

鉄筋コンクリート造異形柱の構造特性把握・設計法構築
のための曲げ応力に対する構造耐力・破壊特性に関する研究

Bendingstress in Variant Column of Reinforced-Concretre of Building Confirmation

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部 北方建築総合研究所

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

鉄筋コンクリート造異形柱の構造特性把握・設計法構築のための曲げ応力
に対する構造耐力・破壊特性に関する研究

Bendingstress inVariant Column of Reinforced-Concretre of Building Confirmation

本間 裕二¹⁾、千葉 隆史¹⁾、森松 信雄²⁾、宮内 淳一³⁾、植松 武是⁴⁾

Yuji Honma*, Takafumi Chiba *, Nobuo Morimatsu*, Junichi Miyauchi **, Takeyoshi Uematsu ***

キーワード : 異形柱、鉄筋コンクリート、ねじれ、圧壊、付着割裂破壊

Keywords : Variant Column, Reinforced-Concretre, Torsion, Crushing, Bond Sprit Failure

1. 研究概要

1) 研究の背景

不整形な土地の有効利用、狭小斜め敷地における日影規制対応などから、鉄筋コンクリート造の中高層マンションや商用施設・事務所建築などにおいて、柱断面が不整形な異形柱が多用される傾向にある。しかしながら、異形柱の設計法は示されておらず、構造耐力に関する技術資料も整備されておらず、等価な正方形断面に置き換えるなど、個別案件毎に設計技術者の判断により設計されているが、共有できる知見・実験データなどが乏しい。

2) 研究の目的

新築及び既存の建築物において多用されている鉄筋コンクリート造異形柱の構造耐力評価法・設計法の構築を目指し、基本的な構造特性である曲げ応力に対する耐力特性を明らかにする。

2. 研究内容

1) 異形柱の傾向分析 (H26 年度)

- ・ねらい: 対象とする異形柱の断面形状・配筋のデータ分析及びモデル化における設計手法のなどを調査・分析を行う。
- ・試験項目等: 異形柱の構造仕様に関する情報分析・統計処理

2) 実験計画・実験方法の構築 (H26~28 年度)

- ・ねらい: 異形柱の傾向分析結果に基づき、試設計による試験体の実験計画の策定及び、加力方法、支点支持方法、センサーの設置箇所などを定める。
- ・試験項目等: 異形柱の加力実験計画・予備実験

3) 加力実験の実施と曲げ応力に対する構造耐力・破壊特性の分析 (H27~28 年度)

¹⁾ 構造判定部 主査 ²⁾ 構造判定部 研究主査 ³⁾ 環境研究部 研究職員 ⁴⁾ 林産試験場 主査

* Chief for Structural Safety Judgment Group ** Researcher of Architectural Engineering Group

*** Chief for Forest Products Research Institute

3. 研究成果

- 1) 異形断面の発生割合を H19～H25 までの 6 年間で対象として傾向を分析し、統計資料としてまとめた。(図 1)
- 2) H26～H28 の 3 年間に於いて試験体計 15 体を 3 種類の試験方法から多角的に実験計画を策定し、実験方法を構築、実施した。(図 2)
- 3) 試験体 15 体の曲げ耐力について終局状態まで加力し、面外方向への変形が特定の状態で増加することが確認された。(図 3) また等価な長方形断面との耐力比較では概ね終局曲げ耐力については確保できているとの知見を得た。(図 4)
- 4) 試験体 15 体の破壊特性について終局状態まで加力し、付着割裂破壊や圧壊などのじん性に関する差異(図 5) や、等価な長方形断面と比較した場合のひび割れ発現状態の違い(図 6) について確認することができた。

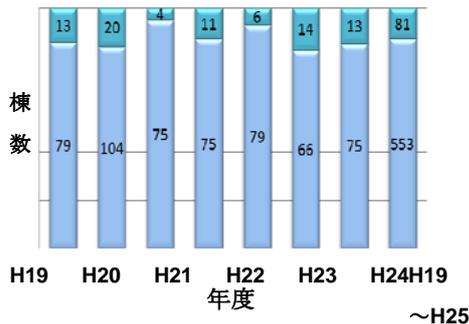


図 1 6 年間に於ける異形柱の統計分析



図 2 平成 27 年度加力試験状況

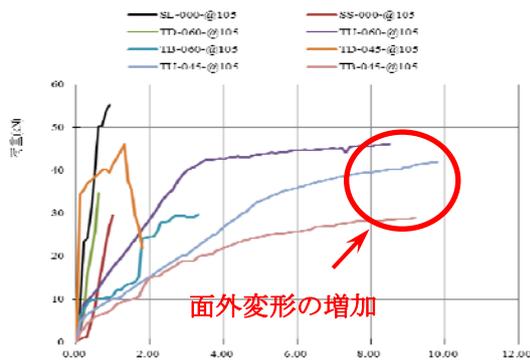


図 3 平成 27 年度加力試験による側面方向の変

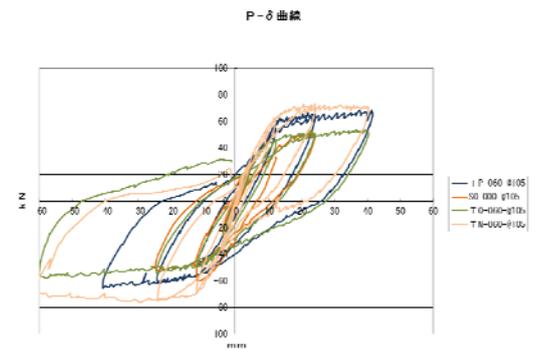


図 4 H 28 年度 RC 異形柱に於ける荷重変形曲



図 5 先端部の圧壊状況



図 6 長方形置換断面とのひび割れ性状の違い

4. 今後の見通し

- ・これまで明らかにならなかった異形柱の曲げ応力に対する基本的な構造特性と構造仕様との関係を明確にすることができる。これにより、異形柱の強度上の問題点や、構造設計・耐力診断時の留意点などを示すことが可能となる。これらの成果は、構造設計技術者に対する技術支援情報として活用できる。
- ・異形柱の終局せん断耐力についてはいまだに解明されていないことから、H29 年度経常研究の中でせん断耐力の推定並びに破壊特性の更なる検証を実施していく。

目 次

| | | |
|-----------|---------------------|-----------|
| 1. | 研究の背景と目的 | 1 |
| | (1) 背景 | 1 |
| | (2) 目的 | 1 |
| | (3) 研究内容 | 2 |
| 2. | 統計分析 | 3 |
| | (1) 調査対象 | 3 |
| | (2) 出現割合 | 3 |
| | (3) 形状の分類 | 3 |
| | (4) 主要材料の分類 | 4 |
| | (5) 配筋量の統計結果 | 5 |
| 3. | 予備試験 | 6 |
| | (1) 試験概要 | 6 |
| | (2) 試験体計画 | 6 |
| | (3) 計測方法 | 7 |
| | (4) 加力試験結果概要 (主変形) | 8 |
| | (5) 加力試験結果概要 (面外変形) | 9 |
| | (6) 歪み度分布 | 9 |
| | (7) ひび割れと最終破壊状況 | 10 |
| 4. | 自由端支持四点曲げ試験 | 12 |
| | (1) 試験概要 | 12 |
| | (2) 試験体計画 | 12 |
| | (3) 計測方法 | 13 |
| | (4) 加力試験結果概要 (主変形) | 14 |
| | (5) 加力試験結果概要 (面外変形) | 14 |
| | (6) 加力試験結果概要 (回転変形) | 15 |
| | (7) 歪み度分布 | 15 |
| | (8) ひび割れと最終破壊状況 | 16 |
| 5. | 端部固定水平加力試験 | 18 |
| | (1) 試験概要 | 18 |
| | (2) 試験体計画 | 19 |
| | (3) 計測方法 | 19 |
| | (4) 加力試験結果概要 (主変形) | 20 |
| | (5) 加力試験結果概要 (面外変形) | 21 |
| | (6) 加力試験結果概要 (回転変形) | 21 |
| | (7) 歪み度分布 | 21 |
| | (8) ひび割れと最終破壊状況 | 22 |

| | | |
|----|-----------------------------------|-------|
| 6. | 曲げ破壊想定時の異形柱における強度上の問題点、設計・診断上の留意点 | 23 |
| | (1) 異形柱における加力時の変形特性 | 23 |
| | (2) 異形柱におけるひび割れ特性と歪み度分布 | 23 |
| | (3) 異形柱における曲げ耐力評価 | 24 |
| | (4) 異形柱におけるじん性評価 | 24 |
| 7. | まとめ | 26 |
| | [参考資料] | |
| A. | 予備試験加力データ及び参考写真 | 資料 1 |
| B. | 自由支持四点曲げ試験加力データ及び参考写真 | 資料 6 |
| C. | 端部固定水平加力試験加力データ及び参考写真 | 資料 12 |

1. 研究の背景と目的

(1) 背景

建築基準法における集団規定によって、建築物は道路斜線、隣地斜線及び日影制限などの建築の制限が有り、建築計画に影響を受ける。なかでも市街地では土地を有効利用し、斜線制限一杯の建築を目指すような中高層建物では、その影響が顕著である。図1-1のような逆日影と呼ばれる手法を用いて、建築可能な空間を導き出した場合、構造上X軸、Y軸が直交しないグリッドを全体または一部に有する建築物の構造体が計画されることは少なくない。

このような場合、グリッド線と斜線制限の交点に建築計画上柱がある場合は、後述するような台形状や五角形状の柱、もしくはもっと不整形な形状の柱が形成されることがある。(交点に柱が無い場合は大梁を曲げるような計画も見られる。)

また長方形断面に非構造体としての増し打ちコンクリートを複合する様な手法で形成されるケースも少なくないが、非構造体部分への定着を有効と考えるか、無効と考えるかなどによっては、構造体部分への折り曲げ定着が余儀なくされる場合などもあり、二次応力の発生や、柱梁接合部の耐力確保において一考を要するようなケース(主筋を柱内で折り曲げ定着する)も見受けられる。

一方現在の構造計算においてはほぼ100%の割合で構造計算ソフト(以下“計算ソフト”)を用いた解析が行われている。これらの計算ソフトでは取り扱える断面形状が長方形か円形に限られている製品ばかりである。(図1-2)

よって台形や五角形などの形状の場合は、等価な断面積の長方形断面に置換する等の慣用法などによる設計が行われており、その他さらなる配慮として剛性を補正したり、かぶり厚などを調整したりするケースが多い。

図1-3にはこれらの異形柱における等価な長方形断面への置換手法について参考例を挙げる。ケース1は主として台形型柱のモデル化に多い1方向型の断面置換であり、ケース2には五角形柱に多い2方向型の断面置換である。ただし五角形柱でも隅切り部分の面積が小さい場合にはケース1の場合も有る。

このような置換方法の妥当性については、破壊性状態で実験などによって確認していることもほとんど見当たらないことから、終局状態までの耐力・じん性については不明確な状態で用いられていることが想定される。

(2) 目的

前述のように構造上の加力方向として想定されているX軸、Y軸に対して、部材断面の主軸が一致せず、さらに断面・配筋形状も非対称な柱や、加力方向に尖鋭な尖端を有する柱の曲げ耐力(またはそのじん性)は、明示されていないのが現状である。本研究では、新築及び既存の建築物において多用されている鉄筋コンクリート造(以下、「RC造」という)の異形断面柱を対象とし、基本的な構造特性である曲げ応力に対する耐力特性やじん性などの構造性能指標を実験的に明らかにしていくことを目的とする。

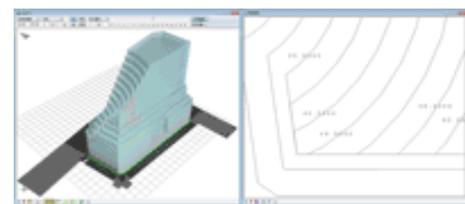


図 1-1 逆日影の例¹⁻¹⁾

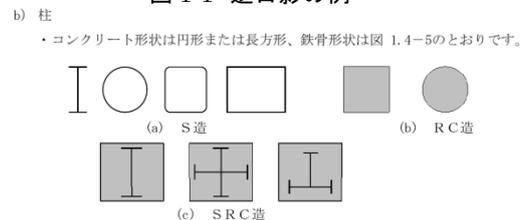


図 1-2 柱形状の適用範囲例¹⁻²⁾

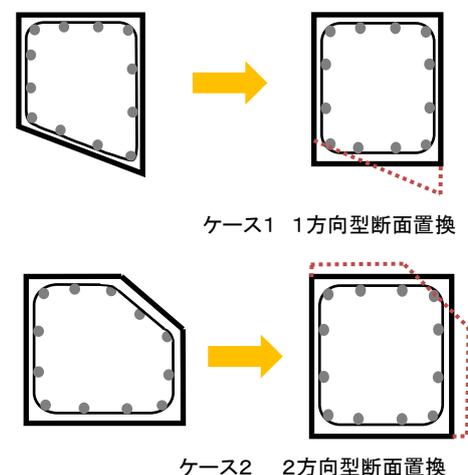


図 1-3 置換方法の例

(3) 研究内容

研究内容の概要を図1-4に示す。本研究ではまず、北海道内の新築建築物における異形柱の発生頻度や特徴に関する傾向と分析を行った。次に、同分析によって得られた道内の建築物における異形柱の活用状況や形状・配筋並びに使用材料の構造仕様を参照して実験パラメーターを確定した。並行して加力方向や支持方法を含む実験方法についての検討を行い、プロトタイプ試験体により所要のデータが得られることの検証を行った。本研究で対象とするRC造の異形断面柱については、構造設計者が参照できる解析データはもとより、構造実験に関しても、加力・計測等の実験方法や考察の蓄積が無いのが現状である。

これらの状況に鑑み、本研究では簡易にRC柱における地震時の応力状態を再現できる加力として大野式加力を予備実験方法として採用し、プロトタイプ試験体の加力実験を実施している。以降純曲げ領域を生成できる最も単純な加力方法としての両端単純支持、2点载荷曲げ実験法を本実験の一年目に、正負交番曲げ試験による加力試験を本実験の二年目を実施するよう実験計画を策定した。その後せん断応力や軸応力が曲げ応力に及ぼす影響を検証するために加力実験を試行し、構造仕様と破壊性状・構造耐力との関係を考察した後、構造設計・耐力評価上の問題点や留意点を示した。

[参考文献]

- 1-1) (株) 建築ピボット LAB-SS 製品案内より、2013.3
- 1-2) (株) 構造ソフト Build一貫IV+ マニュアル、2013.3

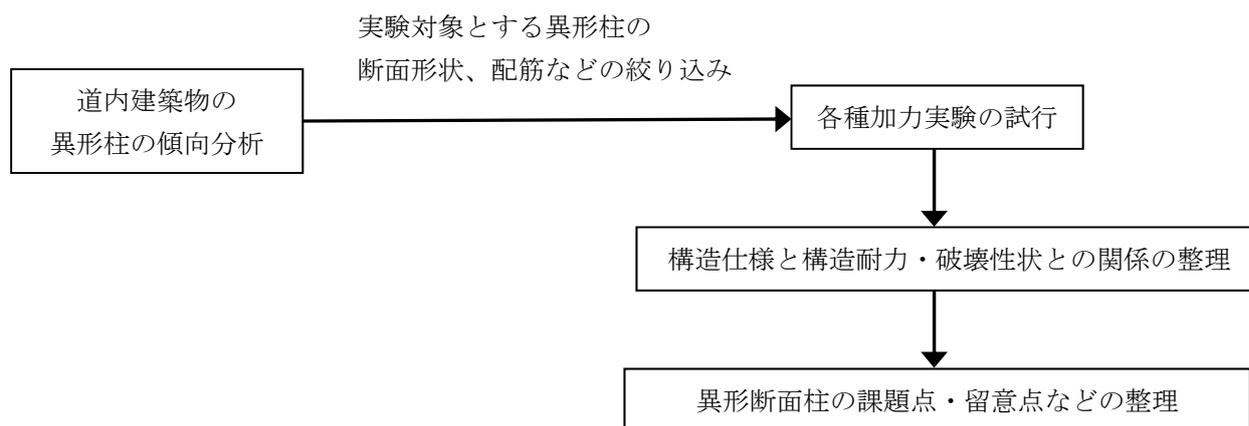


図 1-4 研究内容の概要

2. 統計分析

(1) 調査対象

異形柱の発生頻度については、構造図や構造計算内容について確認できる建築物を対象として、平成19年度から平成25年度までの7年間を対象とした。また低層の建築物にも発生は認められるが、前節において斜線制限などが契機となっているとの理由を踏まえ、一般的に中高層建築物としてカテゴライズされる建築物を対象と位置付けるため、7階建以上を対象に設定した。また主体構造としては、鉄筋コンクリート造が中心となるものの、鉄骨鉄筋コンクリート造として分類されている建築物も、実態としては配置されている鉄骨断面や、周辺部材の状況等からその挙動としては鉄筋コンクリート造と大差ないと思われる建築物も有ることから、調査対象に含むものとした。ただし鉄骨鉄筋コンクリート造の調査対象とした建物は極端に少なく、全体に対し8棟（約1.2%程度）に留まる。

(2) 出現割合

図2-1には7年間における、発生数の調査結果を総計及び年度別に示す。調査棟数約634棟のうちおよそ13%弱の建物において、程度の差はあるが異形柱が確認できた。年度別の傾向として発生頻度の少ない平成21年度で5%強、発生頻度の多い平成24年度では21%強となった。また図2-2では発生が確認された81棟の建物における整形柱と異形柱の割合を調査分析した結果である。異形柱の存在が確認された建築物における異形柱の割合は年度によって5%強から17%強となり、平均では11%強であることが分かった。

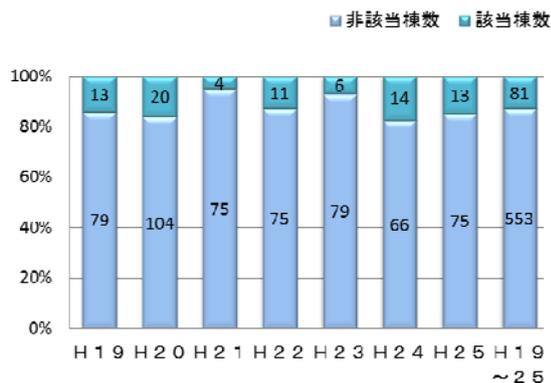


図 2-1 調査対象建物における異形柱の出現割合

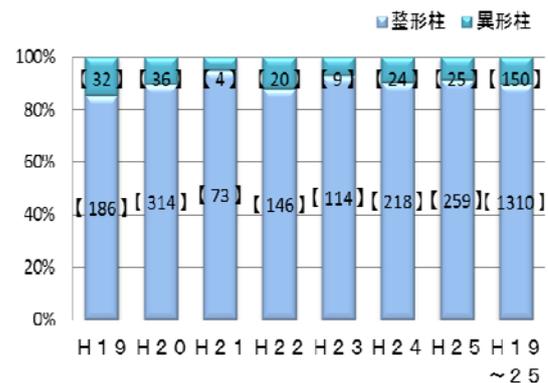


図 2-2 該当建築物における異形柱の割合

(3) 形状の分類

長方形、円形以外の形状を有する柱を異形柱としてグルーピングしたのち、異形柱を形状によって分類すると

- i) 四辺形で構成された台形型の柱
- ii) 五角を有する五角形型の柱
- iii) 上記 i)、ii) には当てはまらない不定形型

にまとめることができる。以降上記 i) を“**台形型**”、上記 ii) を“**五角形型**”どちらにもあてはまらないものを“その他”として分類を行った。

図2-3では図2-2で集計された異形柱をさらに形状別に分類を行った。調査対象範囲における異形柱では台形型が約41%、五角形型が約53%、その他約6%と集計された。

