

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

鉄筋腐食によるひび割れを模擬した
RC 部材の構造性能に関する研究

村井 凌

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保 利之

2016年 3月

概要

既存の鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物を長期的に供用していくためには、構造物の劣化における構造性能の低下を定量的に評価し、劣化の度合いに見合った補修や補強の判断が重要となる。構造物の劣化の中でも鉄筋腐食による構造性能への影響は多大であるため、その影響度を的確に評価する必要がある。既往の研究では圧縮側コンクリートおよび圧縮鉄筋の腐食に着目した研究が行われており、圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の断面欠損により、RC 梁部材の構造性能が低下することが報告されている。本研究では、腐食による圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび鉄筋の断面欠損に着目し、RC 梁部材の構造性能への影響を把握することを目的とする。

本論文は、全 5 章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景について整理し、目的を明確にした。

第 2 章では、圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の腐食を模擬した RC 梁試験体の載荷実験を行った。実験の結果、圧縮側かぶりコンクリートのひび割れの種類および圧縮鉄筋の断面欠損により、RC 梁試験体の変形性能が変化することを確認した。

第 3 章では、ひび割れによるコンクリートの圧縮性能への影響を把握することを目的として、ひび割れを模擬したコンクリート円柱試験体の一軸圧縮試験を行った。実験の結果、ひび割れ深さの増加に伴い圧縮強度が減少したが、荷重－軸変形関係曲線の明確な差異は確認できなかった。また、局所的な破壊により、アスペクト比が大きい試験体では、見かけ上、応力－歪関係における最大強度後の応力低下が大きいことを確認した。

第 4 章では、第 2 章の RC 梁試験体の圧縮側コンクリートの力学性状を把握することを目的として、RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した試験体の圧縮試験を行った。実験の結果、ピーク後荷重が急激に低下する挙動が得られた。また、アスペクト比およびひび割れを考慮したコンクリートモデルの構築を行い、断面解析により RC 梁試験体の実験結果と比較した。その結果、断面解析結果では、ピーク後の急激な耐力低下が得られたが、実験結果と解析結果の挙動が一致しない試験体もあった。

第 5 章では、本論文の結論について述べた。

目次

第1章 序論	1 -
1.1 研究背景	1 -
1.2 研究目的	2 -
第2章 鉄筋腐食を模擬した RC 梁部材の曲げ試験	3 -
2.1 はじめに	3 -
2.2 試験体概要	4 -
2.2.1 試験体	4 -
2.2.2 材料試験	5 -
2.2.3 腐食の模擬方法	7 -
2.3 実験方法	9 -
2.4 実験結果	10 -
2.4.1 最終破壊状況	10 -
2.4.2 引張鉄筋の応力－歪関係	14 -
2.4.3 荷重－載荷点たわみ関係	15 -
2.4.4 断面解析	16 -
2.5 まとめ	22 -
第3章 ひび割れを模擬した円柱試験体の圧縮試験	23 -
3.1 はじめに	23 -
3.2 試験体概要	24 -
3.2.1 試験体	24 -
3.2.2 材料試験	26 -
3.3 実験方法	27 -
3.4 実験結果	29 -
3.4.1 荷重－軸変形関係	29 -
3.4.2 スリットの深さによる影響	32 -
3.4.3 ひび割れの長さによる影響	34 -
3.4.4 試験体アスペクト比による影響	35 -
3.5 まとめ	38 -
第4章 梁試験体の圧縮領域を模擬した角柱試験体の圧縮試験	39 -
4.1 はじめに	39 -
4.2 試験体概要	40 -
4.2.1 試験体	40 -
4.2.2 材料試験	41 -
4.3 試験方法	42 -
4.4 実験結果	43 -
4.5 コンクリートモデルの構築	46 -
4.6 断面解析	48 -
4.7 まとめ	50 -
第5章 結論	51 -

謝辭.....	- 52 -
参考文献.....	- 53 -

図表目次

表 2.1	試験体緒言	- 4 -
表 2.2	コンクリートのフレッシュ性状.....	- 5 -
表 2.3	コンクリートの材料試験結果	- 5 -
表 2.4	鉄筋の引張試験結果	- 6 -
表 2.5	コンクリートモデル緒言	- 17 -
表 2.6	座屈試験結果.....	- 19 -
表 3.1	コンクリートのフレッシュ性状.....	- 26 -
表 3.2	コンクリートの材料試験結果	- 26 -
表 4.1	コンクリートのフレッシュ性状.....	- 41 -
表 4.2	コンクリートの材料試験結果	- 41 -
表 4.3	各試験体の n 値.....	- 46 -
図 1.1	既往の実験結果	- 1 -
図 2.1	梁試験体概要図	- 4 -
図 2.2	かぶりコンクリートのひび割れ模擬方法（左上：Sc 右上：Si 下：US） ...	- 7 -
図 2.3	鉄筋の腐食模擬の方法.....	- 8 -
図 2.4	変位計および歪ゲージ取り付け位置.....	- 9 -
図 2.5	最終破壊状況.....	- 11 -
図 2.6	最終破壊状況その 1（写真）	- 12 -
図 2.7	最終破壊状況その 2（写真）	- 13 -
図 2.8	荷重－引張鉄筋歪関係.....	- 14 -
図 2.9	荷重－載荷点たわみ関係	- 15 -
図 2.10	ひび割れによる影響係数の違いによる曲線の変化.....	- 17 -
図 2.11	座屈試験方法	- 18 -
図 2.12	座屈試験による応力－歪関係	- 19 -
図 2.13	鉄筋の応力－歪関係モデル.....	- 20 -
図 2.14	解析結果と実験結果の比較.....	- 21 -
図 3.1	試験体概要図（左：N タイプ、中：A タイプ、右：B タイプ）	- 25 -
図 3.2	計測装置概要.....	- 27 -
図 3.3	計測装置概要（写真）	- 27 -
図 3.4	計測範囲	- 28 -
図 3.5	荷重－軸変形関係（高さ 300mm 試験体）	- 30 -
図 3.6	荷重－軸変形関係（高さ 450mm 試験体）	- 31 -
図 3.7	荷重－軸変形曲線の比較（スリットの深さ）	- 32 -
図 3.8	スリットの深さによる最大荷重の比較	- 33 -
図 3.9	荷重－軸変形曲線の比較（ひび割れの長さ）	- 34 -
図 3.10	最終破壊状況（左：300-0-N ,右：450-0-N）	- 35 -
図 3.11	応力－歪関係の比較（アスペクト比）	- 36 -
図 3.12	基準化応力－歪関係の比較（アスペクト比）	- 37 -
図 4.1	梁断面の応力分布（最大荷重時）	- 40 -

図 4.2	試験体概要	- 40 -
図 4.3	計測装置	- 42 -
図 4.4	最終破壊状況	- 44 -
図 4.5	応力－歪関係	- 45 -
図 4.6	応力－歪関係の比較	- 47 -
図 4.7	曲げモーメント－基準化たわみ関係の比較	- 49 -

第1章 序論

1.1 研究背景

高度経済成長期に鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物が数多く建設され、現在ではそれらの RC 構造物の多くが耐用年数に近づいている。RC 構造物は基本的にメンテナンスフリーを前提としており、劣化が顕在化してから初めて維持管理行為をする場合がほとんどである。しかしながら、近年では RC 構造物においても予防保全の観点から維持管理が注目を集めている。これは構造物を定期的に点検して、結果を基に劣化の進行や構造性能について将来予測を行い、構造物の劣化が著しく進行する前に構造物を補修しようとするものである。

RC 構造物の劣化の進行やその将来予測を的確に行うためには、劣化による構造物の性能低下を定量的に把握することが重要である。RC 構造物劣化の代表的な劣化の要因は鉄筋の腐食である。RC 構造物が中性化や塩害の被害を受けて鉄筋が腐食し、鉄筋の体積膨張によってかぶりコンクリートにひび割れが発生する。さらに腐食が進行すると鉄筋の断面が欠損し、断面積の減少が起きる。これにより RC 構造物の引張または圧縮性能といった構造性能が低下する。

現在までに鉄筋腐食が RC 部材の構造性能に及ぼす影響について、多くの研究が進められている。通常、腐食が鉄筋の引張性能を低下させて部材耐力を低下させるという観点で検討されるが、既往の研究¹⁾では圧縮鉄筋の腐食によるコンクリートの圧縮耐荷性能への影響を把握することを目的として、電食により鉄筋の腐食程度を変動させた RC 梁部材の載荷実験が行われた。この研究結果では、圧縮側コンクリートの腐食ひび割れにより部材の耐力が低下、鉄筋の座屈によりコンクリートが剥落し、脆性的に破壊する挙動が得られている（図 1.1）。既往の研究結果より、圧縮側コンクリートおよび圧縮鉄筋の損傷を考慮することが重要であると考えられる。

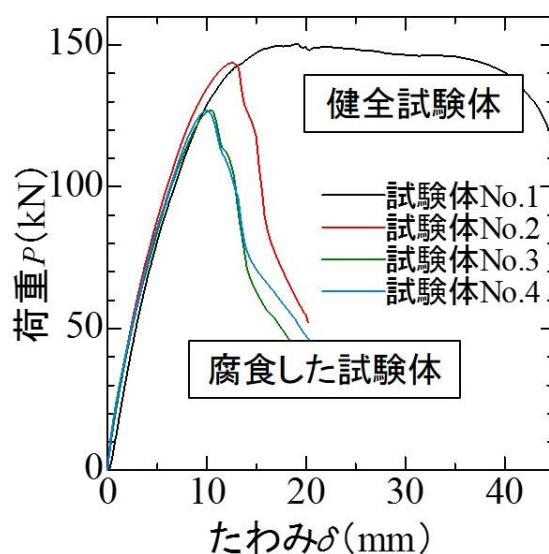


図 1.1 既往の実験結果

1.2 研究目的

既往の研究結果から、RC 部材の脆性的な破壊を防止するためには、圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の腐食も考慮することが重要であると考えられる。本研究では、かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の損傷が RC 部材の構造性能に与える影響を、それらを模擬した実験により把握することを目的とする。

第2章 鉄筋腐食を模擬した RC 梁部材の曲げ試験

2.1 はじめに

既往の研究では、圧縮領域を電食により腐食させた RC 梁部材の曲げ試験が行われ、圧縮側コンクリートの腐食ひび割れにより部材の耐力が低下し、また鉄筋の座屈によりコンクリートが剥落し、脆性的に破壊する挙動をすることが報告されている。既往の研究結果より、圧縮鉄筋の腐食および圧縮側コンクリートの損傷を考慮することが重要であると考えられる。そこで本章では、かぶりコンクリートのひび割れや鉄筋の断面積の減少が RC 梁部材の構造性能に与える影響を把握することを目的として、圧縮側のかぶりコンクリートのひび割れおよび鉄筋の腐食を模擬した RC 梁部材の曲げ試験を行い検討する。

2.2 試験体概要

2.2.1 試験体

試験体の緒言を表 2.1 に、試験体の概要図を図 2.1 に示す。断面は 150mm×235mm、全長 2200mm の試験体で、等曲げ区間を 400mm としている。圧縮鉄筋には 2-D10 (SD295)、引張鉄筋には圧縮側コンクリートの破壊を先行して生じさせるために 3-D16 (SD490) を用い、せん断補強筋には D6 (SD295) を 70mm ピッチで配した。試験体は 6 体作製し、主要なパラメータをかぶりコンクリートのひび割れの模擬種類と圧縮鉄筋の切削の有無とした。

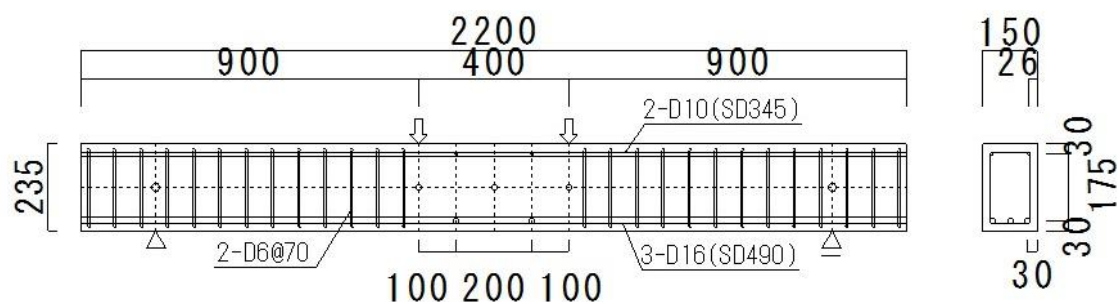


図 2.1 梁試験体概要図

表 2.1 試験体緒言

名称	共通事項	コンクリートの 損傷模擬	鉄筋の 腐食模擬
B-N	断面	—	—
B-N(R)	235×150mm	—	切削 30%
B-Sc	主鉄筋	側面ひび割れ (連続)	—
B-Sc(R)	D16×3 D10×2	側面ひび割れ (連続)	切削 30%
B-Si	せん断補強筋	側面ひび割れ (断続)	—
B-US	D10@70mm	上・側面ひび割れ	—

2.2.2 材料試験

2.2.2.1 コンクリート

使用したコンクリートのフレッシュ性状を表 2.2 に示す。コンクリートには高度経済成長期に建設された構造物を想定し、目標強度 13.5MPa の普通コンクリートを使用した。コンクリートの材料試験結果を表 2.3 に示す。コンクリートの材料試験結果は、試験体と同時に作製したテストピース(φ 100mm×200mm)計 12 体の結果である。

表 2.2 コンクリートのフレッシュ性状

目標圧縮強度 (MPa)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
13.5	103	16.2	4.6

表 2.3 コンクリートの材料試験結果

試験体番号	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時の歪(%)	割裂強度 (MPa)
C-1	12.8	0.21	—
C-2	13.4	0.18	—
C-3	12.4	0.21	—
C-4	12.4	0.22	—
C-5	12.6	0.24	—
C-6	13.0	0.20	—
S-1	—	—	1.60
S-2	—	—	1.46
S-3	—	—	1.44
S-4	—	—	1.46
S-5	—	—	1.26
S-6	—	—	1.55
平均	12.8	0.21	1.46

2.2.2.2 鉄筋

使用した鉄筋の引張試験結果を表 2.4 に示す。歪ゲージにより歪を測定し、降伏強度および弾性係数を算出した。

表 2.4 鉄筋の引張試験結果

種別		公称断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	降伏歪 (%)	弾性係数 (GPa)	備考
D6	D6-1	31.67	16.7	526	410	0.23	177	せん断 補強筋
	D6-2		15.4	487	386	0.23	169	
	D6-3		15.5	490	390	0.21	183	
	D6 平均		15.9	501	395	0.22	176	
D10	D10-1	71.33	36.5	512	387	0.22	177	圧縮鉄筋
	D10-2		36.4	510	380	0.20	188	
	D10-3		37.2	522	388	0.21	189	
	D10 平均		36.7	515	385	0.21	185	
D16	D16-1	198.6	154.9	780	606	0.29	209	引張鉄筋
	D16-2		150.3	757	579	0.29	198	
	D16-3		149.1	751	588	0.30	195	
	D16 平均		151.5	763	591	0.29	201	

