

令和5年度 弘前大学大学院 地域共創科学研究科 修士論文

小型縮小模型を利活用した 橋梁上部工の冗長性の再現実験

地域リノベーション専攻 レジリエンステクノロジー

22GC107 玉手匠

目次

第1章 序論

1.1 はじめに	..... 2
1.2 目的	..... 2
1.3 研究の流れ	..... 2

第2章 実験の概要

2.1 試験体作成	..... 4
2.2 プレストレス導入	..... 12
2.3 圧縮引張試験	..... 15
2.4 電食試験	..... 16
2.5 載荷試験	..... 20

第3章 結果と考察

3.1 圧縮引張強度試験	..... 21
3.2 導入プレストレス	..... 21
3.3 電食試験	..... 21
3.4 単体はりの載荷試験	..... 21
3.5 連結桁の載荷試験	..... 22
3.6 考察	..... 22

第4章 結論

..... 50

参考・引用文献 52
---------	----------

謝辞 53
----	----------

第 1 章 序論

1.1 背景

日本では高度経済成長期以降、多くの構造物において鉄筋コンクリート(RC)が用いられてきた。近年ではそれらの一種としてプレストレストコンクリート(PC)が注目されており、構造物の建材として普及しはじめている。プレストレストコンクリートとは緊張材に緊張力を加えて作成するコンクリートのことである。PC 部材には、一般の RC 部材に比べ荷重に対してひび割れ防止性能や水密性に優れているという特徴が挙げられる。そのため、RC 部材よりも部材の厚みや支柱の本数の削減が可能となる。こうした耐久性や経済性の高さから、PC は道路橋の橋梁などに利用されている。

しかし、PC 橋梁においても RC 橋梁と同様、年月の経過によって塩害などの劣化が進行する。そのため、適切な維持管理が為されなければ落橋などの重大な事故につながる恐れがある。こうした事故を未然に防ぐためにも PC 構造物の劣化時における残存性能の余裕度を調査する必要がある。しかし、大規模構造物を対象に実験、解析を行うとなるとコストや労力、実験設備などの面から多大な制約を受けることになり現実的ではない。これらの制約を解消するためには、橋梁など実際の大規模構造物を模した縮小模型を用いて載荷試験などを行うことによる冗長性の確認が有用であり、縮小模型の再現手法や精度の確立が必要となる。

1.2 目的

本研究では、プレストレストコンクリートの単体はり及び連結桁を対象に、縮小模型を用いた場合における試験体の曲げ耐荷性状について検討する。また、導入プレストレス量や鉄筋の腐食の有無による構造物への影響も併せて検討を行う。

1.3 研究の流れ

本研究は、試験体の作成後に各試験体にプレストレスを導入する。その後、単体はり、連結桁の順で電食試験、載荷試験を行い、その結果を考察する。研究のフローチャートを以下の図 1 に示す。

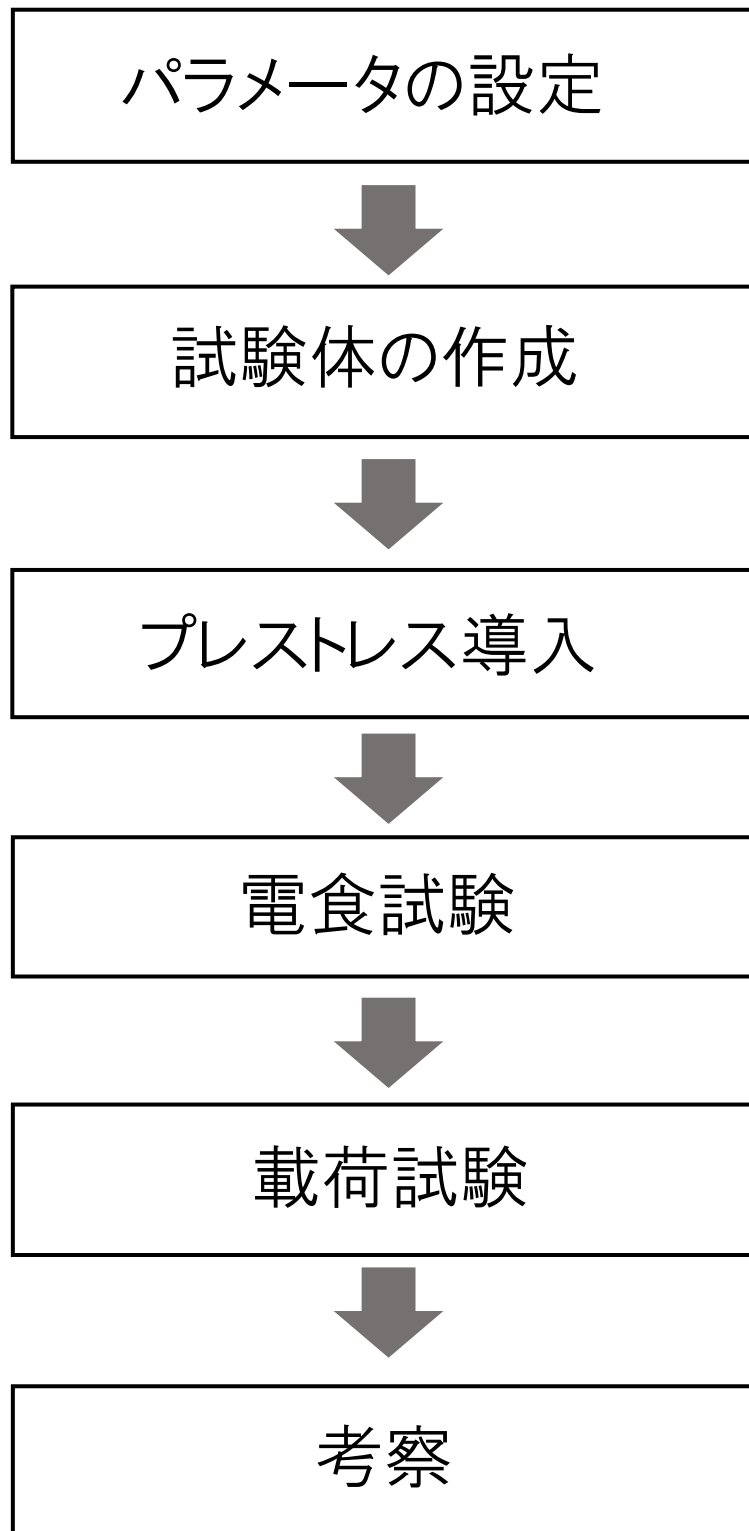


図1：研究のフローチャート

第2章 実験概要

2.1 試験体の作成

2.1.1 試験体の概要

本研究を行うに当たり、強度試験用に円柱状の供試体を10本、電食試験及び載荷試験用に梁を模した直方体の試験体を24本作成した。そのうち、直方体の試験体12本については3本ずつ床版を模した $198 \times 490 \times 10$ [mm]の試験体と接着することで連結桁を作成した。以下の図2から図5に各試験体の寸法、形状を示す。また、作成した試験体の概要を表1に示す

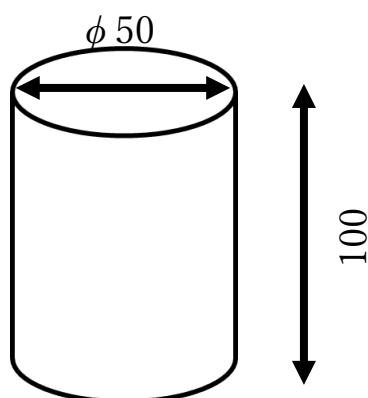


図2：円柱供試体の寸法（単位：mm）

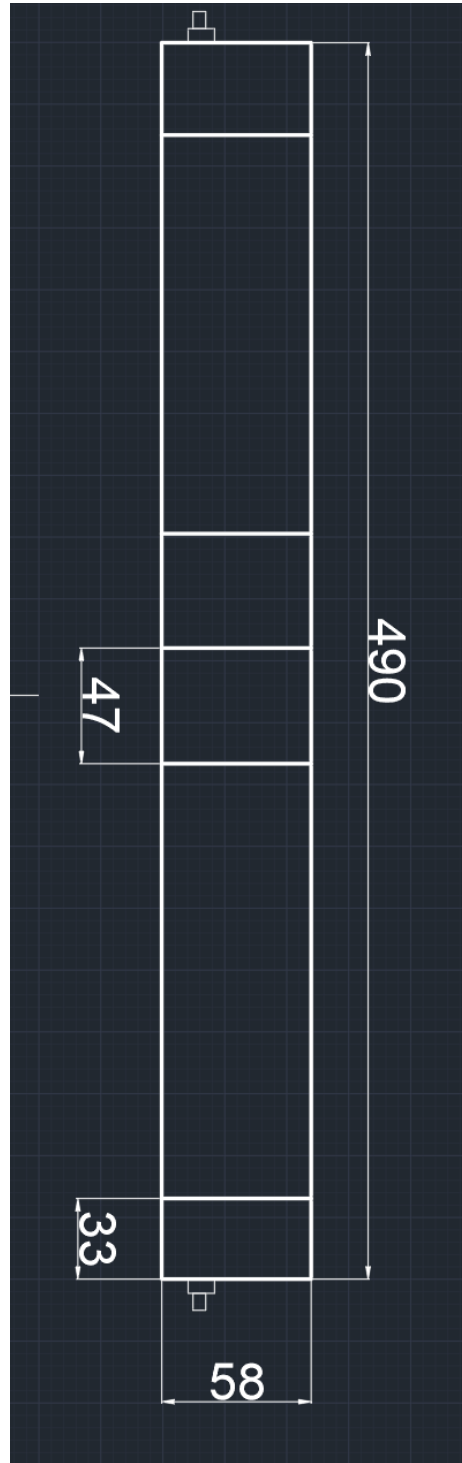
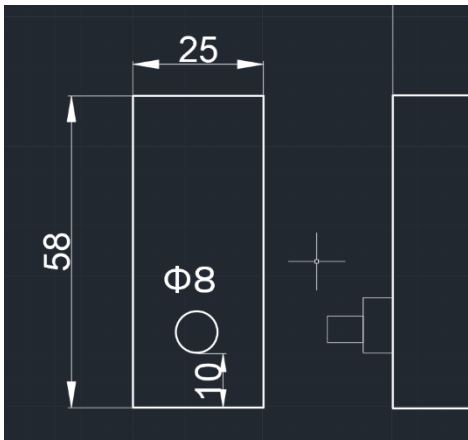


図3：単体はり(直方体)の寸法（単位：mm）

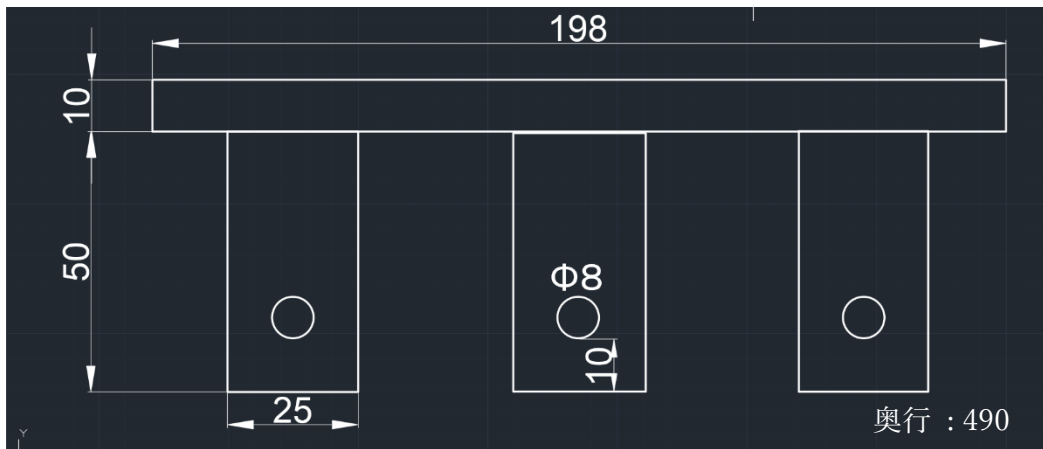


図 4：連結桁(T字)の寸法 (単位：mm)

