

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せん断応力に対する構造耐力・破壊特性に関する研究

Shearstress in Variant Column of Reinforced-Concretre of Building Confirmation

本間 裕二¹⁾、千葉 隆史²⁾、森松 信雄³⁾、宮内 淳一⁴⁾、齊藤 隆典⁵⁾、植松 武是⁶⁾
Yuji.Honma¹⁾, Takafumi.Chiba²⁾, Nobuo.Morimatsu³⁾, Junichi.Miyauchi⁴⁾,
Takasuke.Saitou⁵⁾, Takeyoshi.Uematsu⁶⁾

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
建築性能試験センター

Building Performance Testing Center

Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

1)構造判定課 課長 2)構造判定課 主査 3)評価試験課 主査 4)評価試験課 研究職員 5)評価試験課 研究職員・博士(工学) 6)北海学園大学 教授・博士(工学)

1) Structural Safety Judgment Section Director. 2) Chief for Structural Safety Judgment. 3) Chief for Judgment and Evaluation. 4) Researcher. 5) Researcher. Dr(Eng). 6) Professor,hokkai-gakuen University. Dr(Eng)

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せん断応力
に対する構造耐力・破壊特性に関する研究

Study on Structure Characteristics and Design Method for Shearstress inVariant Column of Reinforced-Concretre

本間 裕二¹⁾、千葉 隆史²⁾、森松 信雄³⁾、宮内 淳一⁴⁾、齊藤 隆典⁵⁾、植松 武是⁶⁾
Yuji.Honma*, Takafumi.Chiba **, Nobuo.Morimatsu***, Junichi.Miyauchi ****,
Takasuke.Saitou *****, Takeyoshi.Uematsu *****

キーワード : 鉄筋コンクリート柱、異形断面、せん断耐力、付着強度、脆性破壊

Keywords : *Reinforced-Concretre Column, Variant Column, Shear Strength,*

Bond Strength, Brittle Fracture

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せん断応力に対する耐力特性を明らかにする。

2. 研究内容

1) 実験計画の構築 (H29～R1 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

2) 加力実験 (H29～R1 年度)

- ・ねらい：実験計画に基づく加力実験を実施する。また実験時のコンクリート試験体に発生するひび割れ状況のデータ収集を行い、今後の知見の一部とする。
- ・試験項目等：異形柱の加力実験

3) 耐力特性の把握と耐力評価・設計へ向けての検討 (H29～R1 年度)

1) 構造判定課 課長 2) 構造判定課 主査 3) 評価試験課 主査 4) 評価試験課 研究職員 5) 評価試験課 研究職員・博士 (工学)

6) 北海学園大学 教授・博士 (工学)

* Structural Safety Judgment Section Director. ** Chief for Structural Safety Judgment. *** Chief for Judgment and Evaluation. **** Researcher. ***** Researcher. Dr(Eng). ***** Professor,hokkai-gakuen University. Dr(Eng)

- ・ねらい：断面形状や配筋などの仕様と構造耐力との関係を整理し、設計に係る問題点・留意点などを明らかにする。
- ・試験項目等：加力実験結果の整理、構造解析

3. 研究成果

- 1) せん断破壊先行型異形柱の試験体 12 体（うち 1 体は比較対象用の長方形断面柱）の加力試験を実施し、形状（外形、配筋）、試験方法などをファクターとしてそれぞれの破壊性状、最大耐力などを測定し計算値との比較を行った。（図-1）
- 2) 加力試験時における面外への回転等を確認した。（図-2）これらの変形が長方形置換とした部材耐力の計算手法とは明確に異なる破壊性状の原因となった可能性がある。（図-3）
- 3) 異形柱の付着破壊を評価した設計法としては、「付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度」における、ヒンジ領域の回転角（ R_p ）を 0.02 まで引き上げて検討することで、付着破壊時のせん断耐力を評価することが可能であるとの知見を得た。

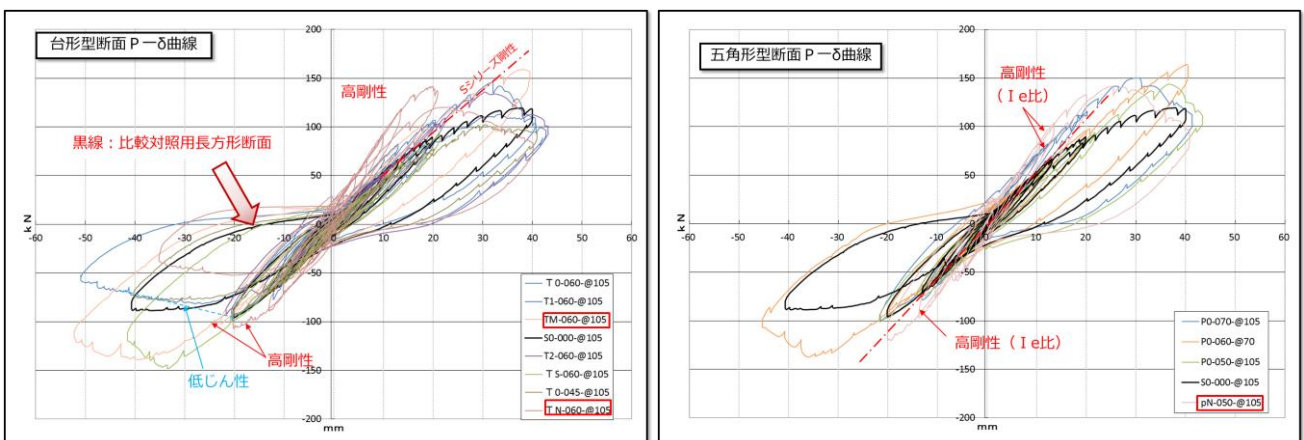


図-1 主加力方向における異形柱の加力変形曲線（左：台形型柱、右：五角型柱）

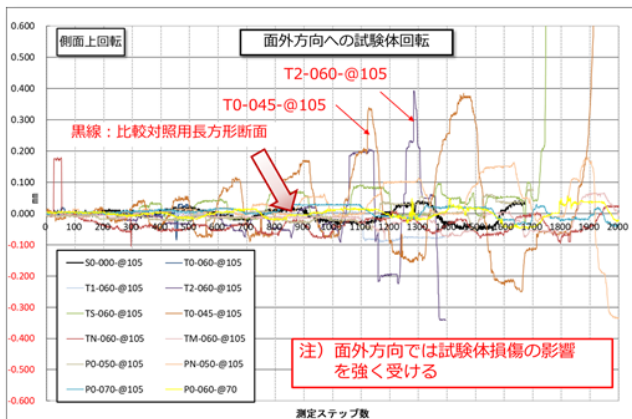


図-2 面外方向における異形柱の加力変形曲線

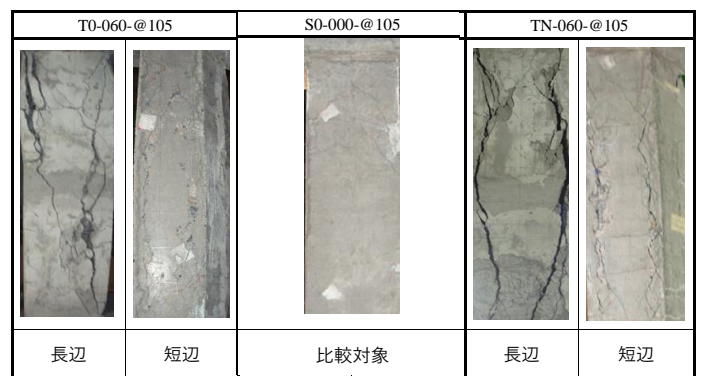


図-3 長方形柱（左）と異形柱（右）の破壊性状比較

今後の見通し

- ・数多ある形状について長方形置換との破壊性状の違いを明らかにするため、解析的手法を中心に実験的手法を併用するなどしていく必要がある。なかでも付着破壊に進展したケースでは原因究明が必要である。当面は付着破壊を抑制するため、「付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度」において前述の係数を用いた検討を行い、脆性的な破壊を回避することが望まれる。
- ・異形柱では接続される梁部材（梁主筋）の定着仕様が不明確なまま施工されているおそれがあり、柱梁接合部の破壊性状についても明らかにしていくことが望まれる。

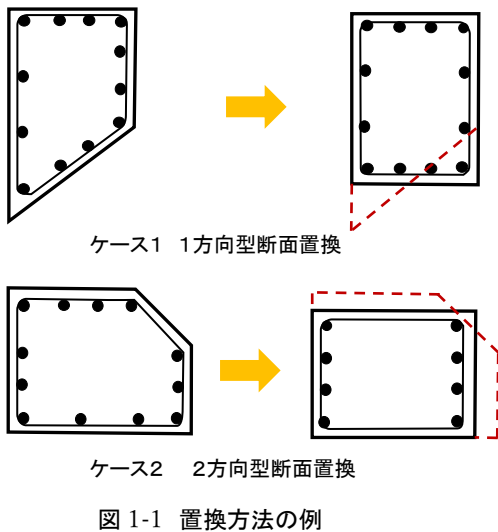
目次

1.	はじめに	1
2.	研究目的	1
3.	実態調査	2
	(1) 出現割合	2
	(2) 形状分類	2
4.	実験概要	3
	(1) 試験体	3
	(2) 使用材料及び試験体の作成概要	3
	(3) 加力方法	5
	(4) 計測方法	5
5.	加力試験結果	6
	(1) せん断ひび割れ強度	6
	(2) 主筋歪み度分布	6
	(3) 帯筋歪み度	7
	(4) ひび割れと最終破壊状況	7
	(5) 加力試験結果概要（加力変形方向）	9
	(6) 加力試験結果概要（面外変形）	10
6.	せん断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	11
	(1) 異形柱における加力時の変形特性	11
	(2) 異形柱におけるせん断耐力評価	11
	(3) 異形柱（せん断破壊先行型）における靱性評価	11
7.	おわりに	12
	[参考資料]	
A.	加力データ	資料 1
B.	試験加力時参考写真	資料 2
C.	材料強度測定データ及び写真	資料 3
D.	試験体製作関係写真	資料 4
E.	試験体試設計資料	資料 5
F.	異形柱における統計資料	資料 6

1. はじめに

建築物が道路斜線、隣地斜線及び日影制限など建築の制限によって、建築可能な空間に限度まで建築を試みた場合、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場合がある。このような建築計画において、直角に交わらないグリッドの交点に柱を計画した場合などでは、台形状や五角形状の柱、若しくはより不整形な形状の柱（以降これらの柱を“異形柱”と呼称する）が形成される場合があることはすでに報告済みである。

現在このような建築物の構造計算は、ほぼ全建築物において構造計算ソフトを用いて解析が行われているが、これらの構造計算ソフトは一般的に日本建築学会などの諸基準に準拠していることから、不整形な形状を有する異形柱は、整形かつ解析可能な長方形（円形）かつ等価な断面積の部材に置換され、解析されているのが実情である。（図 1-1）



これらの長方形断面への置換について、技術的背景が確認できるような資料は見当たらず、変形の増大に伴い損傷を受けるであろう先端部の破壊性状や、主加力方向と断面の主軸が一致しない事による影響、並びに長方形断面との帯筋の拘束効果の違いなどは未だに確たる工学的背景が明らかではないままに建築されているのが現状である。

既報 となる曲げ破壊先行型試験体の加力実験では、15体の異形柱（ただし比較検討用の長方形断面を含む）について加力試験を実施し、異形柱の終局曲げ耐力は長方形断面に置換した場合と比較し、下

回る試験体は確認されなかったが、

- ・ 先端部分の著しい損傷（かぶりコンクリートの圧壊、鉄筋の座屈）
- ・ 面外方向への変形の増大
- ・ せん断型亀裂の拡大

などが加力試験結果として確認されている。（図 1-2）

2. 研究目的

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異形柱の構造耐力を的確に評価する目的から、実験的手法を用いて、基本的な構造特性であるせん断応力に対する耐力特性やじん性などの構造性能指標を明らかにしていくことを目的とする。