2.2.3 腐食の模擬方法

2.2.3.1 かぶりコンクリートのひび割れの模擬

かぶりコンクリートの損傷模擬の例を図 2.2 に示す。スリットは、コンクリート打設前にポリプロピレンシートを鉄筋に接着して設けた。スリットを設ける箇所は等曲げ区間の 400mm とした。B-Sc 試験体は側面に連続してスリットが存在する試験体、B-Si は側面に 50mm 間隔で断続してスリットが存在する試験体、B-US は側面と上面に 50mm 間隔で交互にスリットが存在する試験体である。

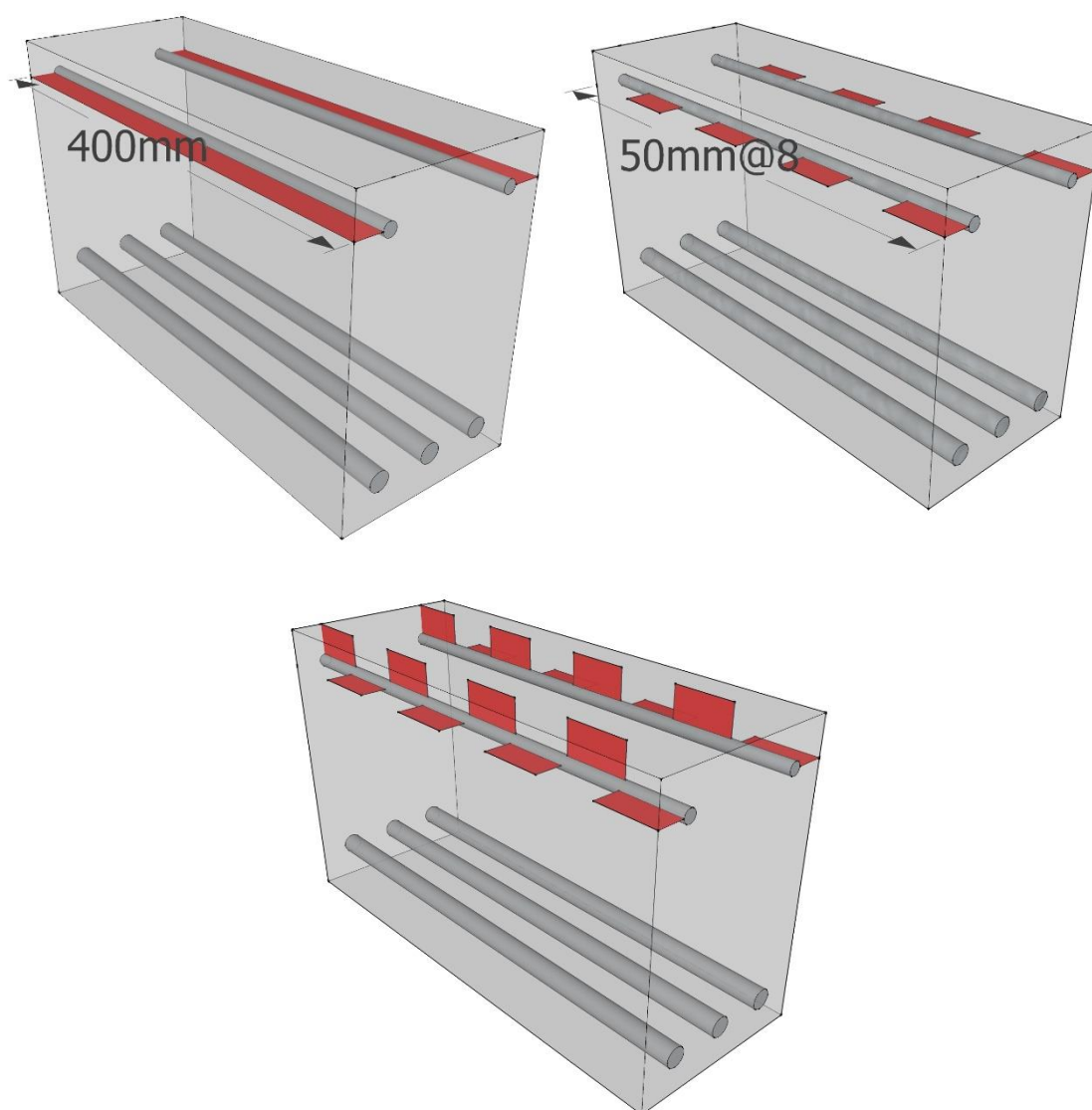


図 2.2 かぶりコンクリートのひび割れ模擬方法（左上：Sc 右上：Si 下：US）

2.2.3.2 鉄筋腐食の模擬

鉄筋の腐食模擬方法を図 2.3 に示す。圧縮鉄筋の試験体中央から左右 100mm の位置 2 ヶ所に、断面積比 30%で切削を設けた。なお、鉄筋腐食を模擬した試験体には末尾に(R)を付け呼称する。

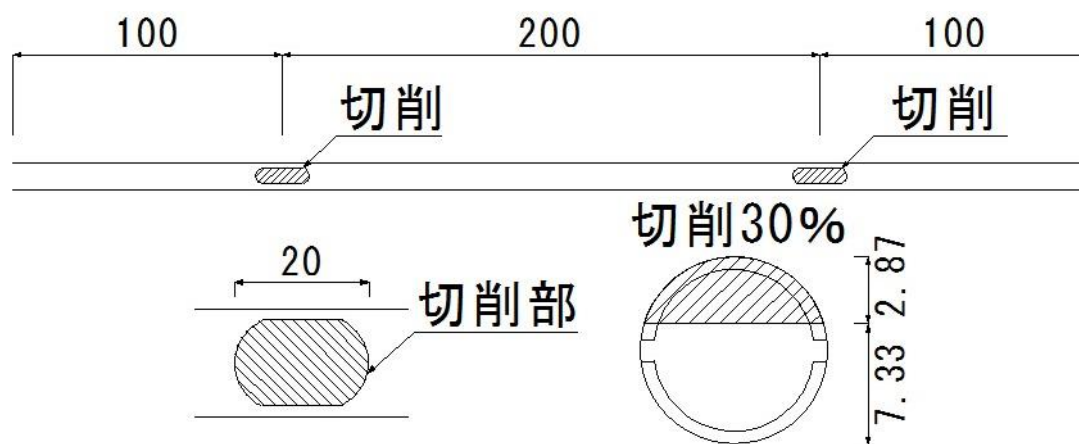


図 2.3 鉄筋の腐食模擬の方法

2.3 実験方法

変位計および歪ゲージの取り付け位置を図 2.4 に示す。載荷位置は試験体中央から左右に 200mm の位置とし、2MN ユニバーサル万能試験機を用いて 4 点曲げ試験を行う。計測項目は荷重、変位計による載荷点たわみ 2 ヶ所、歪ゲージによる引張鉄筋の歪 6 ヶ所の三項目とした。

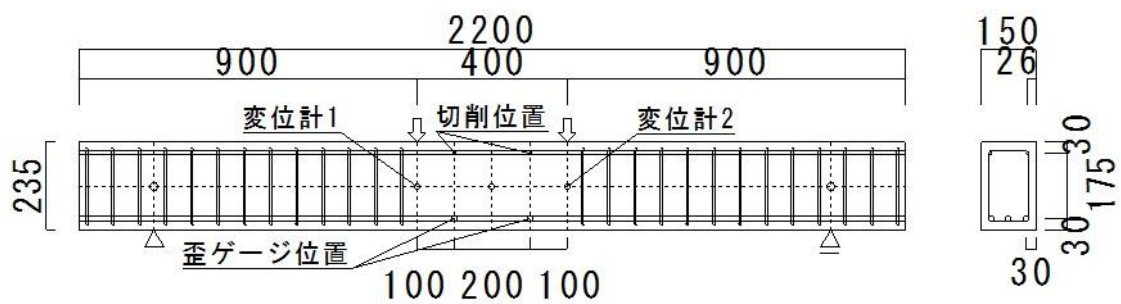


図 2.4 変位計および歪ゲージ取り付け位置

2.4 実験結果

2.4.1 最終破壊状況

試験体の最終破壊状況を図 2.5 に示す。B-N および B-Si 試験体はせん断スパンで、B-N(R)、B-Sc、B-Sc(R)、B-US 試験体は等曲げ区間内の破壊で終局に至った。

試験体破壊位置の詳細写真を図 2.6 および図 2.7 に示す。すべての試験体の圧縮鉄筋は破壊位置でかぶりコンクリートを外に押し出すように断面外側に座屈している。

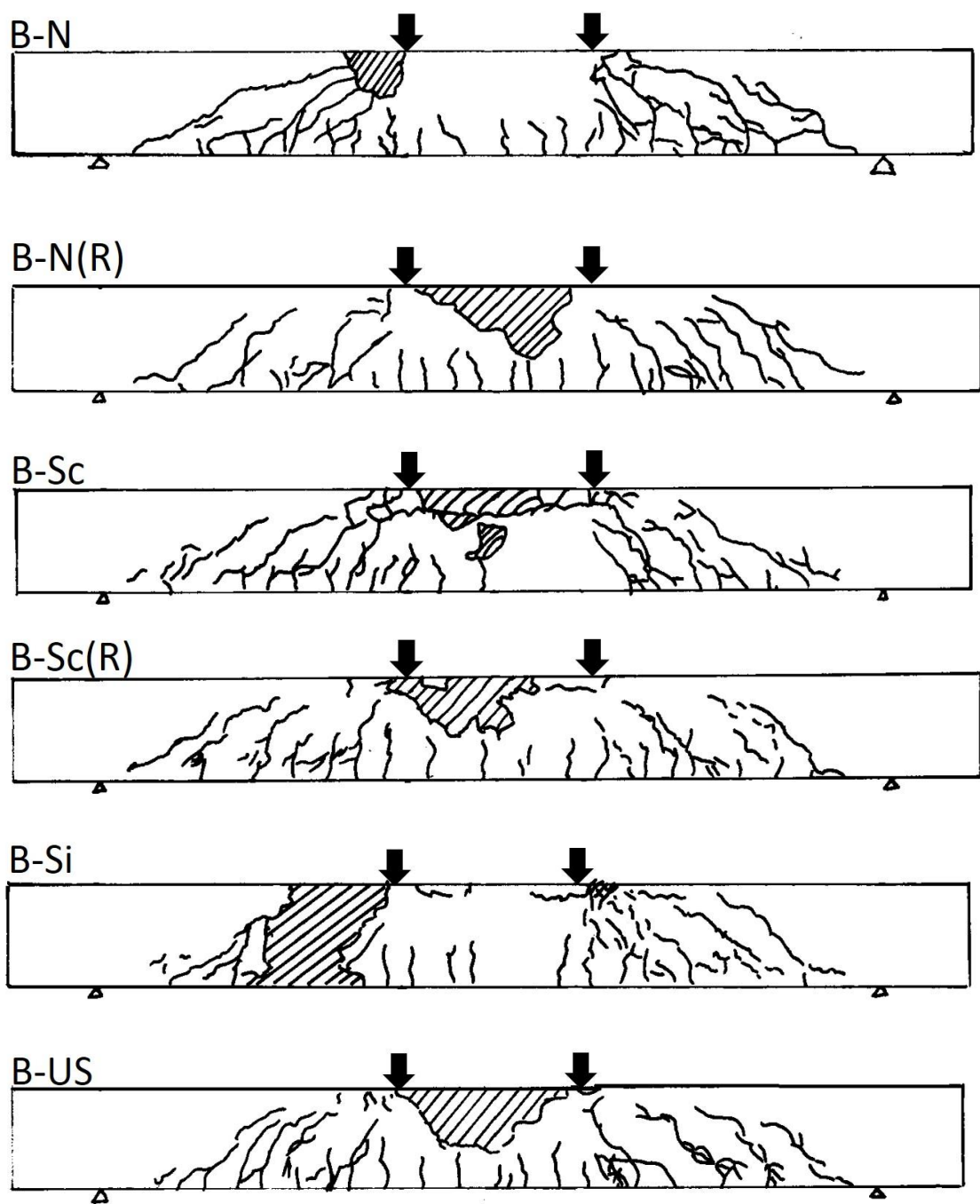


図 2.5 最終破壊状況

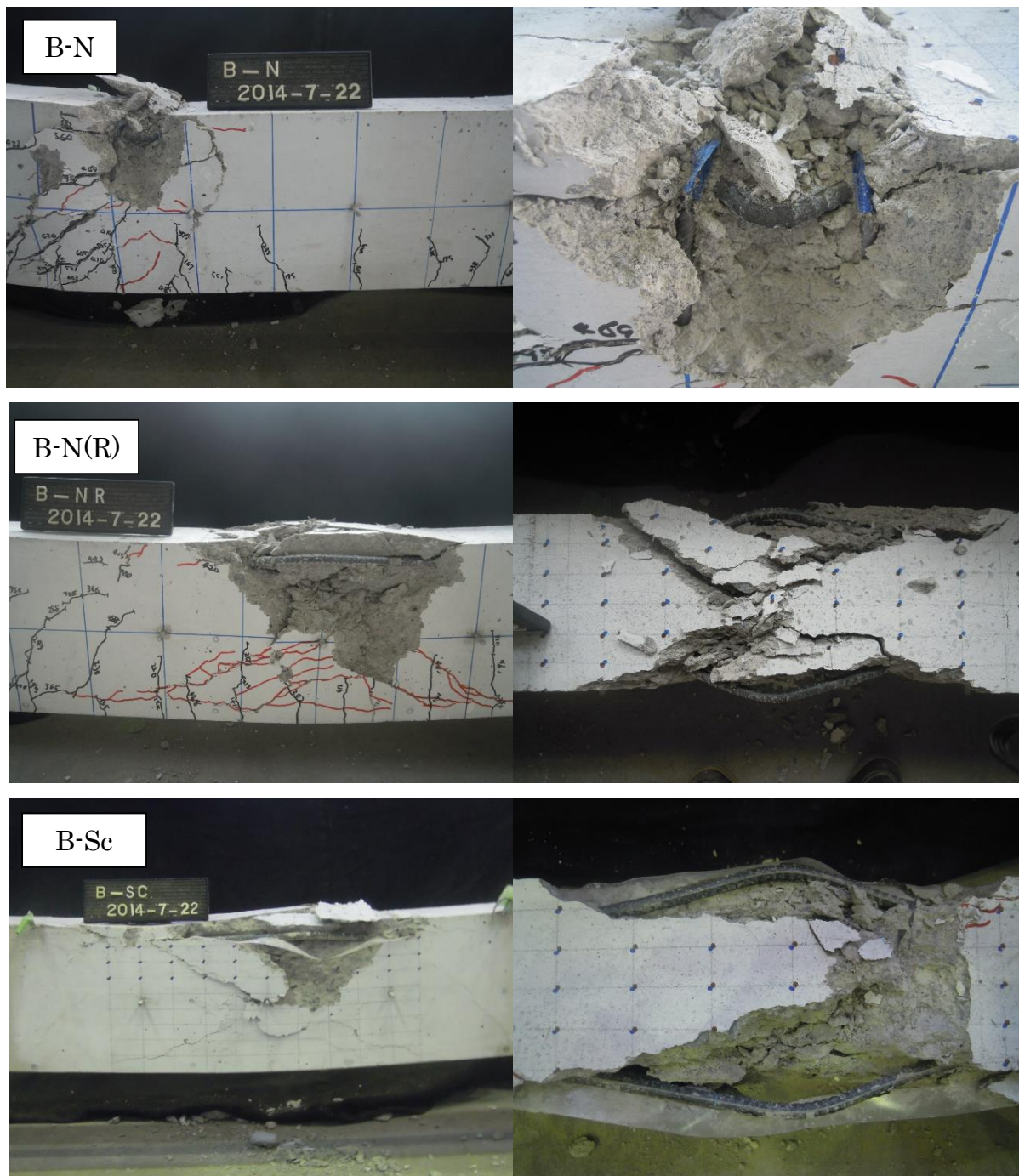


図 2.6 最終破壊状況その 1 (写真)