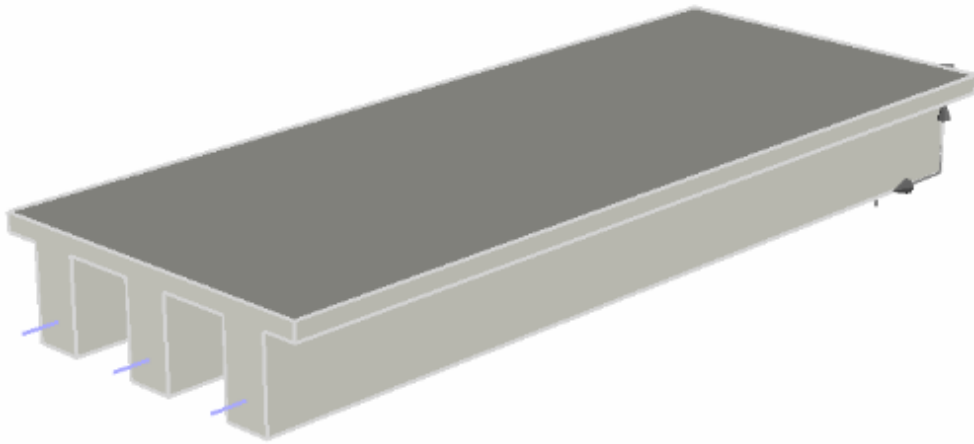


図 5：連結桁の形状

表 1：試験体の概要

No.	構造	シー ス 使用材料	質量減少方法	目標質量 減少率 [%]	桁連結
①	PC	ストロー	鉄筋切削	5	×
②	PC	ストロー	鉄筋切削	10	×
③	PC	ストロー	鉄筋切削	15	×
④	PC	ストロー	健全		×
⑤	PC	ストロー	鉄筋切削	5	×
⑥	PC	ストロー	鉄筋切削	10	×
⑦	PC	ストロー	鉄筋切削	15	×
1	RC	引張ばね	電食試験	10	×
2	PC	引張ばね	電食試験	10	×
3	PC	引張ばね	電食試験	5	×
4	PC	引張ばね	電食試験	10	×
5	PC	引張ばね	電食試験	15	×
I	PC	引張ばね	健全		○
II	PC	引張ばね	健全		○
III	PC	引張ばね	健全		○
IV	PC	引張ばね	電食試験	10	○
V	PC	引張ばね	電食試験	10	○
VI	PC	引張ばね	電食試験	10	○
VII	PC	引張ばね	電食試験	10	○
VIII	PC	引張ばね	健全		○
IX	PC	引張ばね	電食試験	10	○
X	PC	引張ばね	健全		○
XI	PC	引張ばね	電食試験	10	○
XII	PC	引張ばね	電食試験	10	○

2.1.2 高靱性繊維補強セメント複合材料の概要

本研究では、境ら(2004)の研究を参考にして試験体に高靱性繊維補強セメントを使用している。これは、モルタルとビニロン短繊維によって構成される。本セメントの使用によって、コンクリートのひび割れ発生後のひずみ硬化や微少なひび割れの分散といった特性を得られる。そのため、引張強度や曲げ強度、ひび割れの開口に対する引張抵抗力、靱性等の力学的特性の改善が期待できる。また、ビニロン短繊維によって最大圧縮強度以降の応力低下が緩やかになるため、補強鉄筋を用いたコンクリートと類似した特性が得られる。本研究では、体積当たりの繊維混入率を 2.0%として試験体を作成した。

2.1.3 試験体の作成

本研究で作成した試験体は単体はり、連結桁ともにスケールが小さく、通常の橋梁のように多くに鉄筋やスターラップを入れることが難しい。そのため、ビニロン短繊維をスターラップの代わりとして用いている。使用したビニロン短繊維の写真を写真 1 に、詳細を表 2 に示す。また、スケールの小ささから砂利を配合することが困難であり、粗骨材による繊維分散の障害が予想される。そのため、コンクリートではなくモルタルを用いる事でこれらを防止する。試験体の配合について、単位量を表 3 に、はり及び板の一体あたりの材料使用量を表 4 に示す。はり及び連結桁の試験体には直径 6.0 mm の両端をねじ切り加工した丸鋼鉄筋を使用した。試験体のシーす材料はストローもしくは引張ばねを使用した。

縮小模型について、型枠にはスチレンボードを用いた。また、連結桁の板部分については自重による型枠の変形を鑑みて、鉄板を型枠に用いた。打設前の型枠の様子を写真 2 から写真 3 に示す。これらの型枠に高靱性繊維補強セメント複合材料を打設する。水、セメントを練り混ぜた後、砂、ビニロン短繊維の順で練り混ぜ型枠に流し込む。練り混ぜ手順を図 6 に、打設後の様子を写真 4 から写真 5 に示す。試験体は打設後 2 日で脱型し、1 週間以上室内で気中養生する。



写真 1: ビニロン短繊維

表 2: ビニロン短繊維の詳細

直径[μ]	標準長[mm]	引張強度[Mpa]	切断深度[%]	ヤング率[GPa]
40	12	1560	6.5	41

表 3: 試験体の配合

単位量[kg/m ³]			
水	セメント	砂	短繊維
455.7	1012	404.7	19.6
w/c=0.450			

表 4: 1体あたりの使用量

	使用量[g]			
	水	セメント	砂	短繊維
円柱供試体	89.7	199.3	79.7	3.9
単身はり	433.7	972.1	388.7	18.7
連結桁(はり)	290.3	644.6	257.8	12.5
連結桁(板)	442.1	981.8	392.6	19.0

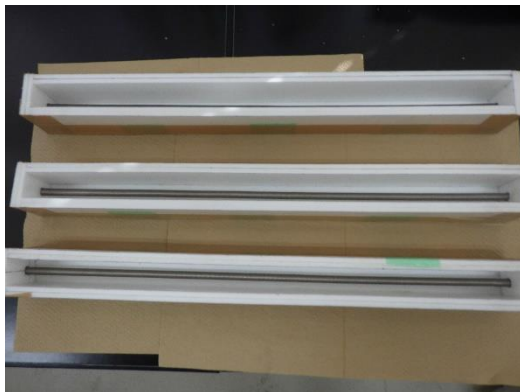


写真 2: はりの型枠



写真 3: 板の型枠

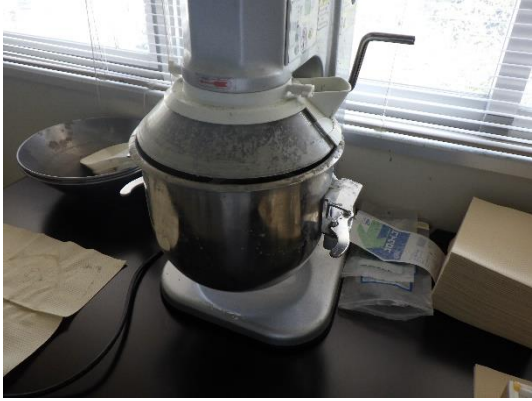


写真 4： 打設の様子

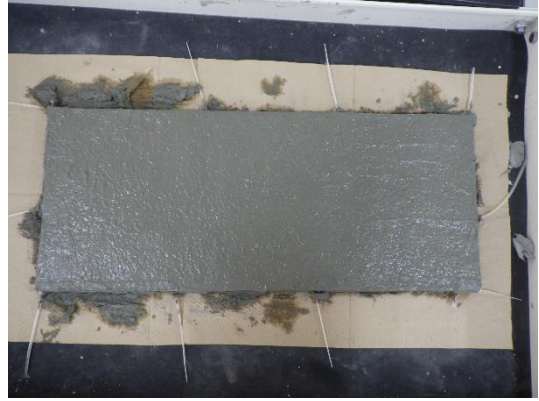
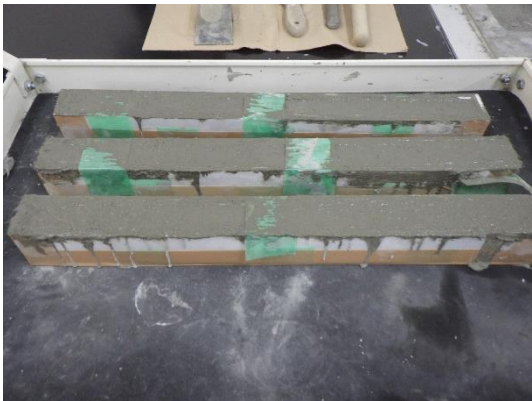


写真 5： 打設後の型枠

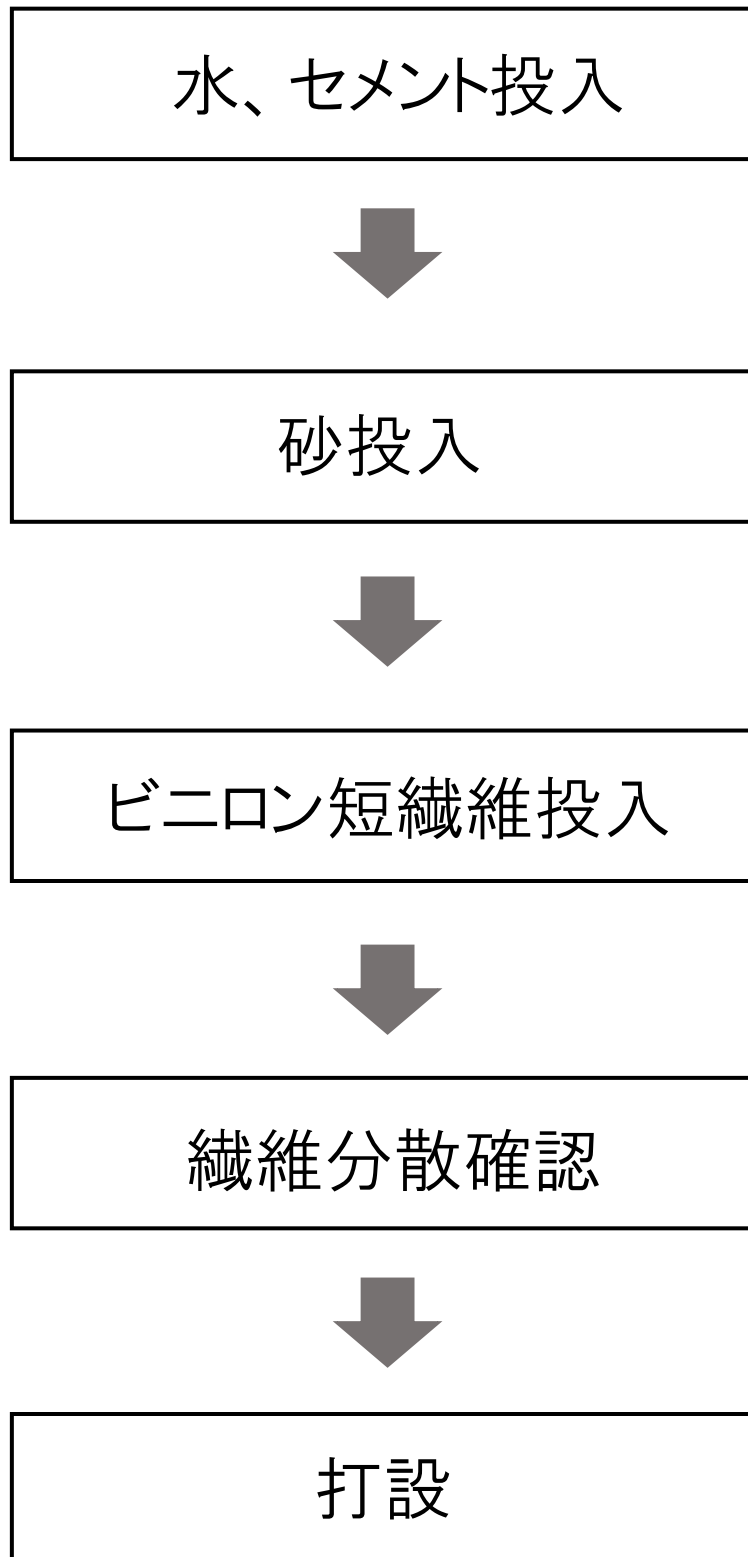


図 6：練り混ぜ手順

2.2 プレストレスの導入

2.2.1 プレストレス導入の概要

本研究においては、玉手(2022)と同様ポストテンション方式でプレストレスを導入した。また、緊張力の定着にはネジ方式を採用した。

プレストレス導入の様子を写真6に示す。打設した試験体に鉄筋を通した後、両端からナットで締め上げることで緊張させた。導入の際、試験体下縁部にひずみゲージを取り付け、下縁部のひずみを測定することで導入したプレストレスの量を算出した。