また台形型や五角形型、それぞれの形状的な特性を分類するのに当たり、以下のファクターに着目して分類するのが適切であると考えた。

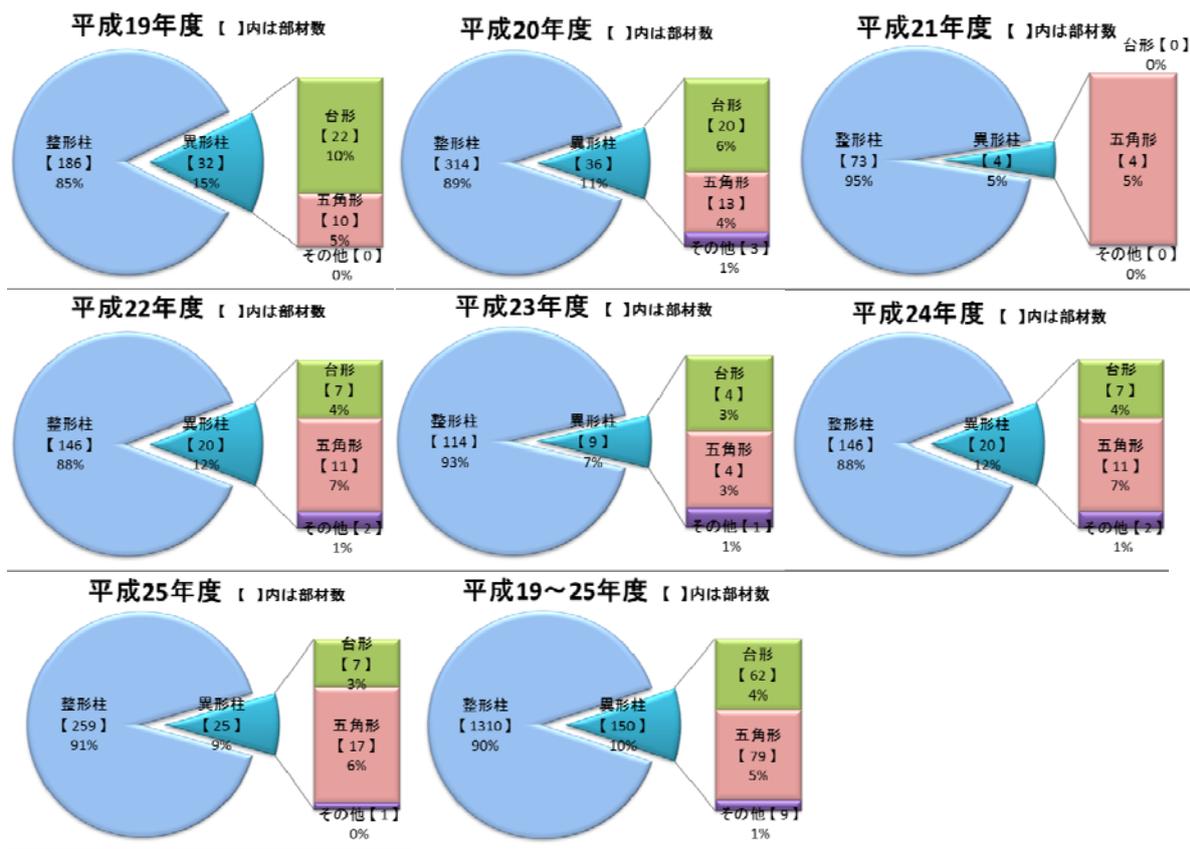


図 2-3 柱形状の年度別分類

i) 台形型柱では尖端角と長辺、短辺の比

ii) 五角形柱では斜線により切り取られた面積の長方形断面に対する比率と各方向の短辺と長辺の比（詳細は図 2-5 を参照）

各パラメーターの平均について、台形型柱では尖端部分の角度は 69° となり、最大では 45° を超えるようなものも認められている。また短辺と長辺の比は 0.72 (=短辺/長辺) となった。また五角形型柱では上記の欠損率が約 4%強となり、各方向の短辺と長辺の比はそれぞれ 0.302 、 0.260 （構造計算上の主要な 2 軸の方向に対し）となっている。

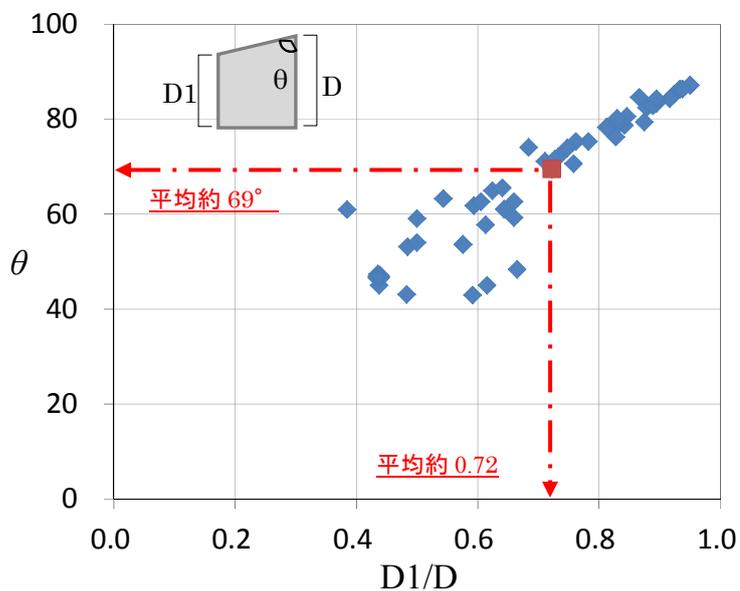


図 2-4 台形型柱の形状的分类

(4) 主要材料の分類

形状の分類と平行して異形柱を構成している鉄筋、コンクリートについて使用材料の統計を分析した。図 2-6 には主筋材料、帯筋材料及びコンクリート強度の統計をグラフ化した。主筋の強度は 90%弱が SD390 を用いており、ごく僅かではあるが SD490 級を用いた建築物も確認された。帯筋はおよ

その3/4が785N/mm²級の材料を使用していた。コンクリートについては、建築では上階ほど低強度のコンクリートを用いる手法が一般的に用いられているため、幅広くコンクリート強度が使用されているが、本集計では該当した建物の規模などの影響からかF_c-36がおよそ半数を占める結果となった。

(5) 配筋量の統計結果

引張鉄筋比 (P_t:%) については、X、Y方向で若干の差はあるものの、0.6~0.63%が建築基準法における主要な二軸の方向別の平均値と集計された。(図2-7)

また帯筋量についても主要な二軸の平均はそれぞれ0.51%及び0.48%と集計された。(図2-8)

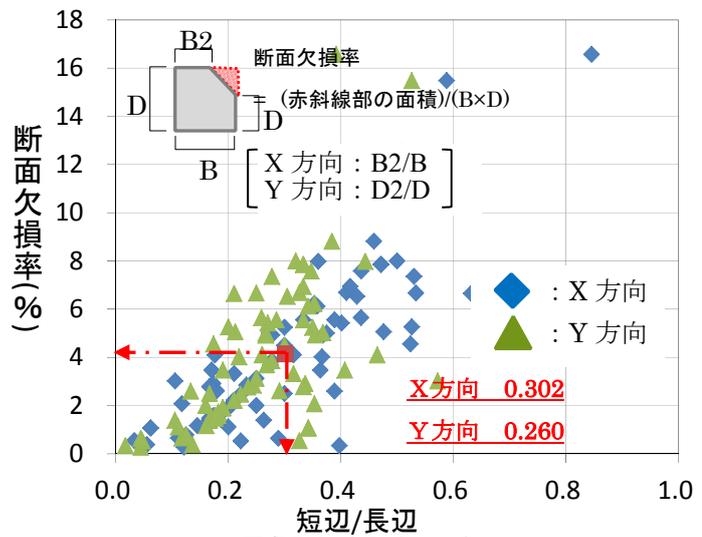


図 2-5 五角形柱の形状の分類

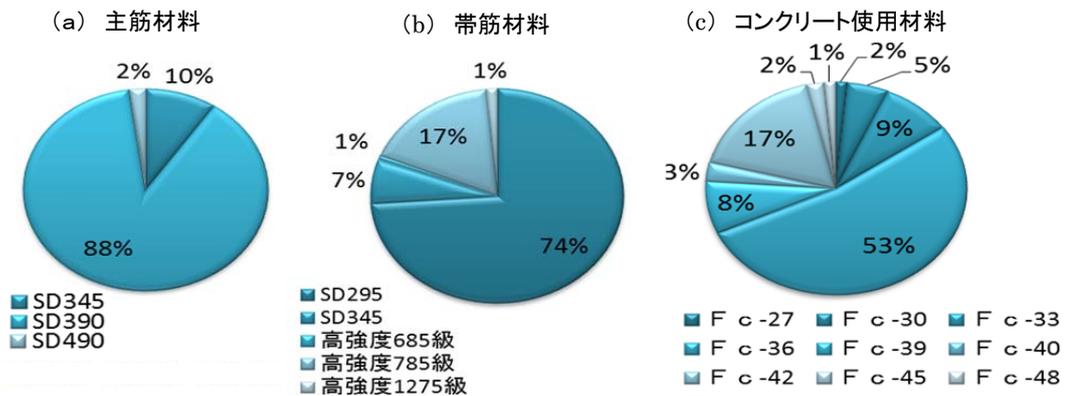


図 2-6 異形柱における使用材料

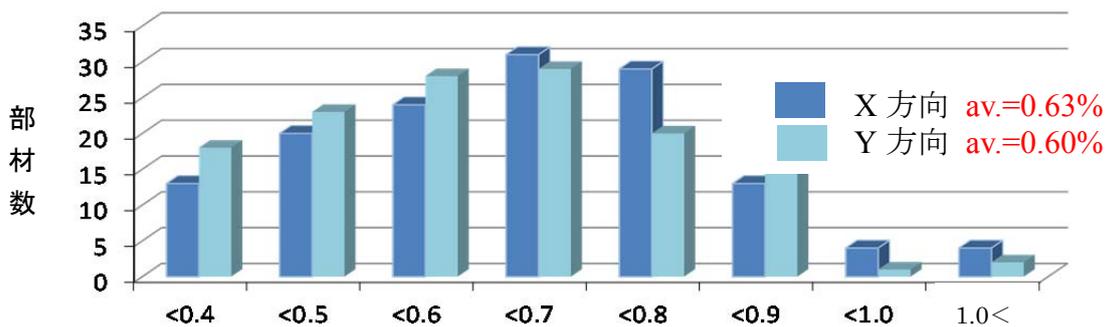


図 2-7 異形柱における引張鉄筋比(P_t)の分布

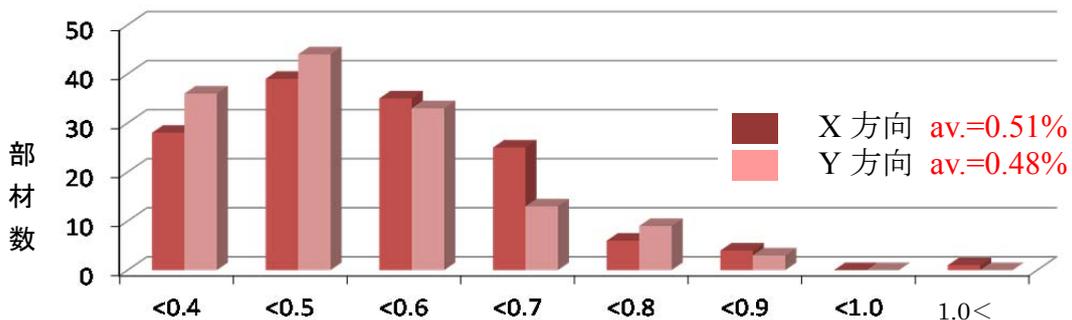


図 2-8 異形柱における帯筋比(P_w)の分布

3. 予備試験

(1) 試験概要

初年度となる平成 26 年度においては、試験体 3 体を作成し、逆対称曲げ加力下における異形柱の挙動を確認するとともに、今後の試験体シリーズの展開や試験方法を策定するための予備試験として位置付けて実験を行った。

予備実験の試験方法としては地震時の正負曲げ加力を比較的簡便に実施できる方法として、大野式加力による試験法を採用することとした。加力装置としてはアムスラー製品・外圧曲げ試験機 CPA-100R-F（処理能力 1,000 kN - 株式会社前川試験機製作所製）を用いた。（図 3-1）また想定応力状態は図 3-2 による。

また加力方法については漸次単調加力とし、部材の降伏状態後 1/50 程度まで加力することを前提とした。

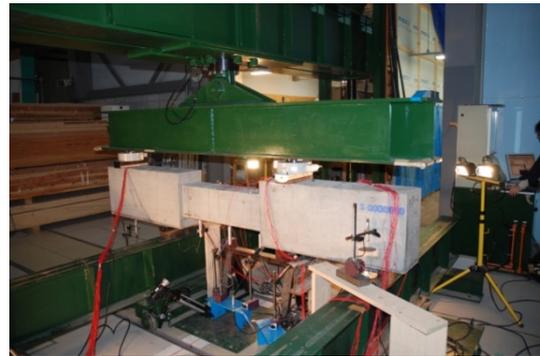


図 3-1 CPA-100R-F 試験機

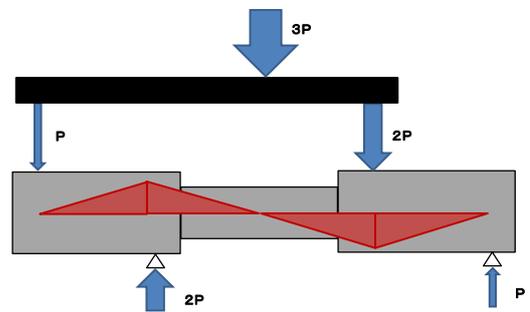


図 3-2 予備試験想定応力状態

(2) 試験体計画

予備試験においては、1/3scale を想定し、今後の各試験における代表的な異形柱の基準的断面として 2 章の統計結果をふまえて、台形型柱の尖端角 60° の断面を各実験における基準断面として採用した。また各実験においては、比較対照の明確化を図る目的から異形断面を（1 章における断面置換と同様の手法で）長方形断面置換とした場合の矩形断面も試験対象として採用することとした。試験体諸元を表 3-1 に、材料の機械的性質を表 3-2 に、試験体詳細を図 3-3 に示す。

表 3-1 予備試験体諸元

| item | A | P_t | P_g | P_w | I_C | I | I_e | M_u | Q_u |
|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|------|-------|--------|-------|
| unit | ($\times 10^4 \text{mm}^2$) | (%) | (%) | (%) | ($\times 10^8 \text{mm}^4$) | | | (kN·m) | (kN) |
| S-000-@60 | 5.2 | 0.55 | 1.66 | 0.47 | 2.86 | 2.86 | 3.44 | 21.4 | 100.4 |
| T-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.66 | 0.27 | 2.86 | 3.13 | 3.64 | 21.4 | 87.3 |
| T-060-@60 | 5.2 | 0.55 | 1.66 | 0.47 | 2.86 | 3.13 | 3.64 | 21.4 | 100.4 |

A: 断面積、 P_t : 引張鉄筋比、 P_g : 鉄筋比、 P_w : 帯筋比、 I_C : 矩形置換の断面二次モーメント、I: 断面二次モーメント
 I_e : 鉄筋考慮の断面二次モーメント、 M_u : 想定終局曲げ耐力、 Q_u : 想定終局せん断耐力

表 3-2 使用材料の機械的性質

・鉄筋

| item | unit | D10 | 6φ |
|------------|---------------------------------|--------|-------|
| | | SD295A | SR235 |
| E_s | ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$) | 1.78 | 1.92 |
| σ_u | (N/mm^2) | 535 | 573 |
| σ_y | (N/mm^2) | 382 | 524 |

・コンクリート

| item | unit | Fc-21 |
|------------|---------------------------------|-------|
| E_c | ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$) | 1.62 |
| σ_c | (N/mm^2) | 23.5 |

E_s : 鉄筋のヤング係数、 σ_u : 鉄筋の引張強度、
 σ_y : 鉄筋の降伏点強度、 E_c : コンクリートのヤング係数、
 σ_c : コンクリートの圧縮強度

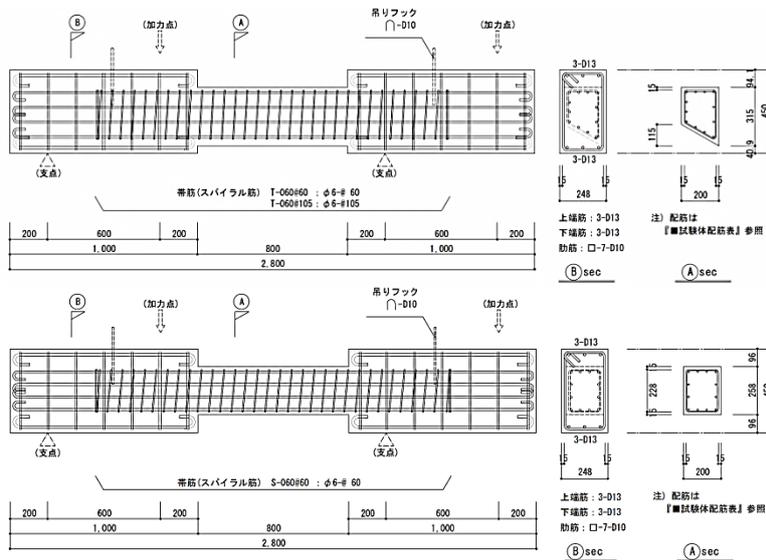


図 3-3 予備試験体図

(3) 計測方法

i) 変位計

表 3-3 には使用した変位計を示し、図 3-4 には変位計の計測位置を示す。

表 3-3 変位計諸元

| 製品名 | 定格容量 | 測定力 | メーカー |
|----------|-------|-------|---------|
| DTH-A-50 | 50mm | 約3N | (株)共和電業 |
| DT-100A | 100mm | 約4.4N | (株)共和電業 |

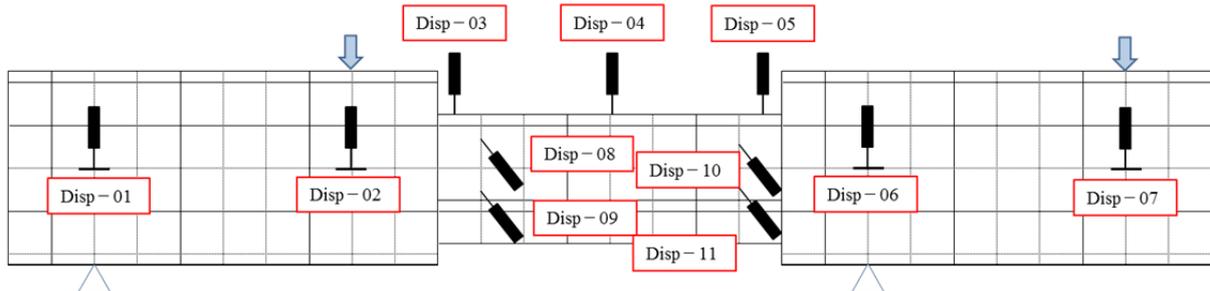


図 3-4 予備試験における変位計計測位置図

ii) 歪みゲージ

鉄筋の歪み状況を測定するため主筋には 41 カ所 (S シリーズでは 36 カ所)、帯筋には 6 カ所 (S シリーズでは 4 カ所) の歪みゲージ (KFG-2-120-C-11 : (株)共和電業社製) を貼付し、歪み測定を行った。なお尖端部分の試験位置に限りダブルゲージとした。設置位置は図 3-5 による。

コンクリートについても歪み状況を測定すべく 15 カ所の歪みゲージ (KC-70-120-A1-11 : (株)共和電業社製) を用いて歪み測定を行った。歪みゲージ配置を図 3-6 に示す。