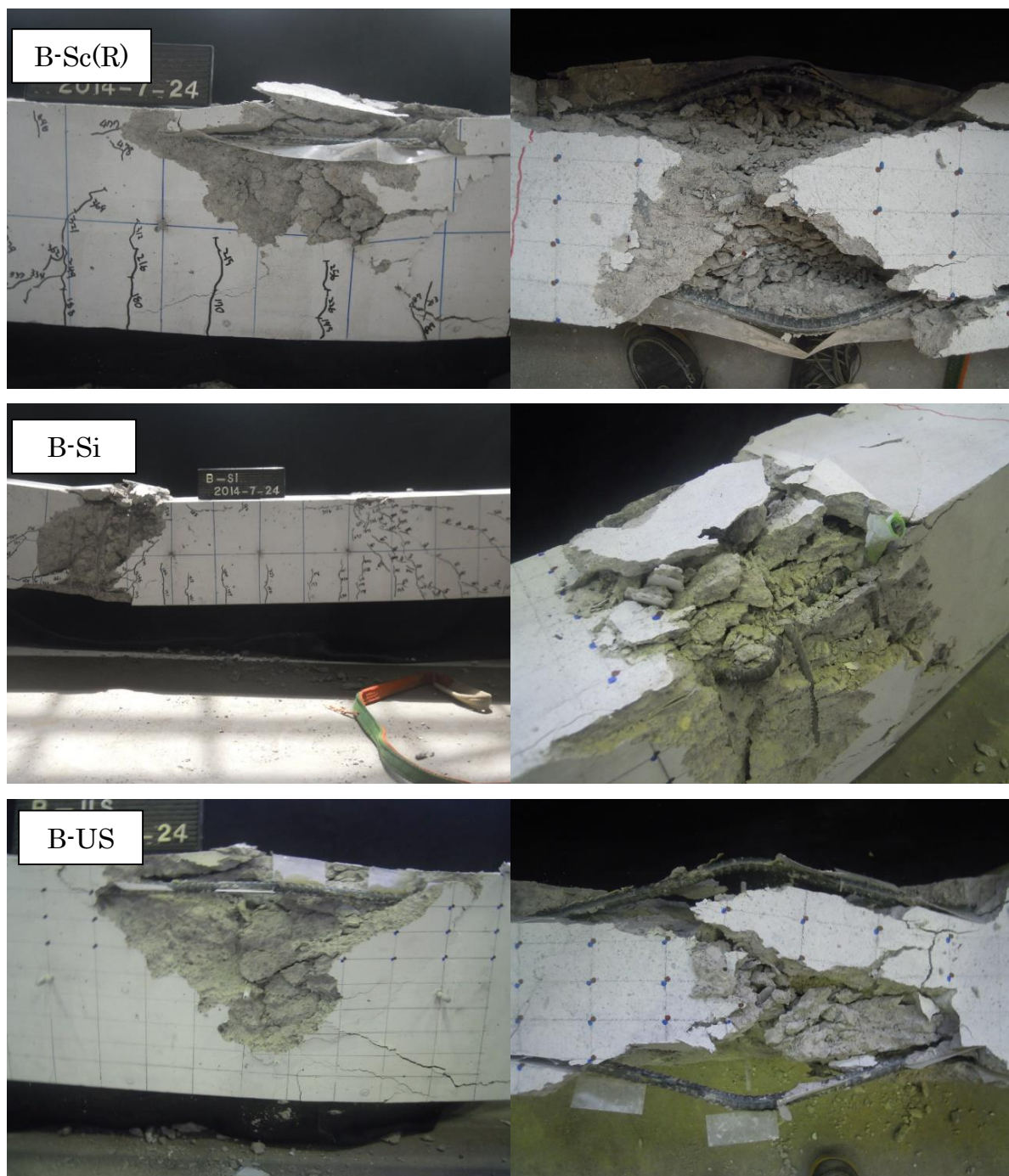


図 2.7 最終破壊状況その 2 (写真)

2.4.2 引張鉄筋の応力－歪関係

荷重と引張鉄筋の歪関係を図 2.8 に示す。試験体に使用した引張鉄筋の降伏歪は 2900μ であり、全ての試験体の引張鉄筋は降伏歪に達していないことがわかる。全ての試験体は圧縮破壊で終局に至ったことが確認できる。

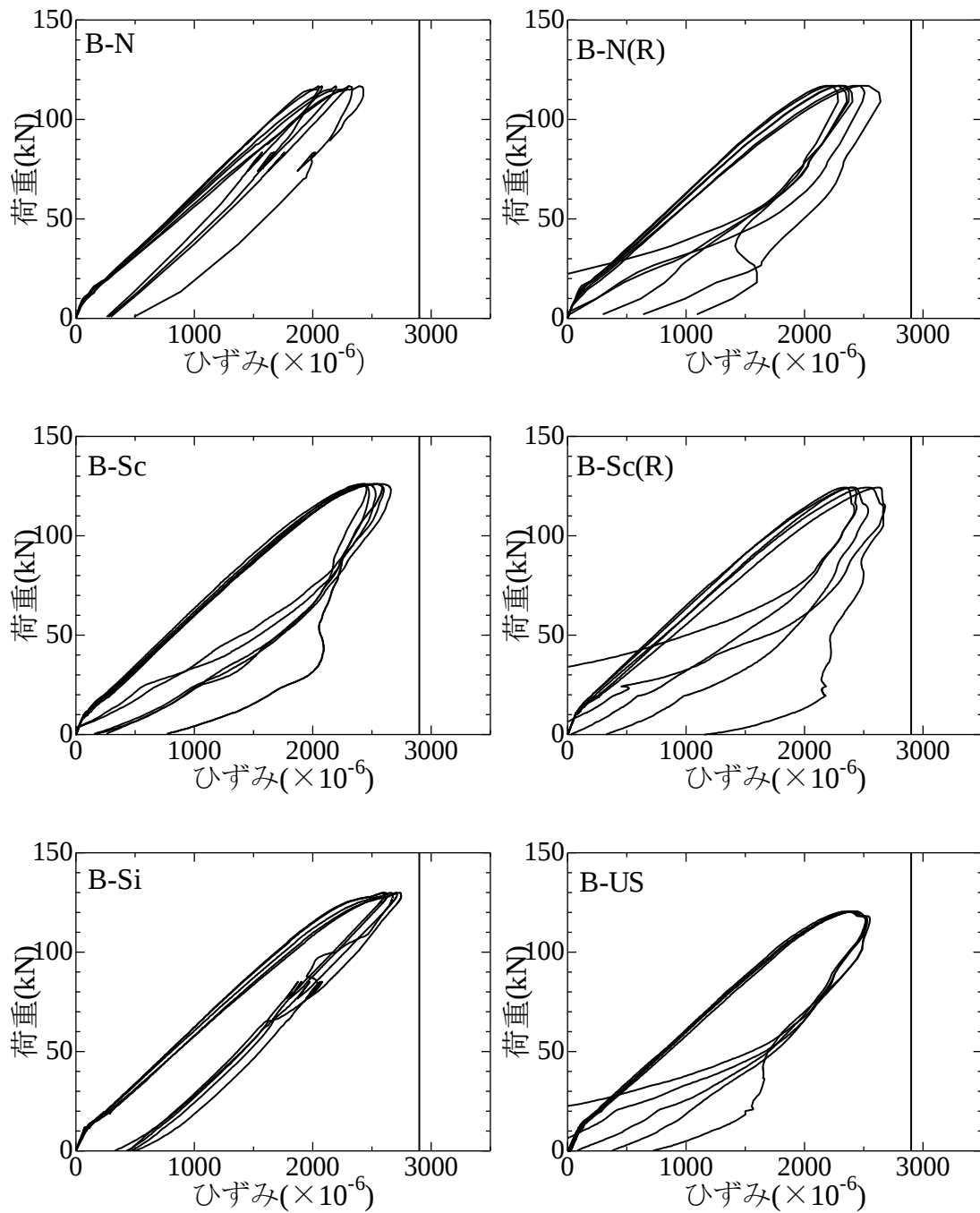


図 2.8 荷重－引張鉄筋歪関係

2.4.3 荷重－載荷点たわみ関係

各試験体の荷重－載荷点たわみ関係を図 2.9 に示す。載荷点たわみは 2 つの変位計の平均である。せん断スパンで破壊した B-N, B-Si 試験体は最大荷重後、緩やかに荷重が低下した。等曲げ区間で破壊した B-N(R), B-Sc, B-Sc(R), B-US 試験体は最大荷重後、急激に荷重が低下し、靱性に乏しい挙動を示した。また、かぶりコンクリートのスリットまたは圧縮鉄筋の切削の影響によって、各試験体の変形性能が変化していることがわかる。

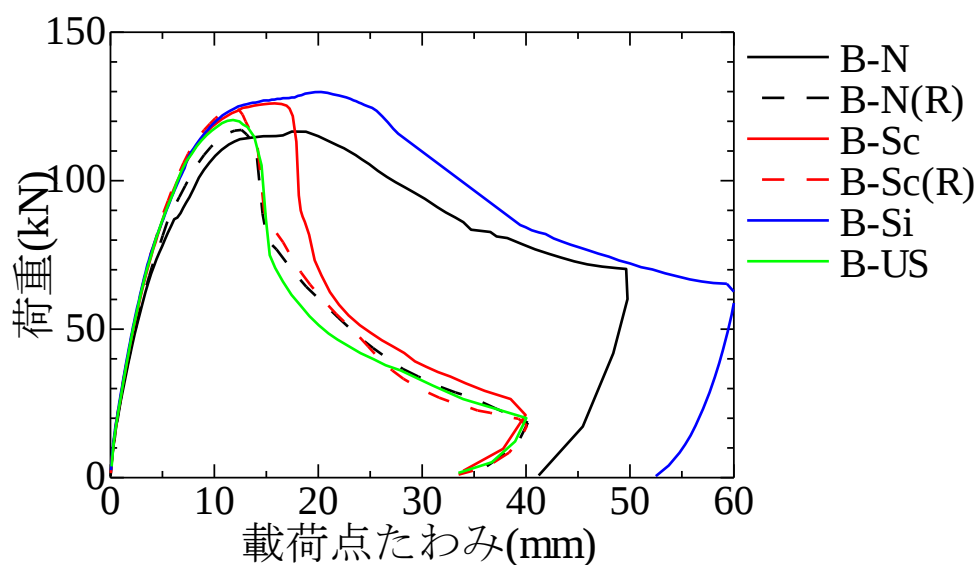


図 2.9 荷重－載荷点たわみ関係

2.4.4 断面解析

2.4.4.1 コンクリートモデル

断面解析に用いるコンクリートモデルは比較的精度良くコンクリートの応力-歪関係を表すことができるとされている Popovics 式(1)を用いる。Popovics 式はコンクリートの圧縮強度、圧縮強度時の歪および実験係数のみで成り立っている。

実構造物は腐食の進行に伴い、かぶりコンクリートにひび割れが生じ構造性能が低下する。構造性能の変化の度合いはひび割れの程度が一因だと考え、Popovics 式の実験係数 n を求める式に、実験係数 α の指数関数を導入することによって変化させることを試みた。

ひび割れによる影響係数 α は対象区間（等曲げ区間:400mm）におけるひび割れの程度を表したものである。なお、ひび割れは側面と上面に分けて考えるものとする。

ひび割れによる影響係数 α の変動によるコンクリートの応力-歪関係の変化を図 2.10 に示す。係数が大きくなる、つまり対象区間にひび割れが多く存在するとピーク後、急激に応力が低下し靱性に乏しい挙動を示すモデルとなっている。

$$\sigma_c = \sigma_{cmax} \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cmax}} \times \frac{n}{n-1+(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cmax}})^n} \quad (1)$$

$$n = e^{\alpha} \times (0.0582 \times \sigma_{cmax}) + 1$$

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{L}$$

ここで、

σ_{cmax} : コンクリートの圧縮強度(MPa)

ε_{cmax} : 圧縮強度時の歪

n : 実験係数

α : ひび割れによる影響係数

L : 対象区間長(mm)

L_{cr} : 対象区間長におけるひび割れ長さの合計(mm)

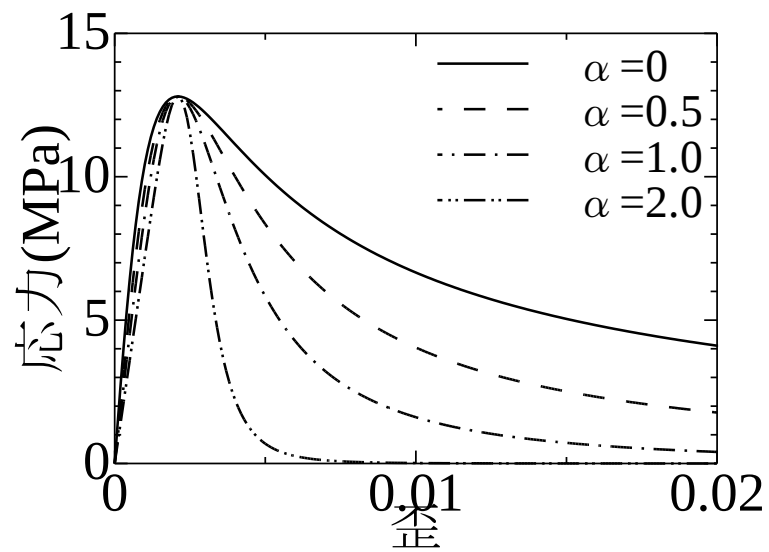


図 2.10 ひび割れによる影響係数の違いによる曲線の変化

表 2.5 コンクリートモデル緒言

コンクリートの圧縮強度 (MPa)	σ_{cmax}	12.8
圧縮強度時の歪 (%)	ϵ_{cmax}	0.21
ひび割れによる影響係数	α	$S_{\text{c,US}} = 1.0$ $S_{\text{i}} = 0.5$
対象区間長 (mm)	L	400
対象区間長におけるひび割れ長さの合計 (mm)	L_{cr}	$S_{\text{c,US}} = 400$ $S_{\text{i}} = 200$

2.4.4.2 鉄筋モデル

(1) 座屈試験

加力後の試験体を観察すると、圧縮鉄筋が座屈して終局に至っている。断面解析に座屈を考慮するために座屈試験を行い、試験結果を基に、鉄筋の応力－歪関係モデルを構築する。

座屈試験の概要を図 2.11 に示す。座屈試験には D10 の鉄筋を 3 本用いる。試験区間長を梁試験体と同様 400mm とし、治具への挿入部は片側 80mm として支持条件は固定とする。試験で得られた応力－歪関係を図 2.12 に示す。応力は荷重を公称断面積 71.3mm^2 で、歪は変位を試験区間長 400mm で除することにより算出した。全ての試験体は弾性座屈により応力が急激に低下している。座屈試験結果の一覧を表 2.6 に示す。