なお、本試験ではプレストレス導入後の乾燥収縮やクリープなどによるプレストレス減少の影響を防ぐため、電食試験や載荷試験の直前にプレストレスを導入した。

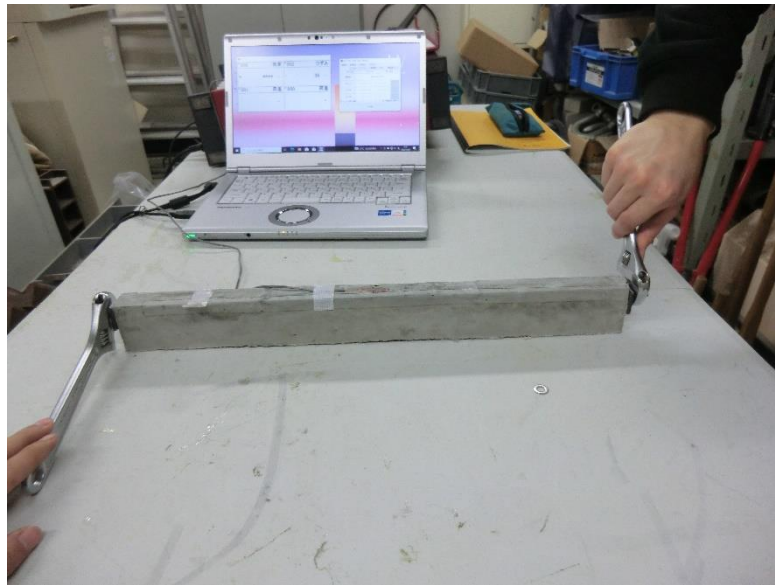


写真6: プレストレス導入の様子

2.2.2 プレストレス量の算出

本試験における導入プレストレス量は、測定した下縁ひずみを基に鋼材応力度、試験体の上下縁応力度、軸圧縮応力度をそれぞれ算出した。各応力度の算出には以下の計算式を用いた。

本試験における、コンクリートのヤング率 E_c 、PC 鋼材のヤング率 E_s をそれぞれ

$$E_c: 2.5 \times 10^4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E_s: 2.0 \times 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

とする。

試験体下縁の縁応力度 σ_{pc} [N/mm²] について、

$$\sigma_{pc} = \frac{P_t}{A_c} + \frac{M_{pt}}{Z_t} \quad (1)$$

また、フックの法則より

$$\sigma_{pc} = \varepsilon E_c \quad (2)$$

が成立する。

ここで、

P_t : 導入プレストレス力 [N]

M_{pt} : プレストレス力による曲げモーメント [N・mm]

Z_t : 試験体の断面係数 [mm³]

A_c : 試験体の断面積 [mm²]

ε : ひずみ

また、プレストレス力によって生じる曲げモーメント M_{pt} [N・mm] について、

$$M_{pt} = e_p P_t \quad (3)$$

e_p : 鋼材の偏心距離 [mm]

(1)、(2)、(3)を組み合わせ、 P_t について変形する。

$$P_t = \frac{\varepsilon E_c A_c Z_t}{Z_t + A_c e_p} \quad (4)$$

(4)で得られたプレストレス力 P_t をもとに、上縁応力度、軸圧縮応力度、鋼材応力度をそれぞれ計算する。

試験体上縁の縁応力度 σ'_{pc} [N/mm²] について、

$$\sigma'_{pc} = \frac{P_t}{A_c} + \frac{M_{Pt}}{Z_c} \quad (5)$$

Z_c : 試験体の断面係数 [mm³]

軸圧縮応力度 σ_{pcg} [N/mm²] について、

$$\sigma_{pcg} = \frac{P_t}{A_c} \quad (6)$$

鉄筋の鋼材応力度 σ_s [N/mm²] について、

$$\sigma_{pcg} = \frac{P_t}{A_s} \quad (7)$$

A_s : 鉄筋の断面積 [mm²]

また、試験体の断面係数 Z_t 、 Z_c については以下の式を用いて計算した。

$$I_{nx} = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

$$Z_t = \frac{I_{nx}}{y_t} \quad (9)$$

$$Z_c = \frac{I_{nx}}{y_c} \quad (10)$$

ここで、

I_{nx} : 断面 2 次モーメント [mm⁴]

y_t : 図心軸から下縁までの距離 [mm]

y_c : 図心軸から上縁までの距離 [mm]

b : はり部材断面の幅 [mm]

h : はり部材断面の高さ [mm]

2.3 圧縮引張試験

圧縮引張強度試験は JIS A 1108 および JIS A 1113 に則り各 5 本ずつ試験を行い、その平均を算出した。試験の様子を写真 7 に示す。また、試験に使用した円柱供試体は JIS A 1132 の基準の下作成した。

圧縮強度ならびに引張強度の導出式は以下の通りである。

(a) 圧縮強度

$$f_c = \frac{P}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (11)$$

f_c : 圧縮強度 [N/mm²]

P: 最大荷重 [N]

(b) 引張強度

$$f_t = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times l} \quad (12)$$

f_t : 引張強度 [N/mm²]

d: 供試体の直径 [mm]

l: 供試体の長さ [mm]



写真 7: 強度試験の様子

2.4 電食試験

2.4.1 電食試験の概要

プレストレスの導入後、一部の試験体に電食試験を行った。この試験によって鉄筋を腐食させ、実際のコンクリート構造物における塩害劣化による構造性能の低下を模擬する。電食試験の概要を図7に、試験の様子を写真8にそれぞれ示す。図7のように容器内に銅板とスポンジを設置し、3%塩化ナトリウム水溶液(食塩水)を加えた。その後、スポンジ上に試験体を配置しスポンジ及び試験体への吸水を確認してから定電源装置に接続した。定電源装置の陽極に鉄筋を、陰極に銅板をそれぞれワニ口クリップで接続し通電した。通電時の電流は、試験体によって吸水量や内部抵抗のバラつきなどの影響で通電できた最大電流が異なったため、0.2~0.4 [A] の間で設定し通電時間で調整を行った。電食区間は試験体の中央区間 200[mm]である。

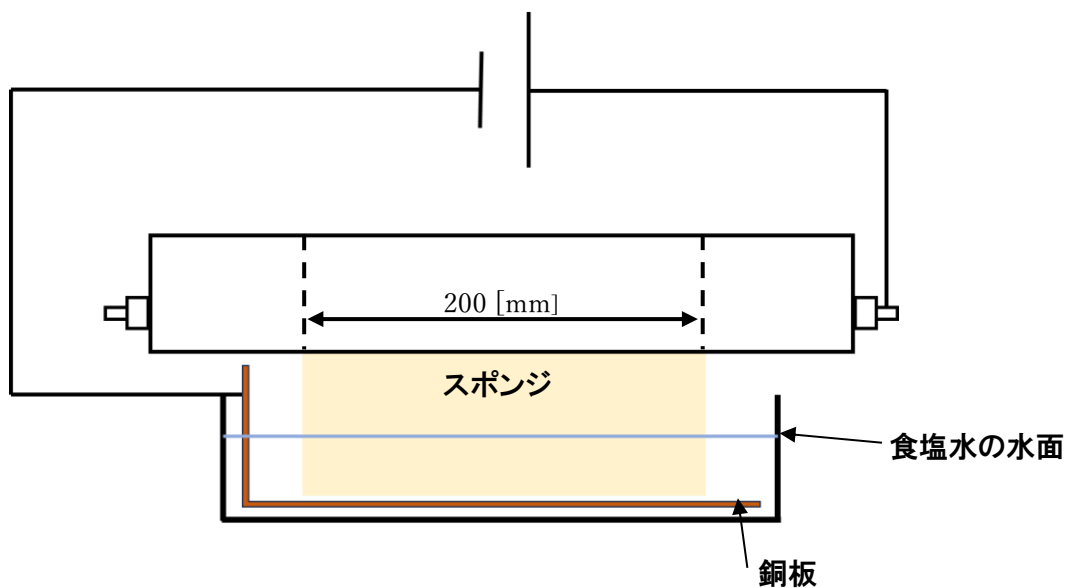


図7：電食試験の概要



写真 8：電食試験の様子

2.4.2 通電時間の算出

通電時間の算出は、目標質量減少率を試験体に応じ 5~15%、比例定数を西村(2022)より 0.886 として以下の式を用いて行った。

$$W = 0.886 \times Ih \quad (13)$$

W : 腐食量 [g]

Ih : 積算電流量 [A・hour]

$$W_c = \frac{W}{A_s} \quad (14)$$

W_c : 単位面積あたりの腐食量 [g/cm²]

A_s : 鉄筋の表面積 [cm²]

$$C = 4 \times \frac{W_c}{(\rho \times D)} \times 100 \quad (15)$$

C : 質量減少率 [%]

ρ : 鉄筋の単位重量 [g/cm³]

D : 鉄筋の直径 [cm]

(13)式は鉄筋の腐食量と積算電流量の関係式となっており、これを鉄筋表面における単位面積あたりの腐食量に変換したものが(14)式である。また、質量減少率の導出式は(15)式で定義されているとおりである。

ここで、(15)式に(13)式、(14)式を代入すると、

$$C = 4 \times \frac{0.886 \times Ih / A_s}{(\rho \times D)} \times 100 \quad (16)$$

(16)式を Ih について解くと、

$$Ih = \frac{C \times (\rho \times D) \times A_s}{4 \times 100 \times 0.886} \quad (17)$$

が得られる。

(17)式によって得られた Ih を、実験時の電流 [A] で除した値が通電時間となる。

2.4.3 鉄筋切削による電食試験の代替

電食試験を行おうとした試験体のうち、No.①～⑦については通電が確認できず電食試験を行うことができなかった。そのため、これらの試験体には目標質量減少率に応じて鉄筋を切削することで電食試験の代替を検討した。切削した鉄筋を写真9に示す。切削箇所は電食試験と同様鉄筋の中央区間 200 [mm]である。



写真9：切削した鉄筋

2.5 載荷試験

プレストレスの導入および電食試験の終了した試験体に対し載荷試験を行った。単体はり、連結桁それぞれの載荷試験の様子を写真 10 に示す。支点は両端部から 33mm、載荷点は中央から両側 47mm の 2 点載荷方式である。この試験では、全ての試験体で変位・荷重を計測したほか一部試験体で試験体下縁部のひずみを計測した。



写真 10：載荷試験の様子

第3章 結果と考察

3.1 圧縮引張強度試験

各強度試験によって得た、試験体 No.1～No.5 の最大荷重を表 5 に示す。

3.2 導入プレストレス

各試験体に導入したプレストレスによるひずみ量、上下縁応力度、軸圧縮応力度、鋼材応力度をそれぞれ表 6～8 に示す。

3.3 電食試験

3.3.1 単体はり

試験体 No.1～No.5 における目標質量減少率、通電時間、電食試験前後の鉄筋質量および質量減少率を表 9 に示す。また、試験後の腐食ひび割れの様子を写真 11～15 に示す。

3.3.2 連結桁

試験体 No. I～XII における目標質量減少率、通電時間、電食試験前後の鉄筋質量および質量減少率を表 10 に示す。また、試験後の腐食ひび割れの様子を写真 16～22 に示す。

3.4 単体はりによる載荷試験

3.4.1 鉄筋切削を行った試験体

各試験体のひび割れ状況を写真 23～29 に示す。また、最大荷重を表 11 に、荷重変位関係を図 8 に、応力ひずみ関係を図 9 に示す。

3.4.2 電食試験を行った試験体

各試験体のひび割れ状況を写真 30～34 に、試験後に取り出した腐食鉄筋の様子を写真 35 に示す。また、最大荷重を表 12 に、荷重変位関係を図 10 に、応力ひずみ関係を図 11 に示す。

3.5 連結桁による載荷試験

各連結桁のひび割れ状況を写真 36~39 に示し、試験後に取り出した腐食鉄筋の様子を写真 40 に示す。また、最大荷重を表 13 に、桁両端のはりにおける荷重変位関係を図 12 に、応力ひずみ図を図 13 に示す。

3.6 考察

3.6.1 圧縮引張強度試験

表 5 より、本研究で使用した各試験体における破壊時荷重の 5 本平均をそれぞれ算出し、圧縮強度および引張強度を算出した。その結果、圧縮強度 f_c は $38.7[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、引張強度 f_t は $5.65 [\text{N}/\text{mm}^2]$ となった。

表 5：圧縮引張強度試験の試験結果

	圧縮強度試験	
	最大荷重[kN]	圧縮強度[N/mm ²]
No.1	74.24	37.8
No.2	78.23	39.8
No.3	77.57	39.5
No.4	77.23	39.3
No.5	72.47	36.9
平均	75.95	38.7

	引張強度試験	
	最大荷重[kN]	引張強度[N/mm ²]
No.1	43.28	5.51
No.2	44.64	5.68
No.3	45.94	5.85
No.4	45.27	5.76
No.5	42.94	5.47
平均	44.41	5.65