図 1-2 曲げシリーズ試験体の脆性的な破壊形式（上：せん断亀裂、中：主筋の座屈、下：圧壊）

3. 実態調査抜粋（再掲）

(1) 出現割合

これらの異形柱に関連する研究の発端となった、平成19年度から平成25年度までの7年間における調査結果についてその概要を再掲する。調査対象とした構造種別は鉄筋コンクリート造としており、調査対象の規模としては一般的に「中高層建築物」に区分される地上7階建て以上を調査対象建物に設定した。調査対象とした634棟のうち81棟、およそ13%弱の建物において異形柱が確認された。また発生が確認された81棟の建物において、異形柱の発生割合はおよそ11%弱となっている。

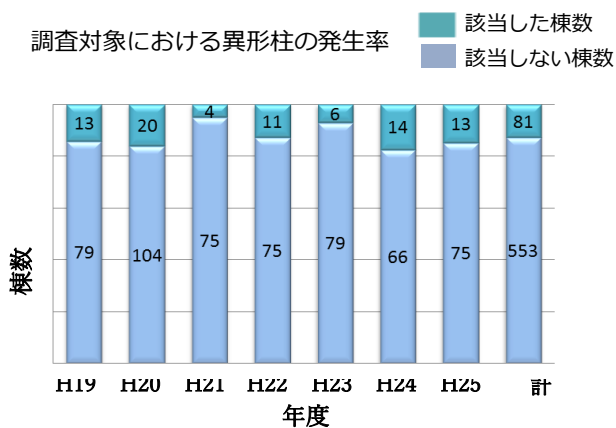


図 3-1 異形柱の発生率

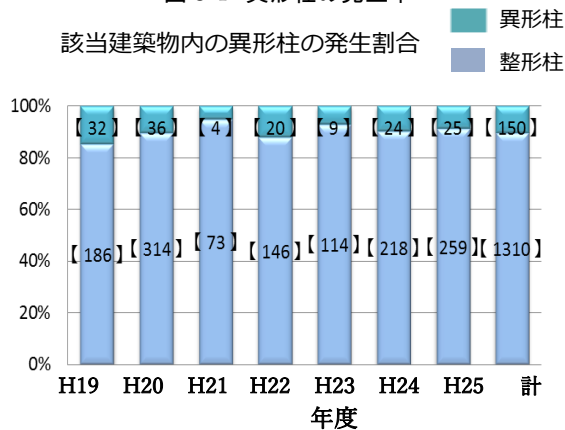


図 3-2 該当建築物における異形柱の割合

(2) 形状分類

上記調査によって確認された異形柱を形状別に分類すると

- 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 3-3) 調査対象においては台形型が約 41%、五角形型が約 53%、その他約 6%と集計されている。

各柱形状における形状的な特性の分布を把握するため、台形型については尖端角と長辺、短辺の比をファクターとして分類し(図 3-4)、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をファクターとした。(図 3-5) それぞれの平均値などは図中に示す。

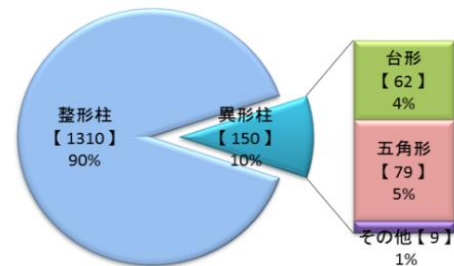


図 3-3 柱形状の分類

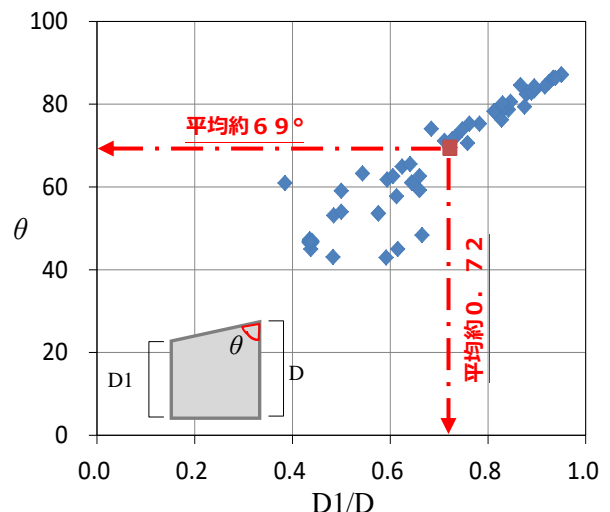


図 3-4 台形型柱の形状的分布

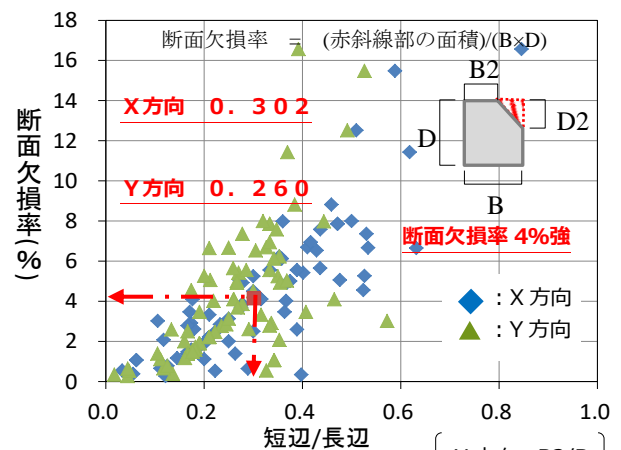


図 3-5 五角形柱の形状的分布

X方向: $B2/B$
Y方向: $D2/D$

4. 実験概要

(1) 試験体

試験体計画では曲げ耐力シリーズから引き続き、加力装置の能力も勘案しながら実断面の 1/3 程度を想定した試験体断面を平成 28 年度から 3 カ年、計 12 体計画した。いずれの試験体においても断面積は等価になるような計画とし、せん断耐力式は荒川 mean 式¹⁾を採用している。(図 4-1、図 4-2)

i) 平成 28 年度

比較検討用の等価な断面積を有する 1 体と、台形型として平均的な尖端角程度を有する尖端角 60 度の試験体 2 体、並びに最大程度の尖端角程度の試験体として尖端角 45 度の試験体 1 体を当該年度の試験体に選定した。なお尖端角 60 度の試験体のうち 1 体については、曲げ耐力シリーズにおいて、尖端部圧壊による破壊が顕著であった軸力の影響を確認するため、0.1F_c 程度の軸力を作用させた状態で加力試験を行っている。なお、曲げ耐力シリーズ同様に当該年度においては明快な鉄筋の歪み度分布を測定すべく、各 1 段の引張り側鉄筋を有する、加力直交側には主筋を配筋しない試験体仕様としている。

ii) 平成 29 年度

平成 28 年度加力試験結果において、付着型の破壊形式が確認されたことから、当該年度からより実配筋に近い、加力直交方向にも引張り側鉄筋と同量の配筋を有する試験体仕様（多段配筋仕様）としている。台形型では尖端角 60 度の試験体 3 体、うち 1 体はシャースパンの影響を確認すべく内法長さを 10% 低下させたものとし、1 体は台形型の特性として必然的に発生する、鈍角の帯筋形状部分に副帯筋を配置することによる破壊性状の違いを確認すべく、直交方向への副帯筋配置仕様を計画した。当該年度より着手した五角形型試験体仕様として、平均的な断面欠損率、形状を有する試験体 2 体を当該年度の試験体に選定した。そのうち 1 体については、台形型柱と同様軸力の影響を確認するため、軸力を作用させた状態で加力試験を行ったが、作用軸力は終局状態の最大荷重に近い値を再現するため 0.3F_c 程度を採用している。

iii) 平成 30 年度

台形型では異形柱を長方形断面＋非構造体として区分した状態の尖端角 60 度の試験体 1 体を、五角

形型試験体仕様としては試験体 2 体を計画し、1 体は平均的な断面欠損率、形状を有する試験体 1 体に副帯筋を配置し、帯筋比を 1.5 倍としたものを、もう 1 体は五角形断面の断面欠損率と加力方向に切り取られる切片が最大に近い形状を有する試験体を選定した。

(2) 使用材料および試験体の作成概要

表-1 に試験体に使用した材料の機械的性質を示す。試験体はパネコートを用いた型枠にて平打ちでコンクリートを打設した（図 4-3）。なお試験体両面には姿勢保持と変位計フレーム固定用に兼用するメタルインサートを 10 カ所に打ち込んでいる。試験体はかぶり厚 15 mm（モルタルにてスペーサー作成）、一般部は主筋断面中心は 30 mm 弱として耐力を試算している。設置用に D16 鉄筋で作成したフック 4 カ所をスタブ部分に打ち込み、運搬や試験体設置の補助用として用いている。試験体は 1 週間を目安に脱型し、以降実験室内に放置した後、材令 4 週程度以降にコンクリート圧縮強度を実施の上、加力試験を実施している。

表 4-1 使用材料の機械的性質

・コンクリート					
仕様	項目	単位	H28	H29	H30
F _c -21	σ_c	(N/mm ²)	29.8	28.3	26.1
・鉄筋					
仕様	項目	単位	H28	H29	H30
D6	σ_u	(N/mm ²)	524	541	529
	σ_y		429	400	394
D10	σ_u	(N/mm ²)	527	524	520
	σ_y		371	371	364
D16	σ_u	(N/mm ²)	586	562	559
	σ_y		385	373	369

σ_c : コンクリートの圧縮強度 σ_u : 鉄筋の引張強度、 σ_t : 鉄筋の降伏点強度、

年度	H28	H28	H29	H30	H29	H29
Series	S0-000-@105	T0-060-@105	T1-060-@105	T2-060-@105	TS-060-@105	TN-060-@105
Section (B = 200mm)						
	ℓ (mm)	1,000	1,000	1,000	1,000	900
A ($\times 10^4 \text{mm}^2$)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
引張鉄筋	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16
全主筋	8-D16	8-D16	12-D16	12-D16	12-D16	12-D16
P_t (%)	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
帯筋	2-D6-@105	2-D6-@105	2-D6-@105	2-D6-@105	2-D6-@105	2-D6-@105
P_w (%)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
I_e ($\times 10^8 \text{mm}^4$)	4.08	4.35	4.42	4.42	4.42	4.35
M_u (kN·m)	63.3	63.3	68.6	68.6	68.6	86.2
Q_{su} (kN)	109	109	105	105	112	149
年度	H30	H28	H29	H30	H30	H29
Series	TM-060-@105	T0-045-@105	P0-050-@105	P0-050-@70	P0-070-@105	PN-050-@105
Section (B = 200mm)						
	ℓ (mm)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
A ($\times 10^4 \text{mm}^2$)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
引張鉄筋	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16	4-D16
全主筋	12-D16	8-D16	12-D16	12-D16	12-D16	12-D16
P_t (%)	1.99	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
帯筋	2-D6-@105	2-D6-@105	2-D6-@105	3-D6-@105	2-D6-@105	2-D6-@105
P_w (%)	0.3	0.3	0.3	0.45	0.3	0.3
I_e ($\times 10^8 \text{mm}^4$)	4.43	4.35	4.21	4.25	4.96	4.35
M_u (kN·m)	48	63.3	68.6	67.9	67.9	108.2
Q_{su} (kN)	78	109	105	109	101	138

図 4-1 試験体概要

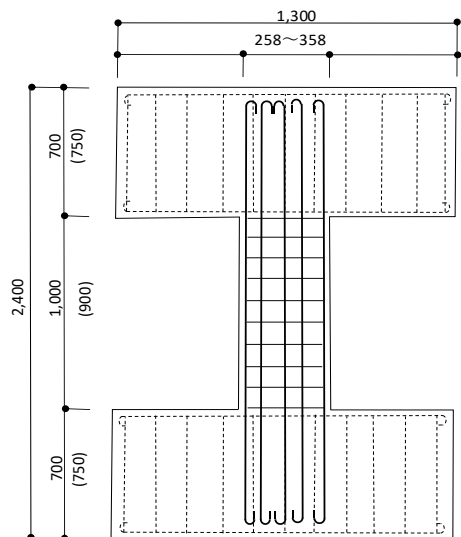


図 4-2 試験体立面図



図 4-3 コンクリート打設時試験体状況

(3) 加力方法

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4-4に示す。

加力方法は正負交番加力とし、加力サイクルは水平変形量で制御しており、単サイクルとして図4-5による。なお試験体の固定にはPC鋼棒32φを上下共2×2=4本で固定し、溝型鋼C-150×75を治具として用いている。なお軸力を考慮した試験体では、ストロークの関係もあって上部センターの加圧ジャッキではなく、4本のジャッキをコントロールし加圧を行っている。

