験

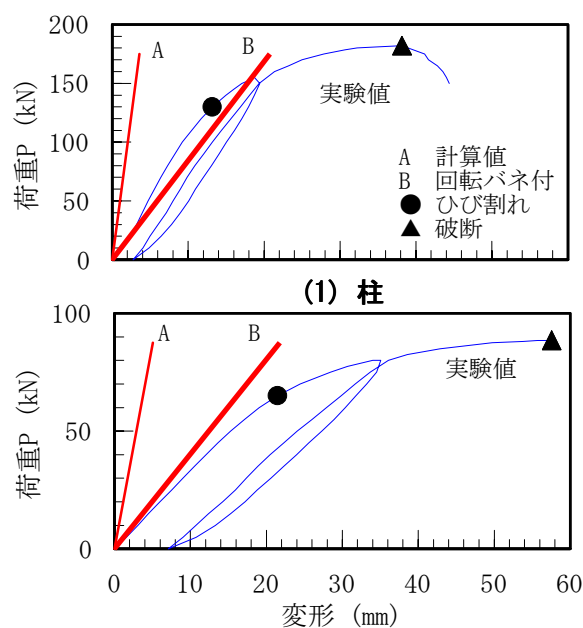


図-6 荷重-変形関係
(接合部の曲げ実験)

値とし、剛域部分は接合部鉄鋼の5倍の断面性能があるとして求めた変形である。

柱部材を用いて、PC部材、PC定着部、接合部の引張耐力を実験で確かめた。引張実験の概略を図-7に示した。測定は接合部の変形量、すなわち図-7に示した接合金物と鋼棒定着端版の間の変形を測定した。図-8に、引張実験の荷重-接合部の変形関係を示した。引張荷重が1400kNのときコンクリート部分のPC鋼棒が破断した。破断状況を写真-2に示した。接合部に損傷は最後まで起こらなかった。

3.3 ラーメン構造の水平加力実験

図-1に示したラーメン構造に水平加力実験を行った。写真-3は実験用ラーメンを載荷装置に設置した写真である。PC柱の柱脚部接合端子の

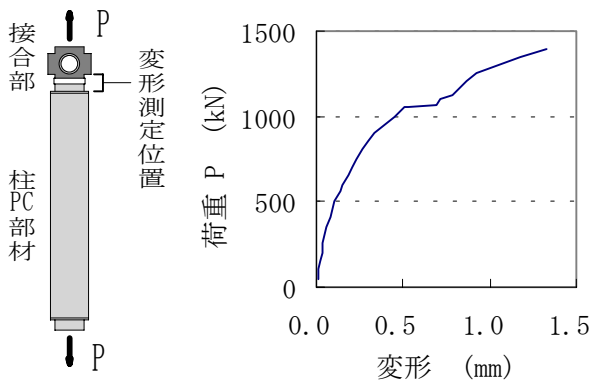


図-7 接合部の引張実験

図-8 荷重-変形関係 (接合部の引張実験)



写真-2 引張実験の破壊状況



写真-3 載荷装置と実験用ラーメン

鉄鋼を載荷装置のフレームに溶接で取り付け固定した。中央の柱が180kN、左右の柱が90kNの圧縮軸力になるようにPC鋼棒によって加力した。2階、3階の水平力載荷点にはロードセルを設置し、実際に作用した荷重を測定している。計測は、2階及び3階の水平変位、各PC部材の定着端板から100mmの位置のコンクリートのひずみ、PC端部接合金物のひずみ、接合部外リングのひずみについて行った。

図-9に示す荷重履歴で実験を行った。この荷重は1階、2階の層せん断力を表しており、最大層せん断力は1階が301kN、2階が143kNである。この荷重において、PC部材、接合金物に損傷は無いが、柱脚固定とした溶接部に亀裂が発生したことから実験を中止した。ラーメンは、さら