3.6.2 単体はりによる試験

(A) 鉄筋切削を行った試験体

試験体 No.①～⑦については玉手(2022)の試験体と同様にシースにストローを使用し電食試験を行った。しかし、通電が確認できず、これらの試験体では電食試験を行うことができなかった。通電ができなかった要因としてストローの素材であるスチロールが電流を絶縁し、鉄筋とモルタルとの間での通電が行えなかったためと考えられる。そのため、これ以降の試験体ではシース材料にステンレス製の引張バネを使用した。その上で、通電できなかったこれらの試験体については、鉄筋を切削することで電食試験による質量減少と同等の効果が得られるかを検討した。なお、これら鉄筋切削による検討は共同で行ったため試験結果については横倉(2023)と同様のものである。

(1)導入プレストレス量及び鉄筋切削の影響

はじめに導入プレストレス量ならびに鉄筋切削の影響について考察する。これらの試験体はプレストレス導入量を一定として、鉄筋の切削割合を変更して作成した。しかし、表 6 より同程度の下縁ひずみとなるようプレストレスを導入したにもかかわらず鋼材に作用する応力は、切削割合が大きいほど高い値となった。このことから No.①～③については想定したプレストレス導入量よりも多く導入されていたと考えられる。プレストレス量増加の要因として、鋼材を切削したことで断面積が減少し 2.2.2 節における導出式 (7)における鋼材断面積 A_s の値が、切削割合が大きくなるごとに減少するためだと考えられる。したがって、以降の試験体では質量減少後に均一となるよう導入する際の下縁ひずみの値に補正を掛けて試験を行った。No.⑤～⑦では補正を掛けたことにより鋼材にかかる応力がで同程度になったことが分かる。

表 6 :No.①～⑦の導入プレストレス

No.	ひずみ [$\mu \varepsilon$]	鋼材応力度 [N/mm ²]	上縁応力度 [N/mm ²]	下縁応力度 [N/mm ²]	軸圧縮応力度 [N/mm ²]
①	-305	-159.4	1.65	-7.63	-2.99
②	-306	-159.9	1.65	-7.65	-3.00
③	-306	-159.9	1.65	-7.65	-3.00
④	-306	-159.9	1.65	-7.65	-3.00
⑤	-292	-152.6	1.58	-7.30	-2.86
⑥	-274	-143.2	1.48	-6.85	-2.68
⑦	-260	-135.9	1.41	-6.50	-2.55

(2) ひび割れ状況

写真 23~29 より、いずれの試験体においてもせん断ひび割れのような大きなひび割れは発生せず曲げ破壊が確認できた。そのため、ビニロン短繊維によるせん断破壊抑制の効果が発揮されたと考えられる。プレストレス量に補正を行っていない No.①~④をみると、5%の質量減少を行った No.①で側面から確認できるひび割れが発生していたものの、これよりも質量を減少させた No.②、③は No.①に比べひび割れ幅は小さくなった。そのため、腐食による耐荷性能の低下を想定したにも関わらず、相対的なプレストレス量の増加によって耐荷性状が向上したと考えられる。補正後の No.⑤~⑦を比較すると、No.⑤と No.⑥で質量減少に応じて側面のひび割れ幅が大きくなった。このことから、導入プレストレス量の補正によって鉄筋切削による相対的なプレストレス量の増加、およびそれに伴う耐荷性状への影響を抑制できたと考えられる。一方で、No.⑦は最も質量減少率が高かったにもかかわらず No.⑤、⑥以上にひび割れは見られなかった。そのため、腐食した場合と同様な耐荷性能の低下は再現できなかつたと考えられる。再現できなかつた要因については、横倉(2023)の考察と同様に腐食ひび割れによる構造的な変化を考慮できなかった点が挙げられる。

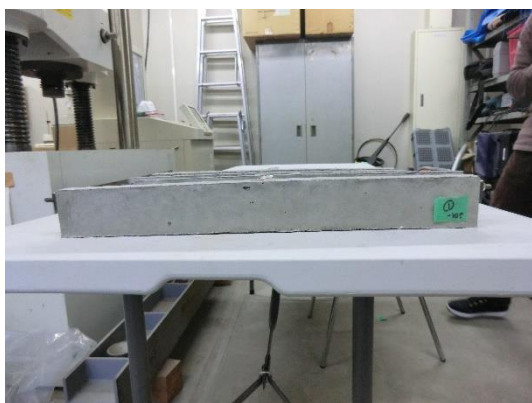


写真 23 : No.①のひび割れ状況



写真 24 : No.②のひび割れ状況

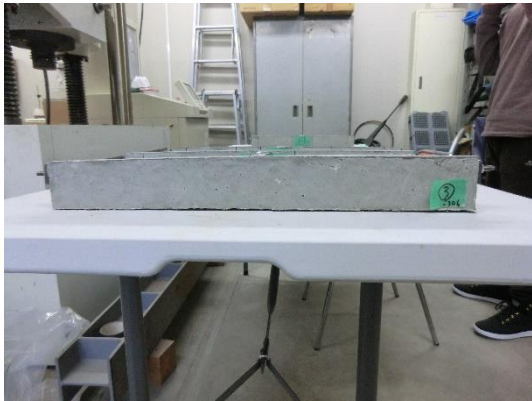


写真 25 : No.③のひび割れ状況

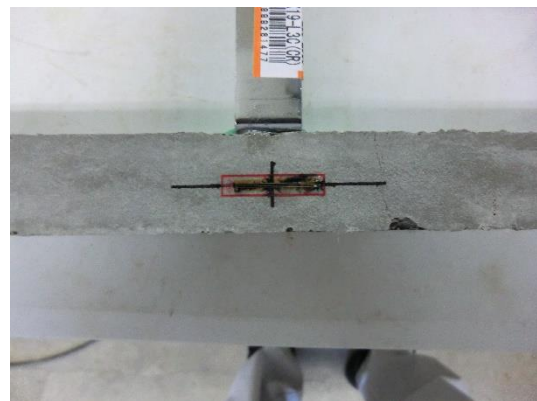


写真 26 : No.④のひび割れ状況



写真 27 : No.⑤のひび割れ状況

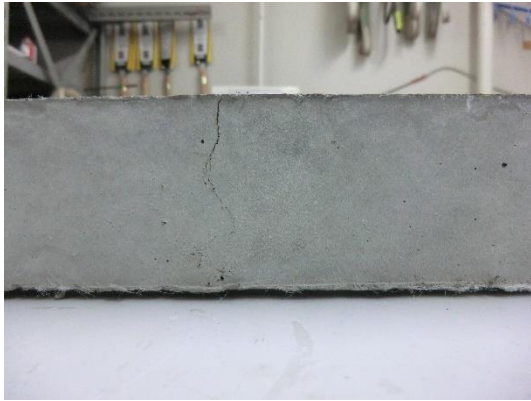


写真 28 : No.⑥のひび割れ状況

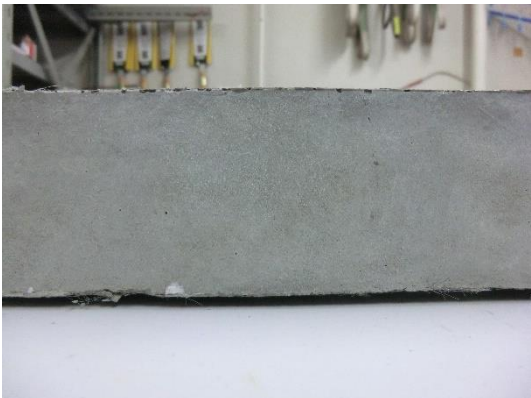


写真 29 : No.⑦のひび割れ状況

(3)荷重変位関係

No.①～④について、図 8 の荷重変位関係や最大荷重を比較したが質量減少率 0%である No.④と比較して No.①～③は明確な差は生じなかった。そのため、プレストレス量に補正を掛けなかった場合には鉄筋の質量減少に伴う耐荷力の低下を再現できなかったと考える。プレストレス量に補正を掛けた No.⑤～⑦を比較すると、④に対する最大荷重や降伏点荷重の低下が顕著に表れた。そのため、プレストレス量の補正による効果は発揮できたと考えられる。しかし、質量減少率ごとに比較した場合には-10%の質量減少を行った⑥が最も耐荷性が低くなった。そのため、鉄筋切削による腐食の代替は十分には再現できなかったと考えられる。再現できなかった要因は、ひび割れ状況の考察と同様に電食試験によって本来発生するはずだった腐食ひび割れや試験体内部の腐食生成物の影響を考慮できなかったためだと考えられる。

(4)応力ひずみ関係

図 9 より、いずれの試験体においても直線部から曲線部へのプロットの切り替わりが見られ、鉄筋からコンクリートへの応力分布の推移が確認できる。No.①～④を比較すると、直線部における最大下縁応力度が質量減少率 0%の④に比べ①～③は鉄筋質量が減少したにも関わらず、④と同等かそれ以上の値となった。これは、鉄筋の断面積減少に伴う相対的なプレストレス量の増加によって鉄筋が耐えられる応力が上昇したと考えられる。プレストレス量に補正をかけた⑤～⑦を比較すると、直線部・曲線部ともに④に比べ小さくなった。これにより、相対的なプレストレス量増加の影響を抑え鉄筋の質量減少に伴う応力低下を再現できたと考えられる。また、⑤～⑦のグラフでは質量減少率が大きくなるほど応力ひずみ関係も小さくなるという相関関係がみられた。このことから、応力ひずみ関係においては鉄筋の質量減少に伴う耐荷性の低下を再現できたと考えられる。

表 11 : No.①～⑦の最大荷重

	最大荷重[kN]
①	5.82
②	6.59
③	5.75
④	5.88
⑤	5.60
⑥	4.79
⑦	5.10

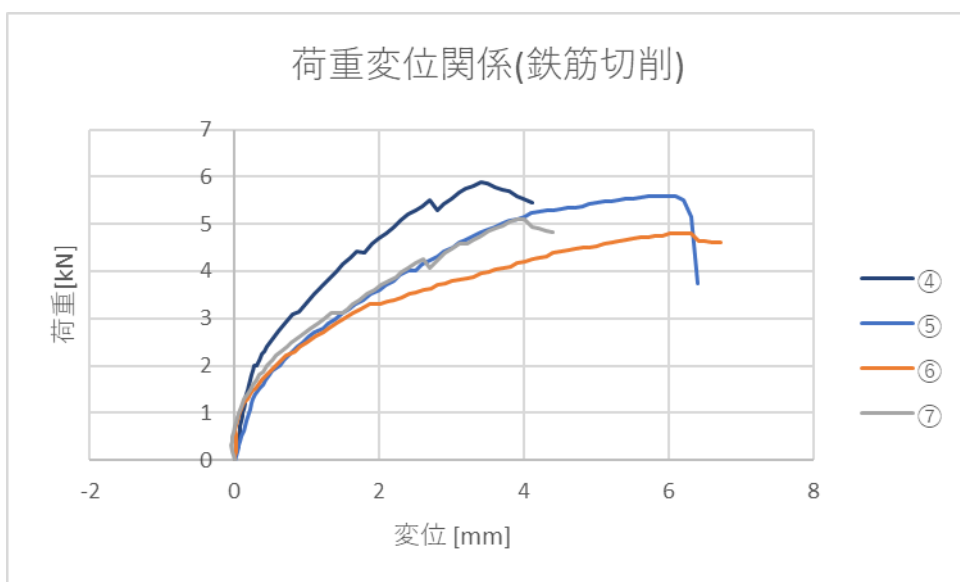
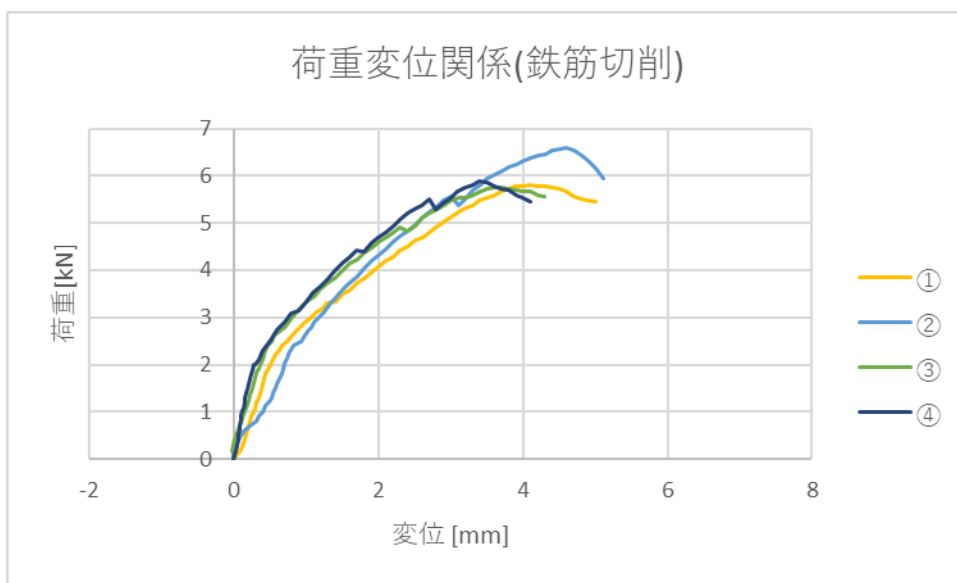