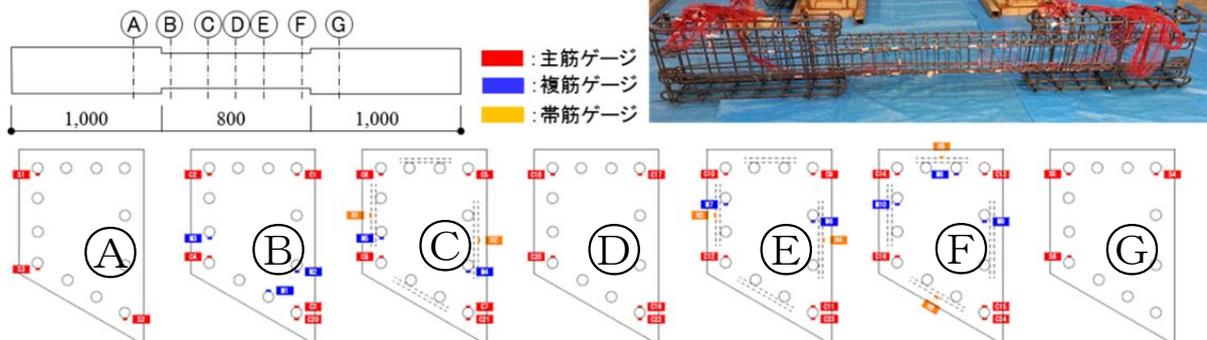


図 3-5 鉄筋歪みゲージ配置計画及び貼付状況

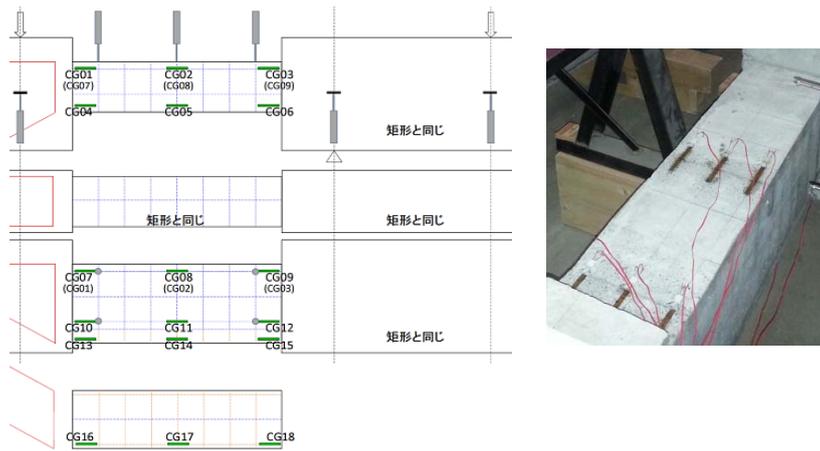


図 3-6 コンクリート歪みゲージ配置計画及び貼付状況

(4) 加力試験結果概要（主変形）

加力試験の結果について図 3-7 に 3 体の予備試験体について加力変形曲線を示す。ここで図 3-7 における変位 (mm) は図 3-4 における変位計 03 と変位計 05 の差を示し、荷重 (kN) については全荷重を示している。また図 3-8 には試験体全体の鉛直変形を示す。

i) T-060@60

本試験体は最大荷重で 265 (kN) (部材の想定せん断力で約 88 (kN)) を示し、比較対照用として試験を実施した S-000-@60 との最大荷重比では約 113%に達し、1/70 まで加力したが明確な耐力低下には至らなかった。ひび割れの発生は 200 (kN) 程度から顕著になったが、発生量は顕著ではなかった。加力当初は試験体に対し、水平方向に発生していたひび割れは 1/200 程度の変形角からはせん断型の方向が主方向となった。ただし、本試験体では主筋に沿った付着型のひび割れは確認されなかった。なお加力点の荷重比については、加力当初はややばらついたものの、最大 10 (kN) 程度から 1:2 は確保されている。

ii) T-060@105

本試験体は最大荷重で 220 (kN) (部材の想定せん断力で約 73 (kN)) をピークに、せん断型ひび割れが拡大し、主筋に沿った付着型のひび割れと複合して耐力が低下した。なお比較対照用として試験を実施した S-000-@60 との最大荷重比では約 94%となっている。なお加力については耐力低下が明確となった、1/100 程度までの加力となった。最終的に大亀裂に進展したひび割れが顕著になったのは 170 (kN) 程度からである。荷重比については i) と同様であった。

iii) S-000@60

本試験体は最大荷重で 234 (kN) (部材の想定せん断力で約 78 (kN)) をピークに、せん断型の破壊となった。本プロトタイプではシャースパン比を実際の建物に近い状態で設定したため、高い剛性そのまま変形した結果、せん断型の破壊となったと推定する。計算によるせん断耐力と想定される作用荷重との比率は約 78%となっている。また 2 点の荷重比についても同様にごく初期の状態を除き 1:2 は確保されていた。

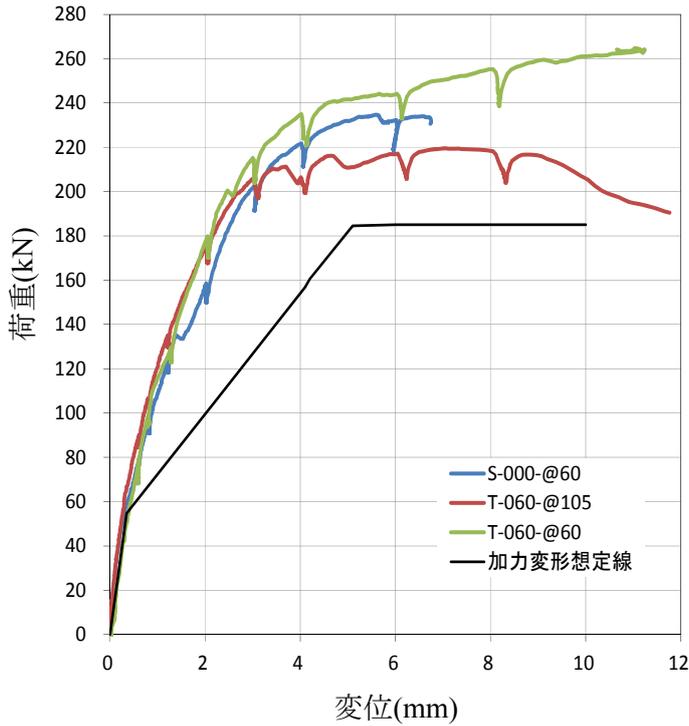


図 3-7 荷重変形曲線

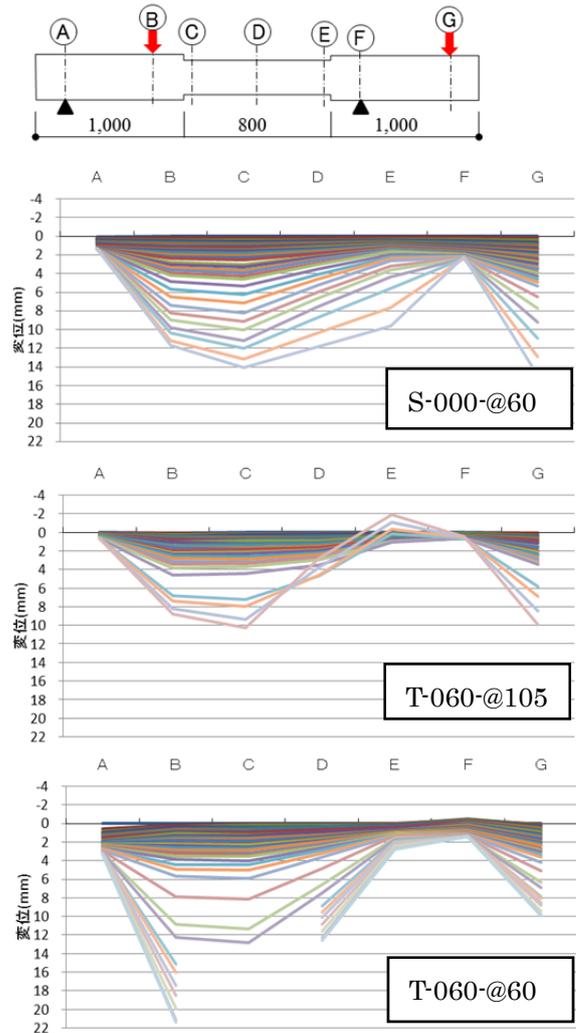


図 3-8 試験体全体の变形荷重変形曲線

(5) 加力試験結果概要（面外変形）

本加力試験による面外への変形は図 3-9 のように測定された。T シリーズでも顕著な傾向にはならないが、矩形と比較すると、明らかに主軸が傾くための面外変形が発生していることが明らかである。

(6) 歪み度分布

試験体部分を平面的に断面表示したひずみ度分布を図 3-10 に示す。最大荷重付近における先端部圧縮の状態において、引っ張り側鉄筋にばらつきが出る場合が多い。また圧縮側の最外端の鉄筋にも圧縮と引っ張りが確認できる場合（T-060-@105）やひび割れの影響などもあり、二段目主筋の方がひずみ度が大きいケース（T-060-@60）も確認された。

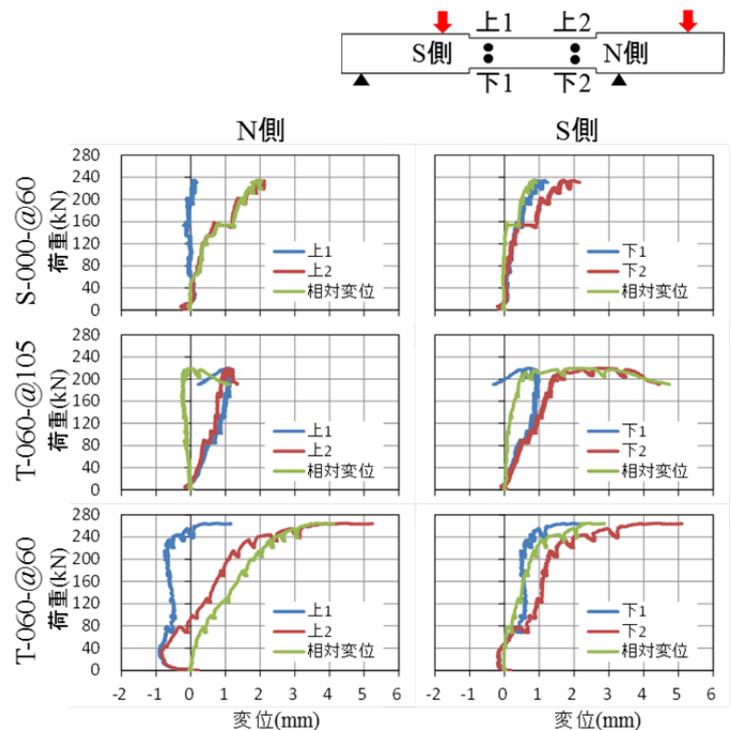
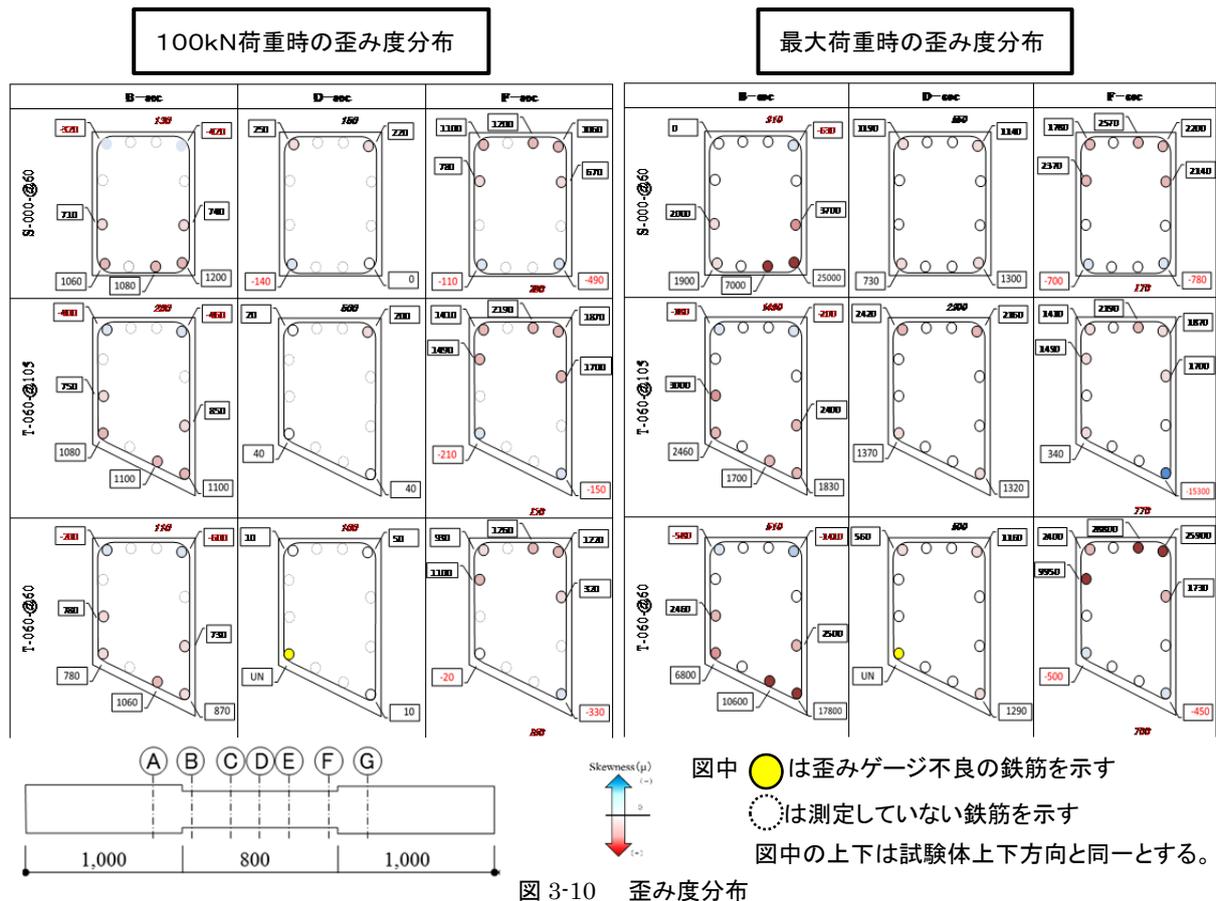
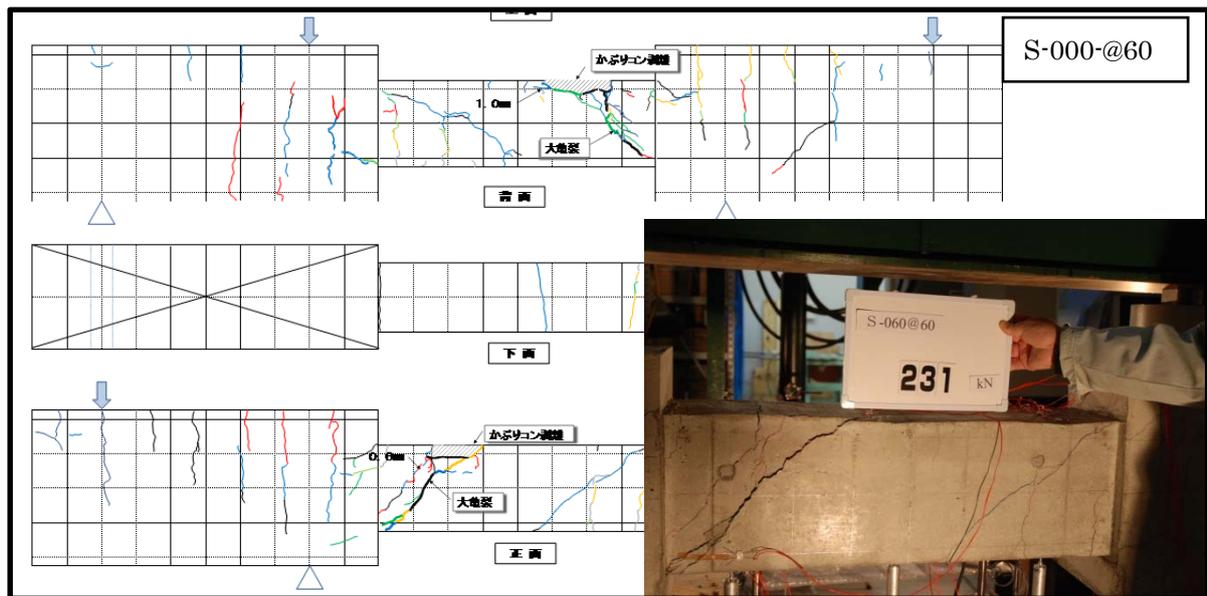


図 3-9 試験体における面外への変形



(7) ひび割れと最終破壊状況

各試験体の破壊性状について最終ひび割れ状況及び最終加力時の写真(スタブを除く試験測定位置)を図 3-11 に示す。



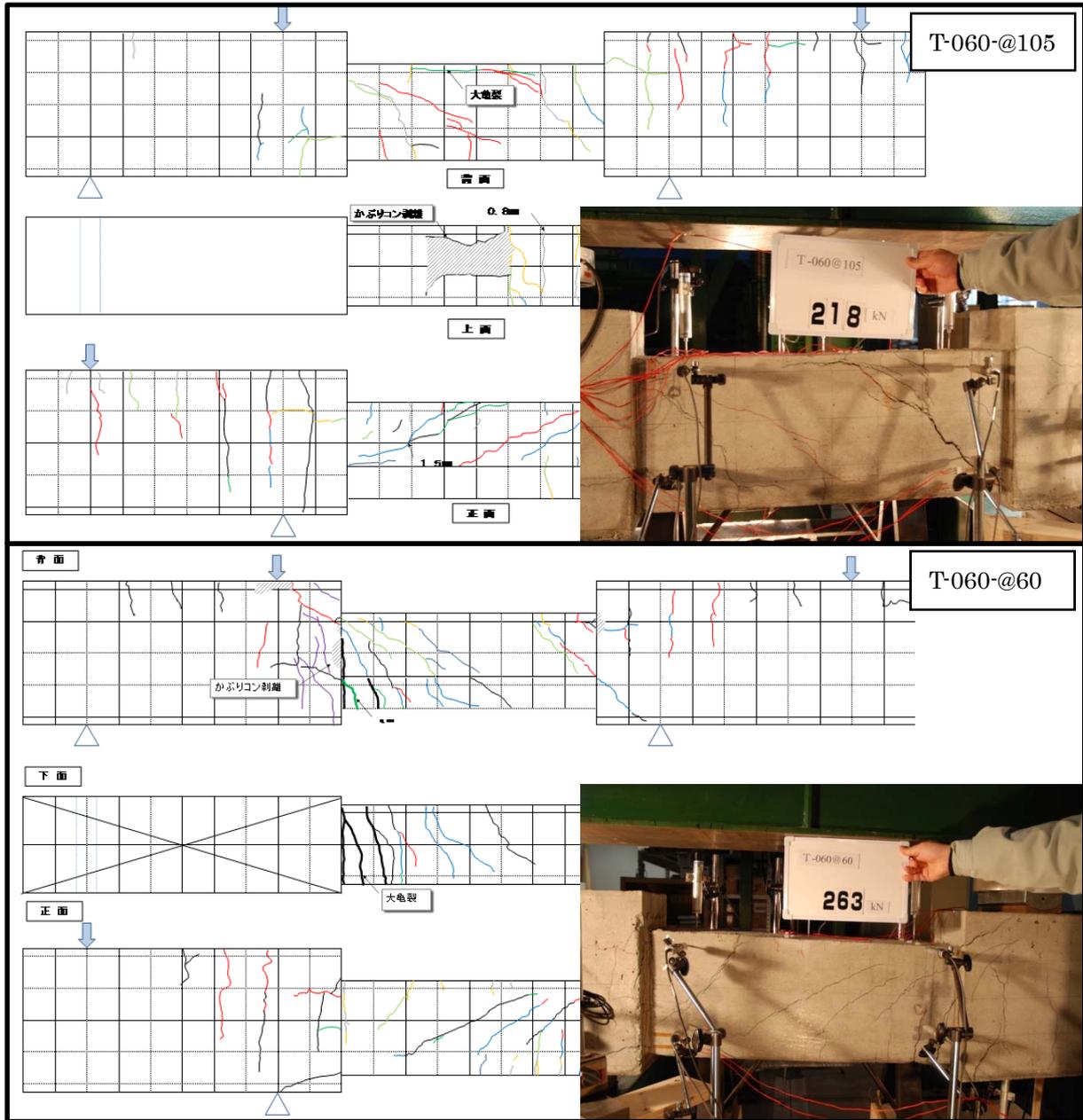


図 3-11 ひび割れ図及び最終加力写真(つづき)

4. 自由端支持四点曲げ試験

(1) 試験概要

平成 27 年度においては、試験体を異形柱 2 シリーズ 6 体と比較検討用の長方形断面 2 体（異形断面における長辺で包絡した矩形断面と短辺で包絡した矩形断面の 2 体）の計 8 体を作成し、基本的な応力状態を確認すべく、純曲げ領域を確認できる自由端支持 4 点曲げ試験を行った。異形柱の 2 シリーズについては図 4-1 にあるように、先端圧縮の場合（U）、先端引張りの場合（D）、並びに異形の方向が面外方向（S）になるような 3 方向からの加力により、曲げ終局状態における破壊性状や挙動を確認するのが目的である。

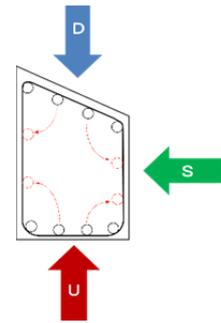


図 4-1 加力方向概要

予備試験からの変更点としては、通常柱配筋では各辺に多数の配筋を有することから、二段目もしくは三段目以降の配筋による耐力上昇などの効果を考えていくのが一般的であるものの、予備実験の結果をふまえると、引張側主筋は各一段にて実験することで結果がより明確になるとの理由から、本試験以降は引張側主筋を一段の状態にて実施していくと決定した。加力装置としては予備実験と同様にアムスラー製品・外圧曲げ試験機 CPA-100R-F（処理能力 1,000 kN - 株式会社前川試験機製作所製）を用いた。（図 4-2）

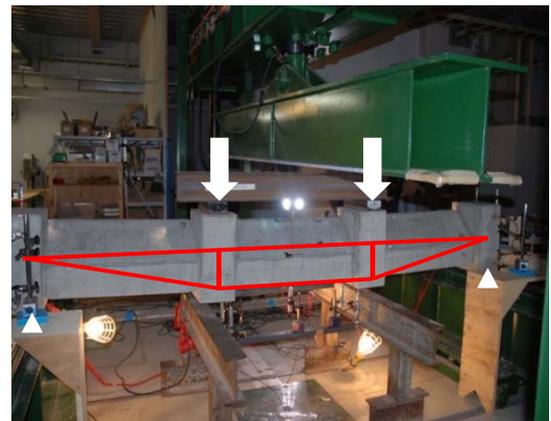


図 4-2 自由端支持四点曲げ試験想定応力と試験機

加力方法については漸次単調加力とし、部材の降伏状態後 1/50 程度まで加力することを前提とした。

(2) 試験体計画

本実験においては、予備試験と同様約 1/3scale を想定して尖端角 60°、並びに尖端角がほぼ最小のグループの代表として先端角 45°で断面積が等価な断面を異形柱における比較検討用のシリーズとして、試験対象として採用することとした。主筋材料については予備試験と同様の異形鉄筋を用いたが、帯筋については材料入手の関係から本実験から異形鉄筋の D6 を用いることとした。またコンクリートについて、前年度は粗骨材のかぶり厚を考慮し 10 mm を採用したが、生産プラントとの協議及び前年度のコンクリートの状態（ヤング係数）を考え本実験では 25 mm を用いることとした。