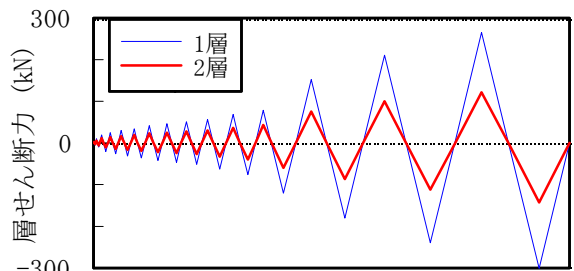


図-9 荷重履歴

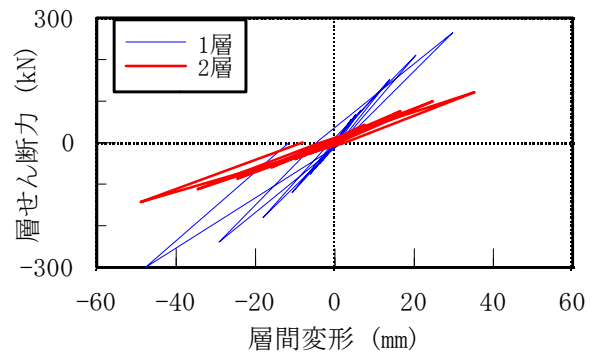


図-10 層せん断力-層間変形関係

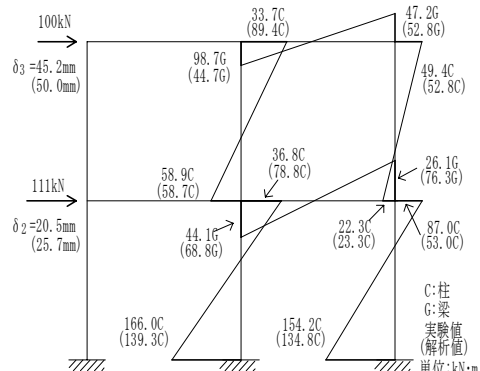


図-11 曲げモーメント図

に荷重を増加させることが可能であった。

実験結果の層せん断力 - 層間変形の関係を **図-10** に示す。1階の層せん断力が 211kN のときの曲げモーメント図を **図-11** に示す。図はひずみ測定値から求めた曲げモーメントであり、 δ_2 、 δ_3 は 2 階及び 3 階の変形測定値である。カッコ内の値は応力解析の結果である。

4. 考察

4.1 PC 部材, 接合金物

各実験の最大荷重時における支点と載荷点の傾きは、柱及び梁の曲げ実験では柱が 1.00%、梁が 0.72% であるが、接合部の曲げ実験では柱が 2.82%、梁が 4.56% までの傾きに対して耐力を保持している。全ての実験において、破壊は PC 鋼棒の破断である。また、接合部の実験では、接合部、接合金物は損傷を全く受けていない。柱接合部の引張試験の結果においても、破壊は PC 部分の鋼棒で発生し、PC 定着部、接合金物および接合部は損傷が全く無かった。引張実験で引張力 800kN 程度まで接合リングの円周方向の応力度はほぼゼロであり、1400kN の荷重で、リング応力度は 120N/mm^2 であり、引張力に対しては充分安全である。

柱及び梁の曲げ実験の弾性限荷重時の変形は計算値と実験値がほぼ一致し、ヤング係数および等価断面性能の評価は妥当である。一方、接合部の実験では、実験値は計算値の 5 倍程度大きな変形になっている。その変形は、除荷によりほぼゼロになる弾性的な変形である。計算値は PC 部材および鋳鋼部分の曲げ剛性によって変化する。柱及び梁の曲げ剛性は単体実験から妥当なものである。鋳鋼部分の形状は複雑であるため曲げ剛性の正確な評価は困難であるが、鋳鋼部分の曲げ剛性を変えるだけでは実験値と計算値を近づけることは困難である。実験結果からは、柱及び梁共に接合部の曲げ剛性が低下しているのは明らかであり、以上とは別の理由が考えられる。理由として、リング接合部または鋼棒定着端板によるものが挙げられる。リング

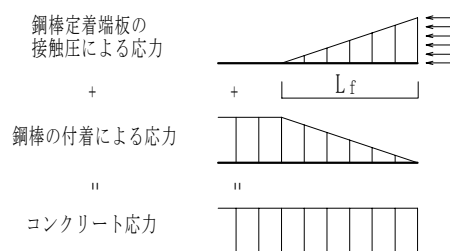


図-12 PC 部材端部のプレストレスの伝達

接合部による剛性低下は、後述のラーメン構造の考察で示すが、無いと判断できる。そこで、鋼棒定着端板によるものとして、コンクリートと鋼棒定着端板の間に回転バネがあると仮定する。回転バネの発生因子として、PC 鋼棒の付着劣化、PC 鋼棒の局所的な伸び等が考えられる。付着劣化は大ひずみで発生するが、異形鋼棒の付着劣化は少ない^{3), 4)}といわれている。