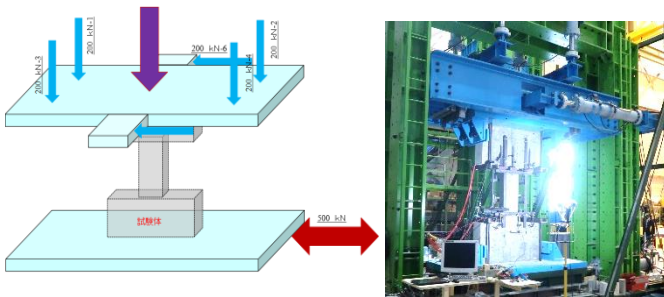


図4-4 試験装置概要図と外観

(4) 計測方法

i) 変位計

使用した変位計は表4-2に諸元を示す。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4-6には変位計の計測位置を示す。また本加力装置では下部スライドテーブルが変形する仕様のため、上部の鉄骨フレームの変形を測定し相殺することで試験体の真の変形となる。よって試験体上端部の加力方向の変形を測定している。

表4-2 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

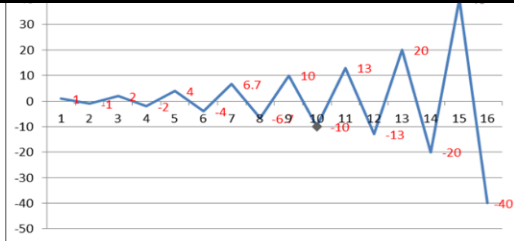


図4-5 加力サイクル概要

ii) 歪みゲージ(図4-7)

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4-6(図中con-01、con-02)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)の歪みゲージ(KFGS-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4-8による。

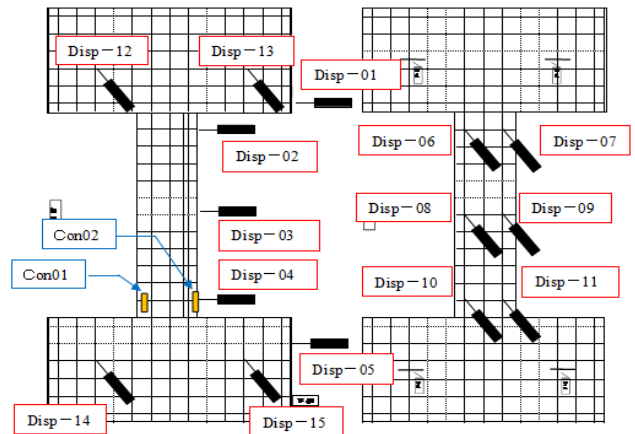


図4-6 試験体部における変位計等計測位置図

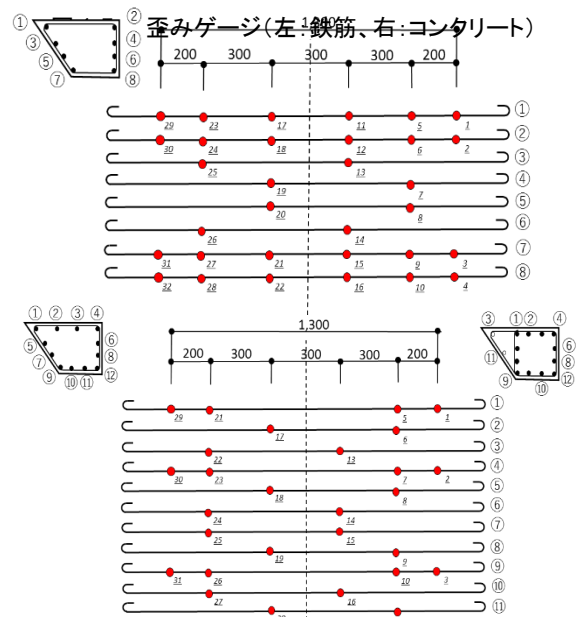


図4-8 歪みゲージ設置位置

5. 加力試験結果

(1) せん断ひび割れ強度

加力実験において、せん断ひび割れが確認された時点での加力ジャッキが示す水平荷重値からせん断ひび割れ強度の実験値を計算し、表 5-1 に示す。変形角の集計において、本加力装置の方式では、装置を支持する架構の変形を差引くのが適切である。測定結果の集計から、架構変形のばらつきにおける平均値を実測値の 85%と算定し本表に示した。

おおむねせん断ひび割れ（文献²⁾による）は 0.01 ラジアン程度で発生し、異形柱 11 体中 10 体で長方形置換とし、 $k_c=0.72$ （部材せいから該当する係数）とした場合の計算値を上回っている。このうち三角部増し打ちコン仕様様の TM シリーズ試験体においては主筋位置の関係も影響したためか、せん断ひび割れが分散した形態となり、実測値と計算値が全く整合しない結果となっている。

表 5-1 せん断ひび割れ測定結果

Series	Concrete (N/mm^2)	Radian	Radian ($\times 0.85$)	TQ_c (kN)	CQ_c (kN)	Rate
S0-000-@105	29.8	0.013	0.011	66.7	53.1	1.26
T0-060-@105	29.8	0.013	0.011	64.4	53.1	1.21
T1-060-@105	28.3	0.013	0.011	77.5	51.5	1.5
T2-060-@105	28.3	0.007	0.006	41.6	51.5	0.81
TS-060-@105	28.3	0.01	0.009	57.8	54.5	1.06
TN-060-@105	29.8	0.02	0.017	140	88.9	1.57
TM-060-@105	26.1	0.02	0.017	98.4	38.4	2.56
T0-045-@105	29.8	0.01	0.009	60.1	52.8	1.14
P0-050-@105	28.3	0.013	0.011	70.3	51.5	1.37
P0-050-@70	26.1	0.013	0.011	65.9	51.5	1.28
PN-050-@105	28.3	0.013	0.011	95.4	81.3	1.17
P0-070-@105	26.1	0.02	0.017	65.9	51.5	1.28

TQ_c : せん断ひび割れ発生時加力値、 CQ_c : せん断ひび割れの計算値

(2) 主筋歪み度分布

試験体は初年度と 2 年目以降で配筋形状を変更していることから、上記のように歪みゲージの配置が異なっている。主筋 1 本当たりに H28 年度では 4 カ所、以降では 3 カ所以上歪みゲージの測定位置を有する主筋について、実測 1/100 レベル変形時、及び最大加力時における、試験体の高さ方向の歪み度分布を図 5-1 に示す。

なお最大加力時に測定不能となった歪みゲージを有する主筋については、当該分布では表示していない。図中実線が最大耐力時を示し、破線が 1/100 レベルでの歪み度を示している。今回の実験では付着破壊を生じるケースが多く、最大耐力と 1/100 レベルとの関係性が希薄である。なお増打仕様とした

TM シリーズでは 3 番鉄筋が非構造体の位置づけであるが尖端部に配置されており、1/65 程度で降伏している。

通常の台形柱において最も応力負担が大きいと想定された尖端部分の主筋（1 番）では、周囲のコンクリート量が充分でなく早期に付着耐力が喪失するためか、あまり歪み度が増加せず、隣接する主筋で負担するような実験結果となっている。また尖端圧縮の場合では対角に配置されている主筋（8 番）の、歪み度上昇が目立つ。軸力を付加した試験体 2 体では軸力の影響が強く、2000 μ 程度以下と計測された。

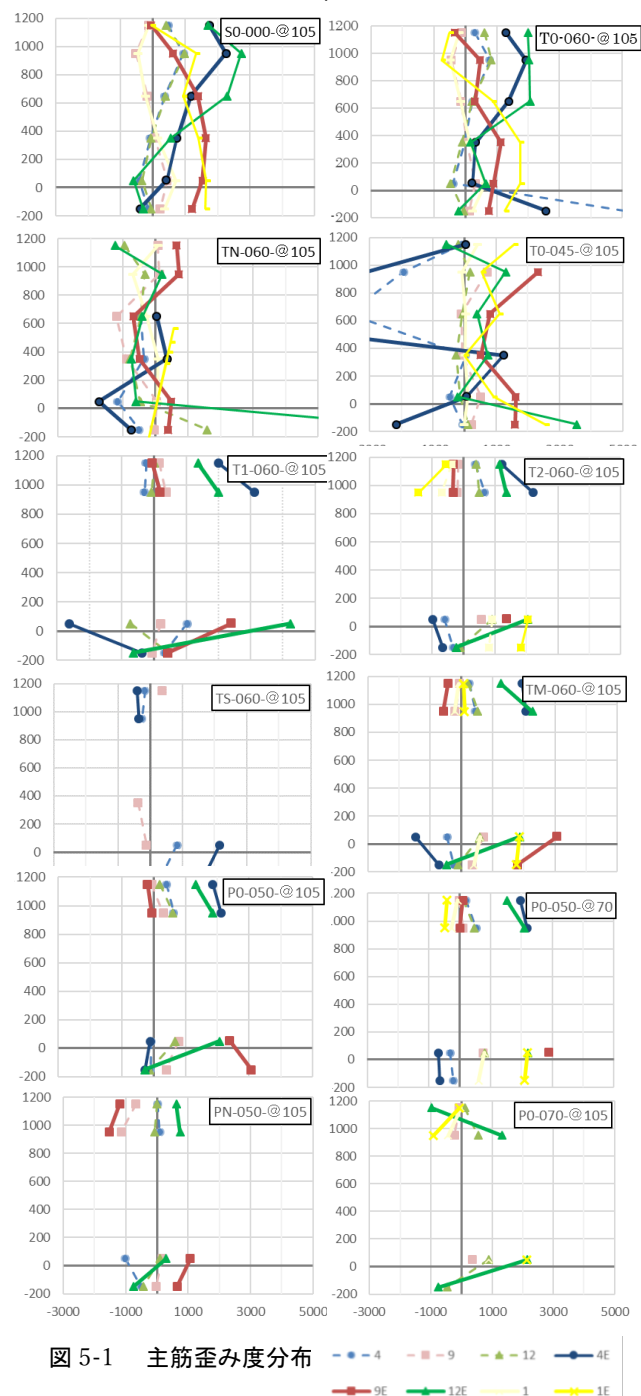


図 5-1 主筋歪み度分布

(3) 帯筋歪み度

主筋歪み度と同様に実測 1/100 レベル変形時、及び最大加力時における帯筋の歪み度を表 5-2 に示す。なお測定不能となった歪みゲージは対象外とし、測定はされているものの極端に大きな数字となっている箇所は 5,000 μ を上限として評価した。なお長方形断面となる S シリーズでは、加力直交方向の帯筋歪み度は測定していない。長方形断面と比較すると異形柱では歪み度が高いとは言えるものの、ひび割れの発生位置と測定位置の関係もあり、明確な因果関係までは特定されるものではない。ただし台形型柱において斜辺部分に存在する加力直交方向の帯筋 (HOOP-Y) は、最大耐力以降に歪み度が降伏前後まで上昇する傾向が認められた。

表 5-2 帯筋歪み度測定結果一覧果

Series	1/100		最終	
	HOOP-X (μ)	HOOP-Y (μ)	HOOP-X (μ)	HOOP-Y (μ)
S0-000-@105	58		1502	
T0-060-@105	26	10	1322	1013
T1-060-@105	48	45	3668	1615
T2-060-@105	756	166	3608	727
TS-060-@105	388	147	4005	1877
TN-060-@105	364	151	1306	615
TM-060-@105	51	31	1470	2083
T0-045-@105	58	16	1615	1100
P0-050-@105	776	13	3506	1568
P0-050-@70	70	16	1734	2292
PN-050-@105	93	29	1932	652
P0-070-@105	35	9	2612	1120