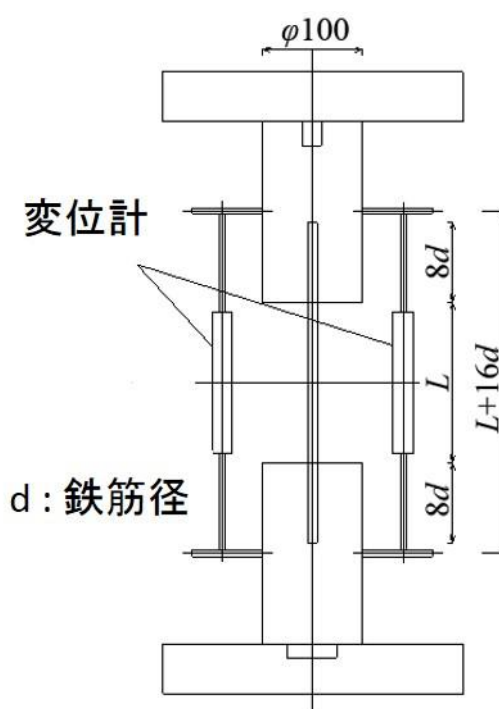


図 2.11 座屈試験方法

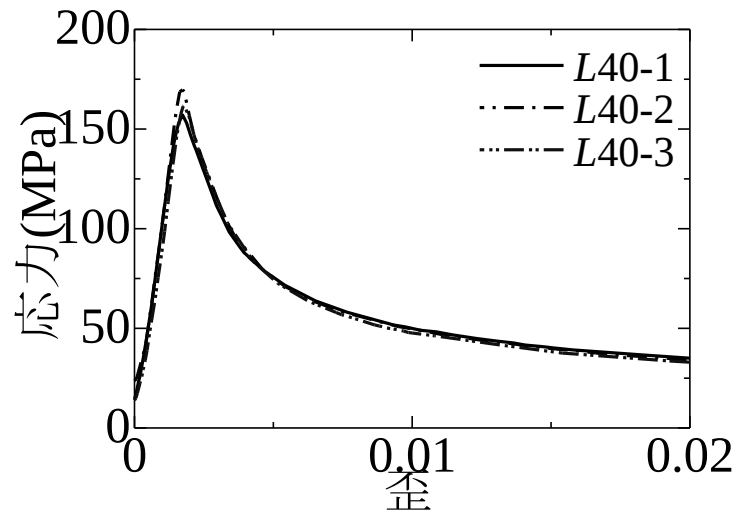


図 2.12 座屈試験による応力－歪関係

表 2.6 座屈試験結果

試験体名	最大荷重 (kN)	最大応力 (MPa)	最大応力時の歪 (%)
L40-1	11.2	157.1	0.17
L40-2	12.1	169.7	0.17
L40-3	11.5	161.8	0.18
平均	11.6	162.9	0.17

(2) 応力－歪関係のモデル化

鉄筋の応力－歪関係のモデルには、座屈試験から得られた応力－歪曲線を近似して最大応力後の負勾配をモデル化した。モデル化した式(2)を下記に示す。

$$\sigma_s = \sigma_{smax} \times \left(\frac{\varepsilon_{smax}}{\varepsilon_s} \right)^{0.568} \quad (2)$$

既往の研究²⁾では切削した鉄筋の座屈試験を行い、鉄筋腐食による断面欠損を考慮した応力－歪関係のモデル化が行われている。本研究においても切削鉄筋のモデルには同一の冪数を用いたモデル式(3)を使用する。断面欠損を考慮したモデルを図 2.13 に示す。断面減少率が増加すると最大応力後の負勾配は緩やかになる。

$$\sigma_s = \sigma_{smax} \times \left(\frac{\varepsilon_{smax}}{\varepsilon_s} \right)^{0.568 \times (1 - \frac{\gamma}{100})^{0.5}} \quad (3)$$

ここで、

σ_{smax} ：鉄筋の最大応力(MPa)

ε_{smax} ：最大応力時の歪

γ ：断面減少率(%)

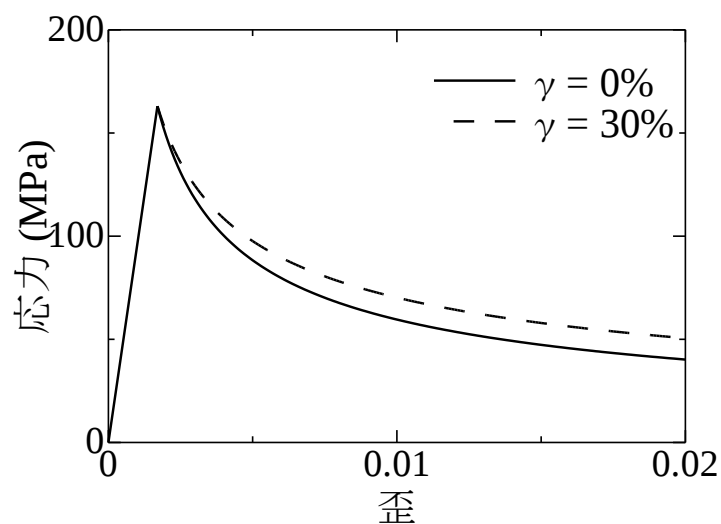


図 2.13 鉄筋の応力－歪関係モデル

2.4.4.3 実験結果と解析結果の比較

前節の材料モデルを用いて、ファイバーモデルによる断面解析を行った。解析結果である曲率と実験結果のたわみを比較するために、それぞれを引張鉄筋の歪が 2000μ に達したときの曲率およびたわみで基準化した。各試験体のモーメントー基準化たわみ曲線を図 2.14 に示す。

解析結果では、ひび割れによる影響係数 α が大きい試験体ほど、ピーク後の負勾配が大きくなっているが、実験結果で見られる急激な荷重の減少を表現できていない。

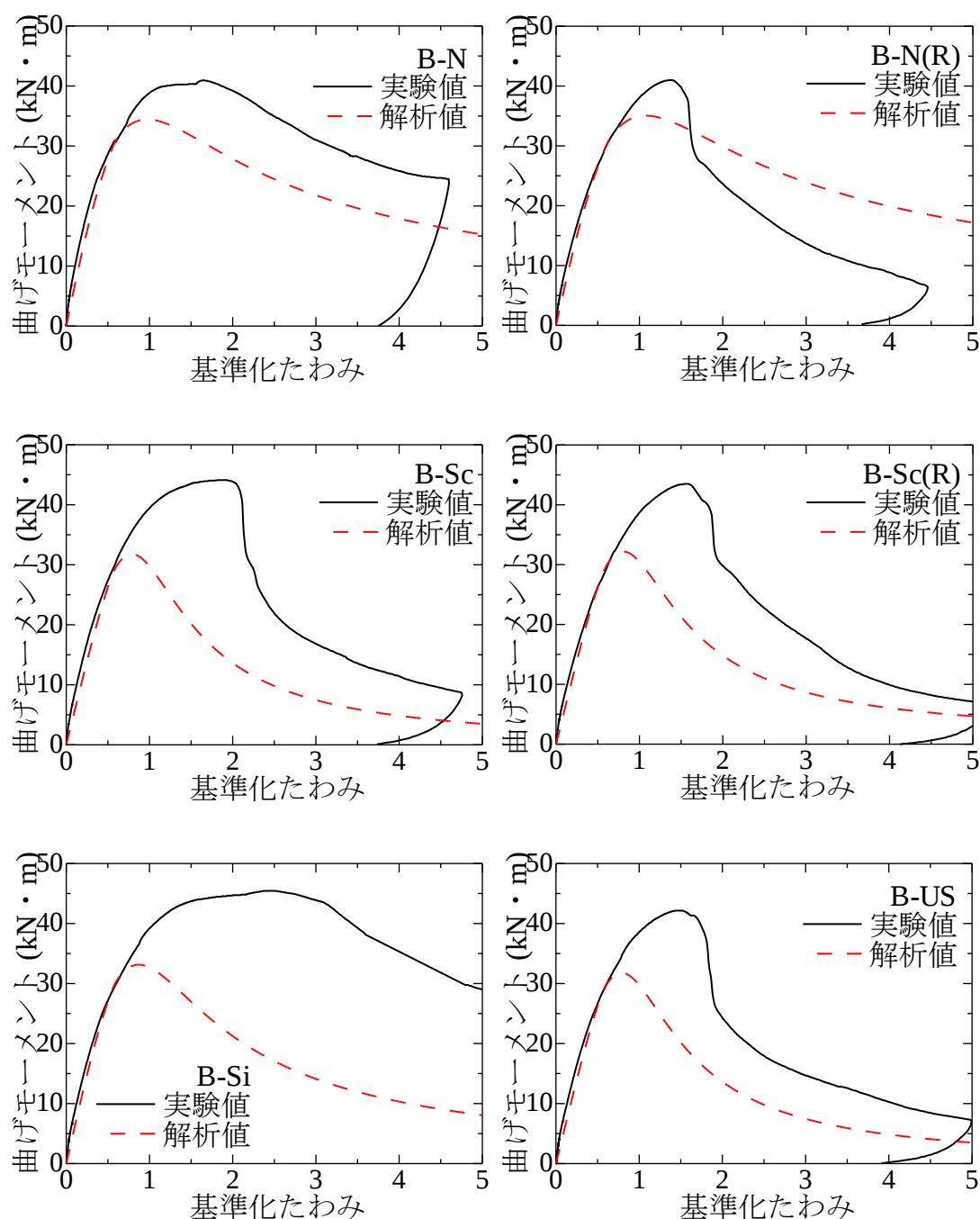


図 2.14 解析結果と実験結果の比較

2.5 まとめ

圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の腐食を模擬した RC 梁試験体の 4 点曲げ試験を行った。また、ひび割れによる応力－歪関係の変化を考慮したコンクリートモデルおよび座屈を考慮した鉄筋モデルを用いて断面解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 圧縮側コンクリートのひび割れの種類および圧縮鉄筋の切削の有無によって RC 梁の破壊挙動が異なる。
- (2) 腐食を考慮した断面解析を行った結果、ひび割れによる影響係数が大きい試験体ほど、ピーク後の負勾配が大きくなったが、実験結果で見られる急激な荷重の減少は表現できなかった。

第3章 ひび割れを模擬した円柱試験体の圧縮試験

3.1 はじめに

本章では、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れがコンクリートの圧縮性能に及ぼす影響を検討することを目的として、ひび割れを模擬したコンクリート試験体の一軸圧縮試験を行う。

3.2 試験体概要

3.2.1 試験体

試験体概要図を図 3.1 に示す。試験体は直径 150mm、高さ 300mm（アスペクト比 1:2）または 450mm（アスペクト比 1:3）の円柱試験体とし、各シリーズ 3 体作製する。変動因子はスリットの長さでスリットの深さである。スリットはコンクリート打筋前に型枠にポリプロピレンシートを取り付けることにより作製した。試験体 N タイプはスリットのない試験体、試験体 A タイプは試験体全長にスリットを有する試験体、試験体 B タイプは試験体の上下 50mm にスリットのない試験体である。変動因子であるスリットの深さは 12.5mm、25mm、37.5mm の 3 種類とした。試験体の呼称は「試験体高さ」・「スリットの深さ」・「試験体タイプ」とする。

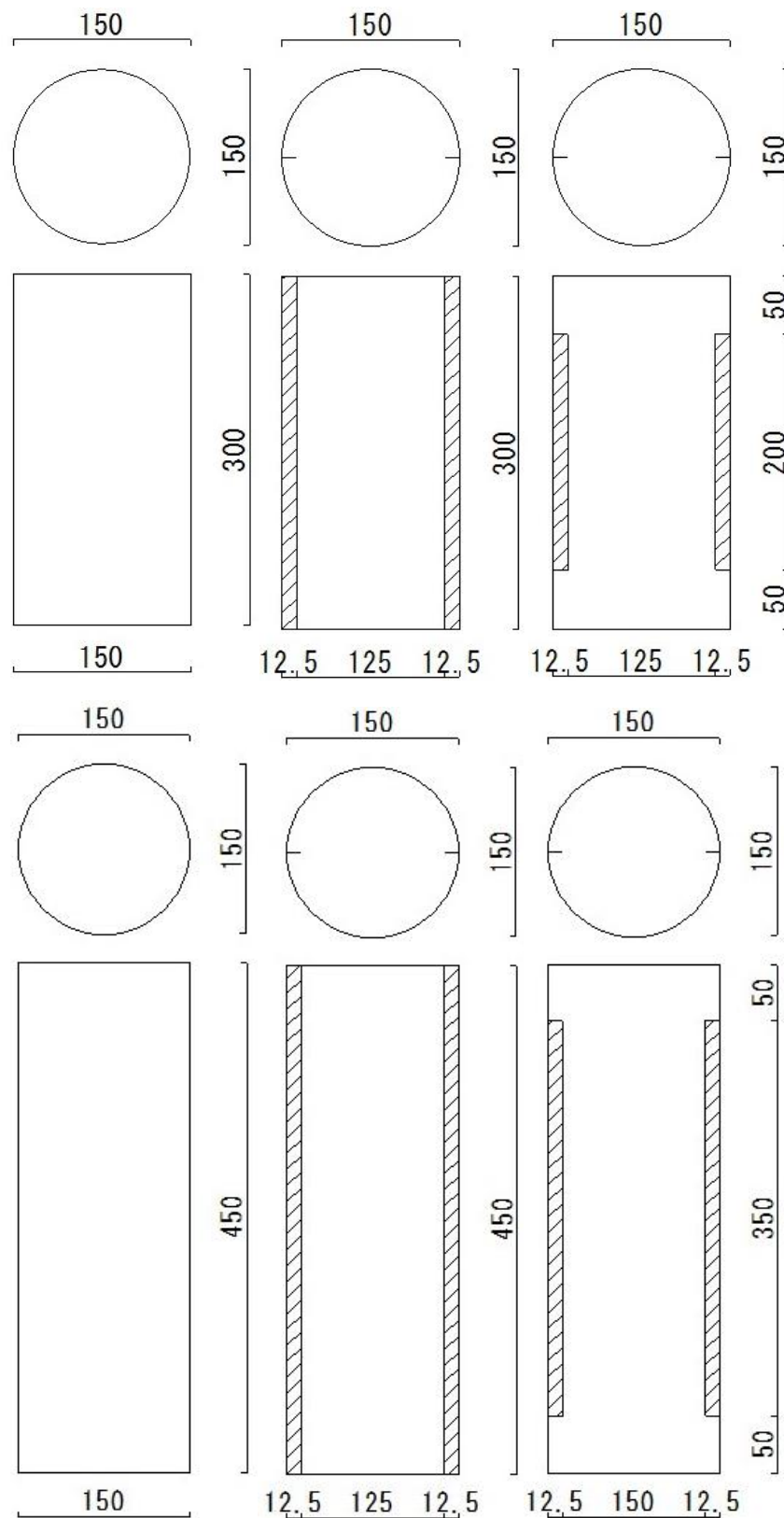


図 3.1 試験体概要図 (左 : N タイプ、中 : A タイプ、右 : B タイプ)