PC 鋼棒の局所的な伸びとして次の様なモデルを考えた。PC 部材端部のコンクリートへのプレストレスの伝達機構として、**図-12** に示すようなコンクリートの応力は鋼棒定着端板からの接触圧によって伝わるものと鋼棒の付着力によって伝わる応力の和である、と仮定する。鋼棒定着端板に張力が作用すれば接触圧が減少する。その影響範囲を L_f とすれば、この間の鋼棒は緊張力が変化し鋼棒が伸びる。または、定着端板からの応力が減少した分だけコンクリートは伸びることになる。この伸びと鋼棒の伸びは同じ現象であり弾性的に生じる。この伸びにより定着端板が回転し、回転バネを形成する。鋼棒に与えた張力を鋼棒の付着力のみでコンクリートの伝えられる長さを L_f とする。異形鋼棒の付着強度をコンクリート示方書²⁾ から 5.2N/mm^2 として L_f を求めると、柱は 44cm、梁は 39cm である。ここで、この L_f の範囲に三角形分布の応力を仮定し、鋼管構造設計施工指針・同解説⁵⁾ により回転バネを求めてみる。その結果、回転バネは、柱では $1780\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 、梁では $737\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ である。この回転バネを「計算値回転バネ」と定義する。一方、接合部の曲げ実験から求めた回転バネを「実験値回転バネ」と定義する。その値は、柱では $2580\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 、梁では $599\text{ kN}\cdot$

m/radである。計算値回転バネを用いて曲げ実験の変形を求めた結果を図-6にB(回転バネ付)として示した。実験値回転バネを用いれば実験結果に一致させることは可能であるが、計算値回転バネでも実験結果を推定することは十分可能である。

4.2 ラーメン構造

遠心成形PCラーメンは、実験結果から300kNの層せん断力に耐えられ、除荷後の変形はほぼゼロとなり、通常のPC構造と同様の傾向がみられる。

PC部材、鋳鋼部分の曲げ剛性のみで回転バネを用いずに応力解析を行うと、変形量は実験値の20%以下である。回転バネを用いて解析する必要があるということがわかる。

前述の、回転バネはリング接合部に起因しない、とした理由は次の通りである。

回転バネがリング接合部にあるとした応力解析では、1階柱脚の固定に溶接を用いているので1階柱脚は回転バネが無い、として解析した。その結果、変形量は実験値の50%以下で、回転バネの原因はリング接合部では無いと考えられる。次に、PC部材の鋼棒定着端板に起因するとした、前述の「計算値回転バネ」をPC部材端に設けて応力解析をした結果を図-11中に計算値として示した。実験値の変形量は計算値の80%~90%で、ほぼ一致している。「実験値回転バネ」を用いれば、当然さらに良く合う。

以上、回転バネの剛性はPC部材端部のPC鋼棒の局所的な伸びと考えられる。このことは、局所的な伸びを変えることができればバネ剛性は制御できる、といえる。

建築基準法施行令で規定する地震力の2倍以上の水平力を受けても、接合金物、補強リングおよびPC部材は安全である。ただし、柱及び梁部材は、遠心成形のPC部材断面が正方形のためコーナー部分が少し剥落した。また、鋼棒定着端板が円形でありコンクリート断面が正方形のため、部材端部コーナーに亀裂が発生した。これらの損傷は、構造的には問題が全く無いと考

えられる。本構造は接合リングを取り外すことによって、PC部材を破壊することなく解体でき、PC部材の再利用が可能である。

5. まとめ

遠心成形PC部材によるラーメン構造の復元力特性は、大きな層間変形が生じても荷重除荷により変形はゼロに戻るという原点指向型のラーメンである。柱梁剛接合のために開発した鋳鋼接合金物は建築基準法施行令で規定された2倍以上の地震力に耐えられる。

PC部材の鋼棒定着端板とコンクリートの応力の伝達機構の特性から、この部分に回転バネが発生する。この回転バネによってPC部材の見かけの曲げ剛性は非常に小さくなる。本ラーメン構造の応力解析は回転バネを考慮する必要がある。回転バネの剛性はPC鋼棒の緊張力とコンクリートの付着強度、PC鋼棒の径および本数、定着端板の寸法から求めることができる。

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重な助言を戴きましたジェーエスディー伊藤祐子氏、実験でご協力戴いた大同コンクリート工業株式会社、ジェーエスディー(元前橋工科大学 大学生)岡村良二君に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築センター編集：無溶接継手杭，'99 新建築技術情報ガイドPart4, p.66, 1999
- 2) 土木学会編：コンクリート標準示方書, 1996.6
- 3) 高松圭, 加藤博人, 木内康博：PC鋼材とコンクリートの付着特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1051-1052, 1998.9
- 4) 阿波野昌幸, 中塚 侑：異形PC鋼棒圧着型梁の荷重-変形関係の提案マクロモデルによる推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.957-958, 2000.9
- 5) 日本建築学会編：鋼管構造設計施工指針・同解説, 1990.1