(4) ひび割れと最終破壊状況

最終破壊の状況について、異形柱（とりわけ台形型柱）では長辺部分と短辺部分が極端に異なる破壊性状を示すため、その両面を図 5-2 に示す。各試験体の破壊性状概要は以下により、試験体の名称は図 4-1 による。

i) S0-000@105

正加力時において最大荷重で 119 (kN)、変位+40 mmまで加力し耐力低下が認められず、負加力時が変位-40 mmまで加力したものの 88 (kN) まで耐力が上がらず、加力試験を終了した。せん断ひび割れは発生したものの、ひび割れ幅は拡大せず、以降は主筋部分の付着劣化がやや進行したが、明確な耐力低下は認められなかった。

ii) T0-060@105

変位+13 mmで発生したせん断ひび割れが、加力と

ともに主筋方向に進展し、30 mm前後から大亀裂となって、変位+33 mm付近で最大荷重約 113 (kN) を記録したのち、耐力低下した。その後負加力側も実施したが、変位-28 mm付近で 80 (kN) 程度を記録後、緩やかに耐力低下した。

iii) T0-045@105

変位-10 mmで明確なせん断ひび割れが、加力とともに拡大したが、変位+25 mmを超えるあたりから新たな主筋近傍の付着喪失によるひび割れが発生し、最終的には大亀裂となって、変位+30 mm付近で最大荷重約 102 (kN) を記録したのち、耐力低下した。負加力側も変位-40 mm付近まで加力したが、75 (kN) 程度が最大荷重であった。尖端部分では顕著な圧壊が変位 20 mm以前に発生している。

iv) TN-060@105

0.1Fc 程度の軸力を加圧した本試験体では、変位+20 mmの段階でせん断ひび割れが発生すると同時に尖端部に顕著な縦ひび割れが発生した。以降脆性的ではないものの付着に起因する縦ひび割れが徐々に拡大・大亀裂化して最終破壊となった。最大荷重は変位+20 mm時点での 142 (kN) となっている。また限界部材角は 1/37 と測定された。

v) T1-060@105

長辺部分に変位+30 mm前後で試験体上部から 60° 方向に進展したせん断亀裂が、急速に拡大し約 145 (kN) 前後にて、せん断破壊となった。なお短辺部分では試験体中央部分において主筋に沿う方向にひび割れが曲折している。

vi) T2-060@105

試験体下部に発生していたせん断ひび割れが変位+20 mm前後で拡大し、試験体中央付近で主筋位置の縦ひび割れとともに大亀裂化した。最大加力は約 135 (kN) となっている。

vii) TS-060@105

長辺部分では試験体上部においてせん断型の、短辺部分では試験体全域で付着型のひび割れ 3~4 本が変位+30 mm前後で拡大し、長辺部分の大亀裂化から最大荷重約 147 (kN) にて最終破壊となった。

viii) P0-050@105

短辺部分には破壊の要因となる大亀裂は認められないが、長辺部分では試験体上部では50°方向に、試験体下部ではほぼ対角方向に進展したせん断ひび割れが拡大し、変位+35 mm前後、最大荷重約144 (kN)にて最終破壊となった。

ix) PN-050@105

長辺部分にはせん断ひび割れが発生したが顕著には拡大せず、短辺部分の主筋位置における付着破壊

の亀裂が卓越したため、変位+26 mm前後、最大荷重約141 (kN)にて最終破壊となった。限界部材角は1/35と測定された。

x) P0-070@105

長辺部分において試験体上部から正負方向ともに60°方向に進展・拡大したせん断ひび割れによって、変位+26 mm前後、最大荷重約141 (kN)にて最終破壊となった。短辺部分にも同様のひび割れは発生しているが、拡大の傾向は認められない。

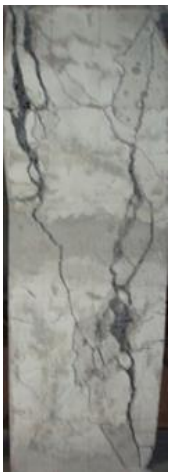



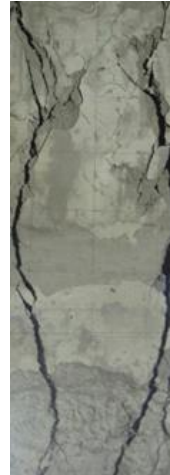







T0-060-@105		T0-045-@105		TN-060-@105	
					
長辺	短辺	長辺	短辺	長辺	短辺
T1-060-@105		T2-060-@105		TS-060-@105	
					
長辺	短辺	長辺	短辺	長辺	短辺

図 5-2 破壊性状(つづく)













P0-050-@105		PN-050-@105		P0-070-@105	
					
長辺	短辺	長辺	短辺	長辺	短辺
P0-050-@70		TM-060-@105		S0-000-@105	
					
長辺	短辺	長辺	短辺	比較対象	

図 5-2 破壊性状

xi) P0-050@70

短辺部分では付着型亀裂の拡大後、せん断亀裂が進展した。長辺部分では試験体下部から進展した70°方向の亀裂が拡大し、変位+40 mm前後、最大荷重約164 (kN) にて最終破壊となった。

xii) TM-060@105

非構造体想定としている増打コン部分に進展したひび割れは一定以上拡大せず、以降は内部側主筋位置での付着型の亀裂が増加して最終破壊となってい

る。変位+37 mm前後、最大加力は約159 (kN) となっており、以降変位-50 mmまで加力を実施した。(最大加力は約139 (kN))

(5) 加力試験結果概要 (加力変形方向)

本加力試験結果について表 5-3 に試験体の確認耐力と試算の結果における想定せん断耐力との比を示す。2 体で僅かに想定耐力を下回ったが2 体以外では同断面積の長方形断面に置換したせん断耐力で評価しうると考えられる。

図 5-3 には台形型柱と比較対象用長方形断面の加

力変形曲線を示し、図 5-4 には五角形柱と比較対象用長方形断面の加力変形曲線を示す。

i) 台形型試験体における破壊性状概要

台形型試験体（基準型 60°。ただし TM シリーズを除く）では基準となる長方形断面との比較では平均で 15%程度、せん断耐力式の基準式として用いた荒川 mean 式との比較で 18%程度、実験の結果得られたせん断耐力が上回っていることが確認された。しかしながら前節でも示したように、破壊性状は著しく異なり、最大荷重後の耐力低下も長方形断面とは同様には扱えない。

初期剛性については尖端が圧縮側となる場合において顕著であり、長方形断面との剛性差も 2 倍を超えるような試験体も確認された。

ii) 五角形型試験体における破壊性状概要

五角形型試験体（P0-070 シリーズを除く）では基準となる長方形断面との比較では平均で 26%程度、せん断耐力式の基準式として用いた荒川 mean 式との比較でも 26%程度、実験の結果得られたせん断耐力が上回っていることが確認された。外観上の破壊性状はひび割れの発生状況からは比較的台形型試験体より、長方形断面に近いものの、最大荷重以降の耐力低下については、台形型試験体と大差はない。ただし台形型試験体と異なり、尖端（五角形型試験体では隅切りされたコーナー部）での圧壊は確認されない。

初期剛性は長方形断面との比較で 1.6 倍ほどであり、台形型断面ほど加力方向別の差は大きくはない。

表 5-3 実験結果と試算の比較

Series	Qu (kN)	Qsu (kN)	Rate
S0-000-@105	119	109	1.09
T0-060-@105	113	109	1.04
T1-060-@105	145	105	1.38
T2-060-@105	136	105	1.30
TS-060-@105	148	112	1.32
TN-060-@105	142	149	0.95
TM-060-@105	159	81	1.96
T0-045-@105	102	109	0.94
P0-050-@105	144	105	1.37
P0-050-@70	164	113	1.45
PN-050-@105	141	138	1.02
P0-070-@105	150	104	1.44

(6) 加力試験結果概要（面外変形）

縦軸に面外方向への変形を計測した 2 点の差分を、横軸に加力状況を計測したステップ数を用いたグラ

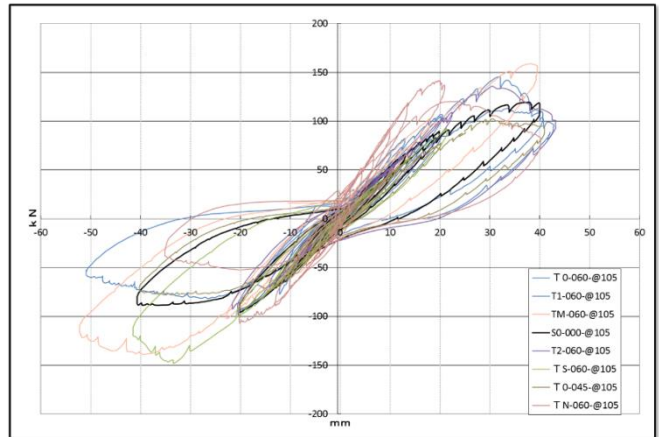


図 5-3 台形型柱の加力変形曲線

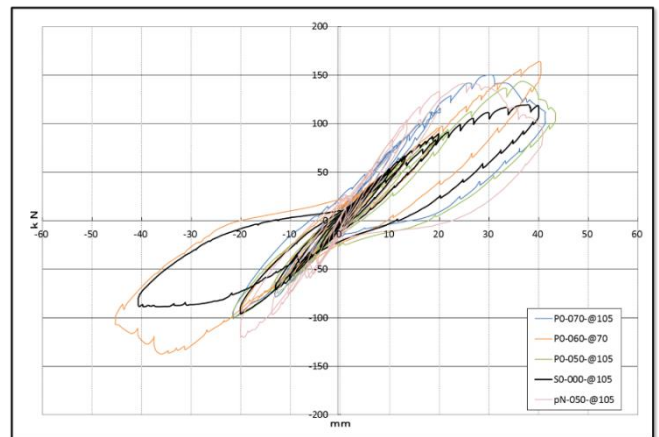


図 5-4 五角形型柱の加力変形曲線

フを図 5-5 に、また縦軸の数値を 2 点の平均値としたグラフを図 5-6 に示す。面外方向の測定は微小な値であり、例えばかぶりコンクリートやひび割れの影響も強く受けることから、コンクリート表面の損傷が測定部付近で発生すると測定結果が乱れることから、ここでは開始からの測定ステップ数を 1000 までとして本グラフを作成している。主軸の傾きが作用するため、全数で傾向が確認されたわけではないが、長方形断面（図中の黒線）と異形断面を比較した場合、加力時において面外に回転する、もしくは変形するといった傾向が異形柱の数体で確認されている。現状においてはこれらの変形が断面にどのような応力または効果を与えているのかは明確にはできていない。

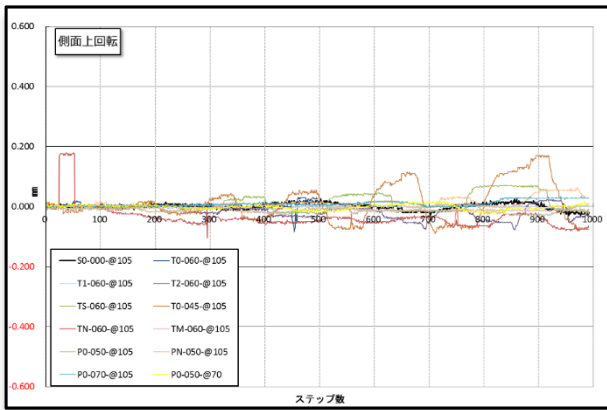


図 5-5 面外方向の変形(上部回転)

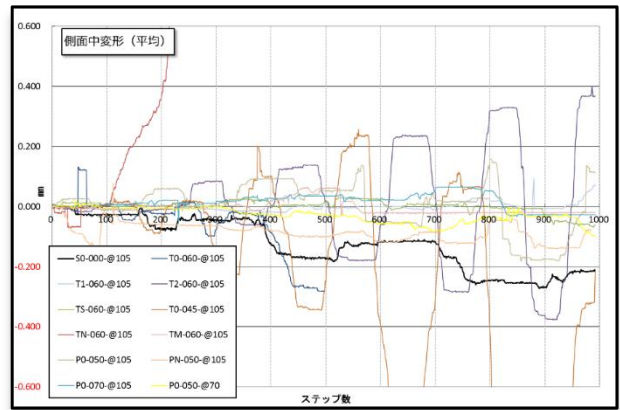


図 5-6 面外方向の変形(中央部平均値)

6. せん断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

曲げ破壊先行型加力試験の際にも面外への挙動についても触れている。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。これは繰返し荷重により付着劣化が促進される事実は既知の事実ではあるが、今回の加力試験においても、規則的に回転するような挙動が確認されるなど、面外方向への変形が部材の破壊性状に影響を与えている可能性が有ると考えられる。