図 8: No.①～⑦の荷重変位関係

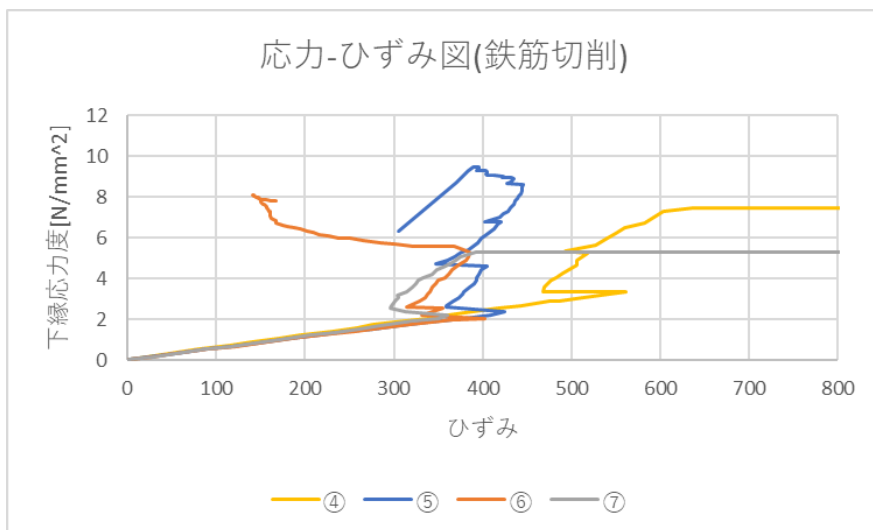
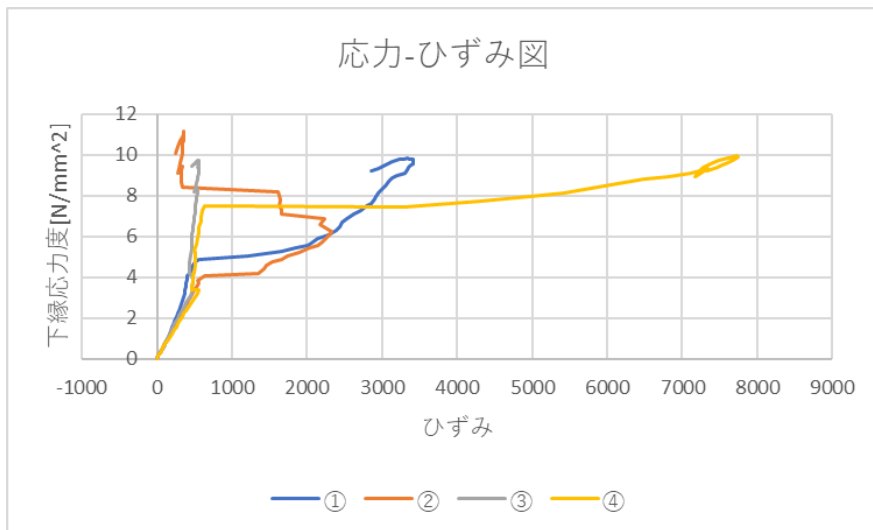
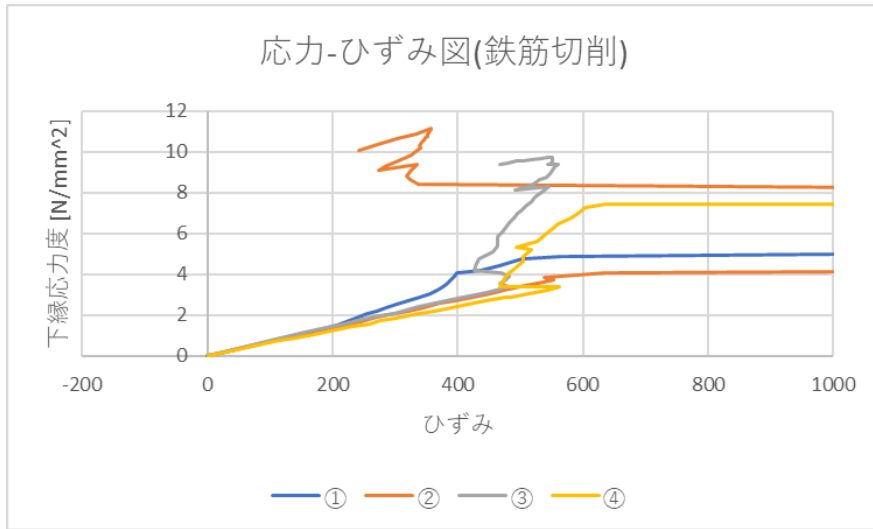


図 9: No.①～⑦の応力-ひずみ図

(B) 電食試験を行った試験体

(1)電食試験

写真 11～15 より、いずれの試験体においても電食区間を中心に試験体下縁部または側面部の鉄筋配置位置に腐食ひび割れが発生した。また、目標質量減少率の増加に伴いひび割れ幅も増加している。そのため、ばねシースを用いた試験体での通電は可能であったと確認できる。載荷試験後に鉄筋を取り出して質量を計測し実際の質量減少率を計測したところ、はじめに電食試験を行った No.1、No.2 について、RC で作成した No.1 に対し PC で作成した No.2 は同量の目標質量減少率であった。それにも関わらず、目標との差が 4.5%と大きかった。No.2 が目標質量減少率まで到達しなかった要因としてシースであるバネにも通電したことでばねの腐食も同時に起こっていたことが考えられる。そのため、PC 試験体の電食試験の際は通常より長時間の通電が必要と判断し、以降の試験体では No.2 の減少量を基に通電時間に 1.8 倍の補正を掛けた。補正後に電食試験を行った No.3～5 では目標と実際の質量減少率の差が最大で 2.7%以内に収まっており、通電時間に補正を掛けた効果が得られたと考えられる。誤差発生の原因としては、通電中の電流量の変動や容器内の食塩水の蒸発による塩分濃度の変化、スポンジ内部の食塩水の蒸発によるコンクリートの吸水量の変化などが影響したと考えられる。写真 35 は載荷試験後に取り出し錆を除去した鉄筋の様子である。腐食による減少部分を見ると、電食区間の中でも大きく減少した箇所と減少しなかった箇所に分かれており、質量減少率が大きいほどそれが顕著である。これは、同じコンクリートでも細骨材や短繊維の分布によって通電しやすい箇所としにくい箇所が偏在したためと考えられる。また、試験体内部での水や錆汁の移動によって電食区間外でも鉄筋の腐食がわずかにあった。これらの結果から、均一に電食区間のみを切削した場合は質量減少の様相が異なっていたと考えられる。この差異が、鉄筋切削による電食試験を行った試験体との試験結果に相違が生じた要因の一つであると考えられる。

表 7 : No.1～5 の導入プレストレス

No.	ひずみ[$\mu \varepsilon$]	鋼材応力度 [N/mm ²]	上縁応力度 [N/mm ²]	下縁応力度 [N/mm ²]	軸圧縮応力度 [N/mm ²]
1					
2	-274	-136.7	1.43	-6.85	-2.71
3	-290	-144.7	1.51	-7.25	-2.87
4	-274	-136.7	1.43	-6.85	-2.71
5	-260	-129.7	1.35	-6.50	-2.57

表 9 : No.1~5 の電食試験結果

No.	腐食	電食前[g]	電食後[g]	質量減少率[%]	目標質量減少率[%]	通電時間[h]	電流量[A]
1	○	111.4	102.6	7.90	10.0	31.3	0.4
2	○	111.4	105.2	5.56	10.0	31.3	0.4
3	○	111.1	106.3	4.32	5.0	56.4	0.2
4	○	112.2	103.9	7.40	10.0	57.0	0.4
5	○	112.3	92.4	17.72	15.0	85.5	0.4



写真 11 : No.1 の腐食ひび割れの様子



写真 12 : No.2 の腐食ひび割れの様子



写真 13 : No.3 の腐食ひび割れの様子



写真 14 : No.4 の腐食ひび割れの様子



写真 15 : No.5 の腐食ひび割れの様子

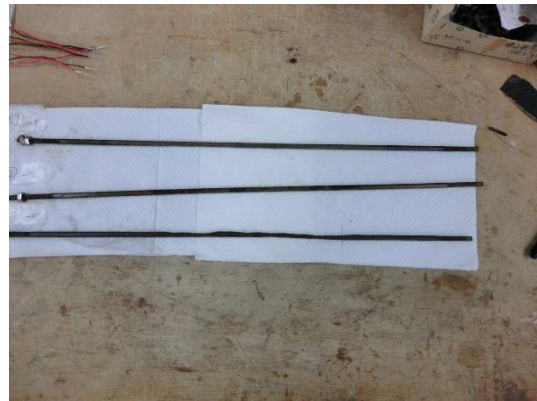


写真 35 : 載荷試験後の鉄筋の様子

(2) ひび割れ状況

写真30～34よりいずれの試験体においてもせん断破壊を示すような大きなひび割れは発生しなかった。このことから、ビニロン短繊維によるせん断破壊抑制効果が確認できる。No.1とNo.2について、同量の腐食量を想定したにもかかわらず曲げひび割れはNo.2のほうが大きかった。No.2は荷重開始前に底面に大きな腐食ひび割れが発生していたため、荷重によるひび割れが入りやすい内部構造だったと考えられる。次にNo.3～No.5について比較する。いずれの試験体も曲げひび割れが腐食ひび割れに直交するような形で発生している。そのため、腐食ひび割れ発生箇所が脆くなっていたと考えられ、電食試験によって耐荷性状が低下したと評価できる。側面のひび割れ幅は質量減少率に応じてある程度相関が見られるものの、大きな差とはならなかった。そのため、一定以上のひび割れに関してはひび割れ幅が大きくなるよりも先に耐荷力に限界が生じたと考えられる。

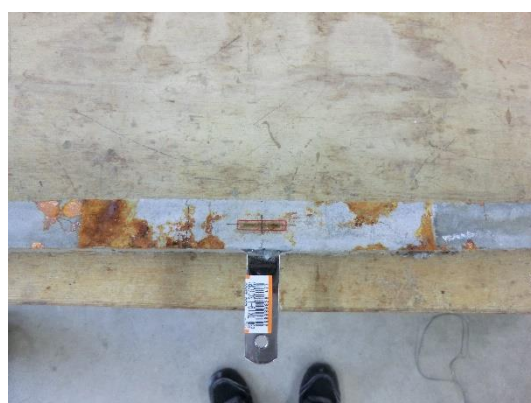


写真 30 : No.1 のひび割れ状況



写真 31 : No.2 のひび割れ状況



写真 32 : No.3 のひび割れ状況



写真 33 : No.4 のひび割れ状況



写真 30 : No.5 のひび割れ状況

(3)荷重変位関係

図 10 より、No.1 と No.2 を比較すると荷重初期は No.2 が荷重の増加に対し変位の増加が著しく小さい。このことから、残存したプレストレスが耐荷性状の向上に寄与していることが確認できる。しかし、荷重が進むと No.2 の降伏が早く、最大荷重も No.2 より低くなった。このような結果となった原因としては、PC と RC でのコンクリートとの付着の差が考えられる。RC で作成した No.1 は、腐食によって鉄筋の耐力が低下してもコンクリートとの付着によって、ある程度耐力低下は緩やかになった。一方、PC で作成した No.2 はコンクリートとの付着がなく、その分をプレストレスで補っている。そのため、腐食やプレストレスの消失による耐力低下に大きく影響を受けたと考えられる。つづいて、No.3~5 の比較を行う。No.3 と No.5 については荷重開始時に変位が大きくずれているが、荷重時の様子や試験後のせん断破壊状況などに特に問題が見られなかった。そのため、これは変位計の設置位置や測定環境による測定誤差だと考えられる。最大荷重やグラフの推移を見ると、No.5 の最大荷重が No.4 をわずかに上回っているが、概ね腐食量と耐力の低下に相関性が見られる。このことから、PC においても電食試験による耐力低下が有効であったこと、(1)でのプレストレス導入量の補正によって鉄筋の断面積減少に伴う相対的なプレストレス力の増加を抑えることができたことが確認できる。