3.2.2 材料試験

使用したコンクリートのフレッシュ性状を表 3.1 に示す。梁試験体同様、目標圧縮強度 13.5MPa の普通コンクリートを使用した。コンクリートの材料試験結果を表 3.2 に示す。

表 3.1 コンクリートのフレッシュ性状

目標圧縮強度 (MPa)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
13.5	103	16.0	4.3

表 3.2 コンクリートの材料試験結果

試験体番号	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時の歪 (%)	割裂強度 (MPa)
C-7	13.0	0.22	—
C-8	12.9	0.22	—
C-9	12.8	0.21	—
C-10	11.9	0.23	—
C-11	13.1	0.22	—
C-12	12.3	0.22	—
S-7	—	—	1.49
S-8	—	—	1.36
S-9	—	—	1.42
平均	12.7	0.22	1.42

3.3 実験方法

実験装置には 2MN ユニバーサル万能試験機を用いる。計測項目は荷重、断面 4 ヶ所における軸変形である。計測装置の概要を図 3.2、図 3.3 に、計測区間を図 3.4 に示す。試験区間長は、高さ 300mm の試験体では 150mm、高さ 450mm の試験体では 300mm である。

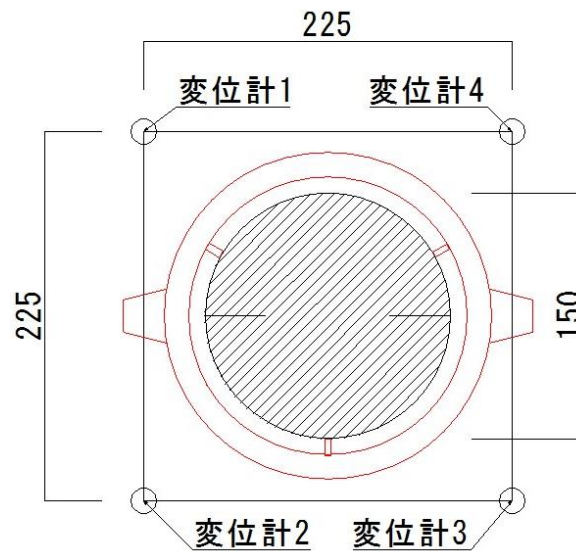


図 3.2 計測装置概要



図 3.3 計測装置概要（写真）

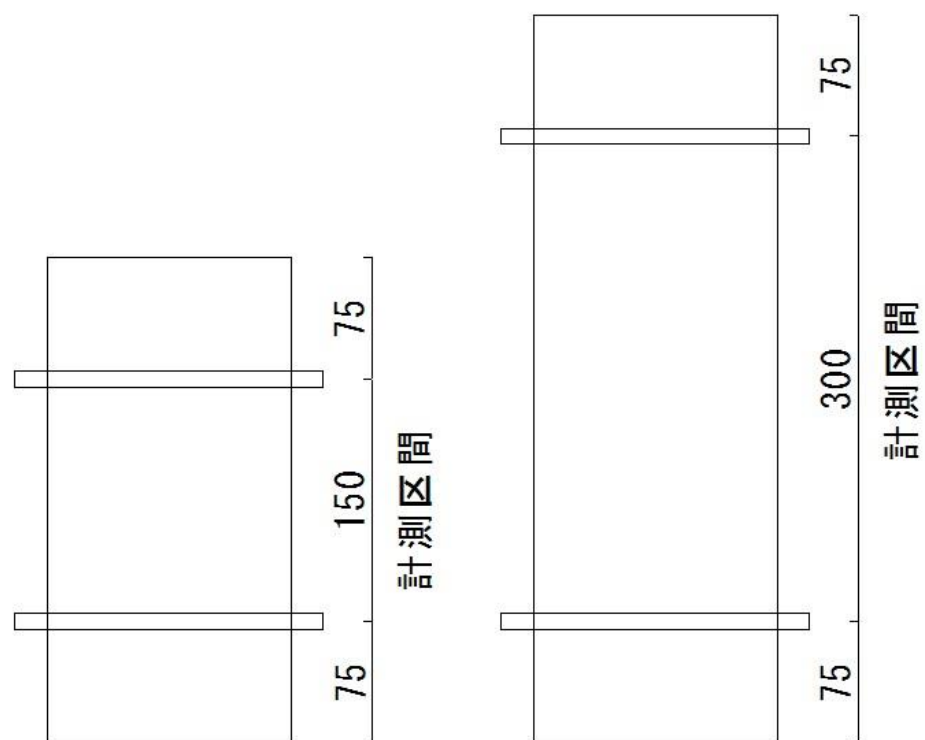


図 3.4 計測範囲

3.4 実験結果

3.4.1 荷重－軸変形関係

各試験体の荷重－軸変形関係を図 3.5 および図 3.6 に示す。300-0-N 試験体の 1 体は他の 2 体と比較して最大荷重が明らかに小さいため、検討からは省く。なお、実験結果の比較には、各シリーズの平均を用いる。

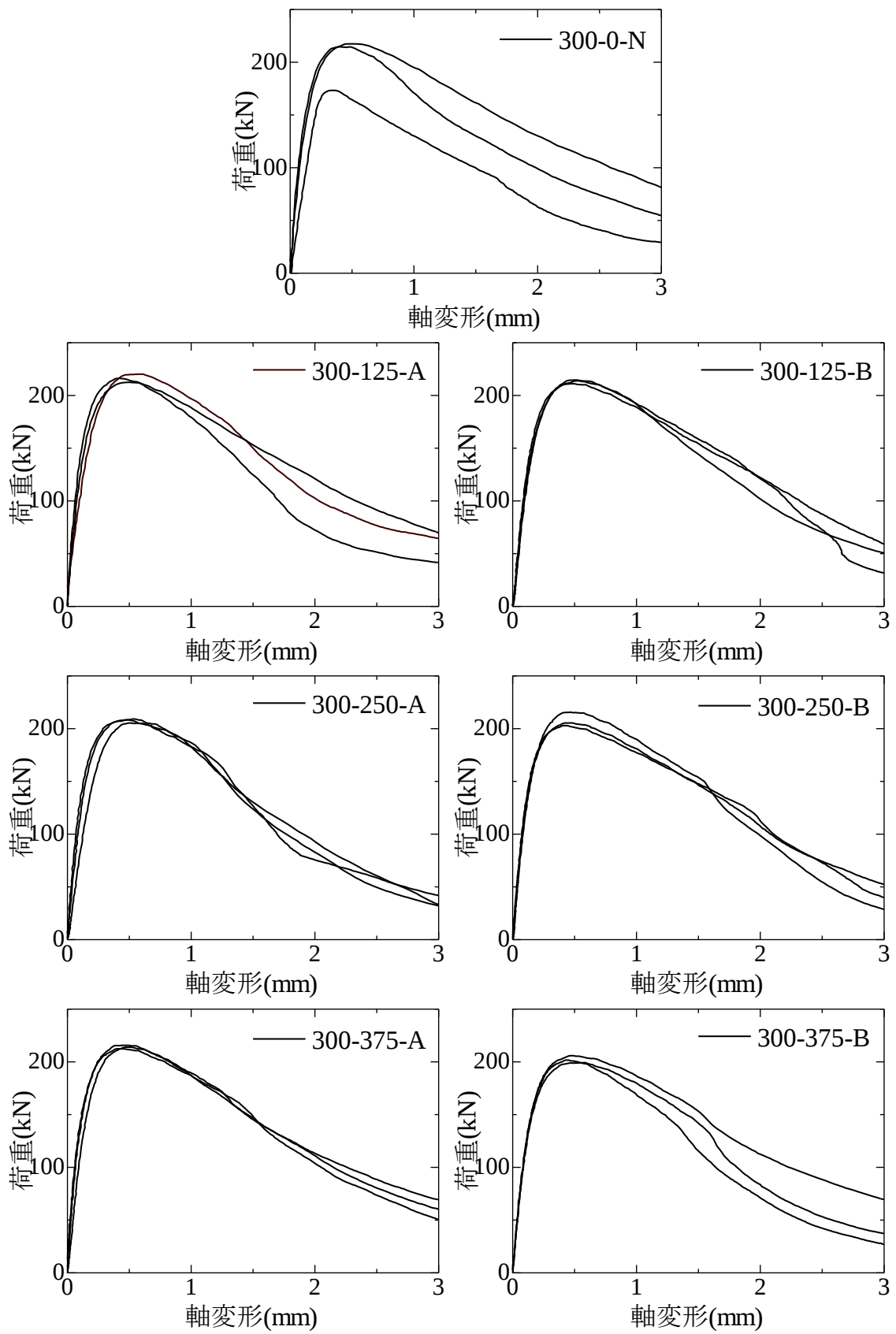


図 3.5 荷重－軸変形関係（高さ 300mm 試験体）

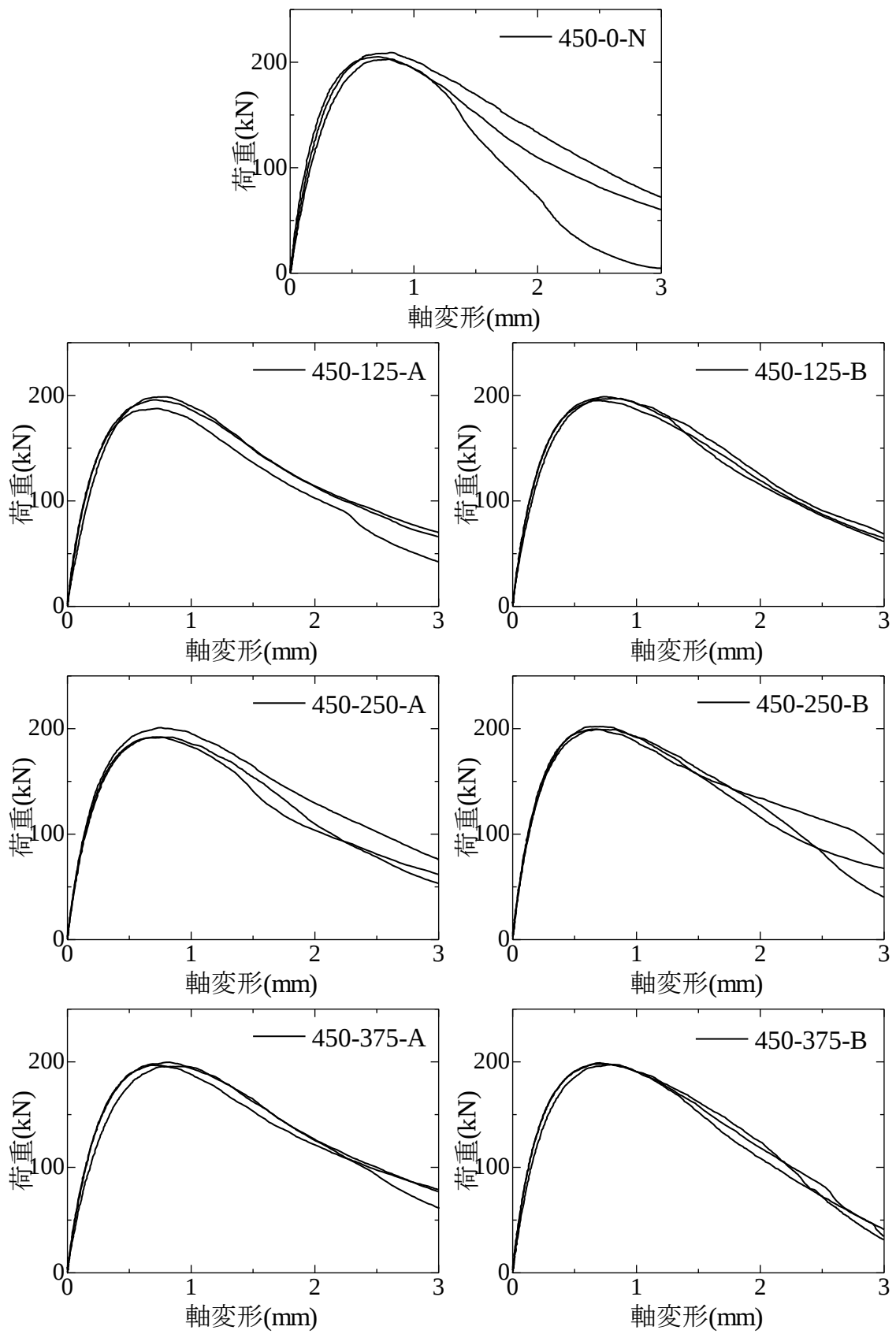


図 3.6 荷重－軸変形関係（高さ 450mm 試験体）

3.4.2 スリットの深さによる影響

スリットの深さによる荷重－軸変形曲線の比較を図 3.7 に、最大荷重の比較を図 3.8 に示す。荷重－軸変形曲線の荷重は、各試験体の最大荷重で基準化している。A シリーズ、B シリーズともに、スリットの深さの違いによる明確な曲線の差異は確認できなかった。一方、最大荷重はスリットの深さが大きくなると低下する傾向が得られた。