初年度となる H28 年度に実施した 4 体の試験体のうち、比較対照用の長方形断面を除く 3 体では、付着に沿った縦ひび割れが相当な亀裂幅となって、コアコンクリートとかぶりコンクリートが完全に分離する付着割裂破壊の破壊形式となった。4 辺に均等な配筋を有する多段配筋ではこの破壊形式は再現できなかったため、その理由が多段配筋による曲げ耐力の上昇（およそ 8%）なのか、鉄筋剛性による断面二次モーメントの増加（およそ 4%）なのかは、



図 6-1 (左)螺旋状のひび割れと (右)コーナースプリット型亀裂

現時点では解明できていない。今後の解析などによって明らかにして行く予定である。

(2) 異形柱におけるせん断耐力評価

長方形柱のせん断耐力評価については、修正荒川式⁶⁻¹⁾が構造設計・耐震診断など幅広く用いられている。異形柱においても、その耐力評価は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 1.はじめにでも示した通りである。計 12 体の試験のうち最大 6%ほど計算値に届かない試験体 2 体は有るが、概ね安全側には評価されており、実用上は支障ないものと判断可能である。

(3) 異形柱(せん断破壊先行型)における靱性評価

せん断破壊の可能性が有る異形柱では 5.(4)破壊形式に見るように、長方形置換の試験体とは歴然と異なる破壊形式を示している。なかでも T0 シリーズや TN シリーズでは付着耐力の喪失から付着割裂破壊へと進展したことから、異形柱において長方形置換により耐力評価した場合においては付着割裂破についての慎重な評価が必要となる。

表 6-1 に文献³⁾による付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度の試算と各試験体の最大荷重を示す。ヒンジを計画する柱では架構設計変形時でのヒンジ領域の回転角 (R_p) を 0.015 とするのが標準的である。ここで付着破壊の傾向がほぼ認められず、耐力低下を起こさない試験加力変形 1/50 を異形柱における付着信頼強度と仮定すれば、 $R_p=0.015$ とした場合は、平均値 0.83、変動係数 10.8%とやや危険側の数値を与えるのに対し、 $R_p=0.02$ の場合は、平均値 0.97、変動係数 10.7%と概ね良好な数値を与える。ただし本統計において著しく配筋の異なる TM シリーズや、加力変形 1/50 で最大荷重を記録し

表 6-1 付着破壊の影響を考慮した各試験体の試算結果

Series	Q _u (kN)	Q _u (1/50) (kN)	R _p =0	R _p =0.015	R _p =0.02
			v _{bu} (kN)	v _{bu} (kN)	v _{bu} (kN)
S0-000-@105	119	90	160	113	97
T0-060-@105	113	85	160	113	97
T1-060-@105	145	105	155	108	93
T2-060-@105	136	103	155	108	93
TS-060-@105	148	86	155	108	93
TN-060-@105	142	142	160	113	96
TM-060-@105	159	101	78	54	47
T0-045-@105	102	77	160	113	97
P0-050-@105	144	91	155	108	93
P0-050-@70	164	95	169	118	101
PN-050-@105	141	130	155	108	93
P0-070-@105	150	93	146	102	87

ている TN シリーズは除外して算出している。

7. おわりに

本研究では中高層共同住宅の調査サンプルに対しておよそ 13%程度に確認された、「異形柱」について前試験体シリーズ（曲げ破壊先行型試験）に引き続き、せん断破壊先行型の試験体 11 体及び比較対照となる長方形型のせん断破壊先行型試験体 1 体について加力試験を実施した。

加力試験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スタブ間の変形角 1/25 程度を最大変形角に想定し実施している。

試験体仕様のうち、台形型柱 7 体、五角形型柱 4 体ではそれぞれのグループで調査サンプルの平均的な形状を基本として、パラメーターを変化させ加力試験を実施し、次のことが確認された。

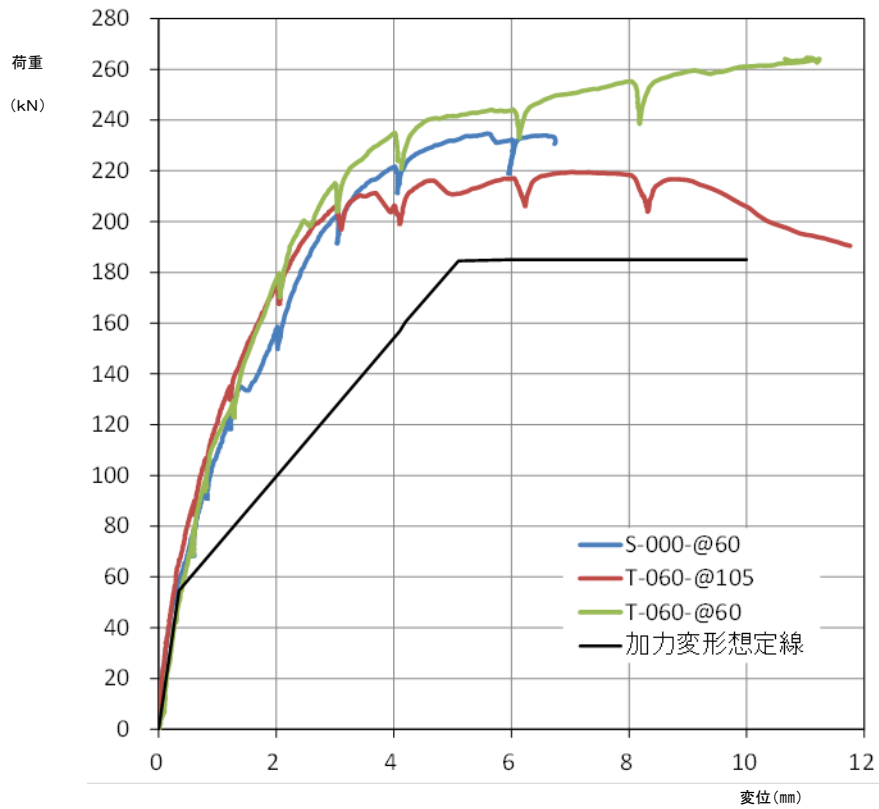
- ・異形柱は等価な断面積の長方形断面に置換して終局曲げ耐力を想定しても、概ね同等程度以上の耐力が確認された。
- ・異形柱では面外方向への繰返し挙動を示す場合が有り、部材耐力に影響を及ぼす可能性が否定できない。
- ・異形柱（とりわけ台形型柱）では主筋の付着耐力の喪失から、付着割裂破壊に至るケースが確認されたため、等価な長方形断面への置換ではこの破壊形式を担保することはできない。なお付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度の算定式において、ヒンジ領域の回転角（R_p）を 0.02 と設定することで付着破壊の影響を考慮し

たせん断耐力評価が可能である。

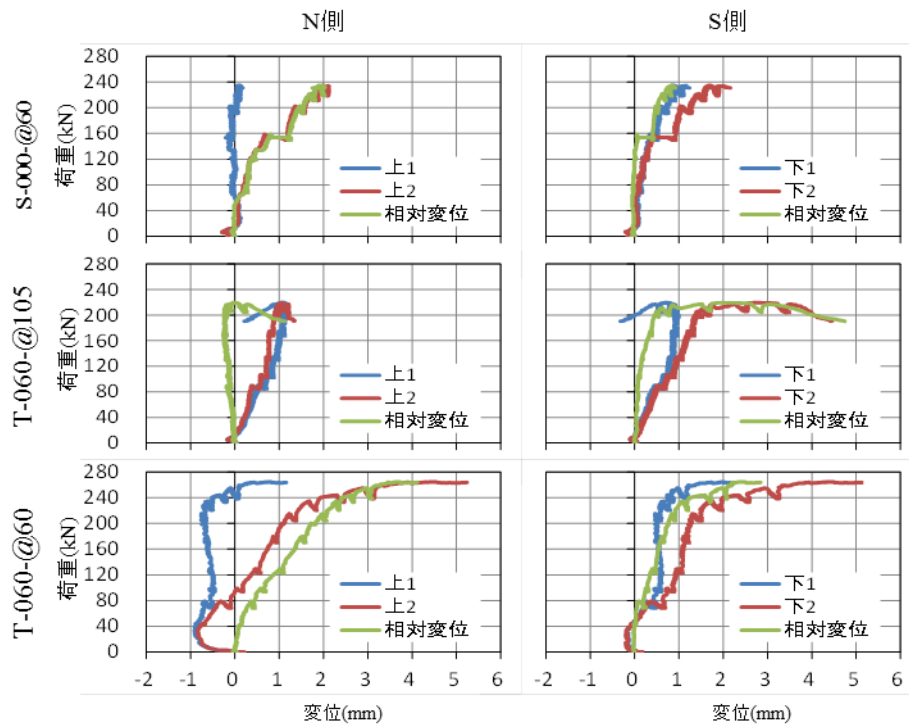
最後に本研究は平成 28 年度より 3 年にわたって行った実験結果をとりまとめたものであり、実験に際しては当研究所の石山和也、二階堂繁男、北海学園大学（技術研修）の、大久保祐輝、櫻井亮太、本庄貴裕の皆さんの協力を得た。ここに記し、謝意を表します。

〔 参考資料 〕

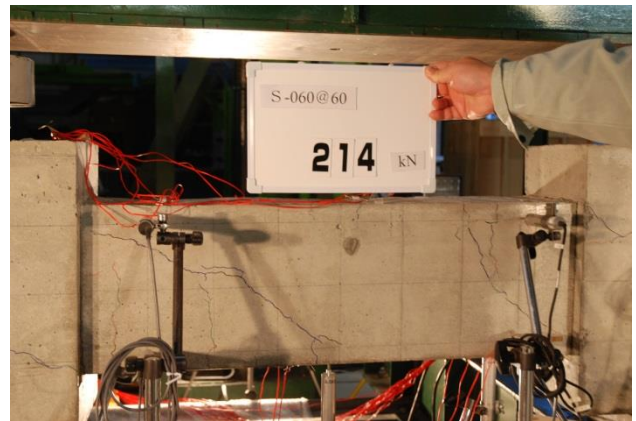
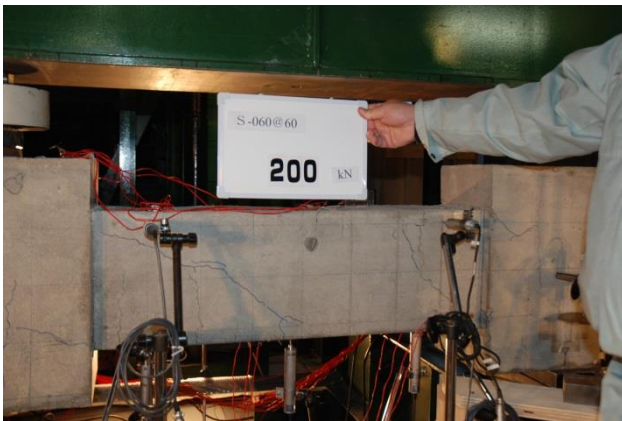
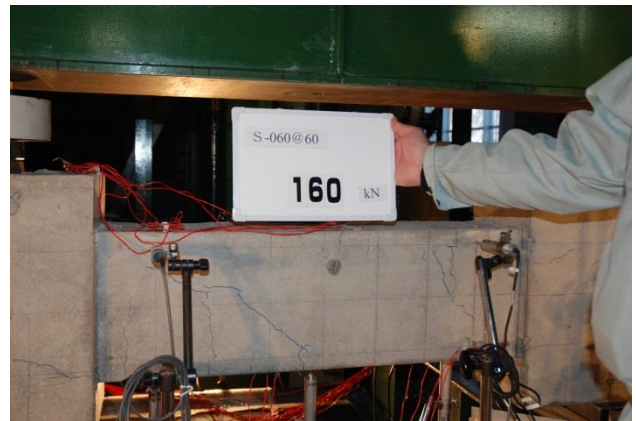
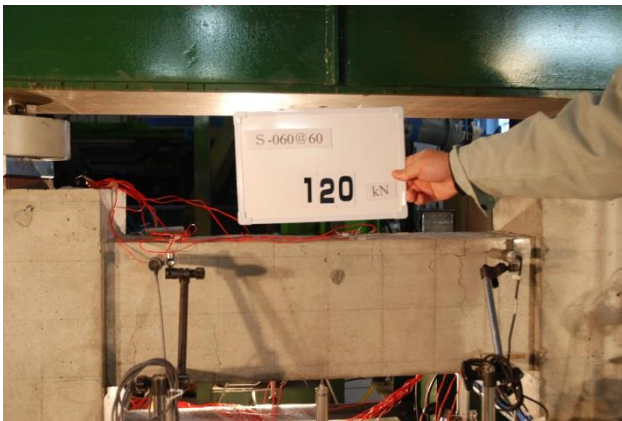
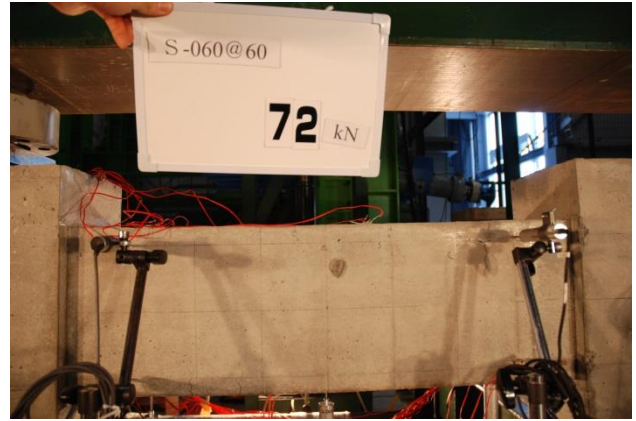
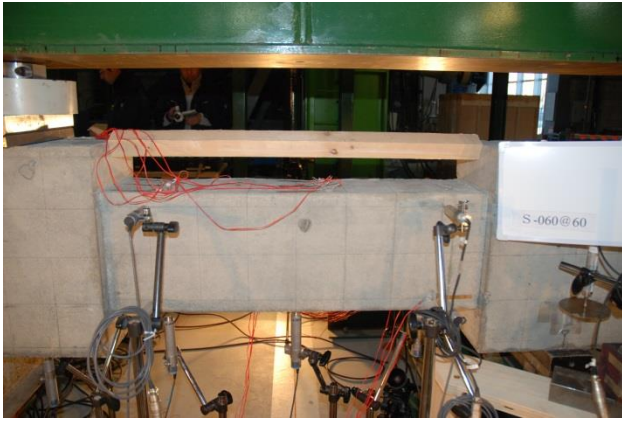
A. 予備試験加力データ及び参考写真