表 12 : No.1~5 の最大荷重

No.	最大荷重[kN]
1	6.72
2	5.20
3	5.26
4	4.32
5	4.45

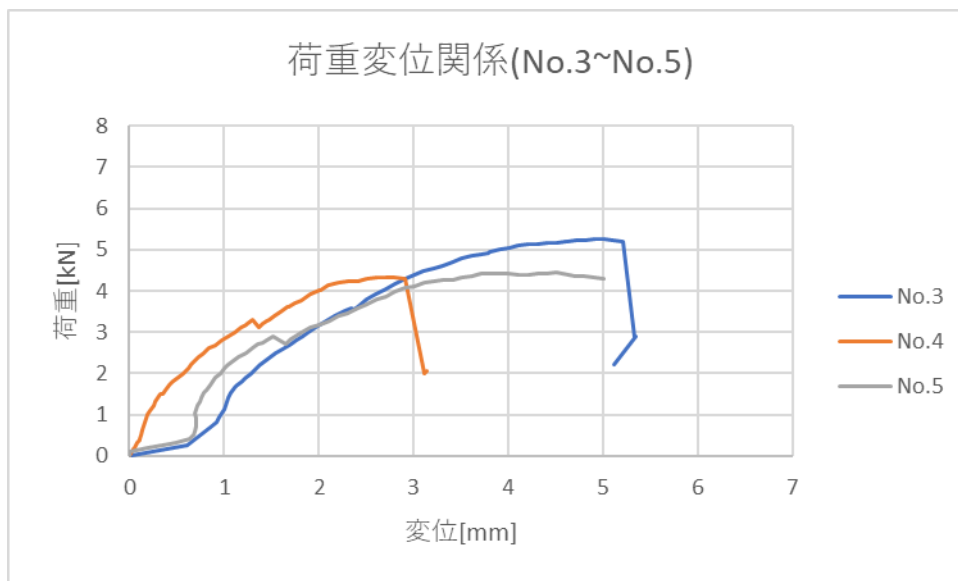
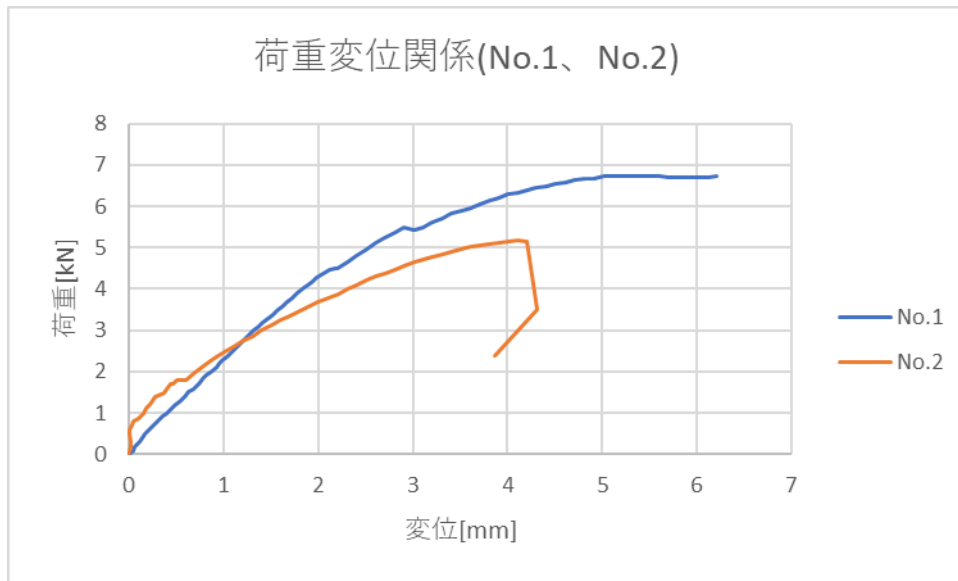


図 10 : No.1~5 の荷重変位関係

(4)応力ひずみ関係

はじめに、RCで作成したNo.1とPCで作成したNo.2について比較する。No.1は全体として曲線的な応力ひずみ関係となった。このグラフのプロットはコンクリートの応力ひずみ関係と近い形をとっている。このことから、No.1は電食試験終了の時点で腐食により鉄筋の耐荷性が消失して、載荷直後から常にコンクリート部分で応力を負担していたと考えられる。一方、No.2は他のPC試験体と同様に載荷直後から直線的な関係を示したが、他のPC試験体のような曲線的な関係はあまり見られなかった。これは、ひずみゲージ取り付け部に腐食ひび割れがあった影響でコンクリートにおける応力負担時のひずみ計測が十分に行われなかったと考えられる。また、プロットの変化からNo.2でも、鉄筋からコンクリートへの応力の再分配が起きたと考えられる。しかし、同じコンクリートによる応力負担でもNo.1とNo.2でプロットが大きく異なった。これは、プレストレスによって、圧縮方向へ力が加わっていたためと考えられる。プレストレスを導入したことで、はじめから試験体下縁部では圧縮方向へ力が加わっており、載荷による下縁部への引張方向の力を打ち消すことが想定されている。載荷やひび割れによる引張方向へのひずみの増加と、プレストレス力による圧縮方向へのひずみの増加がともに作用した結果、このようなプロットになったと考えられる。しかし、電食試験後や載荷試験中の残存プレストレス量については、本研究では計測器の性能や計測位置の関係から推移を測定できず、各試験後における残存プレストレス量の把握はできなかった。そのため、縮小模型規模で利用できる継続的なプレストレス量の計測方法の検討が今後の課題となるだろう。

つづいて、No.3～No.5を比較する。図11より、全ての試験体で直線部(鉄筋)から曲線部(コンクリート)への応力の再分配がみられ、グラフのプロットも他のPC試験体と近い形をとっていることが分かる。グラフの直線部を比較すると、No.3、No.4、No.5の順で最大下縁応力度が低下している。このことから、鉄筋の腐食量に応じて負担できる応力が減少していることが確認でき、電食試験によって鉄筋の腐食に伴う試験体の耐荷性状の低下を再現できたと考えられる。No.5について、コンクリートへ応力負担が切り替わった後のひずみの変化量が著しく大きくなっている。これは、腐食量が多かったことによる腐食ひび割れや、載荷による曲げひび割れが他の試験体よりもひずみゲージ付近で発生した影響だと考えられる。図9の鉄筋切削で同程度の質量減少を行った場合と比較すると、質量減少率の上昇に伴う応力ひずみ関係の変化は近い傾向となった。この点からも、鉄筋切削による電食試験の代替にある程度の再現性があると考えられる。しかし、図9の変化は図11に比べ小さく、この再現性が十分であるかは検討の余地がある。

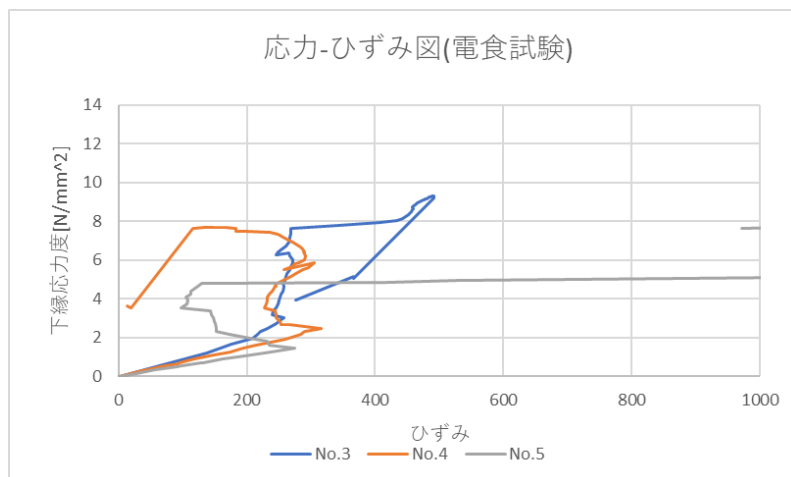
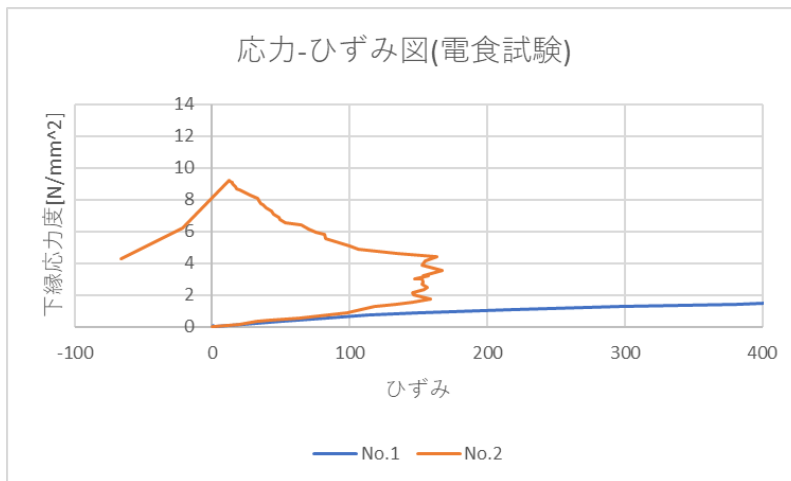
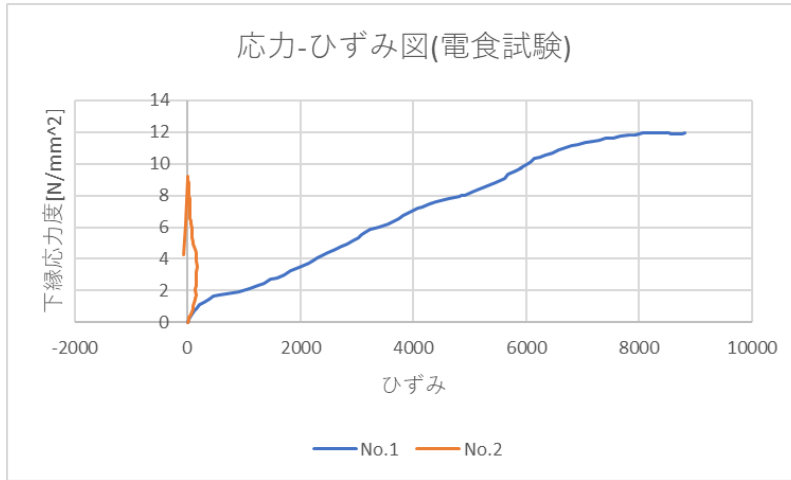


図 11 : No.1~5 の応力ひずみ図

3.6.3 連結桁による試験

(1) 電食試験

写真 16~22 より、いずれの試験体でも電食区間を中心に底面および側面部に腐食ひび割れが発生していた。そのため、電食試験による腐食の効果が十分に表れたと考えられる。質量減少率について、最も目標との差が大きかった No.IVで 4.21 [%]であり、それ以外の試験体は単体はりの電食試験と同程度の誤差範囲に収まった。質量減少率に差が生じた原因として、3.5.2 節(2)項で前述した要因の他に RC と PC での構造の違いによる比例定数への影響が考えられる。本試験で用いた PC 試験体はばねをシースとして使用しているため、過去の研究における電食試験で用いていた RC 試験体と比べ試験体内部の通電の様子が異なった可能性が考えられる。

ここで、電食試験を行った全試験体の腐食量と積算電流量 I_h との関係を表 14 に示す。表 14 より No.2 と No.4 以降を比較すると、通電時間に対し補正を行う前後で比例定数が大きくずれている。このことから、通電時間補正後の比例定数について新たに検討する必要があると考えられる。この結果から連結桁で用いたばねを対象に比例定数の平均を計算すると 0.682 であった。この値を今後のばねシースを用いた PC 連結桁における新たな比例定数として提案する。

表 14：各試験体の腐食量と積算電流量 I_h の関係

No.	腐食量[g]	I_h [A × hour]	比例定数
1	8.8	12.5169	0.703
2	6.2	12.5169	0.495
3	4.8	6.2698	0.766
4	8.3	12.6640	0.655
5	19.9	19.0120	1.047
IV	6.5	12.6750	0.513
V	8.1	12.7000	0.638
VI	11.4	12.7000	0.898
VII	8.3	12.6640	0.655
IX	8.3	12.6750	0.655
XI	7.1	12.6640	0.561
XII	10.8	12.6750	0.852