試験体諸元を表 4-1 に、材料の機械的性質を表 4-2 に、試験体詳細を図 4-3 に示す。

表 4-1 自由端支持四点曲げ試験予備試験体諸元

| item | A | P_t | P_g | P_w | I_c | I | I_e | M_u | Q_u |
|-------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|------|-------|--------|-------|
| unit | ($\times 10^4 \text{mm}^2$) | (%) | (%) | (%) | ($\times 10^8 \text{mm}^4$) | | | (kN·m) | (kN) |
| SL-000-@105 | 6.3 | 0.45 | 0.90 | 0.30 | | 5.21 | 5.59 | 25.6 | 83.1 |
| SS-000-@105 | 4.0 | 0.71 | 1.42 | 0.30 | | 1.33 | 1.70 | 16.2 | 52.1 |
| TD-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.30 | 2.85 | 3.13 | 3.57 | 21.0 | 67.9 |
| TU-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.30 | 2.85 | 3.13 | 3.57 | 21.0 | 67.9 |
| TS-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.23 | 1.72 | 1.69 | 1.92 | 16.2 | 60.8 |
| TD-045-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.30 | 2.85 | 3.70 | 4.16 | 21.0 | 67.9 |
| TU-060-@105 | 5.2 | 0.98 | 1.11 | 0.30 | 2.85 | 3.70 | 4.16 | 21.0 | 67.9 |
| TS-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.23 | 1.72 | 1.63 | 1.87 | 16.2 | 60.8 |

A: 断面積、 P_t : 引張鉄筋比、 P_g : 鉄筋比、 P_w : 帯筋比、 I_c : 矩形置換の断面二次モーメント、I: 断面二次モーメント

I_e : 鉄筋考慮の断面二次モーメント、 M_u : 想定終局曲げ耐力、 Q_u : 想定終局せん断耐力

表 4-2 使用材料の機械的性質

・鉄筋

| item | unit | Fc-21 |
|------------|--------------------------|-------|
| E_c | ($\times 10^4 N/mm^2$) | 2.34 |
| σ_c | (N/mm^2) | 29.5 |

・コンクリート

| item | unit | D10 | D6 |
|------------|--------------------------|--------|--------|
| | | SD295A | SD295A |
| E_s | ($\times 10^5 N/mm^2$) | 1.72 | 1.78 |
| σ_u | (N/mm^2) | 515 | 570 |
| σ_y | (N/mm^2) | 356 | 450 |

σ_u : 鉄筋の引張強度、 σ_t : 鉄筋の降伏点強度、

E_c : コンクリートのヤング係数、

σ_c : コンクリートの圧縮強度

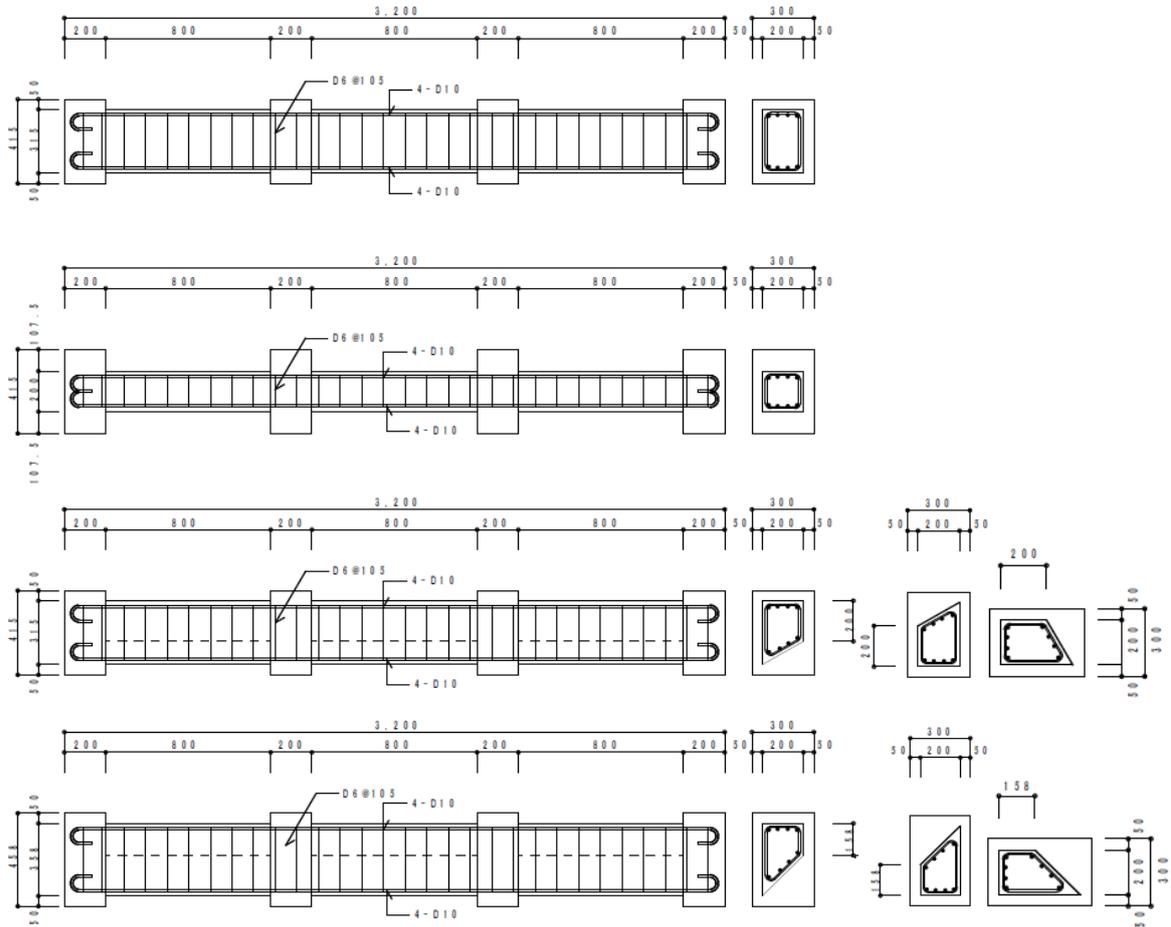


図 4-3 自由端支持四点曲げ試験体図

(3) 計測方法

i) 変位計

使用した変位計は 3-(3)を参照されたい。図 4-4 には自由端支持 4 点曲げ試験における変位計の計測位置を示す。

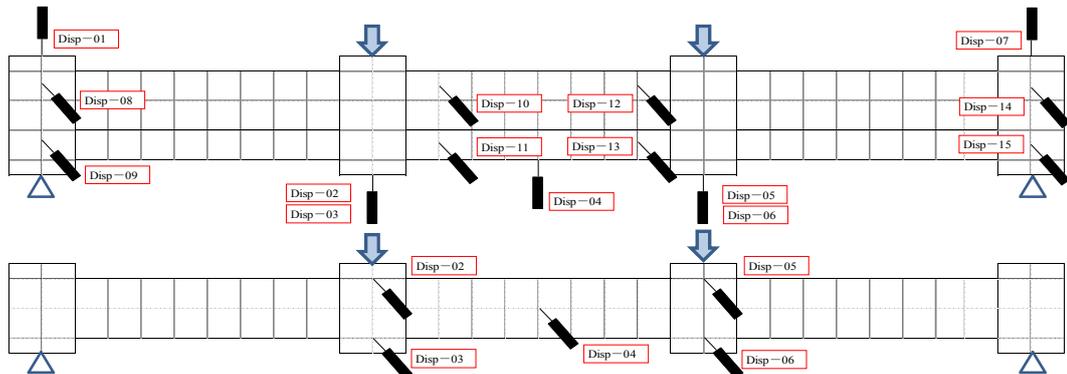


図 4-4 自由端支持四点曲げ試験における計測位置図

ii) 歪みゲージ

主筋には 26 カ所、帯筋には 6 カ所（S シリーズでは 4 カ所）の歪みゲージ（KFG-2-120-C-11：（株）共和電業社製）を貼付し、歪み測定を行った。なお予備試験と異なり尖端部分もゲージはシングル配置とした。設置位置は図 4-5 による。

コンクリートについても歪み状況を測定すべく 5 カ所の歪みゲージ（KC-70-120-A1-11：（株）共和電業社製）を用いて歪み測定を行った。歪みゲージ配置を図 4-6 に示す。

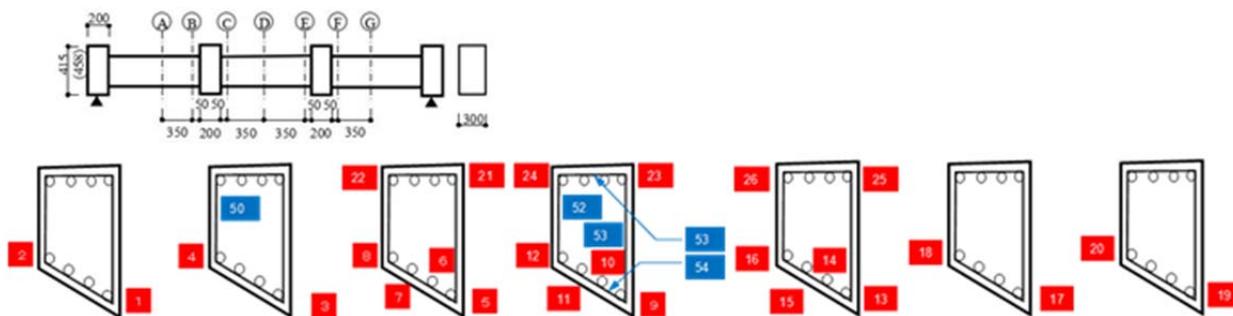


図 4-5 鉄筋歪みゲージ配置計画及び貼付状況

(4) 加力試験結果概要（主変形）

加力試験の結果について図 4-7 に全 8 体の加力変形曲線を示す。変位 (mm) は図 4-4 における変位計 02～変位計 06 の平均を採用している。また荷重 (kN) についてはアムスラー試験機 CPA-100R・F の全荷重を示している。このため 1 点当たりの荷重は全荷重の 1/2 となる。

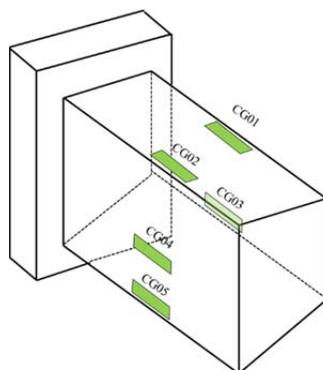


図 4-6 コンクリート歪みゲージ配置計画及び貼付状況

i) T*-060@105 シリーズ

本試験体シリーズでは強軸方向において試験最大荷重で約 45 (kN) となり、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較では 107% となったことから、矩形置換でほぼ適切な評価ができていたといえる。また弱軸方向では試験最大荷重で約 29 (kN) となり、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較ではこの方向でも 107% となった。矩形断面との比較では強軸方向で二次勾配が小さく、ひび割れ後の剛性低下が大きい。

ii) T*-045@105 シリーズ

本試験体シリーズでは強軸方向において試験最大荷重で約 40～42 (kN) であったことから、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較では 95～100% となった。また第二勾配が終了し部材の降伏状態を示した変曲点は尖端引張側で 5% 程度低くなった。また弱軸方向では試験最大荷重で約 30 (kN) となり、尖端角の違いによる差異は認められなかった。

iii) SL-000@105 及び SS-000@105

矩形断面の本試験体群では強軸方向において試験最大荷重でそれぞれ 31、60 (kN) であったことから、終局曲げ耐力の略算値との比較ではそれぞれ 117%、129% となった。

(5) 加力試験結果概要（面外変形）

本加力試験による面外への変形は図 4-8 を参照されたい。側面方向の変形は純曲げ区間における側

面方向への変形を確認する変位計 4 台の平均値を変位の値(mm)として採用している。

尖端部分が圧縮となる TU シリーズの 2 試験体で、最大 10 mm 近い面外変形が確認された。

(6) 加力試験結果概要 (回転)

回転方向については明確な規則性が確認できなかった。TD シリーズではほぼ回転せず、TU シリーズでは降伏後大きく回転し始めている。また TB シリーズでは部材軸に対して、右回転、左回転を交互に繰り返すような挙動を示している。(図 4-9)

(7) 歪み度分布

図 4-10 には、鉄筋・コンクリートの代表的な加力時におけるひずみ度分布を示す。ここで代表的な加力時としては、加力試験時における最終耐力時 (想定 M_u 時)、およびその 70% 程度の加力時を用いた。

TD シリーズにおいては、尖端角 45 度と 60 度では、引張り側鉄筋のひずみ度の分布が正反対の傾向となっている。順次尖端側が大または小と逆の傾向を示した。また歪み度の絶対値についても異形柱の方が歪み度は大きい。

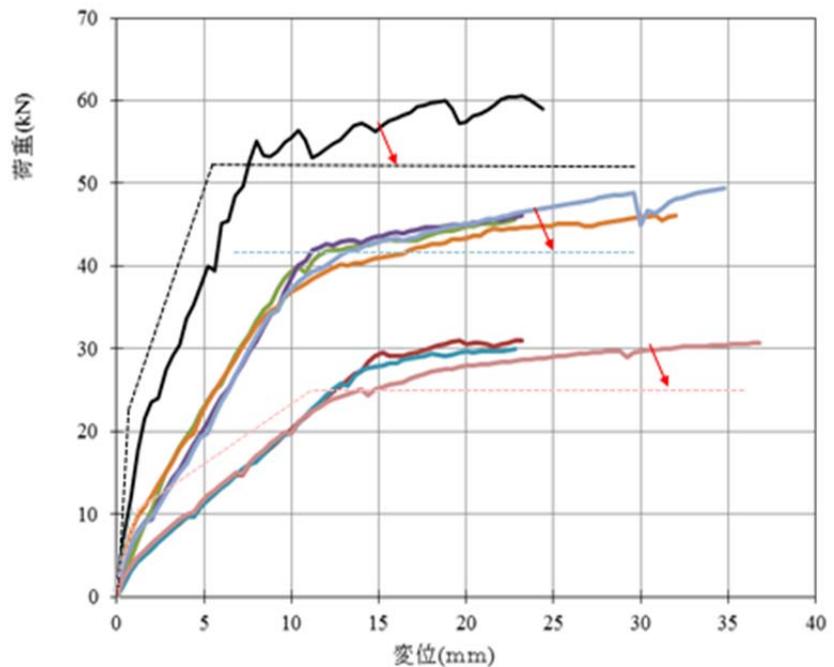


図 4-7 自由端支持四点曲げ試験加力変形曲線(主方向)

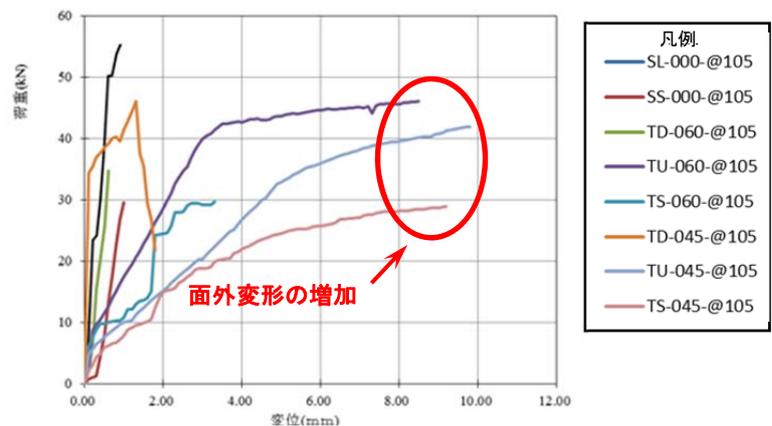


図 4-8 自由端支持四点曲げ試験加力変形曲線(面外方向)

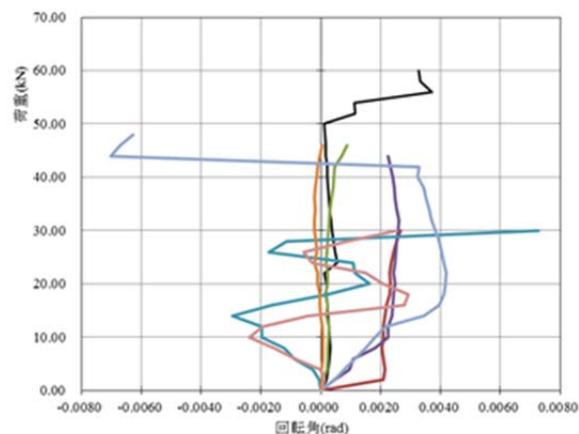


図 4-9 自由端支持四点曲げ試験加力変形曲線(回転)