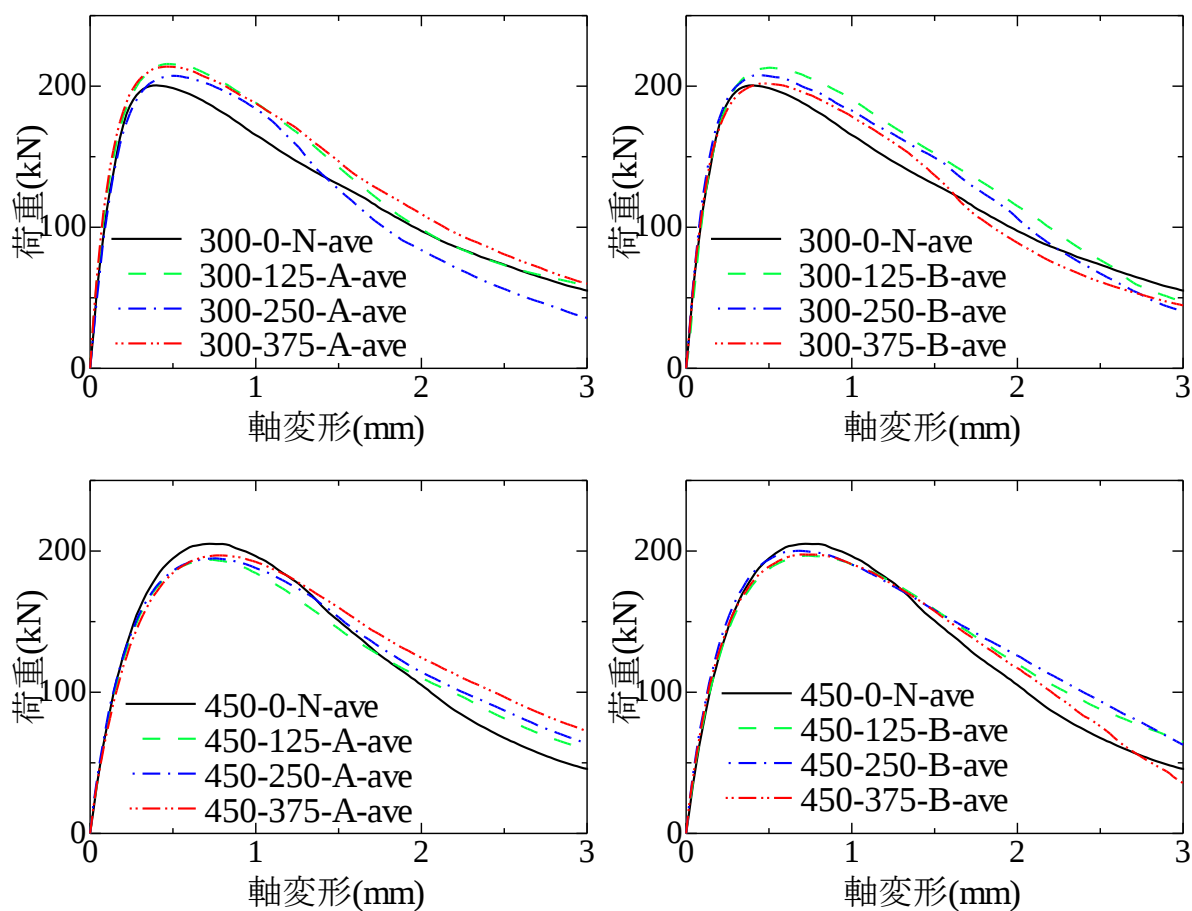


図 3.7 荷重－軸変形曲線の比較（スリットの深さ）

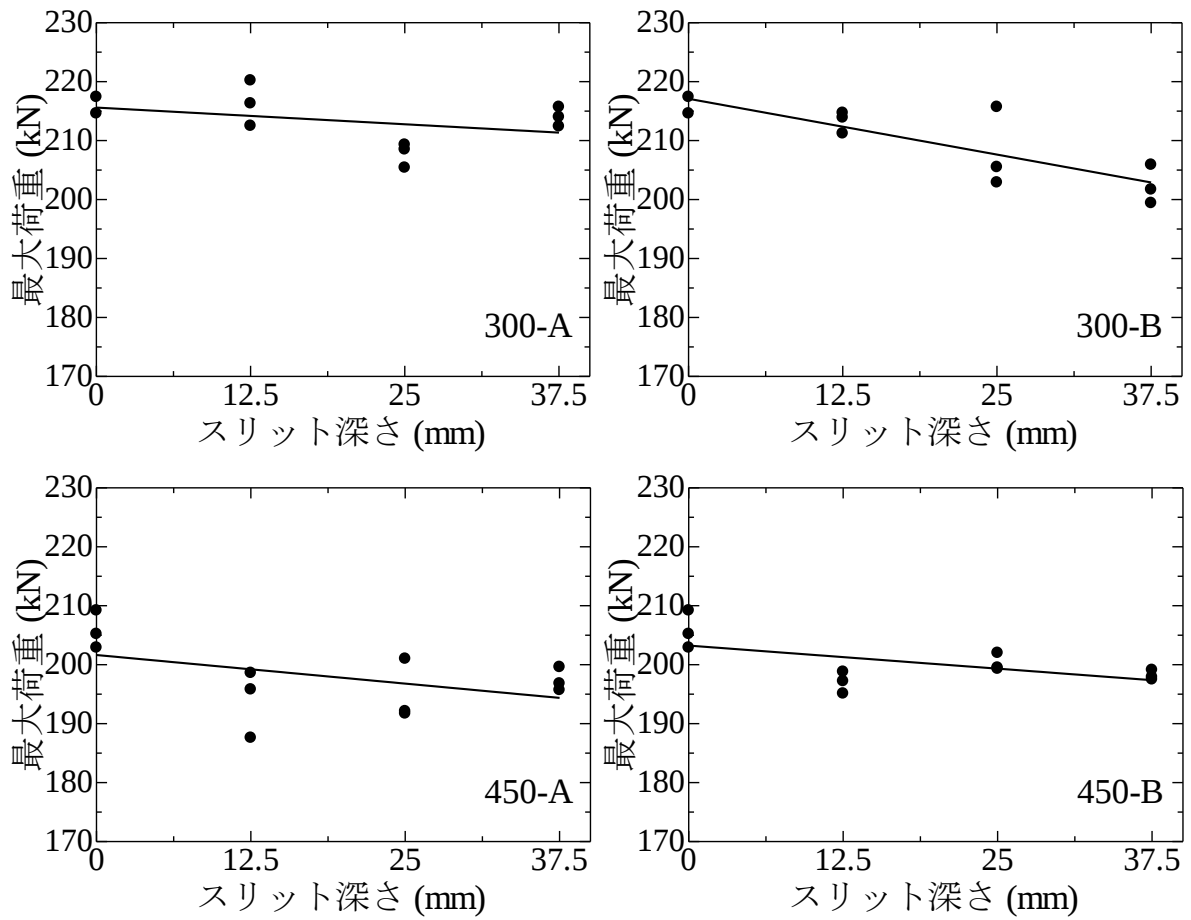


図 3.8 スリットの深さによる最大荷重の比較

3.4.3 ひび割れの長さによる影響

ひび割れの長さによる荷重－軸変形曲線の比較を図 3.9 に示す。全ての試験体でひび割れの長さの違いによる明確な曲線の差異および最大荷重に及ぼす影響は確認できなかった。

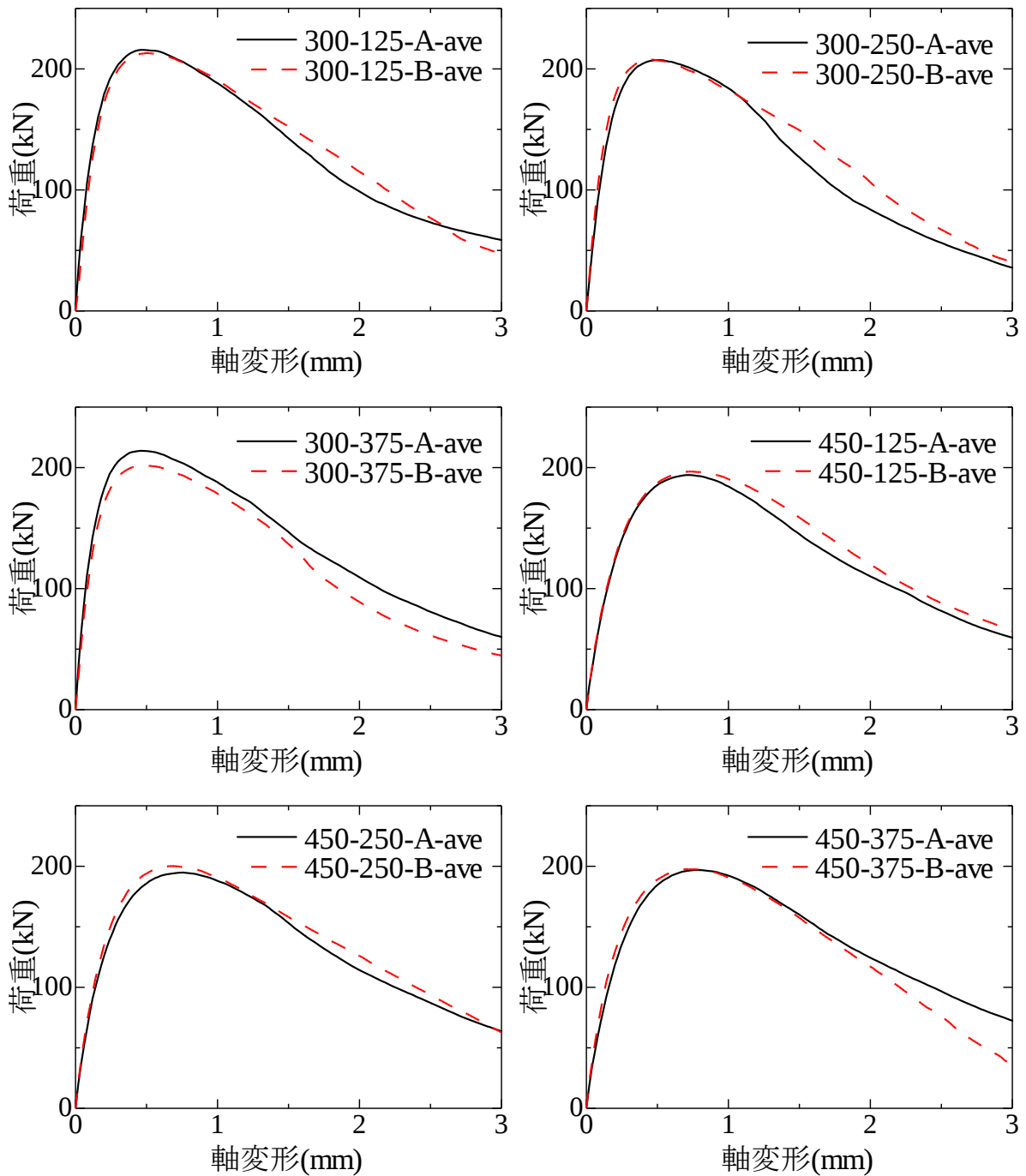


図 3.9 荷重－軸変形曲線の比較（ひび割れの長さ）

3.4.4 試験体アスペクト比による影響

300-0-N および 450-0-N 試験体の最終破壊状況を図 3.10 に示す。アスペクト比 1:2 の全ての試験体では試験体全体が破壊して最終破壊に至ったが、1:3 の試験体では一部のみが破壊して最終破壊に至った。試験体のアスペクト比による応力-歪関係の比較を図 3.11 に、応力を各試験体の強度で除して基準化した同比較を図 3.12 に示す。アスペクト比が大きくなると最大荷重が低下し、最大荷重後の応力が急激に低下する傾向が得られた。これは 1:3 の試験体では局所的な破壊が影響していると考えられる。既往の研究³⁾⁴⁾でも同様にアスペクト比が増加すると、ピーク後の応力-歪関係が脆性的になることが報告されている。



図 3.10 最終破壊状況 (左 : 300-0-N ,右 : 450-0-N)

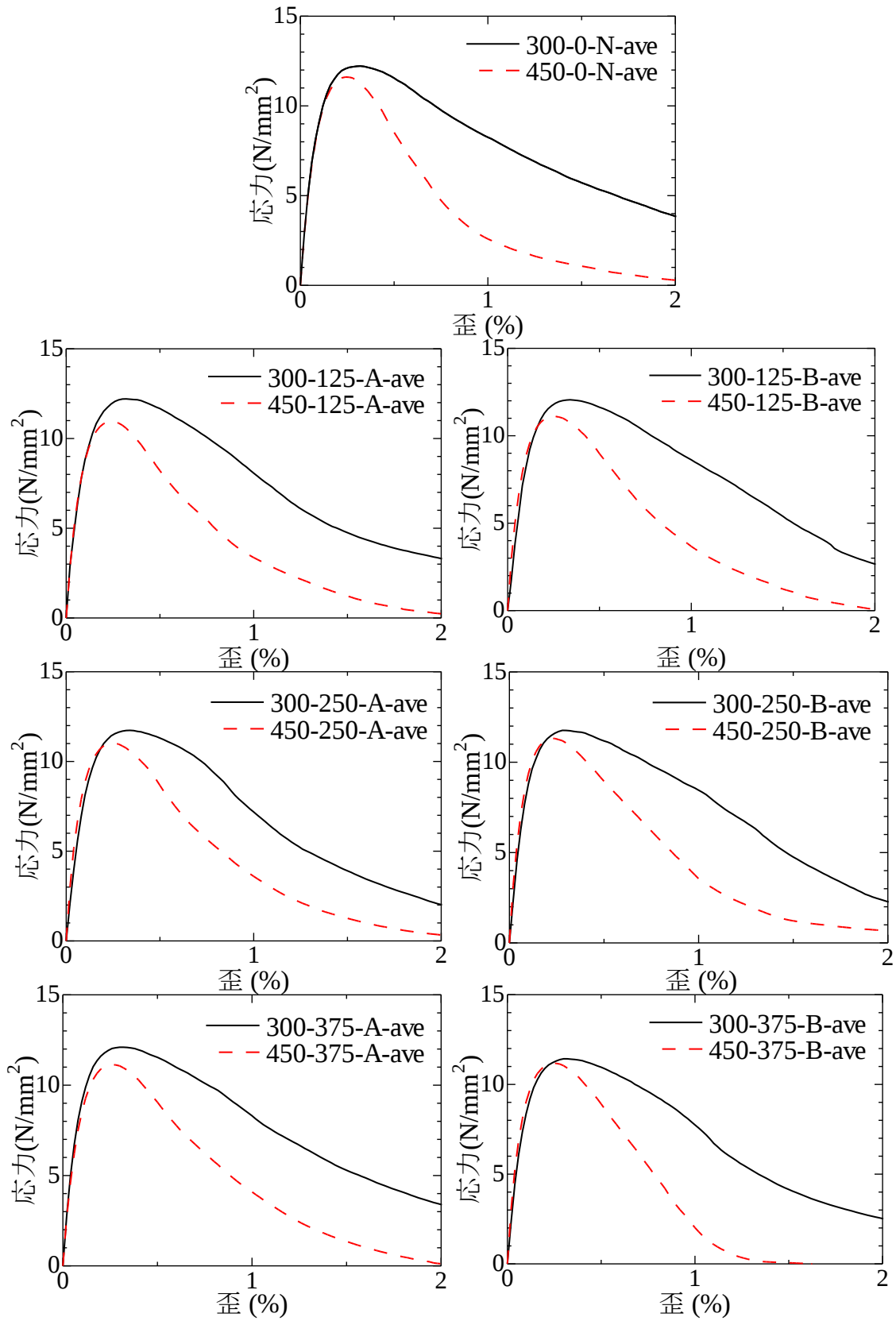


図 3.11 応力-歪関係の比較 (アスペクト比)