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)

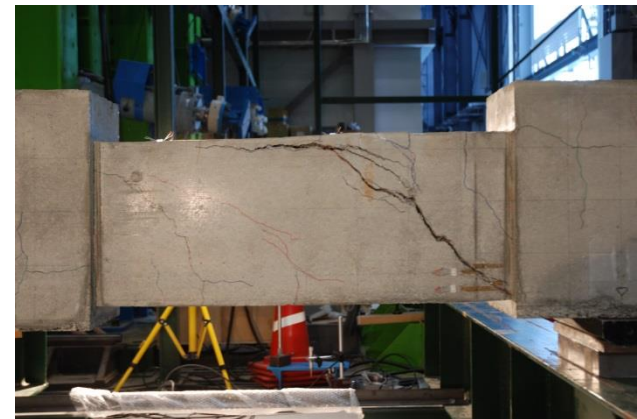
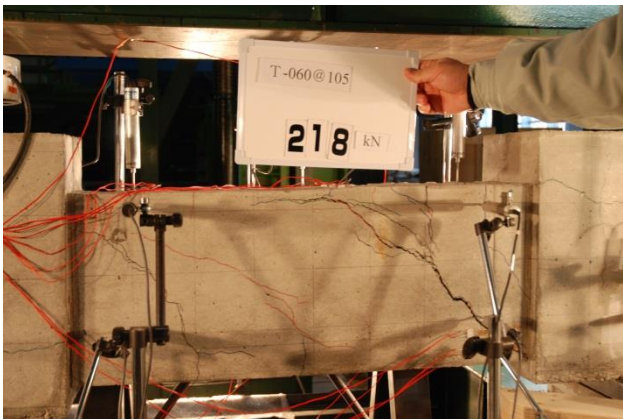
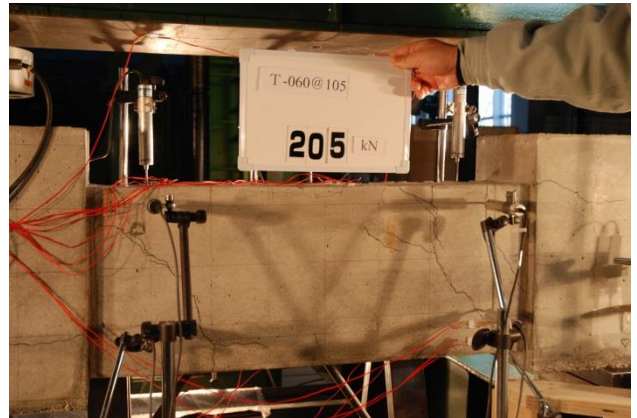
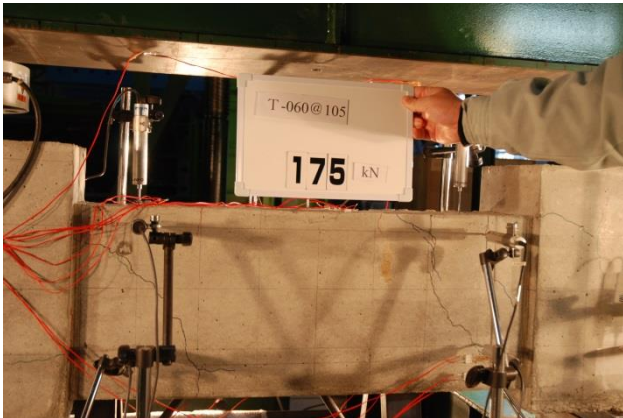
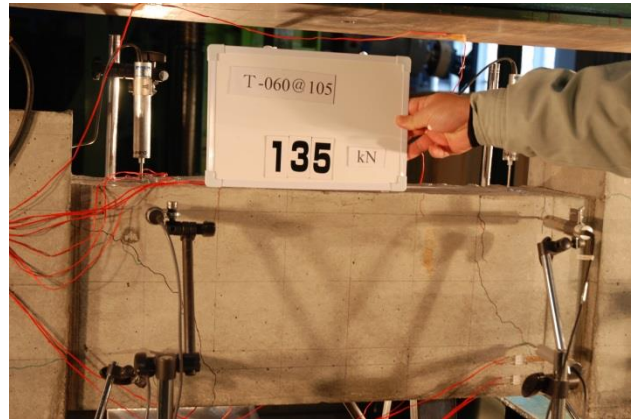
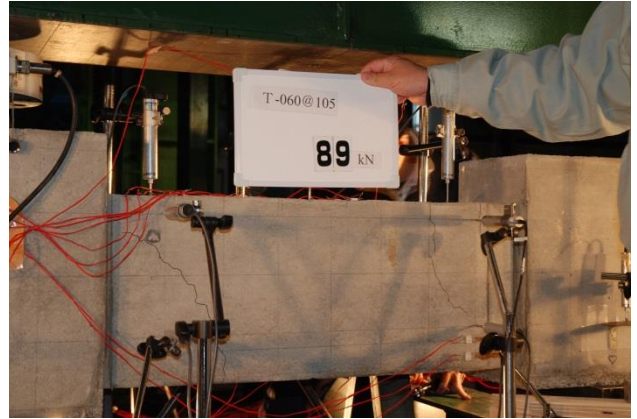
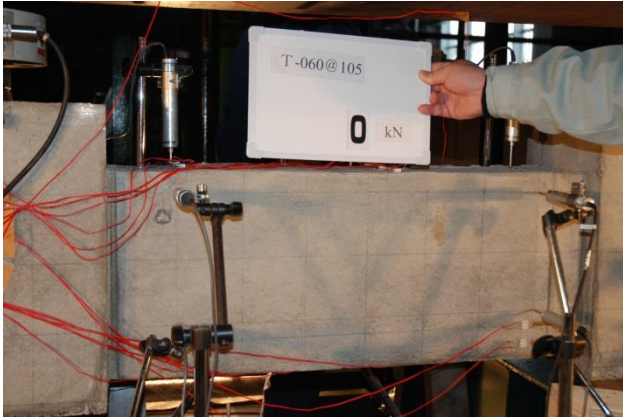


図 A-4 予備試験加力試験写真(T-060-@105)

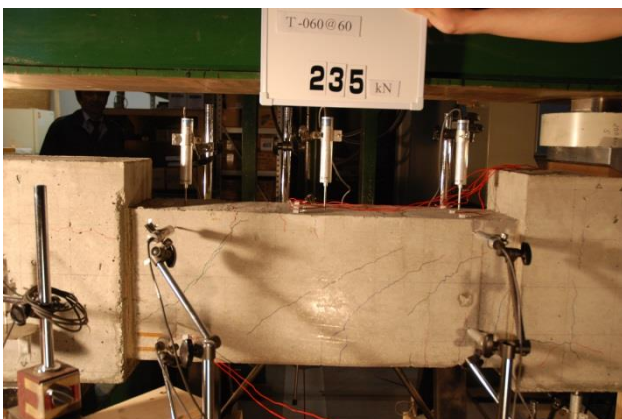
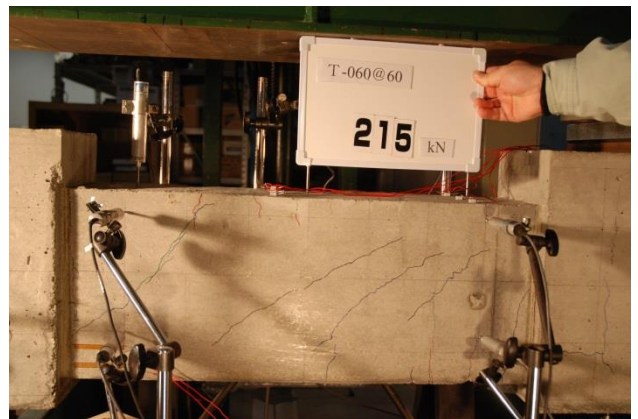
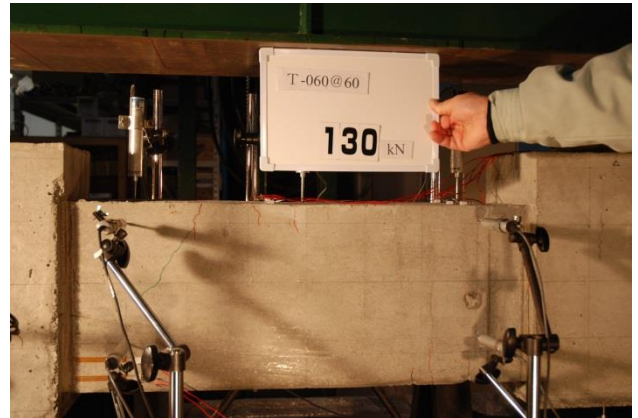
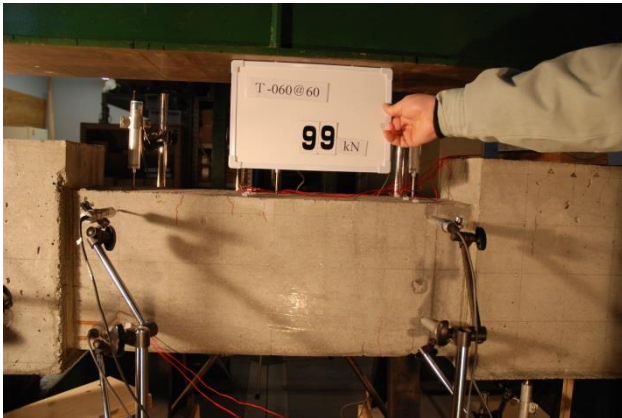
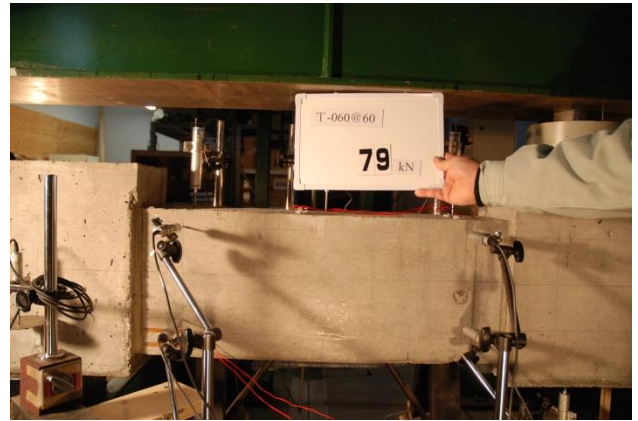
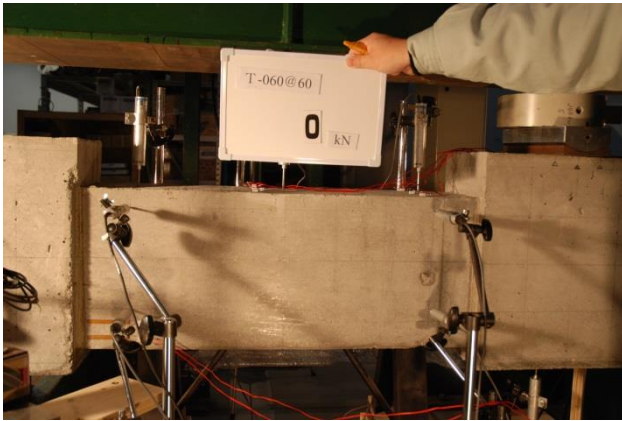