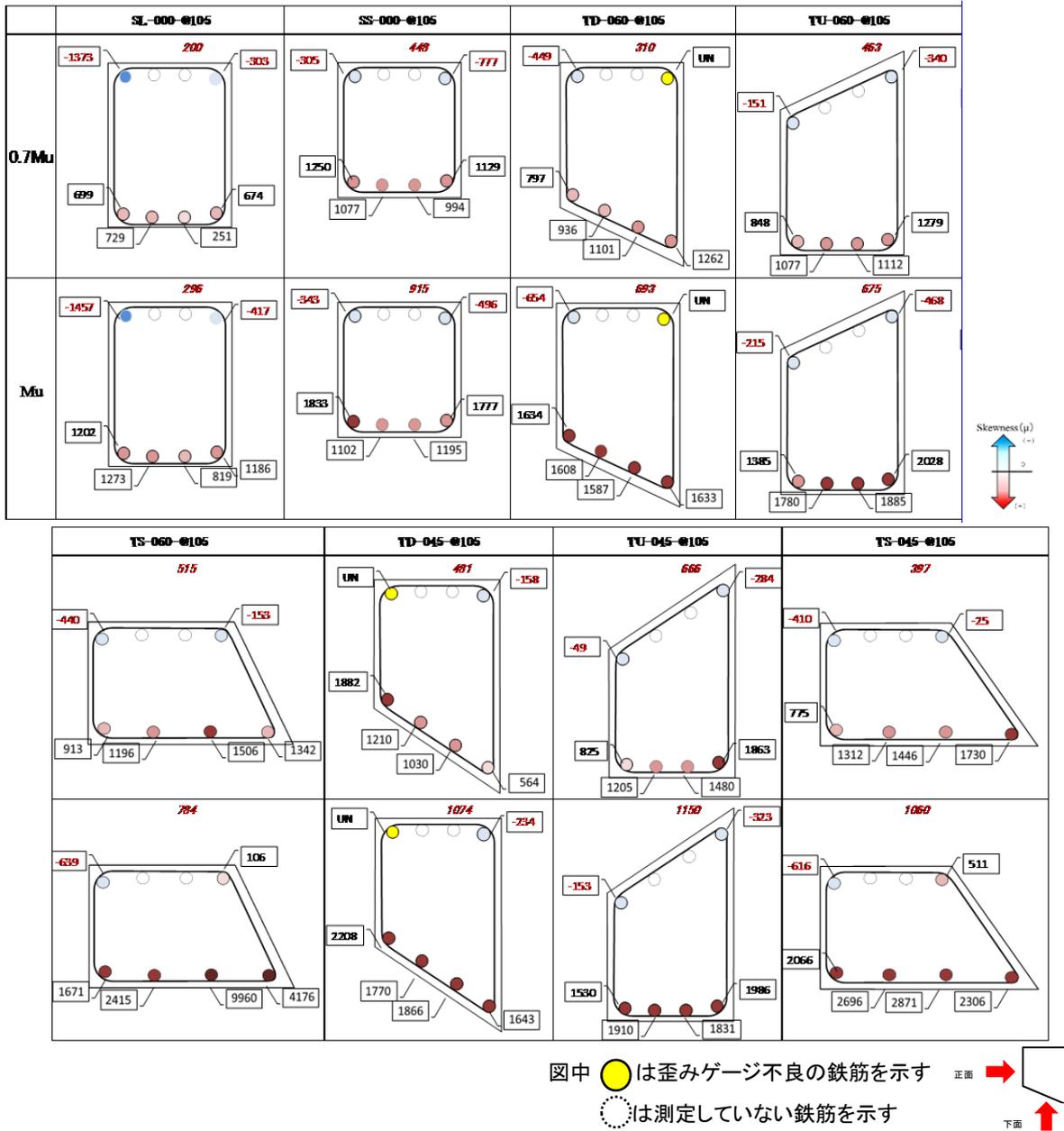


図 4-10 歪み度分布

(8) ひび割れと最終破壊状況

各試験体の破壊性状について最終ひび割れ状況及び最終加力時の写真（中央純曲げ領域）を図 4-11 に示す。

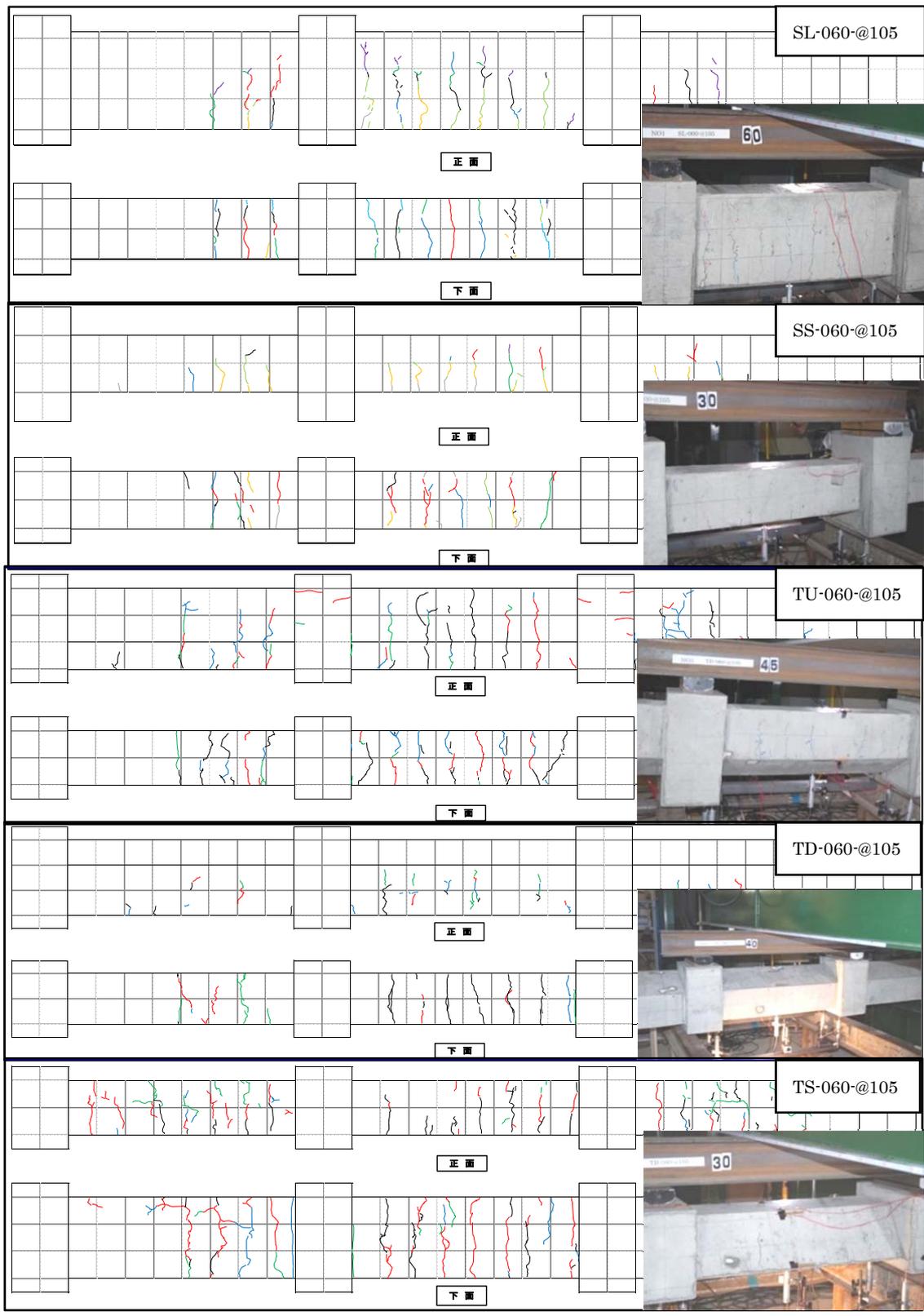


図 4-11 ひび割れ図及び最終加力写真

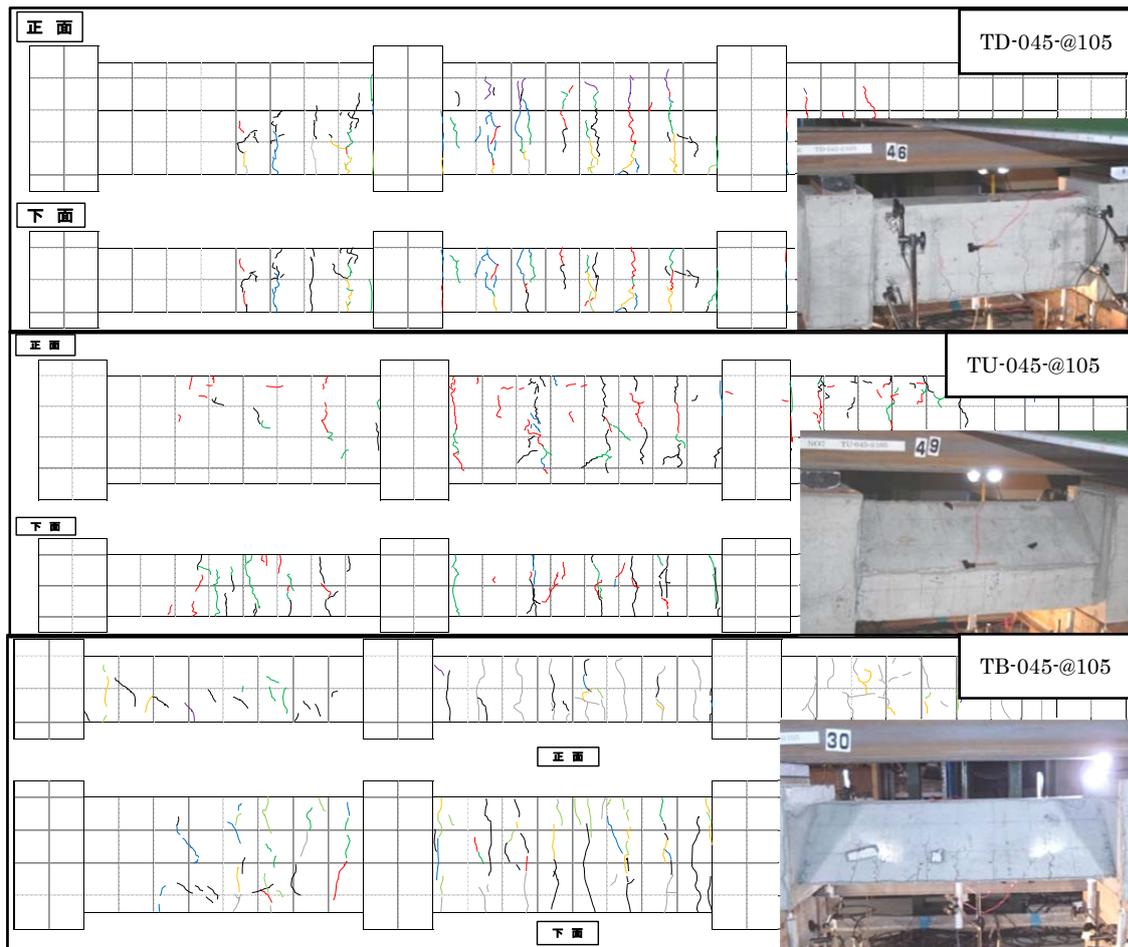


図 4-11 ひび割れ図及び最終加力写真(つづき)

5. 端部固定水平加力試験

(1) 試験概要

最終年度となる平成 28 年度においては、試験体を異形柱 3 体と比較検討用の長方形断面 1 体の計 4 体を作成し、地震時の応力状態を再現すべく正負交番加力に基づく破壊性状の確認を行った。

異形柱 3 体については基準となる試験体をシリーズ名「T0」とし、主筋量を増加させたものをシリーズ名「TP」、 $0.1F_c$ 程度の軸力 (100 k N) を作用させた状態で加力したものをシリーズ名「TN」とした。尖端角はいずれも 60 度としている。加力方法は正負交番加力とし、加力サイクルは図 5-1 による。また加力装置としては (地独) 北総研の所有する株式会社巴技研制作の RC 造試験機を多点ねじれせん断プログラムを準用する形で試験を実施した。試験装置の概要と試験装置外観を図 5-2 に示す。

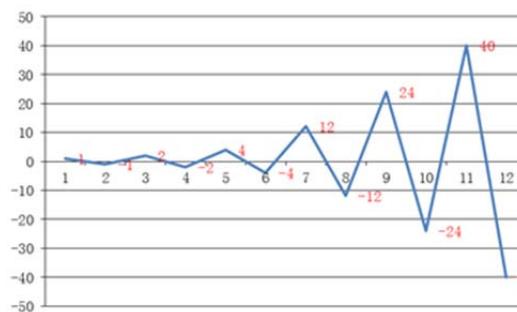


図 5-1 加力サイクル概要

(2) 試験体計画

使用材料については4章から変更はないが、主筋量をファクターとした「TP」シリーズでは、主筋径を D13 とすることで対応した。以上から試験体諸元を表 5-1 に、材料の機械的性質を表 5-2 に、試験体詳細を図 5-3 に示す。なお試験体の固定には PC 鋼棒 32φ を上下 2×2=4 本で固定し、溝型鋼 C-150×75 を治具として用いた。

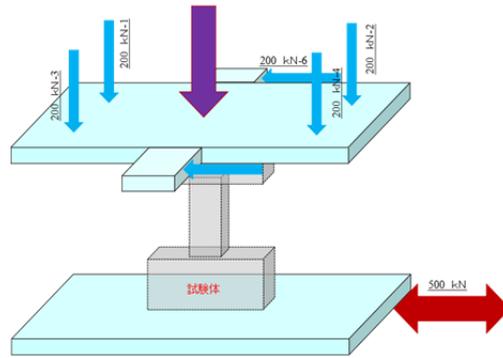


図 5-2 試験装置概要図と外観

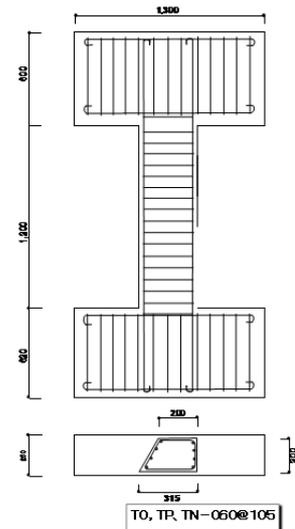


図 5-3 試験体詳細図(Tシリーズ)

表 5-1 端部固定水平加力試験試験体諸元

| item | A | P_t | P_g | P_w | I_c | I | I_e | M_u | Q_u |
|-------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|------|-------|--------|-------|
| unit | ($\times 10^4 \text{mm}^2$) | (%) | (%) | (%) | ($\times 10^8 \text{mm}^4$) | | | (kN·m) | (kN) |
| SL-000-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.30 | 2.86 | 2.86 | 3.34 | 21.2 | 79.7 |
| T0-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.30 | 2.86 | 3.13 | 3.60 | 21.2 | 81.3 |
| TP-060-@105 | 5.2 | 0.98 | 1.97 | 0.30 | 2.86 | 3.13 | 3.95 | 37.7 | 86.8 |
| TN-060-@105 | 5.2 | 0.55 | 1.11 | 0.30 | 2.86 | 3.13 | 3.60 | 31.3 | 89.1 |

P_t : 引張鉄筋比、 P_g : 鉄筋比、 P_w : 帯筋比、 I_c : 矩形置換の断面二次モーメント、I : 断面二次モーメント、 I_e : 鉄筋考慮の断面二次モーメント、 M_u : 想定終局曲げ耐力、 Q_u : 想定終局せん断耐力 注記) TN-060-@105 には軸力 100 kN を加力

表 5-2 使用材料の機械的性質

・鉄筋

| item | unit | D13 | D10 | D6 |
|------------|---------------------------------|--------|--------|--------|
| | | SD295A | SD295A | SD295A |
| E_s | ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$) | 1.80 | 1.88 | 1.79 |
| σ_u | (N/mm^2) | 515 | 518 | 570 |
| σ_y | (N/mm^2) | 356 | 358 | 450 |

・コンクリート

| item | unit | Fc-21 |
|------------|---------------------------------|-------|
| E_c | ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$) | 2.36 |
| σ_c | (N/mm^2) | 23.9 |

σ_u : 鉄筋の引張強度、 σ_t : 鉄筋の降伏点強度、

E_c : コンクリートのヤング係数、 σ_c : コンクリートの圧縮強度

(3) 計測方法

i) 変位計

使用した変位計は 3-(3)を参照されたい。ただし基準水平点の変位については、非接触系の測定機 (FC2010 : ディステニー社製) も併用し、主としてその測定値を用いることとした。図 5-4 には端部固定水平加力試験における変位計の計測位置を示す。

ii) 歪みゲージ

コンクリートには 2 カ所の歪みゲージ (KC-70-120-A1-11 : (株)共和電業社製) を設置して歪み測定を行った。歪みゲージ配置を図 5-4 に示す。主筋には 38 カ所、帯筋には 6 カ所 (Sシリーズでは 4 カ所)

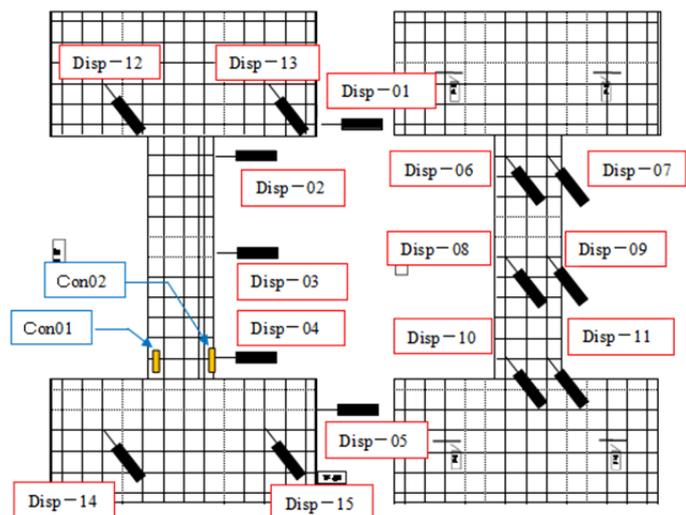


図 5-4 端部固定水平加力試験における計測位置図

の歪みゲージ（KFG-2-120-C-11：(株)共和電業社製）を貼付し、歪み測定を行った。設置位置は図 5-5 による。

(4) 加力試験結果概要（主変形）

加力試験の結果について図 5-6 に加力変形曲線を示す。変位（mm）は（3）で既述したように、非接触型変位測定機によるものを最終的に用いた。比較検討用の S シリーズのみ、油圧系統の不調から変位 24mm で加力を終了したが、他の試験体では目標である 40mm まで加力することができた。グラフ上における正加力側でややひび割れ発生後の剛性低下が大きいように見受けられるが、履歴曲線については計算上の想定耐力は確保できており、耐力低下も試験では確認できなかった。ただし斜めひび割れの拡大が TP 試験体で顕著であり、軸力を作用させた TN 試験体においては尖端部の圧壊が顕著であった。

i) T0-060@105

本試験体ではおおむね部材降伏荷重で約 44（kN）前後となり、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較では 124%となったことから、矩形置換でほぼ適切な評価ができているといえる。また弱軸方向では試験最大荷重で約 29（kN）となり、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較ではこの方向でも 107%となった。矩形断面との比較では強軸方向で二次勾配が小さく、ひび割れ後の剛性低下が大きいと言える。

ii) TP-060@105

本試験体では 1/100 程度で発生したせん断ひび割れが、最終加力付近では最も顕著なひび割れにはなったが、最終的には耐力低下には至っていない。また部材降伏荷重で約 68（kN）前後となり、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較では 108%となった。ただしかぶりコンクリートの剥落や圧縮側主筋のはらみ出しなどもあって、ほぼ試験最終加力が終局限界に近いと考えられ、繰返し荷重に対して十分なじん性を確保しているとは言い難い。

iii) TN-060@105

100 kNの軸力で最終的には 0.08Fc 程度の加圧となった本試験体では、尖端部の圧壊が顕著であった。本軸力の条件下では圧壊が原因となるじん性低下は確認されていない。また部材降伏荷重で約 65（kN）前後となり、同断面積の矩形置換による終局曲げ耐力の略算値との比較では 125%となった。

iv) S0-000@105

本試験体は最大荷重で 51（kN）まで加力し最終状態ではスタブからの鉄筋抜け出し型の破壊となった。ひび

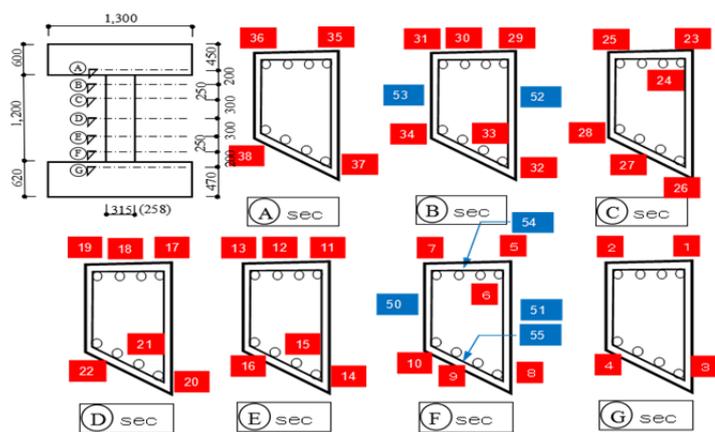


図 5-5 鉄筋歪みゲージ配置計

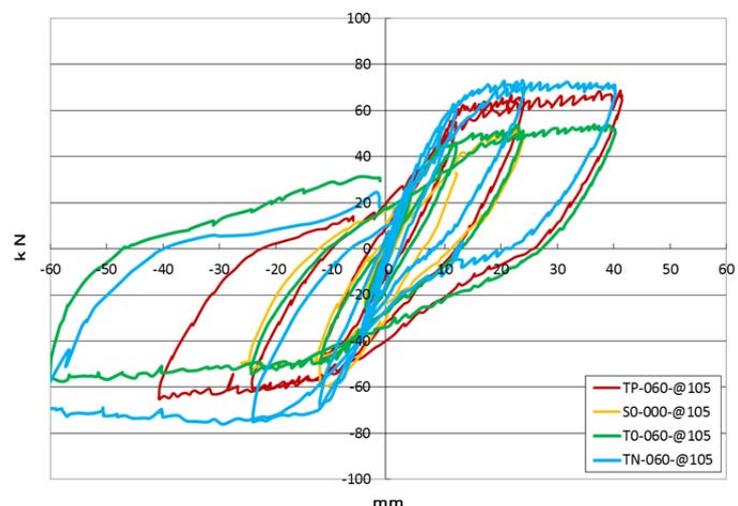


図 5-6 端部固定水平加力試験における加力変形曲線

割れの発生についても異形断面とはかなり発生率が異なり、ひび割れの方向も加力方向とは水平に近い。

(5) 加力試験結果概要（面外変形）

縦軸に主方向の変形を、横軸に面外方向の変形を用いた面外方向のグラフを図 5-7 に添付する。本加力試験の条件下では面外への変形は 1/50 相当の変形まで有意な差は認められなかった。ただし TP シリーズでは 1/50 を境に正負加力とも面外変形が急増する傾向が確認された。

(6) 加力試験結果概要（回転変形）

縦軸に主方向の変形を、横軸に面外方向の変位計の測定値の差（測点間距離 200 mm）とした回転方向のグラフを図 5-8 に示す。回転方向については比較検討用の矩形断面と比較可能な 1/50 レベルの変形で矩形断面の 1/500 程度に対し、TP、TN の 2 シリーズでは、尖端引張り側の正方向で 1/250、尖端圧縮側の負方向で 1/200～1/170 程度となり、整形な長方形部材と比較すると主軸による影響を無視できないと考えられる。