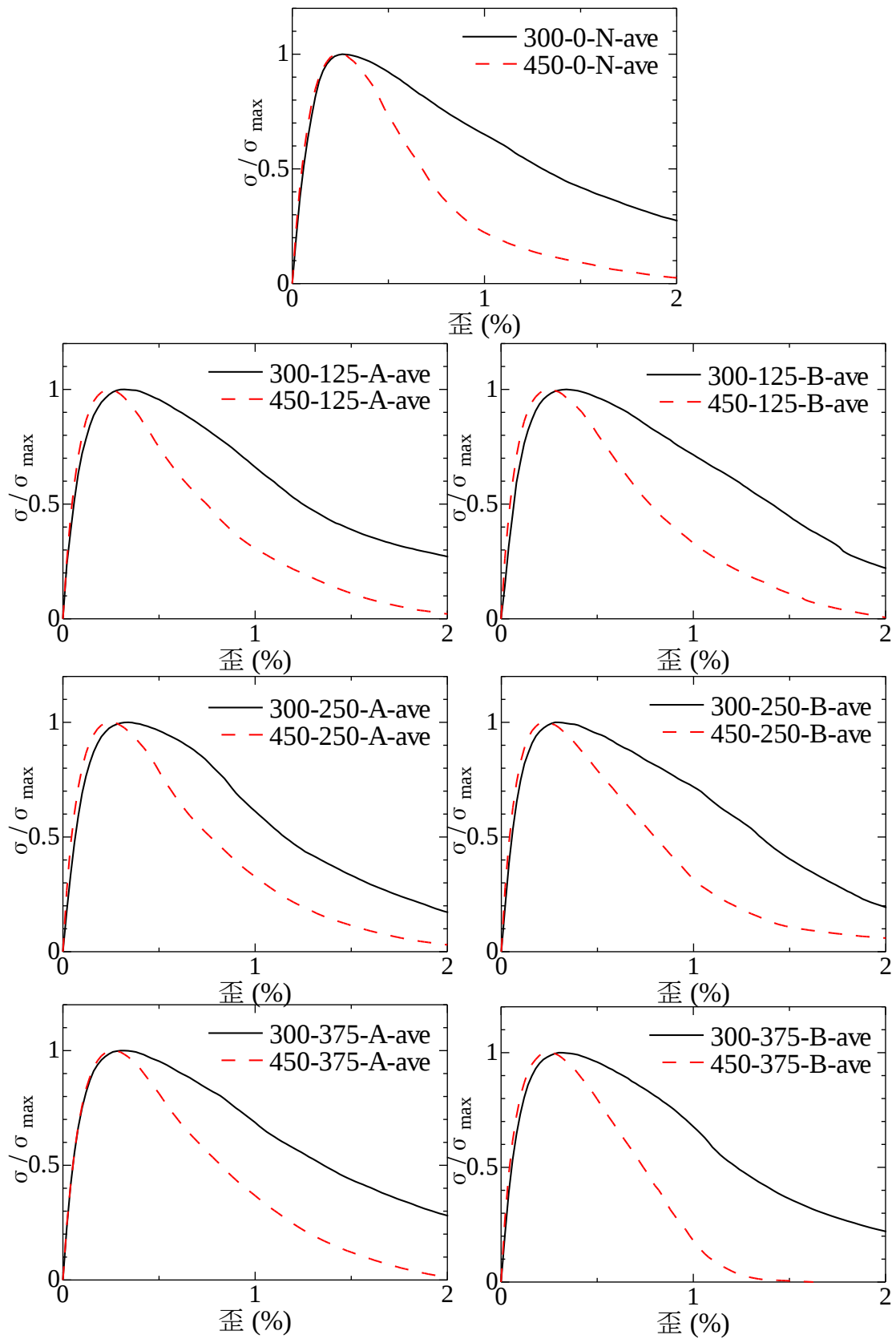


図 3.12 基準化応力-歪関係の比較 (アスペクト比)

3.5 まとめ

腐食によりひび割れが発生したコンクリートの圧縮性状を把握することを目的に、ひび割れを模擬した円柱試験体の圧縮試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ひび割れ深さの増加に伴い圧縮強度が減少したが、荷重－軸変形関係曲線の明確な差異は確認できなかった。
- (2) 局所的な破壊により、アスペクト比が大きい試験体では、見かけ上、応力－歪関係における最大強度後の応力低下が大きい。

第4章 梁試験体の圧縮領域を模擬した角柱試験体の圧縮試験

4.1 はじめに

3 章で、腐食したコンクリートの力学性状を把握するために、ひび割れを模擬した円柱試験体の圧縮試験を行った。その結果、スリットによるコンクリートの応力-歪関係に明瞭な違いが得られなかった。しかしながら、試験体のアスペクト比の増加に伴う、応力-歪関係の変化が得られた。4 章では 2 章の RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した試験体の圧縮試験を行い、コンクリートの力学性状を把握することを目的とする。

4.2 試験体概要

4.2.1 試験体

第 2 章の断面解析における最大荷重時の断面応力分布を図 4.1 に示す。最大荷重時の中立軸は、コンクリート上縁から 100mm 程度の位置にあることがわかる。これより、試験体の寸法は RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した断面 $150 \times 100\text{mm}$ の長方形断面とし、試験区間長は RC 梁試験体の等曲げ区間と同様 400mm とする。試験体の概要を図 4.2 に示す。全高は 600mm とした。6 体の試験体を作製した

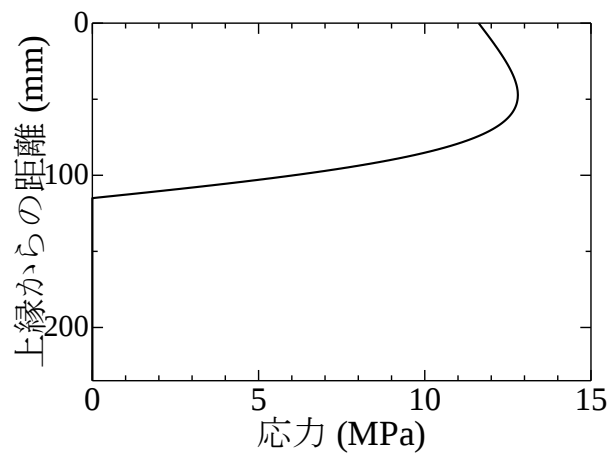


図 4.1 梁断面の応力分布（最大荷重時）

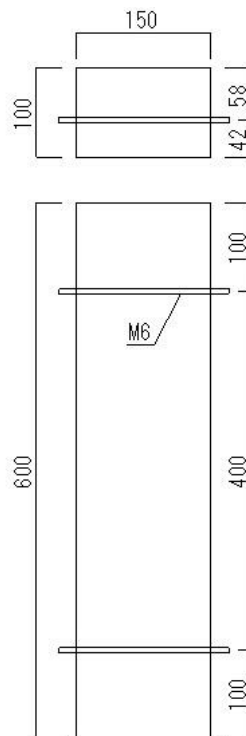


図 4.2 試験体概要

4.2.2 材料試験

使用したコンクリートのフレッシュ性状を表 4.1 に示す。コンクリートの材料試験結果を表 4.2 に示す。材料試験には角柱試験体と同時に作製した直径 100mm、高さ 200mm の円柱試験体を 6 体用いた。

表 4.1 コンクリートのフレッシュ性状

目標強度 (MPa)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
15	103	24.5	4.6

表 4.2 コンクリートの材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時の歪 (%)	割裂強度 (MPa)
C-13	12.0	0.27	—
C-14	11.7	0.24	—
C-15	11.6	0.26	—
S-10	—	—	1.24
S-11	—	—	1.40
S-12	—	—	1.26
平均	11.8	0.26	1.30

4.3 試験方法

計測装置の概要を図 4.3 に示す。試験体断面の短辺に変位計を 4 つ設置し、軸変形を計測した。加力には 2MN 万能ユニバーサル試験機を用いる。

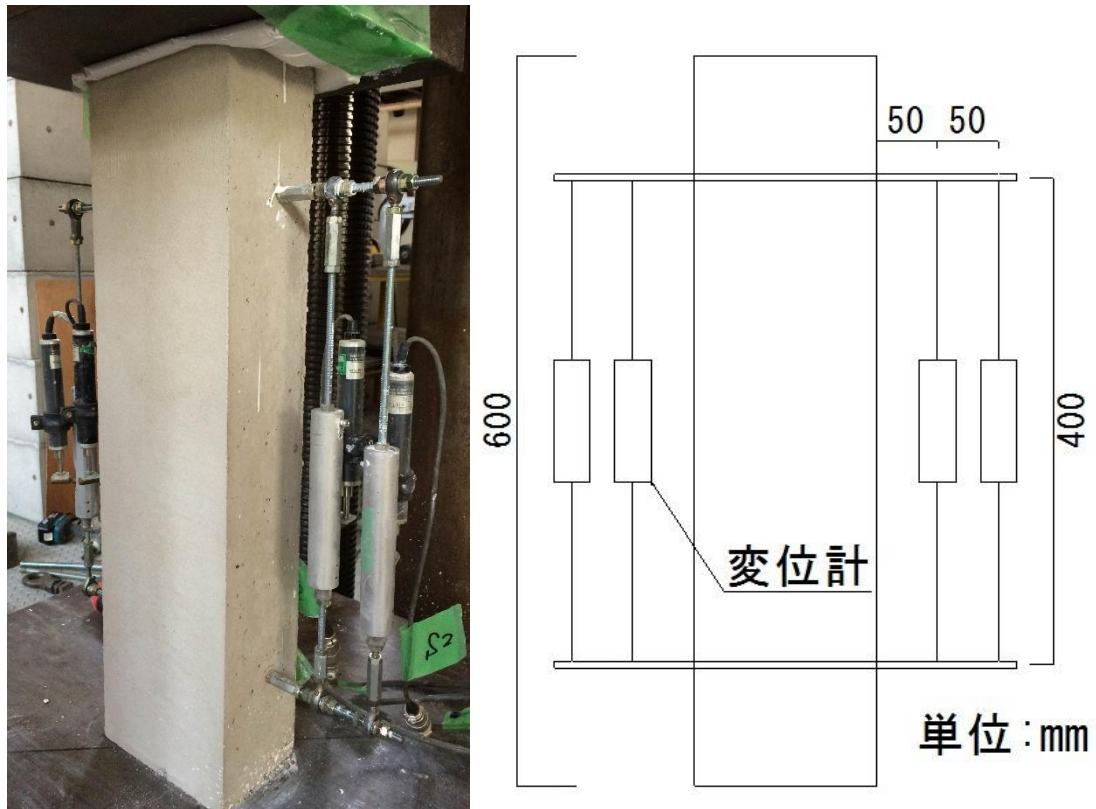


図 4.3 計測装置

4.4 実験結果

試験終了後の試験体の写真を図 4.4 に示す。全ての試験体において局所破壊が確認された。

応力－歪関係を図 4.5 に示す。局所的な破壊により、ピーク後の応力－歪関係が脆性的になっていることが確認できる。

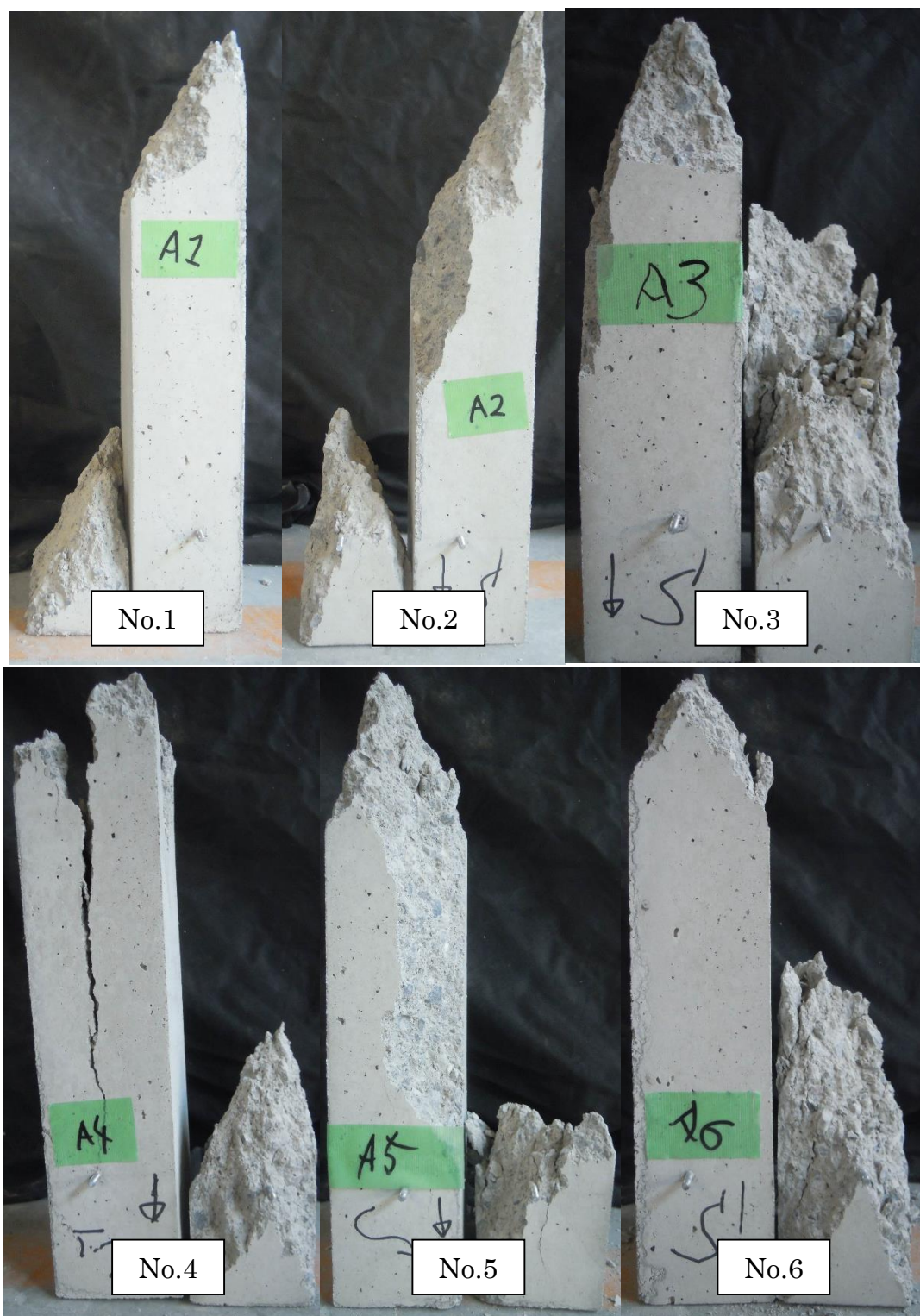


図 4.4 最終破壊状況

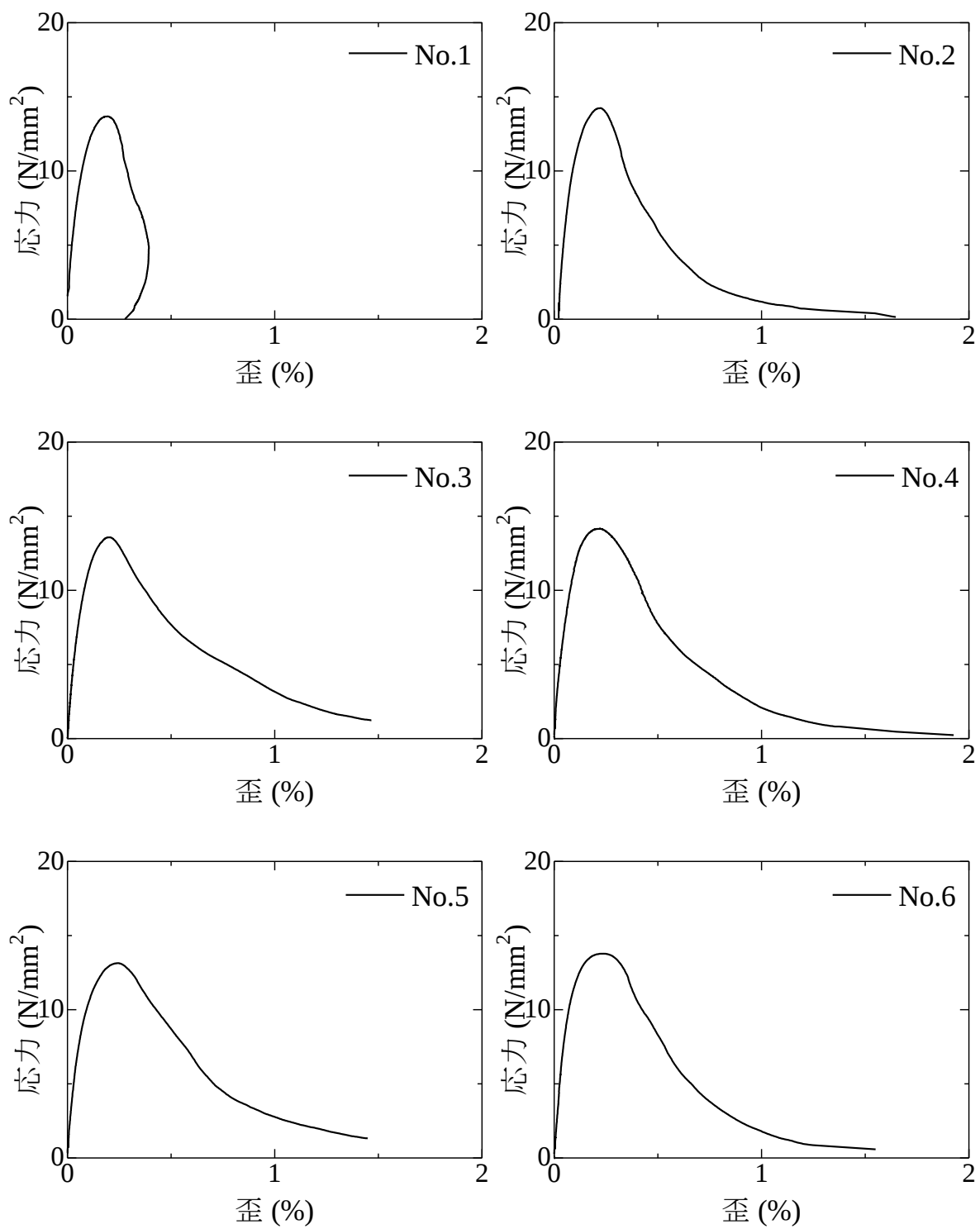


図 4.5 応力－歪関係

4.5 コンクリートモデルの構築

梁試験体の圧縮領域コンクリートのアスペクト比を考慮した応力－歪関係のモデルの構築を行う。モデルは本章の実験結果を用いて、Popovics 式の実験係数 n を決定する。実験結果を近似したモデルの応力－歪関係を図 4.6 に示す。各試験体のモデルの実験係数 n を表 4.3 に示す。モデルの n 値の平均は 3.08 となった。