写真 16 : No.IVの腐食ひび割れの様子



写真 17 : No.Vの腐食ひび割れの様子



写真 18 : No.VIの腐食ひび割れの様子

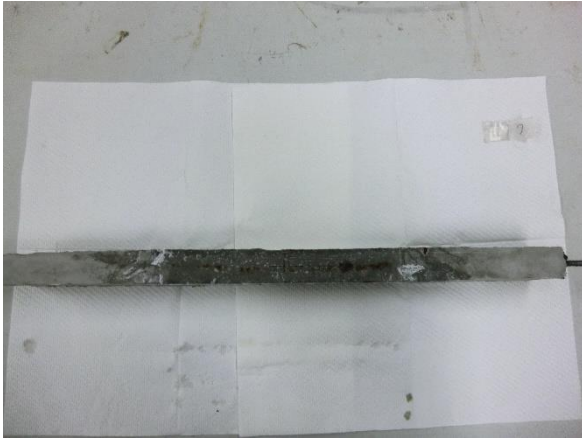


写真 19 : No.VIIの腐食ひび割れの様子



写真 20 : No.IXの腐食ひび割れの様子



写真 21 : No.XIの腐食ひび割れの様子

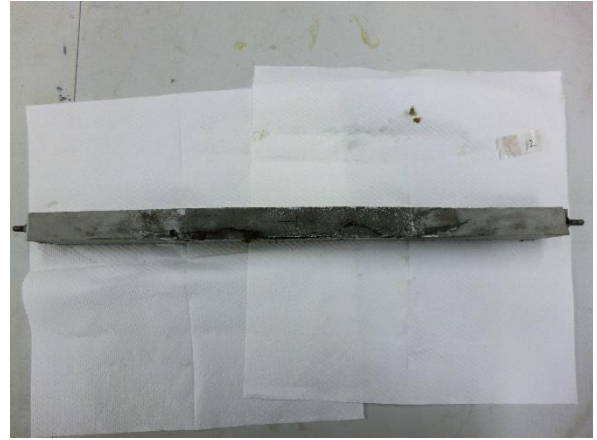


写真 22 : No.XIIの腐食ひび割れの様子

(2)導入プレストレス量

表 8 の通り、連結桁の各はりに導入したプレストレスは単体はりでの質量減少量による補正を考慮して導入した。試験直前のプレストレス導入という条件設定のため健全はり (No. I ~ III, VIII, X) については連結後に導入を行った。その際、特に中央部に設定したはりにおいて緊張が適切に行えず鉄筋端部の破損が数回発生した。この要因として、連結によって単体はりよりも、プレストレスによる曲げ方向への変形に対する抵抗性が上がった点が挙げられる。

表 8 : No. I ~ XII の導入プレストレス

No.	腐食	ひずみ [$\mu \varepsilon$]	鋼材応力度 [N/mm ²]	上縁応力度 [N/mm ²]	下縁応力度 [N/mm ²]	軸圧縮応力度 [N/mm ²]
I	×	-306	-159.0	1.18	-7.65	-2.35
II	×	-305	-161.1	1.23	-7.63	-2.43
III	×	-305	-165.9	1.21	-7.63	-2.46
IV	○	-275	-145.5	1.10	-6.88	-2.17
V	○	-276	-151.4	1.14	-6.90	-2.25
VI	○	-275	-156.3	1.14	-6.88	-2.24
VII	○	-275	-149.7	1.09	-6.88	-2.20
VIII	×	-305	-159.4	1.19	-7.63	-2.42
IX	○	-274	-150.5	1.13	-6.85	-2.22
X	×	-305	-159.6	1.18	-7.63	-2.40
XI	○	-274	-148.8	1.10	-6.85	-2.23
XII	○	-274	-149.0	1.09	-6.85	-2.21

(3) ひび割れ状況

写真 36～39 より、いずれの連結桁においてもせん断ひび割れは発生せず、曲げ破壊を起こした事が分かる。そのため、ビニロン短繊維によるせん断破壊抑制効果が十分に表れたと考えられる。

各連結桁での曲げ破壊の様子を比較すると、連結桁 A では全てのはりにおいて中央部に同程度のひび割れが見られる。そのことから、均一に荷重負担が分散したと考えられる。全てのはりを腐食させた連結桁 B においても、全てのはりで同程度のひび割れが発生した。そのため、均一な荷重分散が確認できたが、側面のひび割れ幅は連結桁 A より小さかった。これは、腐食によって耐荷性が低下したために、健全はりよりもひび割れが発生しやすかったためと考えられる。

連結桁 C、D については、どちらも健全はりでは中央部にひび割れがみられた。しかし、腐食はりにおいては、No.IXをのぞき中央部でのひび割れが見られなかった。そのため、これらの連結桁においては腐食はりでは荷重の負担ができず、健全はりに荷重負担が集中したと考えられる。



写真 36 :連結桁 A のひび割れ状況



写真 37 :連結桁 B のひび割れ状況



写真 38 :連結桁 C のひび割れ状況



写真 39 :連結桁 D のひび割れ状況

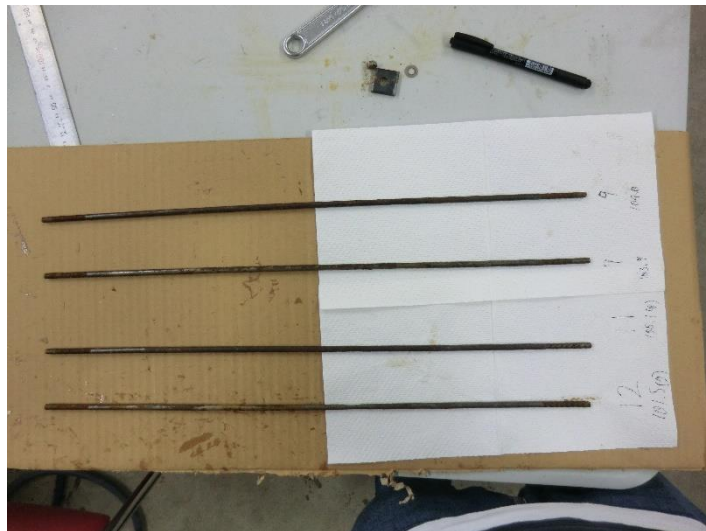


写真 40： 載荷試験後の腐食鉄筋

(4) 荷重変位関係

図 12～15 より、いずれの連結桁においても載荷直後に左右で対称的に変位が増減した後左右で同程度の増減に戻っている。これは、床板との接着の際に接着剤の厚みなどで左右の高さが平行でなくなったために載荷によって歪みが生じたためと考えられる。そして、この歪みが荷重の増加に伴い平行に矯正されたことで、徐々に左右の荷重変位関係が近くなっていったと考えられる。また、電食試験を施したはりについては、底面に腐食ひび割れが発生していた。そのため、ひび割れによる凹凸と載荷支点との接地面が不安定であることも影響したと考えられる。載荷序盤における荷重変位関係の再現性向上のためには、接着面の均一化や接着剤の塗りムラを抑制することが今後の研究では必要となるだろう。

最大荷重について、全て健全はりを用いた連結桁 A が最も高く、腐食はりを含むそれ以外の連結桁では耐荷力の低下が見られた。そのため、塩害劣化による耐荷性状の変化を再現できたと考えられる。連結桁 C と D の荷重変位関係を比較すると、連結桁 D では左右の腐食の有無によって降伏後の変位の伸びに差が生じた。その内腐食はりである左側については、同量の腐食である連結桁 C の両端のはりよりも破壊するまでの変位が小さかった。また、全体的な耐荷性状においても腐食はりの本数が同じにもかかわらず連結桁 C のほうが高くなった。これは、連結桁 C では中央に配置した健全はりが荷重を負担できたのに対し、連結桁 D では左と中央のはりが腐食していたことで連結桁 C のように中央で荷重負担ができず、右の健全はりに負担が集中しやすくなったためと考えられる。連結桁 B と D において、3 本全て腐食はりである連結桁 B が連結桁 D に比べて、最大荷重や降伏後の変位の伸びで優れた耐荷性を示している。これも同様に、荷重負担の偏りが要因となっている。連結桁 D が右の健全はりに負担が集中した一方で、連結桁 B は優先的に負担の掛かるはりが存在しないために均等に負担がかかったものと考えられる。このことから、山岸(2020)における RC 連結桁での検討と同様に、PC を用いた連結桁においても健全はりの配置状況が桁全体の耐荷性状に大きく影響すると考えられる。

最後に桁連結による冗長性の確認について考察を行う。連結桁 A と単体はり No.④で最大荷重を比較すると、No.④で 5.88 [kN] に対し連結桁 A では 17.85 [kN] と約 3 倍であった。このことから、桁連結によってはりの本数分の耐荷性の向上は見られたものの、桁連結を行ったことに起因する冗長性は確認できなかった。