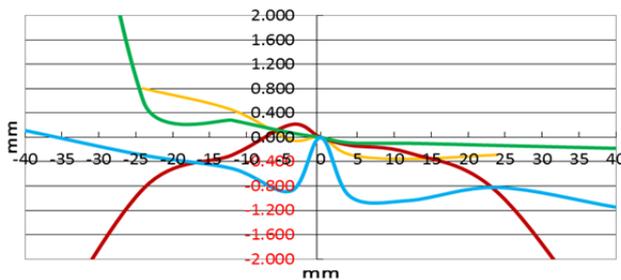


図 5-7 加力変形曲線（側面下側の面外変形）

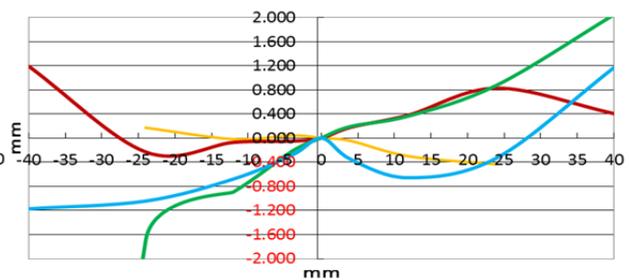


図 5-8 加力変形曲線（側面下側の回転変）

(7) 歪み度分布

図 5-9 には、鉄筋・コンクリートの代表的な加力時におけるひずみ度分布を示す。ここで代表的な加力時としては、加力試験時におけるスタブ間の変位 4 mm、12 mm、24 mm を用いて各試験体の歪み度の比較を用いた。正負交番加力においては、比較的引張り側、圧縮側における鉄筋の歪み度分布は均一に近い状況を保ちてきていたと考えられるが、やはり面外変形が急激に増加するにつれて、引張り側鉄筋の歪み度分布はばらつく傾向を示している。

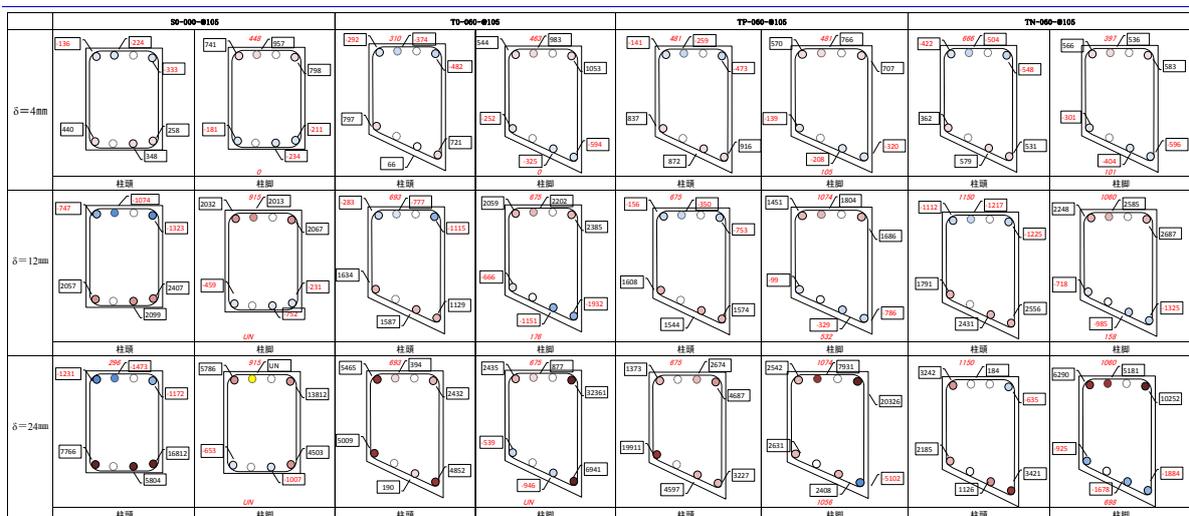
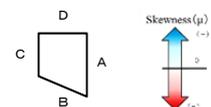


図 5-9 端部固定水平加力試験における歪み度分布



(8) ひび割れと最終破壊状況

各試験体の破壊性状について最終ひび割れ状況及び最終加力時の写真（中央純曲げ領域）を図 5-10 に示す。

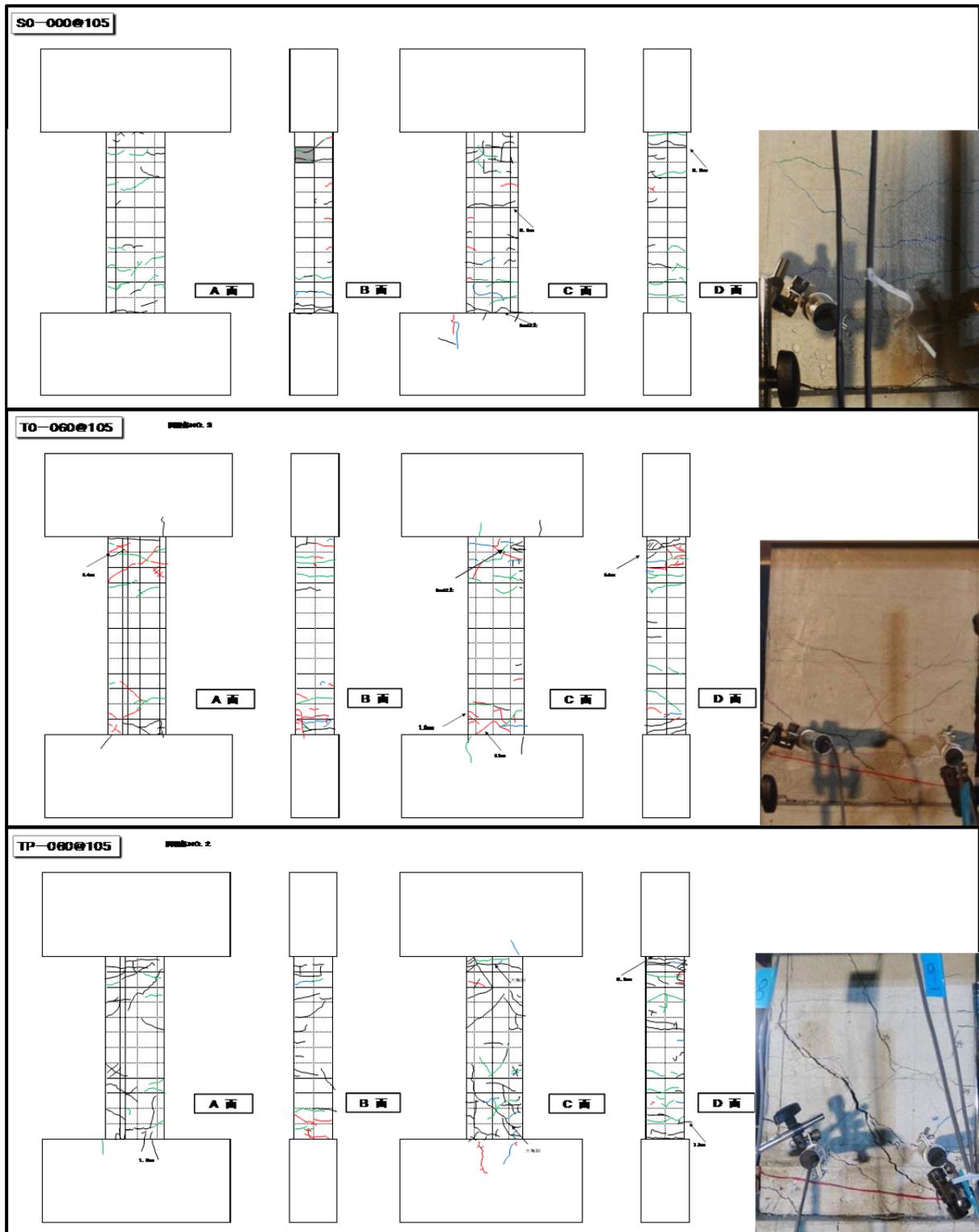


図 5-10 ひび割れ図及び最終加力写真

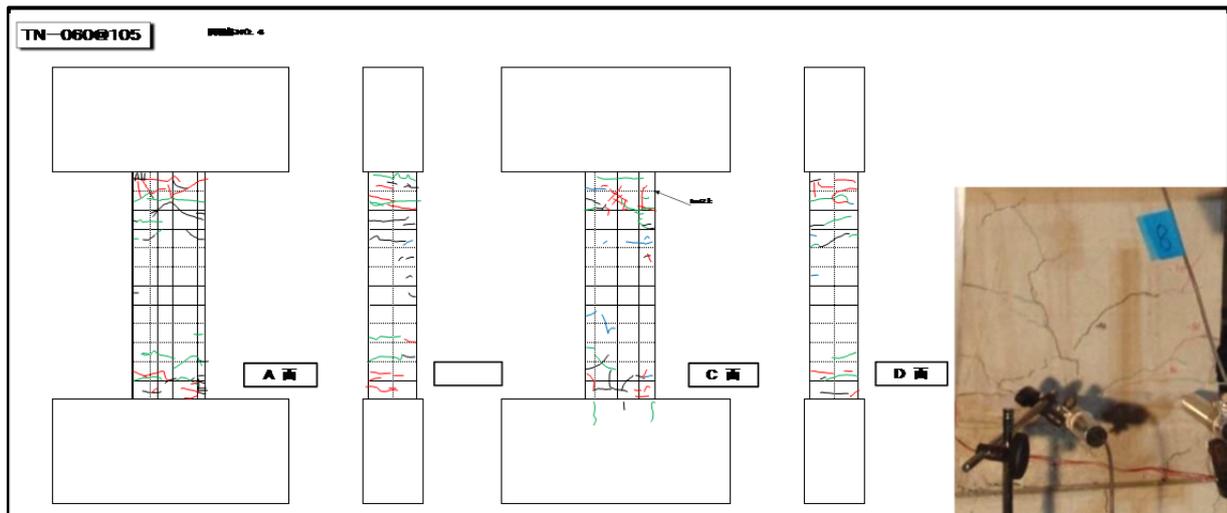


図 5-10 ひび割れ図及び最終加力写真(つづき)

6. 曲げ破壊想定時の異形柱における強度上の問題点、設計・診断上の留意点

(1) 異形柱における加力時の変形特性

長方形柱と異形柱の断面的な特性の違いとして、部材断面における主軸の方向と想定される加力方向が長方形柱では一致するが、異形柱では一致しないことは明らかである。このため加力が小さい場合にはその差は微々たるものであることも多く、特に配慮する必要がない場合が多いが、加力が大きくなるにつれて、面外方向力が大きくなり、側面方向の弱軸曲げによる変形や面外方向の回転変形を無視できなくなると考えられる。このような面外変形については予備試験時のTシリーズ及び自由端支持四点曲げ試験時のTUシリーズやTBシリーズなどで特に顕著であった。(図 6-1)

また回転に関する変形では自由端支持四点曲げ試験におけるTBシリーズで不規則な回転による挙動が確認できた。また端部固定水平加力試験では、大変形時に面外変形が急激に増大する挙動を確認したが、スタブ間で1/60を超えるような主変形時であった。

一方、尖端部を圧縮して加力したものと尖端部を引張りで加力したものについては、尖端部圧縮の場合に顕著な圧壊などがなかったことから有意な差は認められず、前述の図 4-7 に示すように正逆の両加力についても同様の変形曲線を示すこととなった。

一般的に柱部材のような構造部材は、単独ではなく架構の一部材として存在するため、端部の支持条件は

- ・スラブによる固定度の判断
- ・直交方向の梁による拘束効果

が影響する。実際の建築物においては上記 i)、ii) の固定度がスラブの有無及び異形柱断面との剛性比、直交梁の剛性・方向、など多様な状況であることから、面外方向への変形量や回転角そのものを定義することは今のところ困難だが、外力から想定される面外方向への分力を見込んで想定応力を算出し、その外力を考慮して、設計・診断を行うことがより適切であると言える。



図 6-1 自由端支持四点曲げ試験 試験機の変形

(2) 異形柱におけるひび割れ特性と歪み度分布

i) ひび割れ特性

長方形柱における曲げひび割れ耐力（以降“ M_c ”）の評価式としては、『鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会）』（以下“RC規準”）の8条に示されている。今回の実験結果から受けた印象では、 M_c の評価式は今回実験を行った異形柱では概ね適用可能と考える。ただし台形型の異形柱におけるひび割れの発生は、台形の長辺部分に多く発生した後短辺に発生するような、断面内の剛性差が顕著に現れるような特性を有している。（図6-2）

端部固定水平加力試験では長方形柱とは異なり、異形柱のスタブ近辺に曲げせん断亀裂と考えられるひび割れの発生が認められ、試験体 TP シリーズではそのひび割れ幅の拡大が顕著であった。長方形断面では破壊性状が主筋抜け出し型の比較的じん性に富んだ性状であったのと比較すると、せん断型の亀裂が拡大したことについては、異形断面柱を無条件に等価な長方形断面の柱に置換することは最善とは言えず、せん断耐力についても確認することが望ましいと言えよう。

ii) 歪み度分布

本実験では台形型の異形柱を対象としたが、圧縮端から距離が最大で2倍以上異なるような形状を持ち、さらに面外方向への変形・回転も確認されたことから、多様な結果が確認された。

(3) 異形柱における曲げ耐力評価

長方形柱の曲げ耐力評価については、構造設計・耐震診断上広く一般的に用いられている、終局曲げ強度式⁶⁻¹⁾が知られており、異形柱においても、等価な断面積の長方形断面置換が主な耐力評価の手法として用いられることが大多数であることは第1章（1）に示した通りである。本加力試験では計15体の加力試験を通じて、本終局曲げ強度式を下回った試験体は無かったことから、異形柱の終局曲げ耐力の想定に本耐力式を用いることは、今回の検討内容においては曲げ耐力上は妥当であるといえよう。

(4) 異形柱におけるじん性評価

異形柱のなかでも台形型柱では、その形状から尖端部分が鋭角の形状を有し、圧壊や付着割裂破壊など、じん性能への影響が懸念された。本実験結果においてじん性に関する上記2項目についてとりまとめ評価を行う。

i) 圧壊

軸力を加味して加力試験を行った、TNシリーズ試験体で顕著な圧壊が確認された。TNシリーズの圧壊はスタブ間の変形で約1/100程度から明確に確認され、最終加力まで圧壊範囲が拡大していったが主として尖端部に沿って上下方向への拡大が主となった。また圧壊は柱頭及び柱脚の2カ所で発生したため、通常建物のように柱脚部のみで発生した場合の再現は確認できなかった。（図6-3）

終局時の負担軸力の制限が一般的に $1/3 \cdot b \cdot D \cdot F_c$ 程度を最大範囲と考えるならば、本実験における加力の4倍程度の軸力を保持したまま曲げ耐力を発揮すべきと考えられる。本研究では軸力作用時の圧壊と破壊性状についてさらなる検証が必要であると言える。



図6-2 長辺部と短辺部のひび割れ発生状況
(TS-060-@105 荷重 15kN)

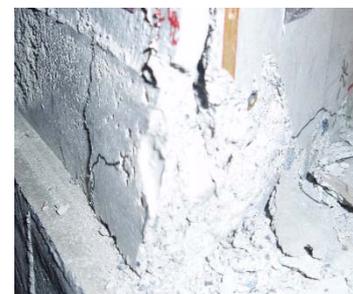


図6-3 TNシリーズ柱脚部圧壊

ii) 付着割裂破壊など

図 6-4 には付着や付着割裂に起因したと考えられる、破壊性状を示す。図 6-4 (上段) は予備試験において T-060-@105 に見られた斜めひび割れから主筋に沿って拡大したひび割れを示す。また図 6-4 (中段) では TN-060-@105 における先端部コーナー主筋部分のコーナースプリット破壊を示す。また図 6-4 (下段) には TP-060-@105 における、先端部周辺のかぶりコンクリートがコーナースプリット破壊からやや破壊域が拡大した形状の破壊が確認された。中段及び下段の破壊形状についてはどちらも主筋の座屈を伴う破壊性状となっている。コーナースプリット破壊については、たとえば付着信頼強度の検討⁶⁻²⁾が知られており、実際の設計や診断でも用いられているが、 45° の割線線長さ b_{ci} 及び横補強筋の効果 $\sigma_c \cdot s_t$ についてはいずれも最低限先端部分の影響を考慮した角度補正が必要と考えられる。

[参考文献]

6-1) 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書、2015.6

6-2) 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 (日本建築学会)、2006.4



図 6-4 付着割裂に起因する破壊

7. まとめ

本研究では中高層共同住宅に多く見られる、建築基準法における各制限に対して有効に建設が可能な建築物の計画において、居住性や経済性などを主目的とした結果、柱の断面形状について、従前より広く用いられている長方形断面・円型などとは異なる台形や五角形の柱を用いて建設されている建物が調査サンプルに対しておよそ13%程度確認された。これらの柱は五角形型が53%、台形型が41%、どちらにもあてはまらない形状の断面が6%となった。また主として大きな分類となった五角形型、台形型の柱についてはその形状の分布を確認し、それぞれの形状を代表できるようなファクターとして、尖端角や長辺・短辺の比率などから分布図を作成した。またこれらの断面の主筋量、帯筋量ならびにそれらの鉄筋主材、使用コンクリートの強度についても統計処理を行った。

試験体を用いた実験については、第一段階として簡易に地震時の応力状態が再現できる実験手法として大野式加力を用いた実験を異形柱2体、比較検討用の異形柱と等価な断面の矩形柱1体を作成し、単調加力による加力試験を行った。

第二段階の実験としては基本的な曲げ性能を確認すべく、端部を自由支持とし純曲げ区間の確認が可能な4点曲げ試験を実施した。試験体の構成は尖端角が60°の配筋量が同一な試験体を3体作成し、尖端角が圧縮側、引張側及び強軸方向に直交する場合の3方向の加力にて1/50程度の変形まで加力を行った。また尖端角の違いによる比較対象として、尖端角が概ね調査実績の最大に近い45°の形状の試験体を同じく3体作成し、3方向から加力した。また比較対象として尖端角60°の試験体の長辺に当たる長方形断面の試験体と、同じく短辺に当たる試験体を作成し、計8体を単調加力にて試験を実施した。

最終段階の実験では大地震時の破壊性状を再現させる目的から、端部固定条件による正負交番加力を行い、スタブ間の変形角1/30程度を目安に加力試験を行った。試験体は尖端角60°を対象として主筋量を標準的な主筋量1体と、主筋径を1サイズ太いものとして主筋量を約2倍弱としたもの、並びに標準的な主筋量の試験体におよそ $0.1 \cdot F_c$ 程度の軸力として100kNを載荷した試験体の計4体を試験対象とした。

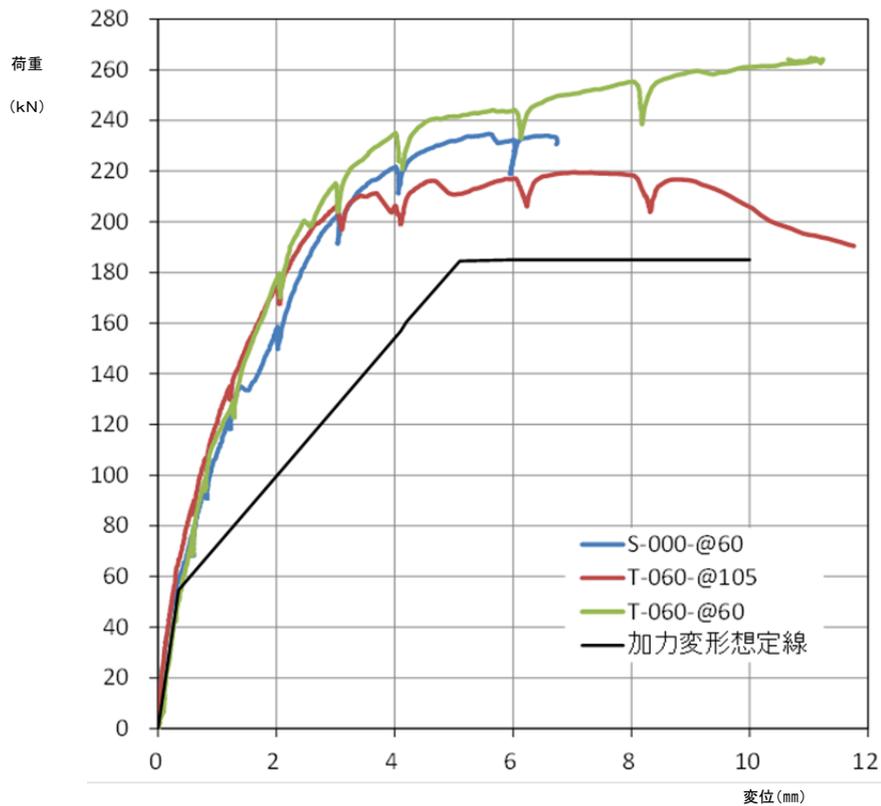
これらの加力試験を通じ、以下の構造特性、構造耐力並びに破壊特性について以下の知見を得た。

- ・異形断面柱（台形型）は等価な断面積の長方形断面に置換して終局曲げ耐力を想定しても、下回る試験体は確認されなかった。
- ・異形断面柱（台形型）は尖端側を圧縮側とした場合やその直交方向に加力した場合、面外変形が卓越するケースが確認された。
- ・初期段階において長辺、短辺が存在する方向に加力した場合について、ひび割れは長辺側に集中して発生する。
- ・せん断型のひび割れが顕著となる試験体が数例確認された。
- ・尖端部分は圧壊の影響も有り、コーナースプリット破壊型の付着割裂破壊を生じやすい。