ひび割れを考慮したコンクリートモデルの構築を行う。アスペクト比を考慮したコンクリートモデルに 2 章と同様ひび割れによる影響係数 α を導入する。アスペクト比およびひび割れを考慮した実験係数を n_{cr} とし、ひび割れが存在しない場合に値が 3.08 となるように式(5)を決定した。

$$\sigma_c = \sigma_{cmax} \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cmax}} \times \frac{n_{cr}}{n_{cr}-1+(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cmax}})^{n_{cr}}} \quad (4)$$

$$n_{cr} = e^{\alpha} \times (0.163 \times \sigma_{cmax}) + 1 \quad (5)$$

表 4.3 各試験体の n 値

試験体	n 値
No.1	3.95
No.2	3.50
No.3	2.45
No.4	2.80
No.5	2.80
No.6	3.00
平均	3.08

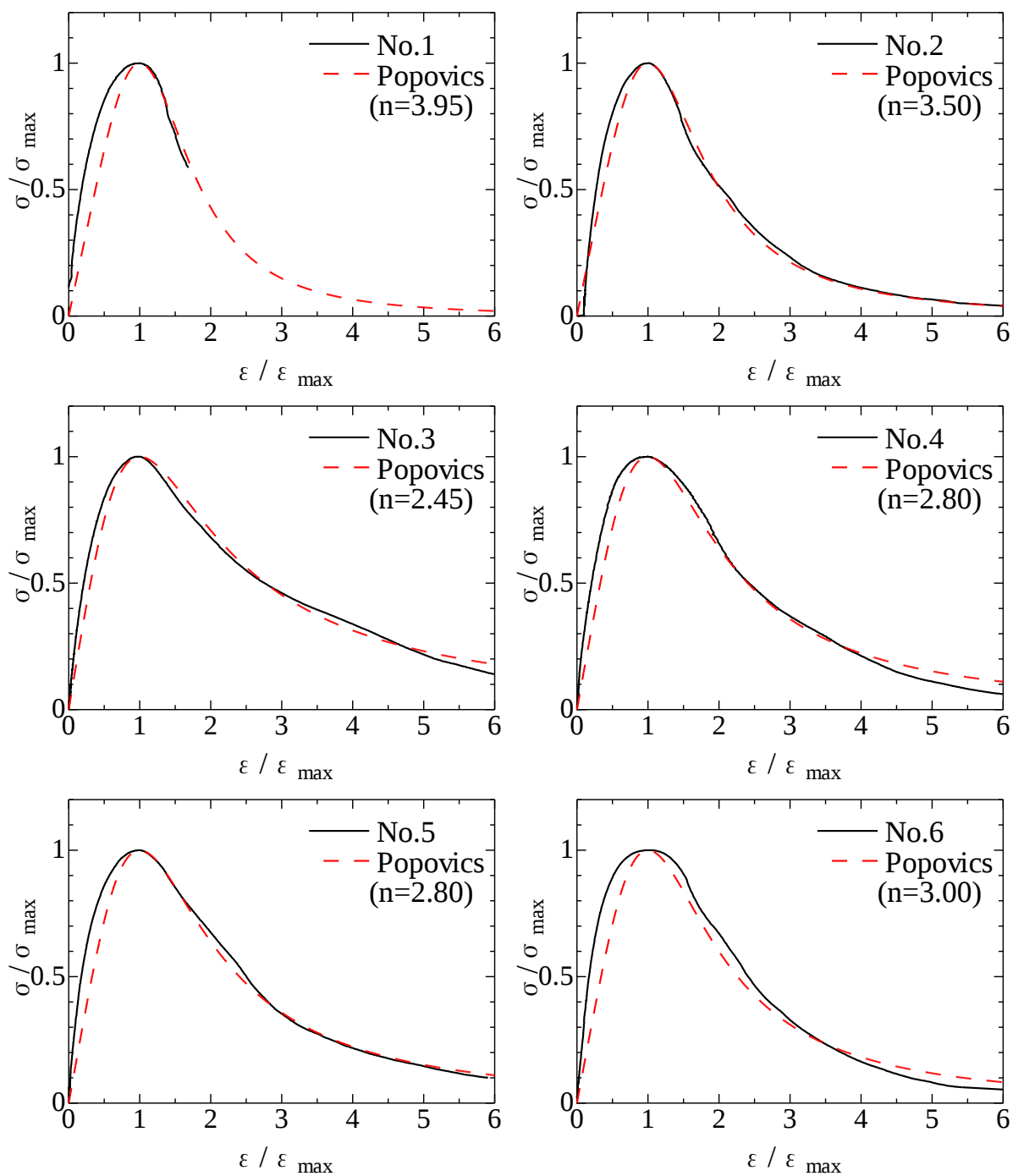


図 4.6 応力-歪関係の比較

4.6 断面解析

4.5 節で求めたコンクリートモデルを用いて 2 章の RC 梁試験体の断面解析を行う。なお、鉄筋のモデルには 2 章の座屈試験の結果を用いる。実験結果と断面解析結果の比較を図 4.7 に示す。なお、B・N および B・Si 試験体はせん断スパンで破壊したため、本章のモデルの解析結果と比較することはできない。ひび割れによる影響係数を考慮したモデルではピーク後の急激な耐力低下が確認できる。B・N(R)の実験結果ではピーク後、急激な耐力の低下が確認されているが、解析結果では同様の挙動は確認できない。

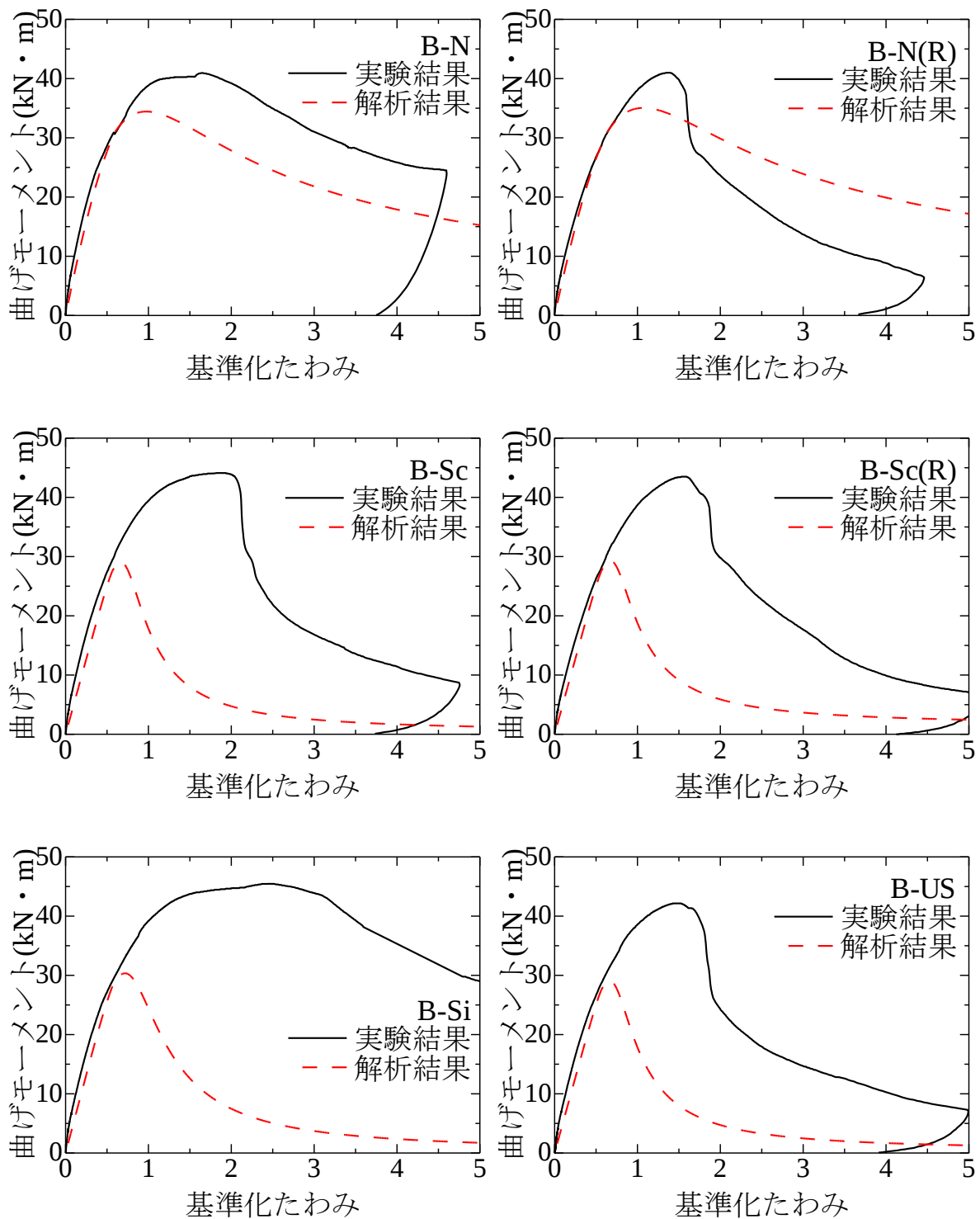


図 4.7 曲げモーメントー基準化たわみ関係の比較

4.7 まとめ

第 2 章の RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した角柱試験体の圧縮試験を行った。アスペクト比およびひび割れを考慮したコンクリートモデルの構築を行い、断面解析結果と RC 梁試験体の実験結果を比較した。その結果以下の知見を得た。

- (1) RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した試験体では、ピーク後荷重が急激に低下する挙動が得られた。
- (2) 断面解析結果では、ピーク後の急激な耐力低下が得られたが、実験結果と解析結果の挙動が一致しない試験体もあった。

第5章 結論

鉄筋腐食による圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の断面欠損が RC 梁部材の構造性能に与える影響を把握するために、第 2 章では圧縮側かぶりコンクリートのひび割れおよび圧縮鉄筋の断面欠損の模擬をした RC 梁試験体に対して載荷実験を行い、構造性能の変化を確認した。第 3 章ではひび割れによるコンクリートの圧縮性能を把握することを目的として、ひび割れを模擬したコンクリート円柱試験体の一軸圧縮試験を行った。第 4 章では、第 2 章の RC 梁試験体の圧縮側コンクリートの力学性状を把握することを目的として、RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した試験体の圧縮試験を行った。アスペクト比およびひび割れを考慮したコンクリートモデルの構築をし、断面解析を行い実験結果と比較した。

以上から得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮側かぶりコンクリートのひび割れの種類および圧縮鉄筋の断面欠損の有無によって、RC 梁部材の破壊挙動が変化する。
- (2) ひび割れ深さの増加に伴いコンクリートの圧縮強度は低下したが、荷重－軸変形関係曲線の明確な差異は確認できなかった。
- (3) 局所的な破壊により、アスペクト比が大きい試験体では、見かけ上、応力－歪関係における最大強度後の応力低下が大きい。
- (4) RC 梁試験体の圧縮領域を模擬した圧縮試験体では、ピーク後荷重が急激に低下する挙動が得られた。
- (5) 断面解析結果では、ピーク後の急激な耐力低下が得られたが、実験結果と解析結果の挙動が一致しない試験体もあった。

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院システム情報工学研究科の大学院生として、在学中の 2 年間に行った研究の成果をまとめたものです。

この論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力を頂きました。

筑波大学准教授である金久保利之先生には、研究に着手する際から論文を校了するに至るまで、終始丁寧なご指導を賜りました。心より深謝の意を表します。

副指導教官である筑波大学助教 八十島章先生、筑波大学准教授 庄司学先生にはご指導から研究に対する姿勢、考え方を学びました。時には有益な助言を頂きました。厚く感謝致します。

筑波大学技官 小島篤志氏には、実験に必要な知識や技術を頂きました。財団法人鉄道総合技術研究所 大屋戸理明氏には絶えず熱心にご指導いただきました。心より感謝致します。

同期であるカクスイ氏、佐野直哉氏、墨野倉駿氏、宮口大氏には多くの時間を共有し合う中で助けられたことは数多くあります。これから先変わらぬお付き合いをして頂きたい思います。

最後になりますが、多大な苦勞をかけた私を応援して下さいた本論文に携わった人たちに改めて深く感謝すると共に、今後の成長を見守って頂きたいと存じます。

参考文献

- 1) 鈴木健二：鉄筋腐食が鉄筋コンクリート部材の圧縮特性に及ぼす影響、筑波大学大学院博士課程 システム情報工学研究科修士論文、2014.3
- 2) 墨野倉駿、金久保利之、八十島章、大屋戸理明：腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.1、pp.973-978、2015.7
- 3) 岩波光保、渡辺健、横田弘、二羽淳一郎：コンクリートの局所的破壊現象とその評価手法、港湾空港技術研究所報告、Vol.42、No.3、pp.1-32、2003.9
- 4) Lertsrisakulat, T. Watanabe,K, Matsuo, M. and Niwa, J : Experimental study on parameters in localization of concrete subjected to compression、土木学会論文集、No.669/V-50、pp.309-321、2001
- 5) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete、JCI-C51E、Vol.2、pp.259-272、1999