図 A-5 予備試験加力試験写真(T-060-@60)

B. 自由端支持四点曲げ試験加力データ及び参考写真

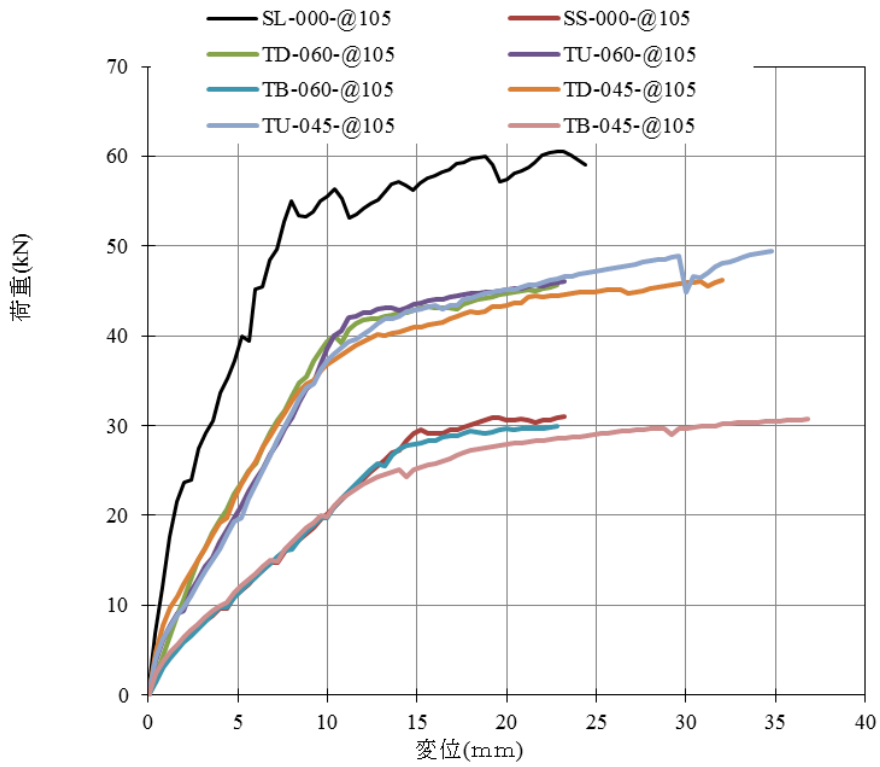


图 B-1 自由支持四点曲げ加力試験荷重変形曲線

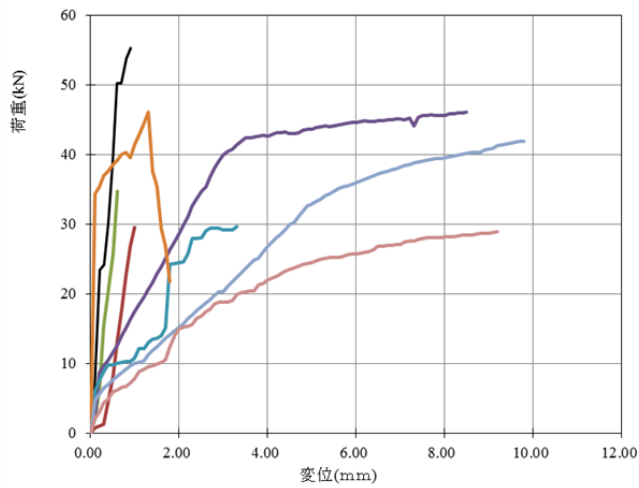


图 B-2 自由支持四点曲げ加力試験荷重変形曲線(水平方向)

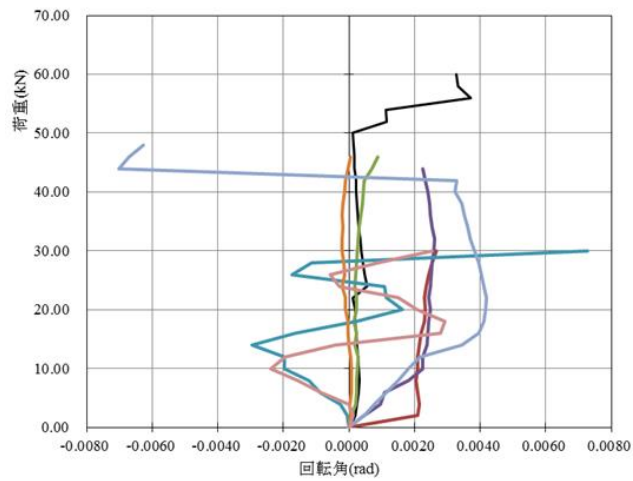


图 B-3 自由支持四点曲げ加力試験荷重変形曲線(回転方向)

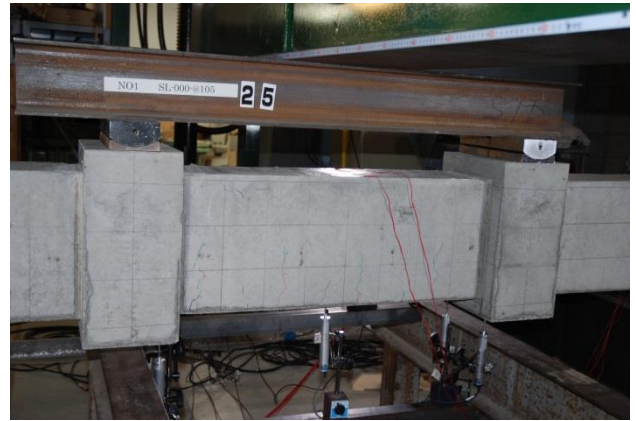
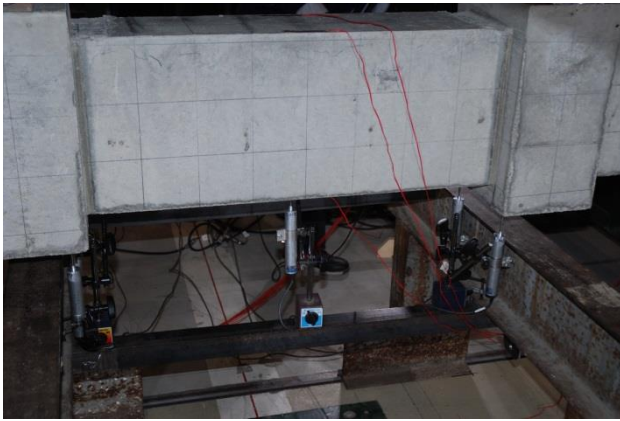


図 B-4 自由端支持四点曲げ試験(SL-000-@105)

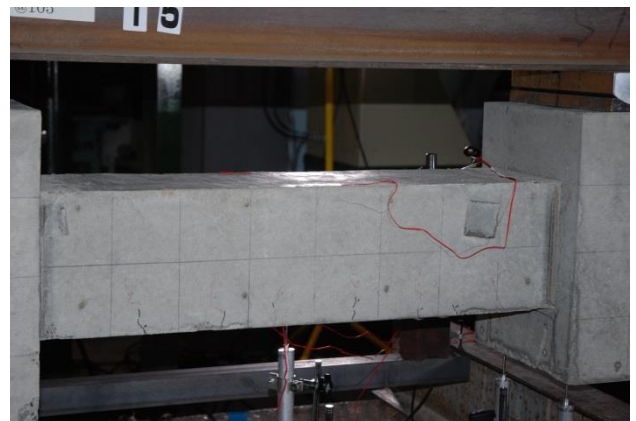


図 B-5 自由端支持四点曲げ試験(SS-000-@105)

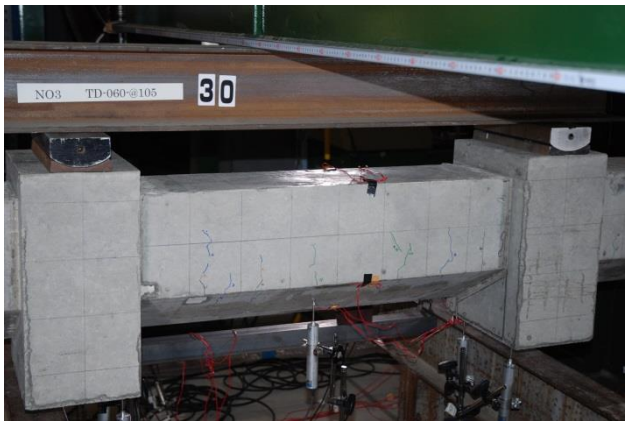
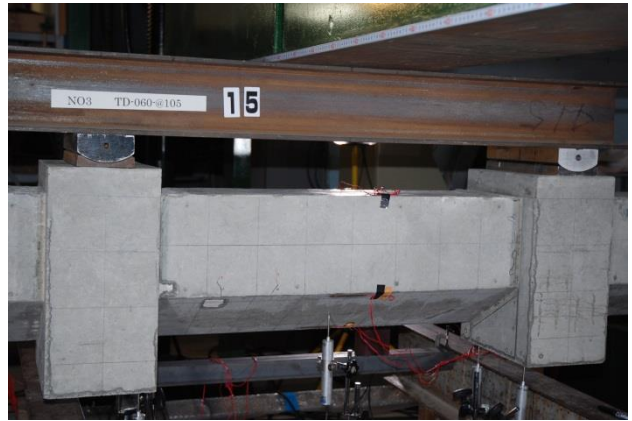


图 B-6 自由端支持四点曲げ試験(TD-060-@105)



图 B-7 自由端支持四点曲げ試験(TU-060-@105)

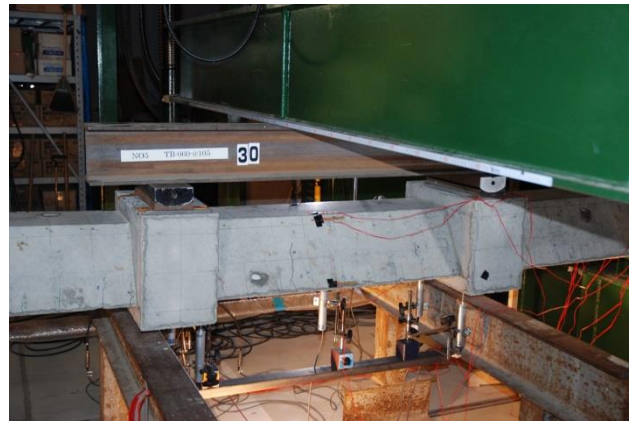


图 B-8 自由端支持四点曲げ試験(TB-060-@105)