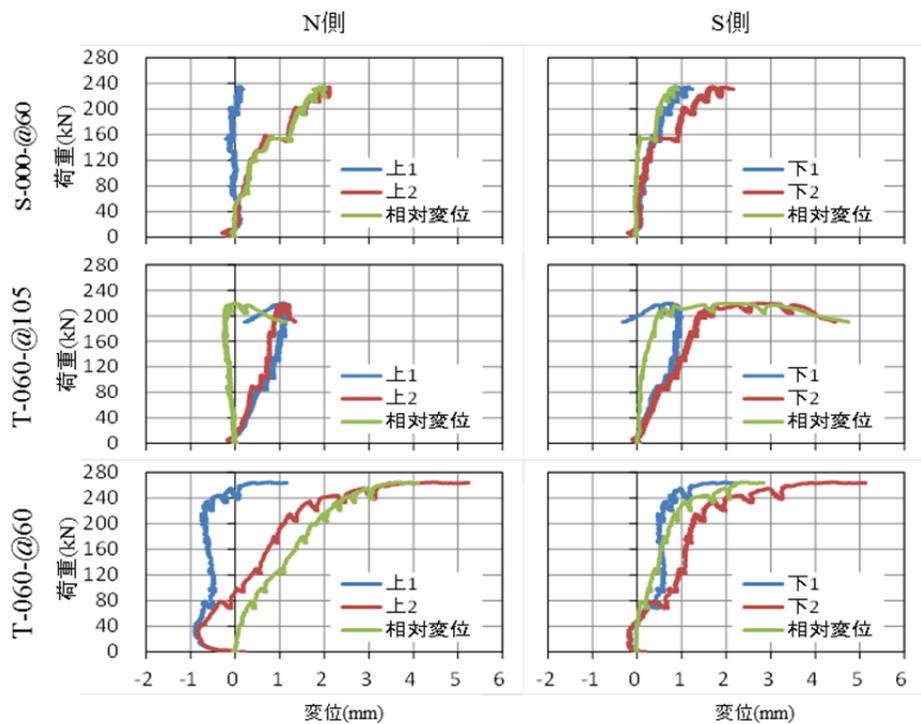
今後は建築物の安全性確保・向上のため、異形柱におけるせん断耐力の確認及び、じん性の確保に関する諸事項について解明していく。

〔 参考資料 〕

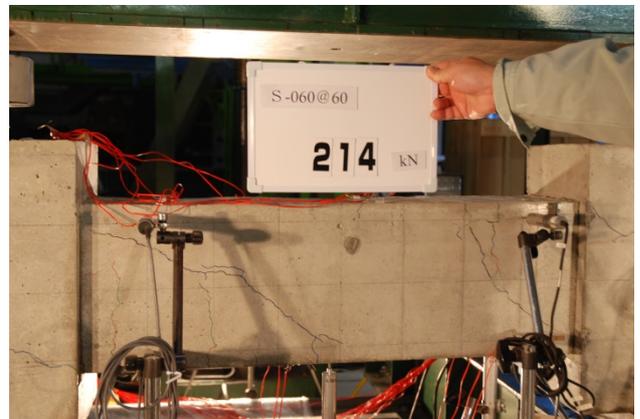
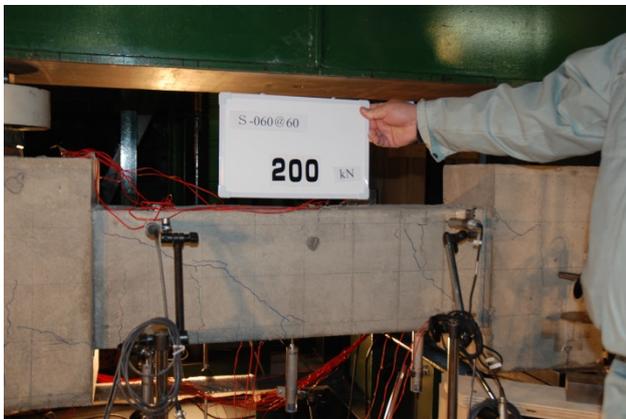
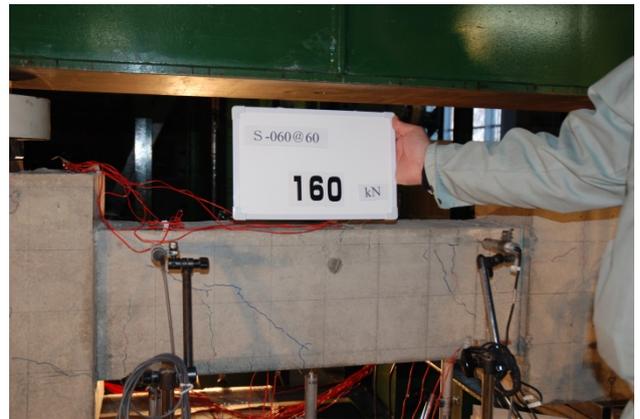
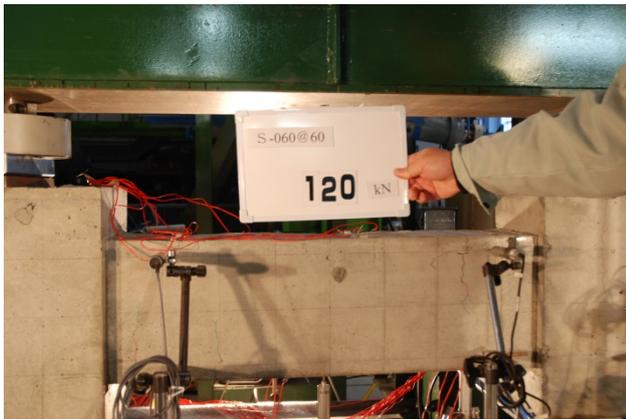
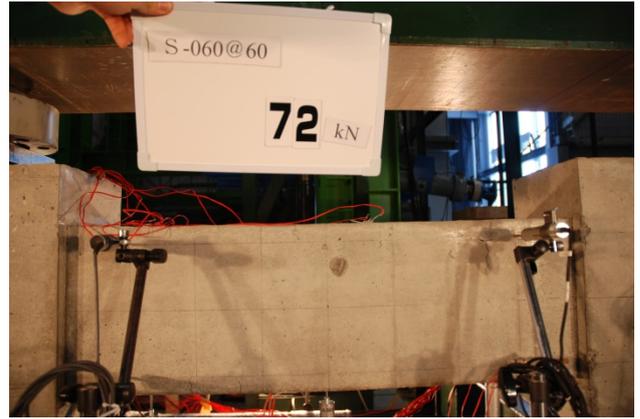
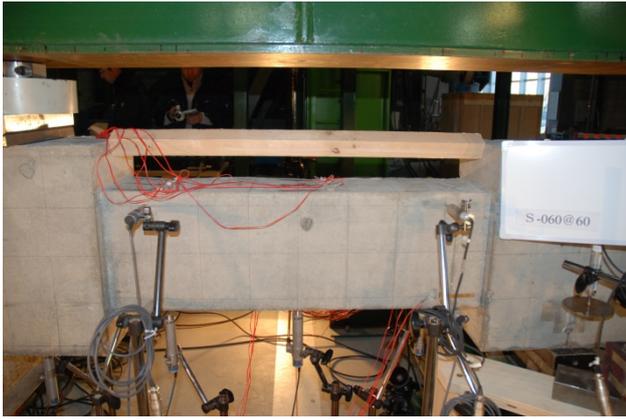
A. 予備試験加力データ及び参考写真



図A-1 予備試験加力変形曲線



図A-2 予備試験加力変形曲線(側面)



図A-3 予備試験加力試験写真(S-000-@105)

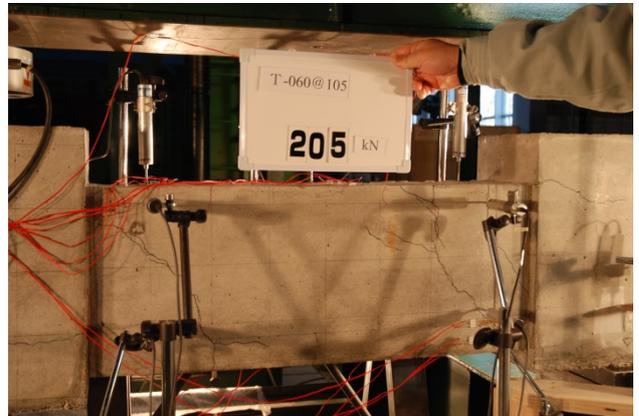
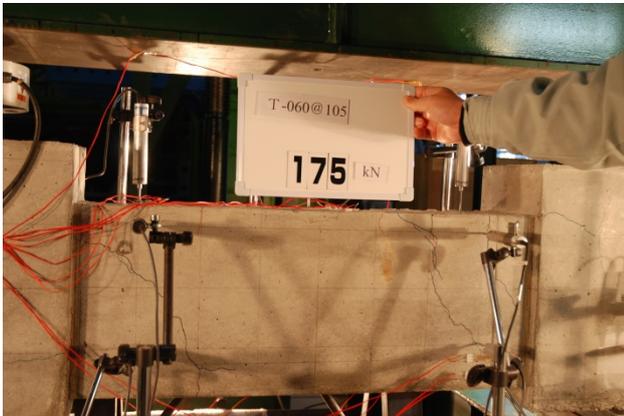
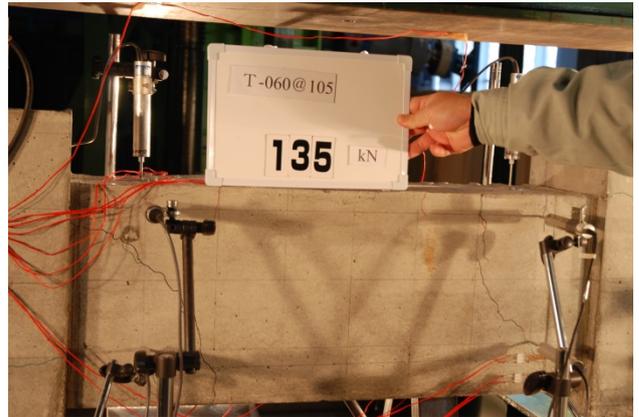
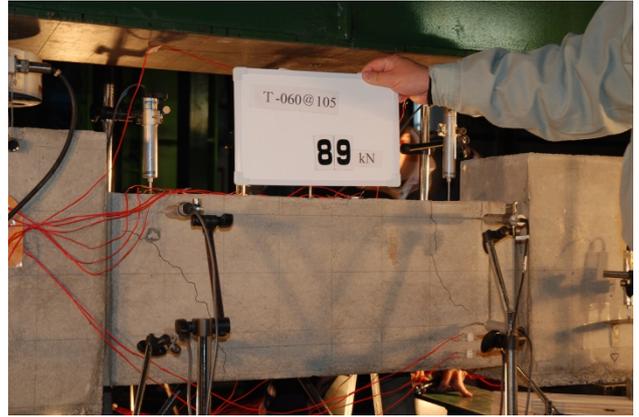
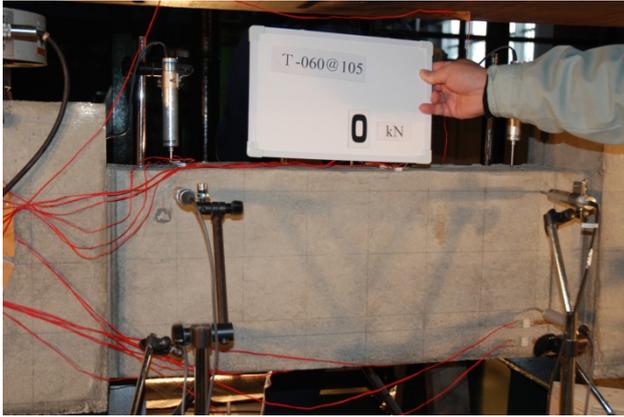


図 A-4 予備試験加力試験写真(T-060-@105)

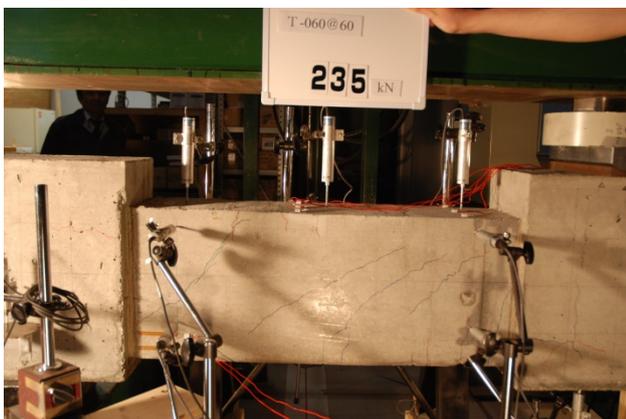
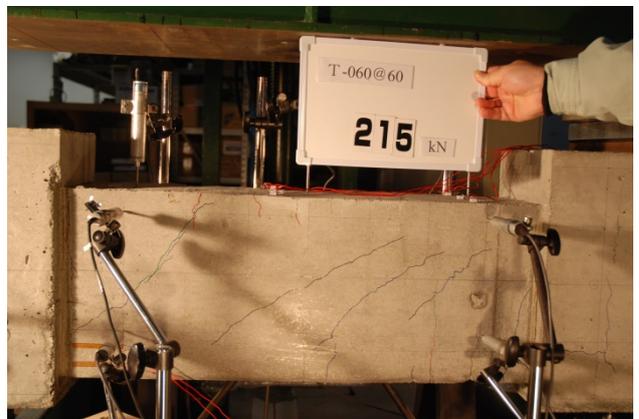
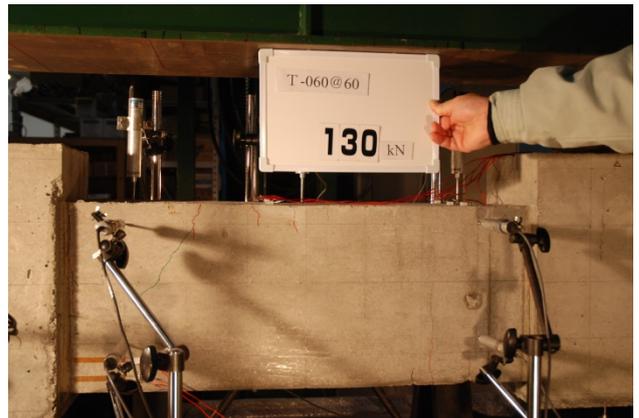
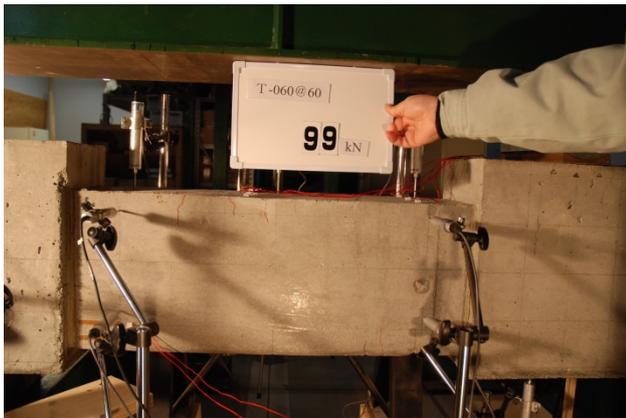
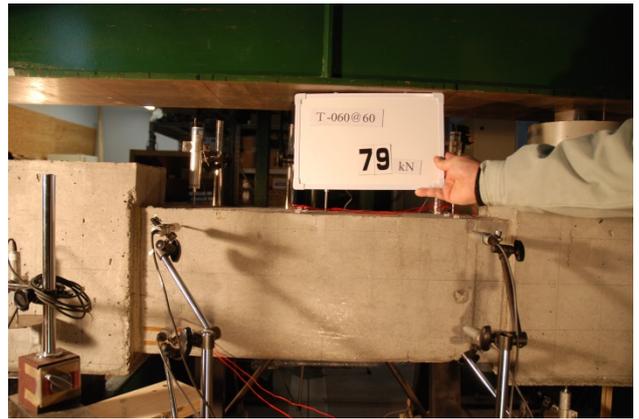
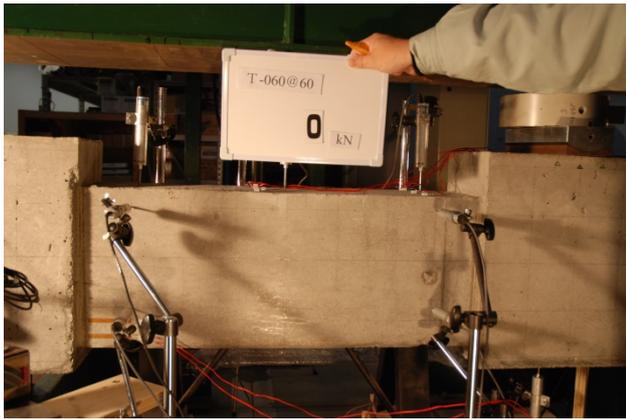


図 A-5 予備試験加力試験写真(T-060-@60)

B. 自由端支持四点曲げ試験加力データ及び参考写真

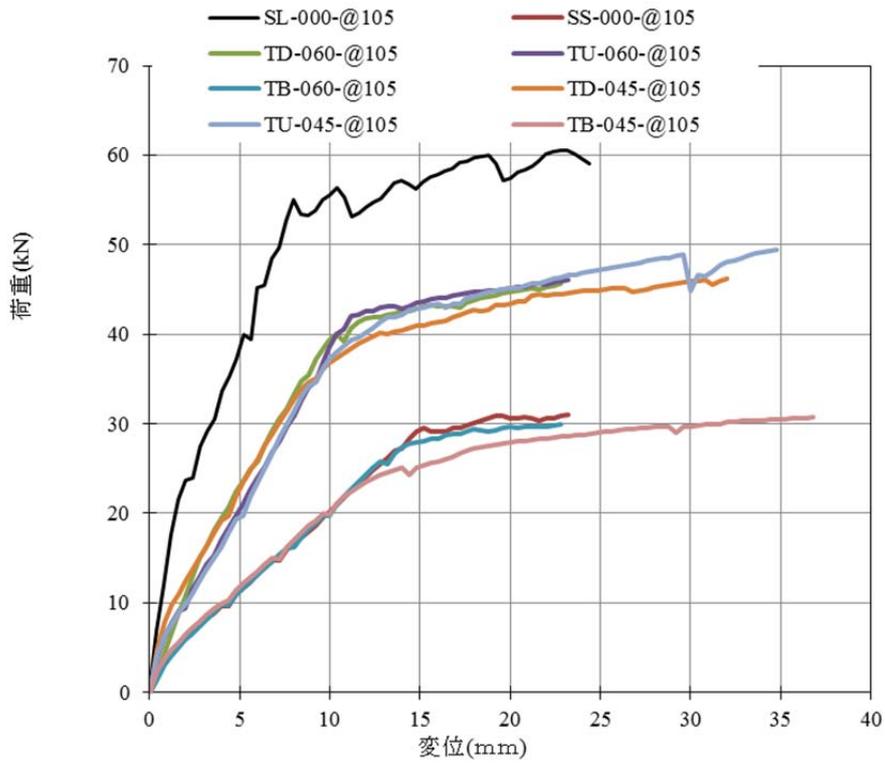


图 B-1 自由支持四点曲げ加力試験荷重変形曲線

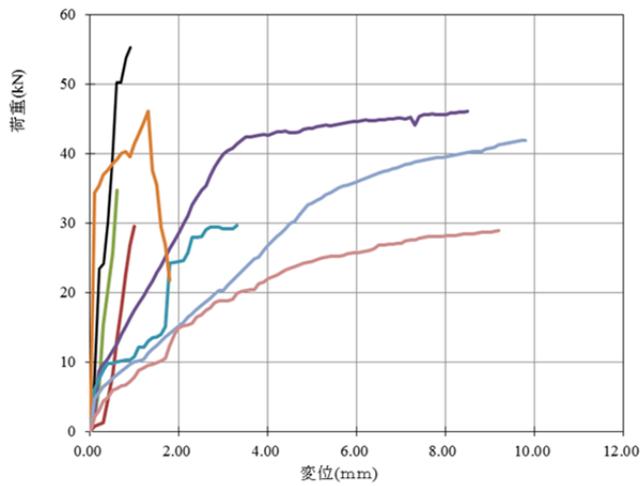


图 B-2 自由支持四点曲げ加力試験荷重変形曲線(水平方向)

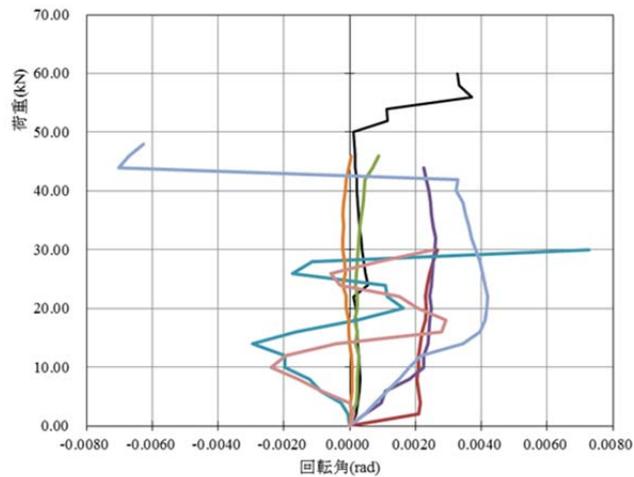


图 B-3 自由支持四点曲げ加力試験荷重変形曲線(回転方向)

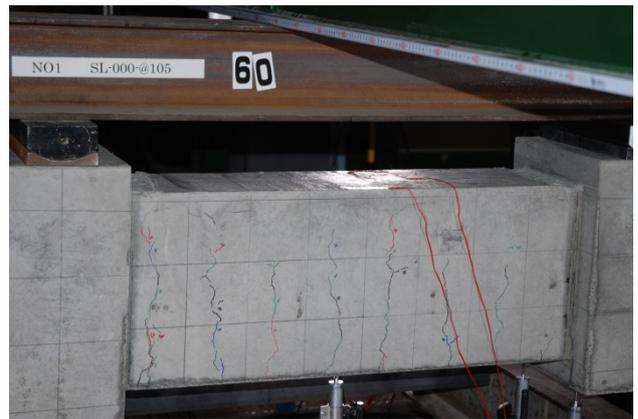
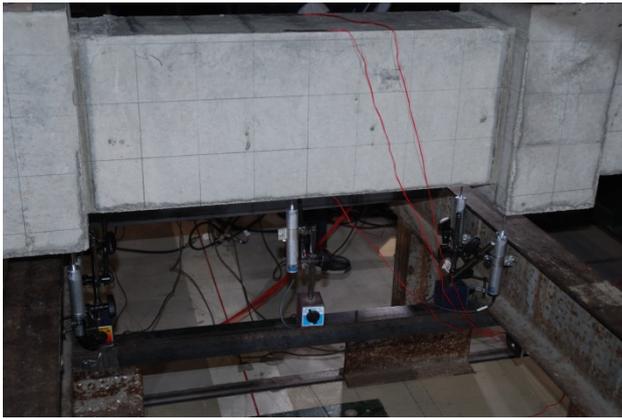


图 B-4 自由端支持四点曲げ試験(SL-000-@105)

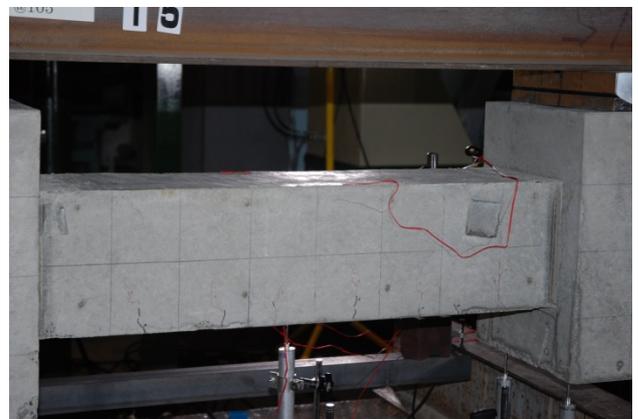


图 B-5 自由端支持四点曲げ試験(SS-000-@105)

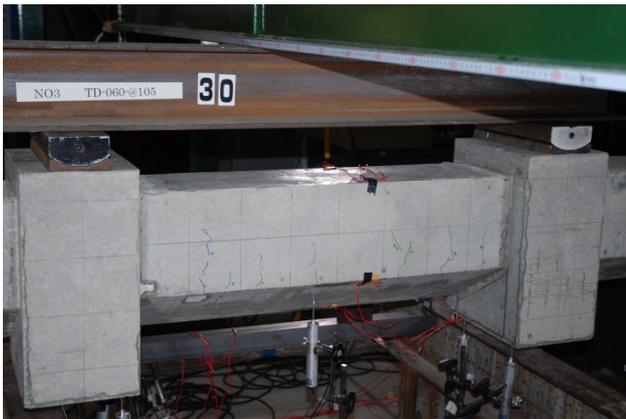
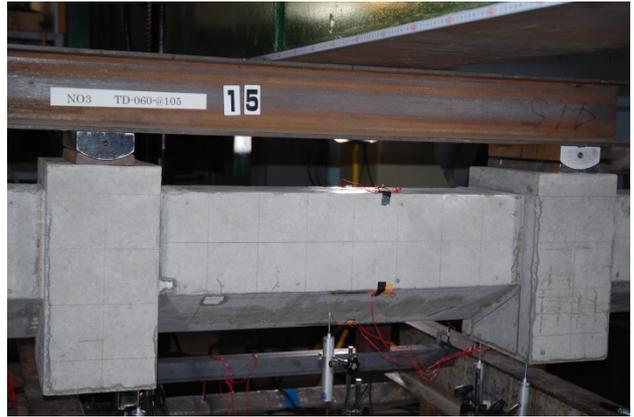


图 B-6 自由端支持四点曲げ試験(TD-060-@105)



图 B-7 自由端支持四点曲げ試験(TU-060-@105)

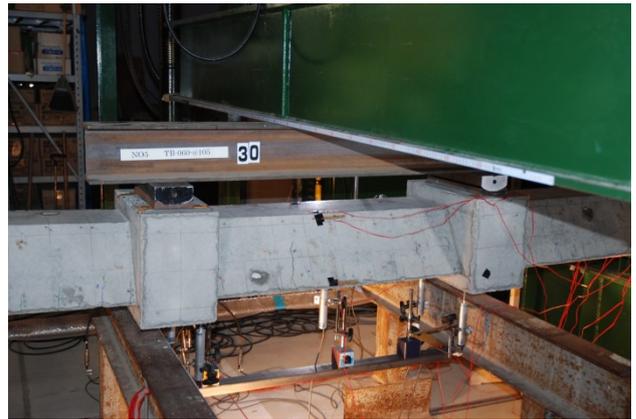
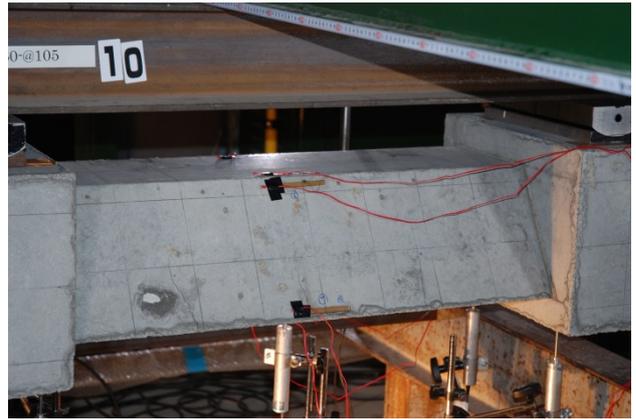


图 B-8 自由端支持四点曲げ試験(TB-060-@105)

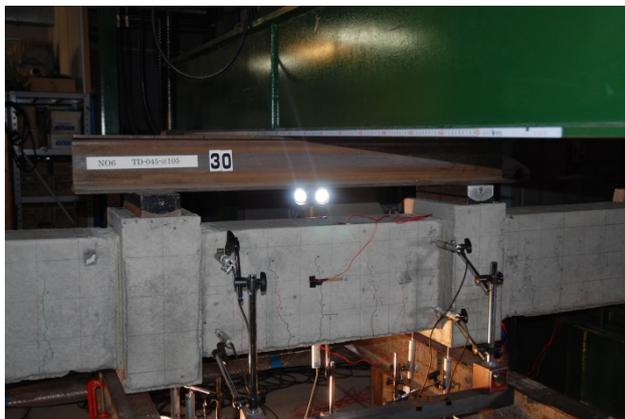
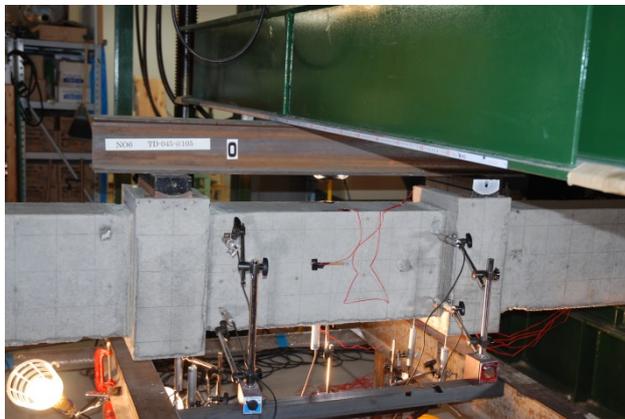


图 B-9 自由端支持四点曲げ試験(TD-045-@105)



图 B-10 自由端支持四点曲げ試験(TU-045-@105)



图 B-11 自由端支持四点曲げ試験(TB-045-@105)

C. 端部固定水平加力試験加力データ及び参考写真

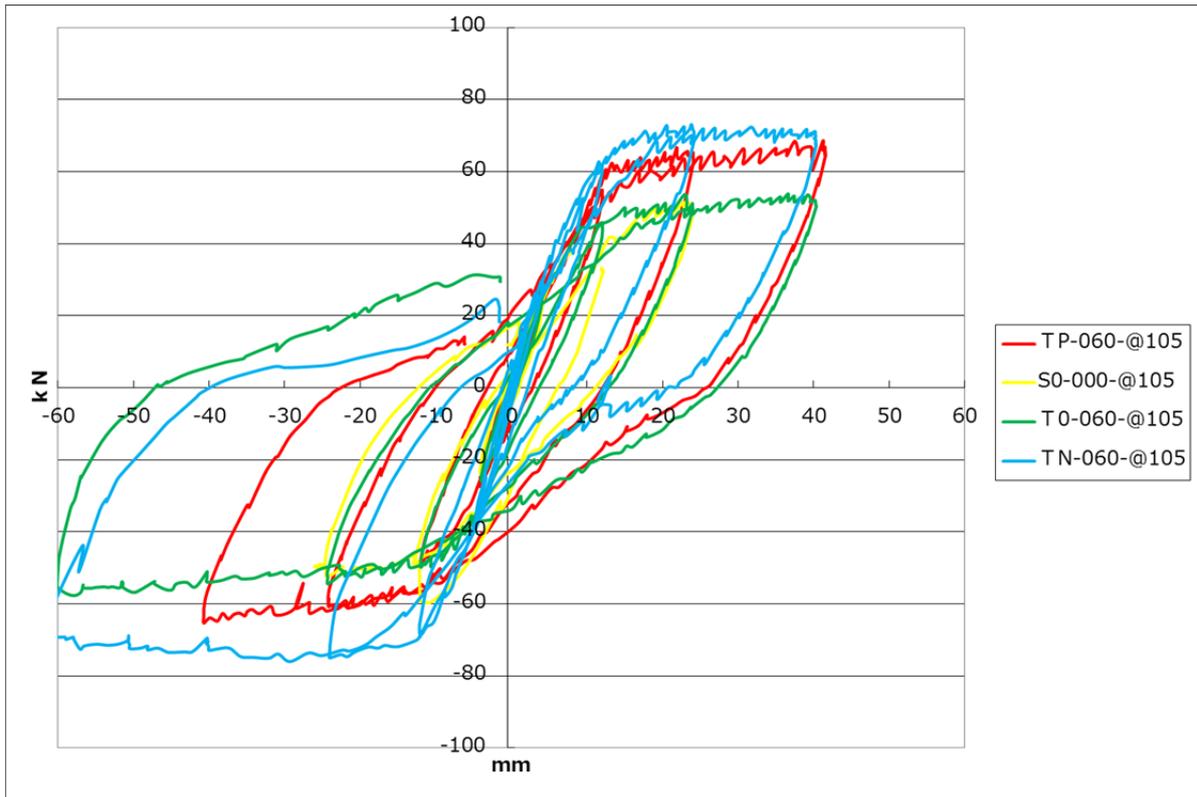


圖 C-1 端部固定水平加力試驗荷重變形曲線

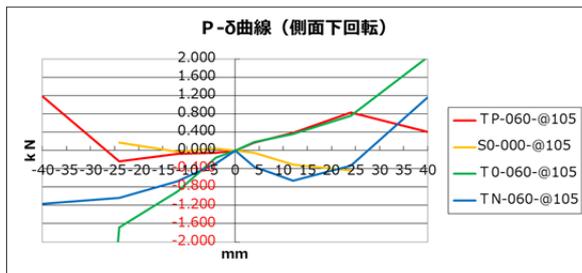
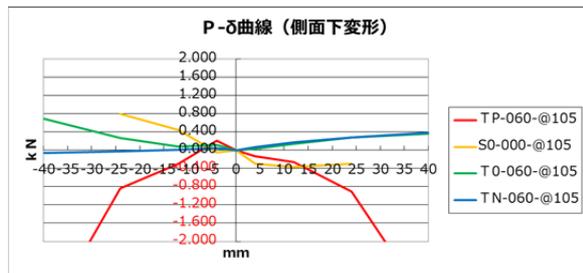
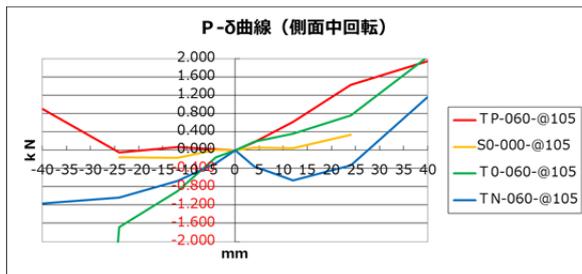
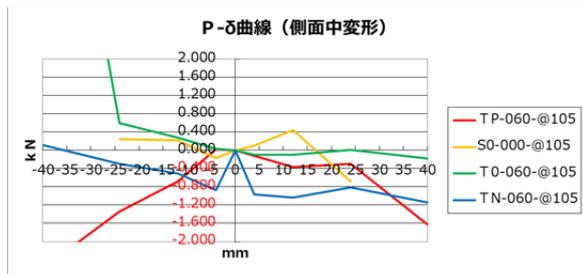
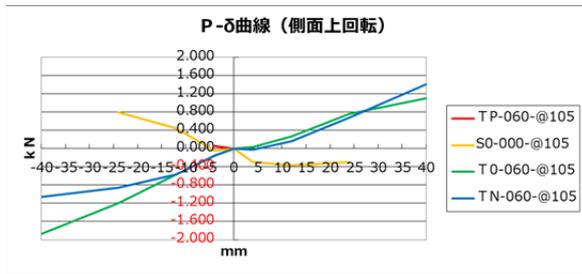
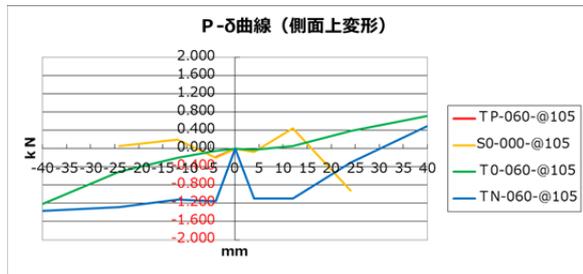


圖 C-2 端部固定水平加力試驗荷重變形曲線(面外方向)

圖 C-3 端部固定水平加力試驗荷重變形曲線(回轉方向)

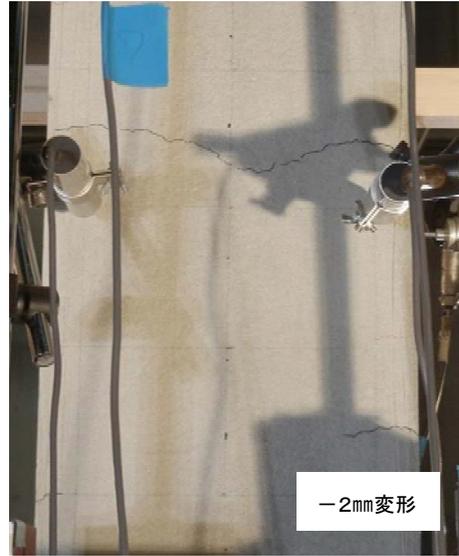


図 C-4 端部固定水平加力試験(S0-000-@105)

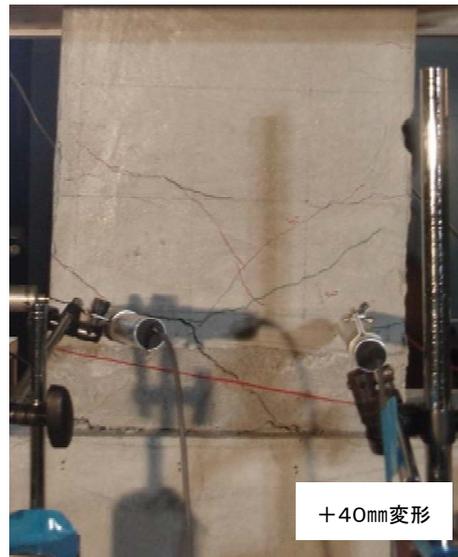
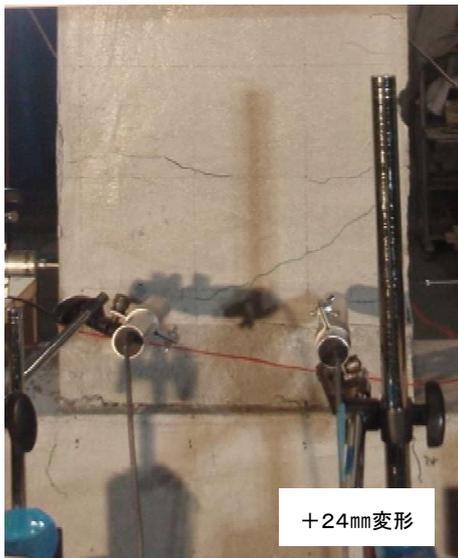
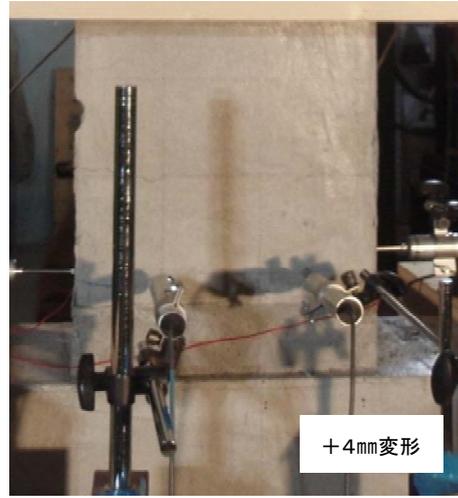
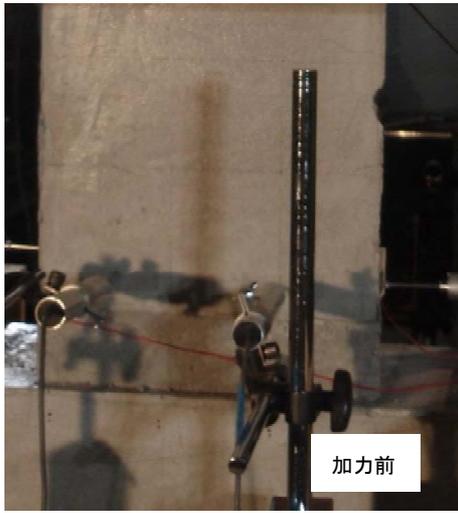


图 C-5 端部固定水平加力试验(T0-060-@105)



図 C-6 端部固定水平加力試験(TP-060-@105)

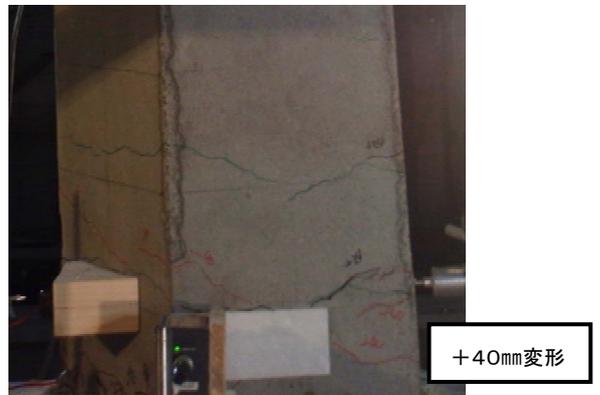
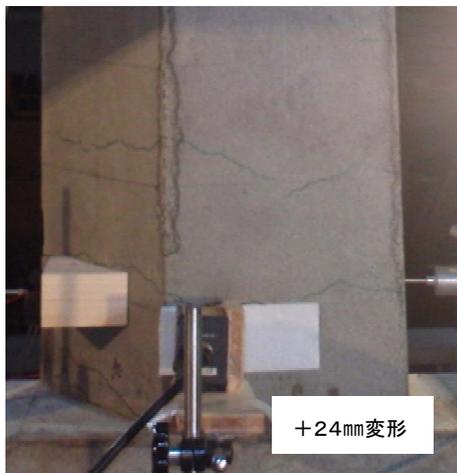


図 C-7 端部固定水平加力試験(TN-060-@105)