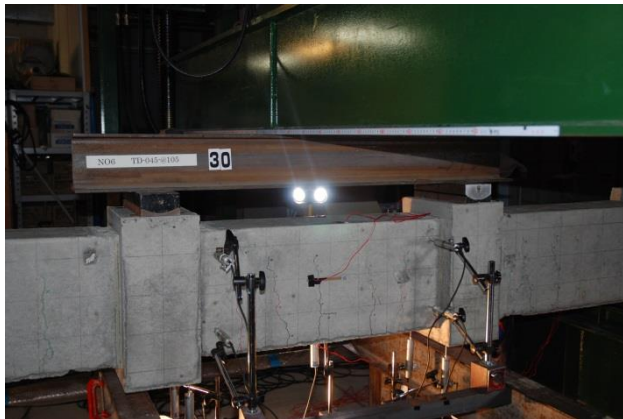
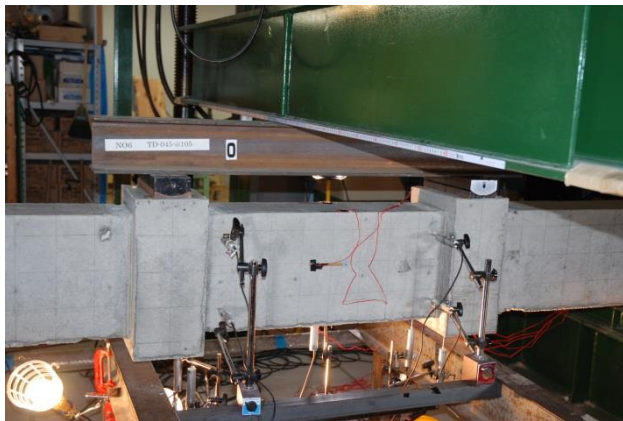


图 B-9 自由端支持四点曲げ試験(TD-045-@105)



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驗參考写真

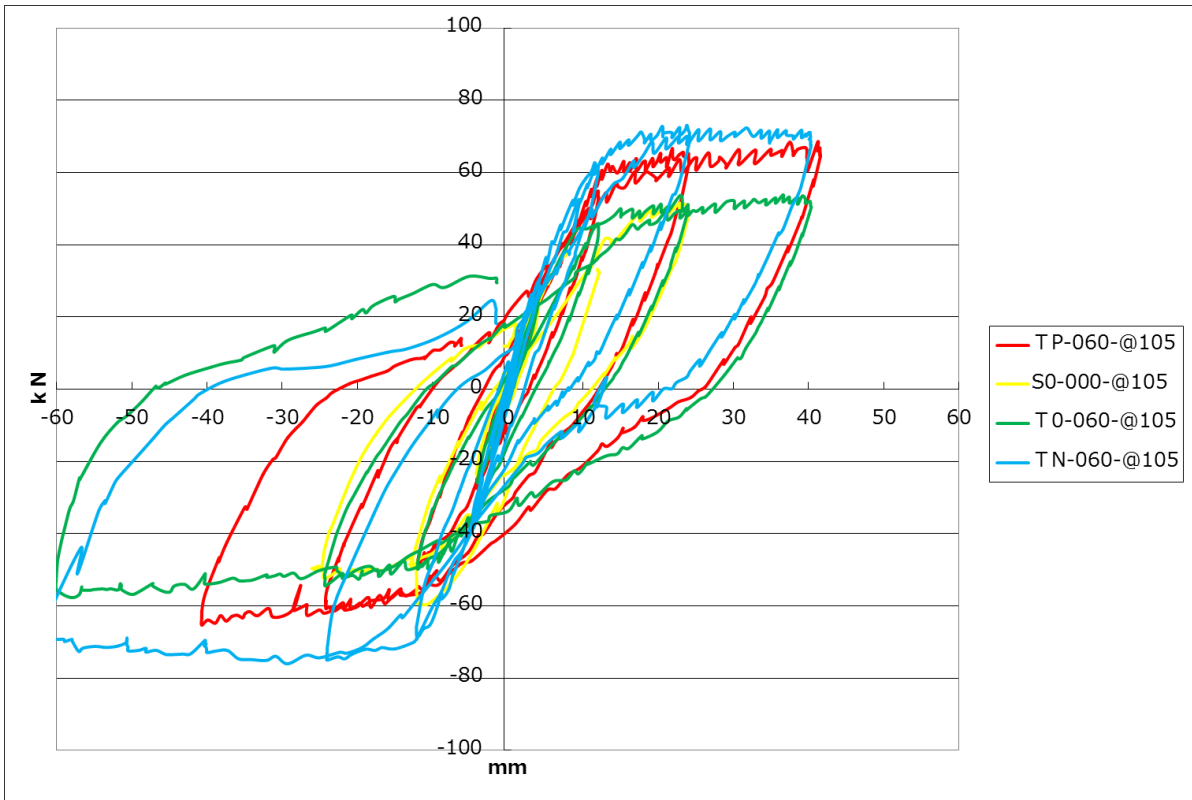


圖 C-1 端部固定水平加力試驗荷重變形曲線

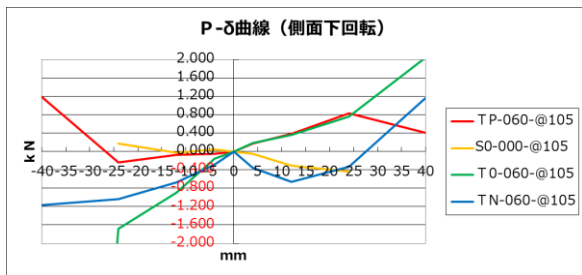
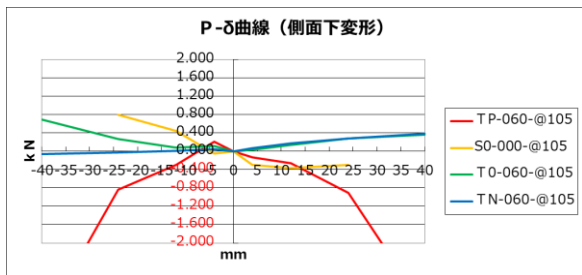
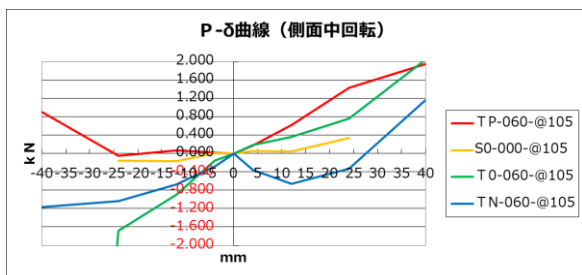
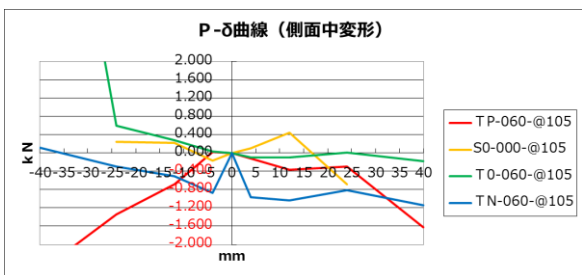
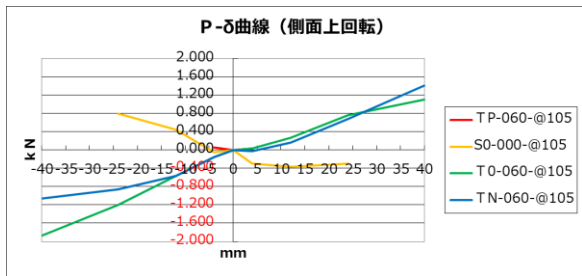
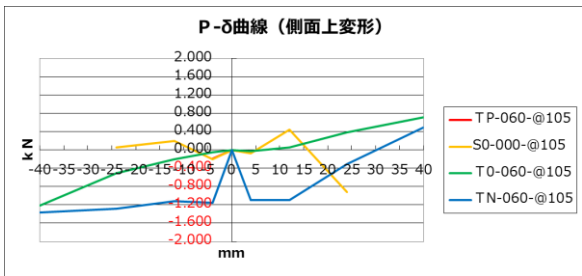


圖 C-2 端部固定水平加力試驗荷重變形曲線(面外方向)

圖 C-3 端部固定水平加力試驗荷重變形曲線(回轉方向)

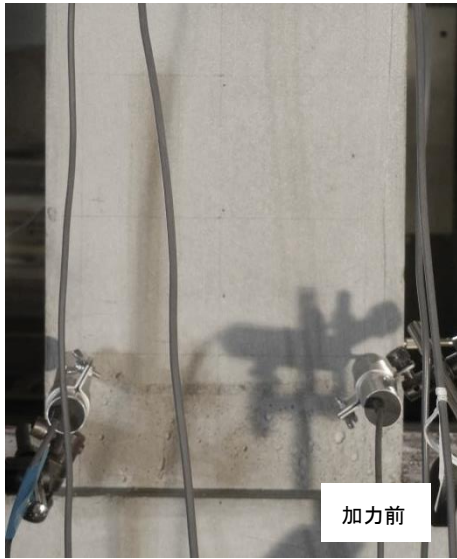


図 C-4 端部固定水平加力試験(S0-000-@105)

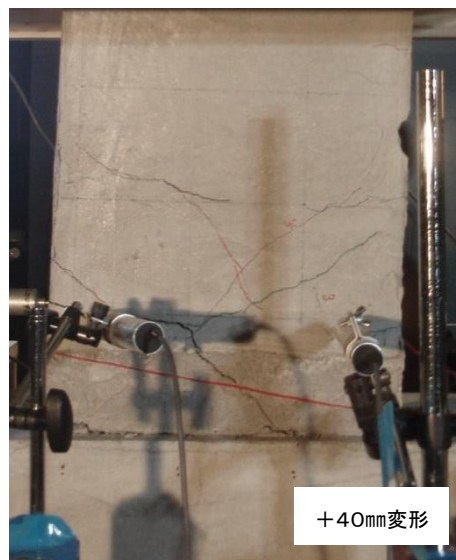
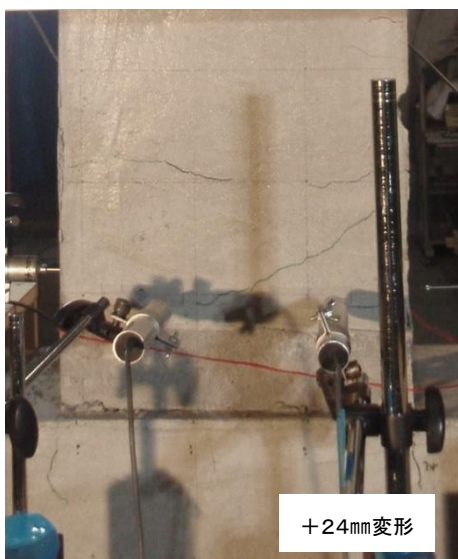


图 C-5 端部固定水平加力试验(T0-060-@105)



図 C-6 端部固定水平加力試験(TP-060-@105)

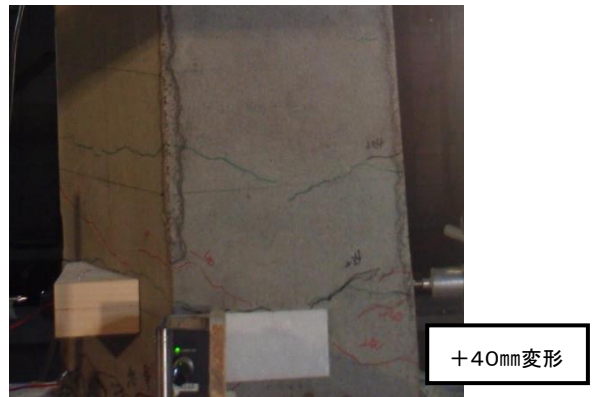
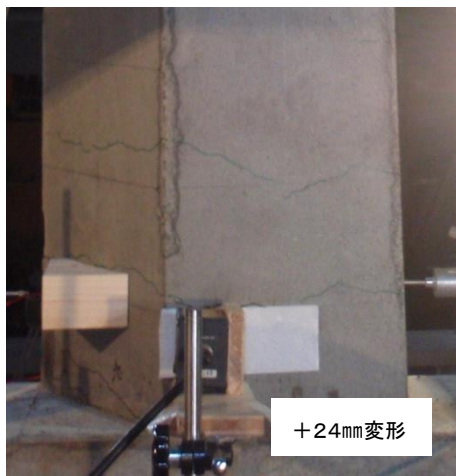


図 C-7 端部固定水平加力試験(TN-060-@105)