表 13 :連結桁 A～D の最大荷重

連結桁	最大荷重[kN]
A	17.85
B	12.88
C	14.93
D	10.79

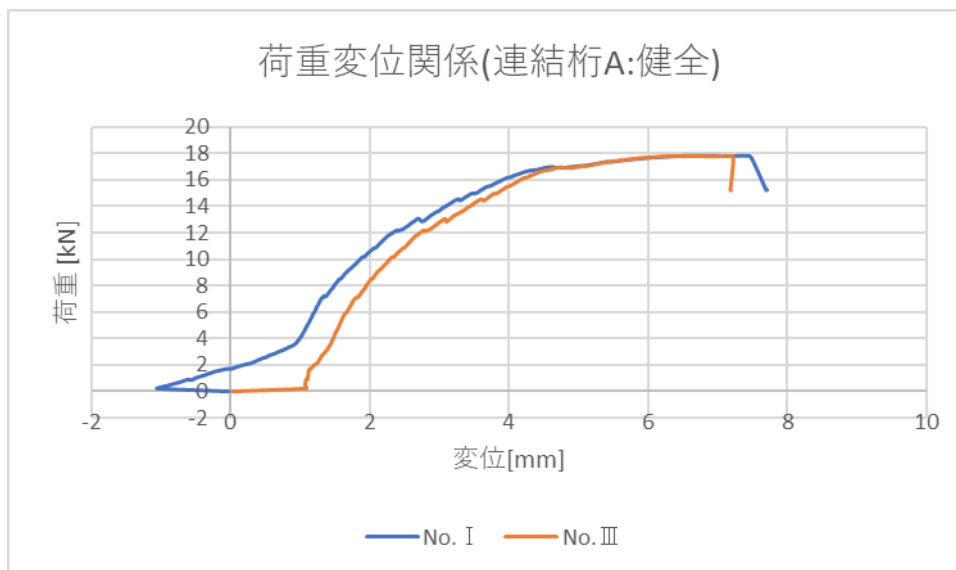


図 12 :連結桁 A の荷重変位関係

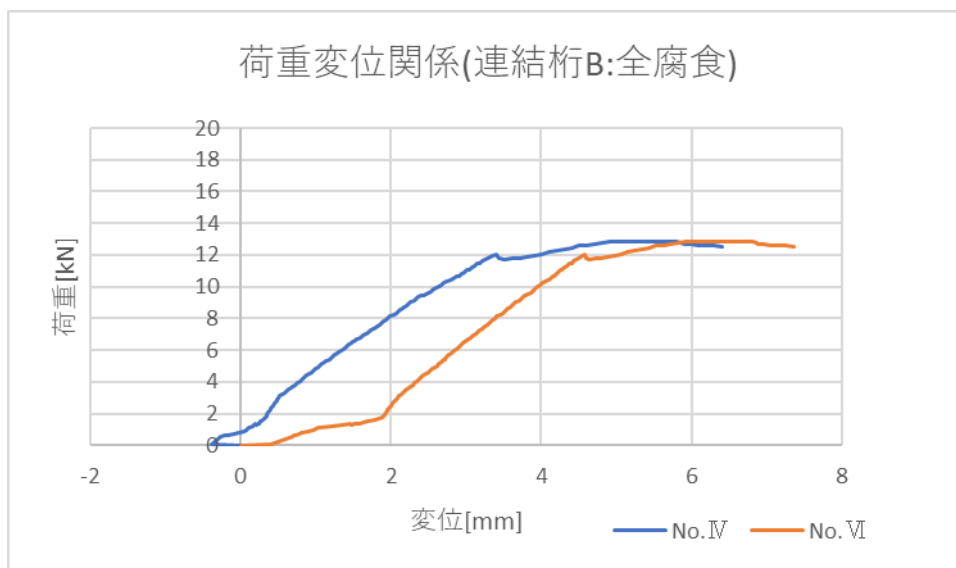


図 13 :連結桁 B の荷重変位関係

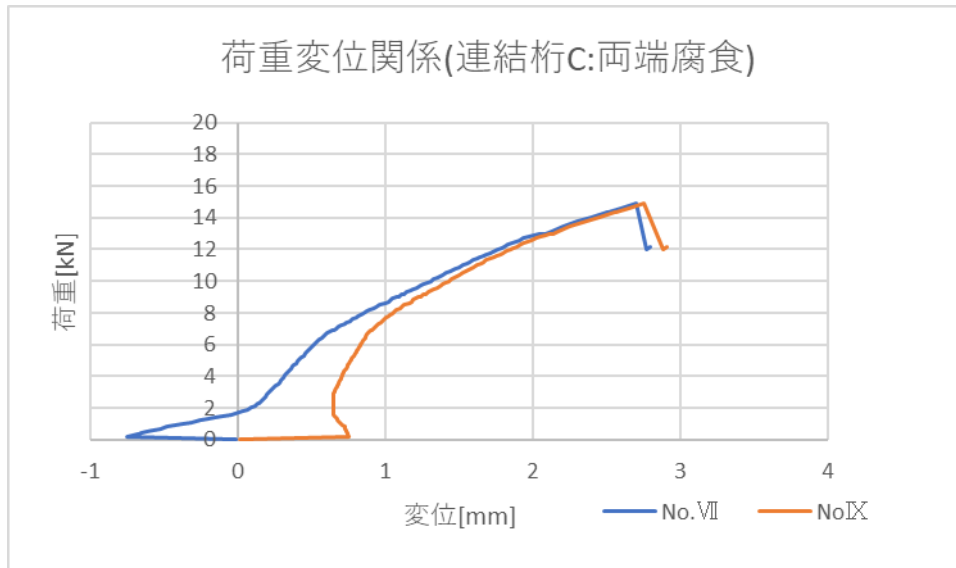


図 14 :連結桁 C の荷重変位関係

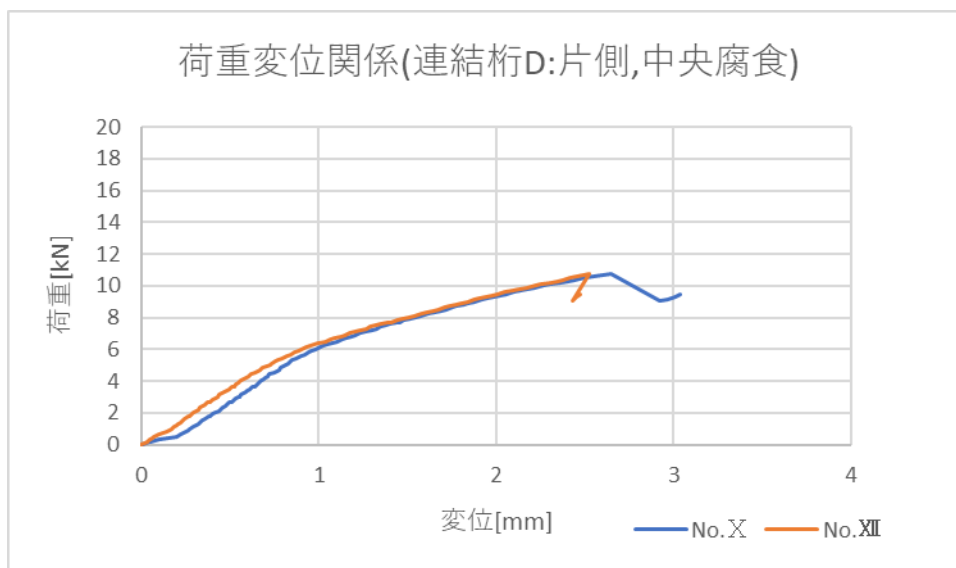


図 15 :連結桁 D の荷重変位関係

(5) 応力-ひずみ関係

連結桁 A について、図 16 より荷重直後から中央のはり(No. II)に両端のはりよりも大きな応力がかかっていることが分かる。このことから、応力分布の面からも連結桁において中央のはりに対する荷重負担は両端に比べ大きいものであると考えられる。グラフのプロットについて比較すると、No. I と No. III はともに単体はりの応力ひずみ図と同様、直線部と曲線部の変遷が見られ鉄筋からコンクリートへ応力の再分配が確認できる。また、グラフのプロットが近似していることから、両端へ均等に荷重が加わったと考えられる。なお、No. I については荷重中にひずみゲージ付近にひび割れが発生したことでひずみの値が急増した後にゲージが断裂した。そのため、途中から計測不能となった。No. II については、荷重後からはやや直線的なグラフのプロットであるものの、途中でひずみの値が急増し No. I や No. III のような応力の再分配は確認できなかった。これは、最初のひび割れ発生が、ひずみゲージの貼り付け部で発生したためと考えられる。それらのことから、今後の研究においては、ひずみゲージの取り付け位置の変更など、ひび割れによる計測への影響などを考慮した計測方法の検討が必要である。

連結桁 B 以降の試験体については、電食試験による腐食ひび割れがひずみゲージ取り付け部に大きく発生した。そのため、十分な計測ができないと判断して計測を行わなかった。

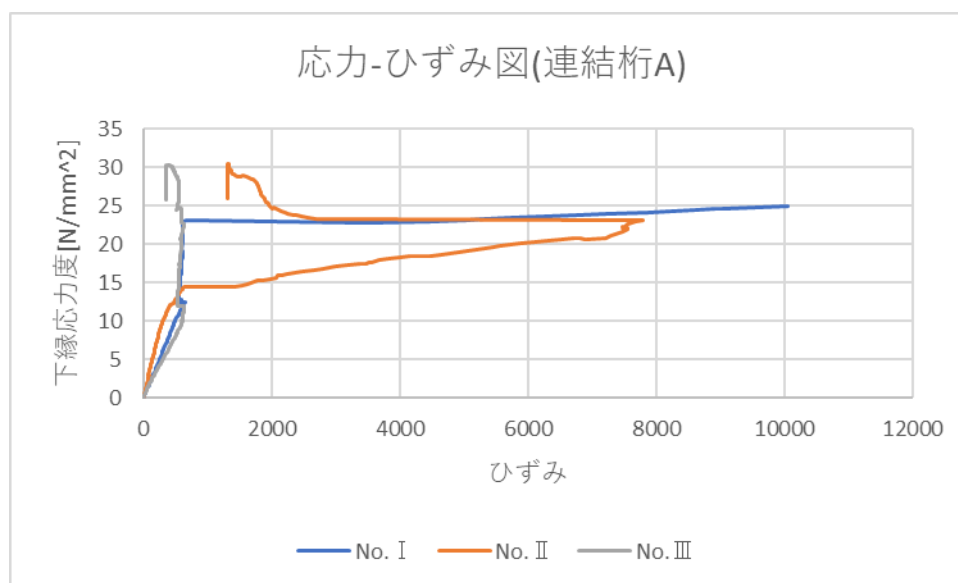


図 16: 連結桁 A の応力ひずみ図

第4章 結論

本研究では、費用や労力、実際の設備などの制約を受けない高靱性繊維補強セメント複合材料を使用した縮小模型によって PC はりの再現性の検討を行った。導入プレストレス量、腐食の有無及び程度、桁連結の有無を実際のパラメータとし、単体はり、連結桁のはりそれぞれに組み合わせ適用することで試験体を作成した。そして、これらの試験体に載荷試験を行い、その試験結果からそれぞれの耐荷性状や構造的な変化を確認した。第1章から第3章を踏まえた結論を以下に示す。

- (1) 繊維混入率 2.0% の高靱性繊維補強セメント複合材料を用いて試験体を作製して載荷試験を行った。その結果、各種パラメータの違いに関わらず、いずれの試験体においてもせん断ひび割れは発生しなかった。このことから、PC 鋼材とビニロン短繊維がせん断力を十分に負担したと考えられる。
- (2) PC 試験体において鉄筋切削や電食試験による鉄筋の質量減少を試みたところ、導入を想定した量よりも相対的に多くのプレストレスが加わり耐荷性状に影響を及ぼした。これは鉄筋の断面積が減少したことに起因すると考えられるため、目標質量減少率に応じて初期の導入プレストレス量を減らす必要がある。
- (3) 導入プレストレス量に補正を掛けた上で鉄筋切削による質量減少を行うことで、電食試験による鉄筋腐食の代替を試みた。その試験結果や電食試験を施した腐食はりとの比較から、応力ひずみ関係では再現性が見られた。しかし、それ以外の考察においては再現性を示せなかった。これは、腐食によるコンクリートへの腐食ひび割れや腐食生成物の発生とそれに伴う発生箇所の構造性能の低下を考慮できなかったためと考えられる。
- (4) 電食試験において、腐食量推定式における比例定数として 0.886 の値を用いて試験を行った。しかし、PC 試験体では目標の質量減少率に届かなかったため通電時間に補正をかけた。これは、用いた比例定数が RC 試験体の電食試験結果から得たものであり、シー材料である引張ばねの電気抵抗や鉄筋-シー材料間のわずかな空隙といった PC 試験体の構造に対応できなかったためと考えられる。以上の点を踏まえ、ばねシー材料を用いた PC 試験体における通電時間算出式の比例定数として、新たに 0.682 という値を提案した。今後はこの比例定数を用いて試験を行い、PC 試験体の電食試験における腐食量推定の精度を高めていく必要がある。

- (5)単体はりにおける腐食はりの載荷試験について、荷重変位関係や応力ひずみ関係から質量減少率の増加に応じた耐荷性状の低下が確認できた。そのため、電食試験における耐荷性の低下が十分に表れたと考えられる。
- (6)連結桁 A～D の載荷試験について、健全はりのみで構成された連結桁 A に対し腐食はりを含んだ連結桁の耐荷性状が低下したため、腐食による構造性能への影響が確認できた。
- (7)健全はりと腐食はりを複合した連結桁 C、D について、どちらも健全はりにひび割れが発生し腐食はりにはあまり発生しなかった。このことから、腐食はりを含む連結桁に載荷した場合、健全はりのみで荷重を負担し腐食はりでは荷重負担ができないと考えられる。また、連結桁 C に比べ連結桁 D の耐荷力が低かったことから、健全はりと腐食はりの複合連結桁では健全部材の配置が耐荷性状に関係すると考えられる。
- (8)ともに健全な試験体である単体はり④と連結桁 A の最大荷重を比較すると、④が 5.88 [kN]、連結桁 A が 17.85 [kN]と約 3 倍の値を示した。このことから、山岸(2020)における RC 縮小模型の結果と同じく、PC 縮小模型においても複数部材の組み合わせによる耐荷性の向上が見られず、桁連結による冗長性は確認できなかった。

参考・引用文献

- ・境有紀、徳井紀子、真田靖士、山内成人、中埜良昭、諏訪田晴彦、福山洋
超縮小模型を用いた鉄筋コンクリート構造の簡易震動実験手法の開発—超小型模型による鉄筋コンクリート造の復元力特性の再現性—
日本建築学会構造系論文集, 第 584 号, 2004.10.
- ・陸賢、田中泰司、山口貴幸、下村匠
腐食した PC より線の機械的性質とプレテンション PC 梁の残存耐力の評価
第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,
pp211-216, 2012.
- ・山岸聖 『縮小模型を用いた RC 構造物の冗長性に関する検討』
弘前大学理工学部卒業論文, 2020
- ・玉手匠 『縮小模型によるプレストレストコンクリートはりの力学特性の検討』
弘前大学理工学部卒業論文, 2022
- ・西村友希 『鉄筋コンクリート部材に電気防食と埋込補強を同時に行った場合の復極特製
に関する研究』 弘前大学理工学部卒業論文, 2022
- ・横倉辰紀 『鋼材腐食を考慮した小型縮小模型の曲げ耐荷性状』
弘前大学理工学部卒業論文, 2023
- ・公益社団法人プレストレストコンクリート工学会(2016)
増補改訂版 フレッシュマンのための PC 講座-プレストレストコンクリートの世界-
- ・土木学会(2000) 平成 12 年度版 構造実験指導書
- ・土木学会(2018) コンクリート標準示方書 [規準編]

謝辞

本研究の実施及び論文の執筆にあたり、様々な方々にご協力を頂きました。上原子晶久准教授にはご多忙の中、本日に至るまで多大なるご指導、ご教授を頂きました。心より感謝し、深くお礼申し上げます。また、共同研究者である横倉辰紀さん、奥田颯麻さんには実験の進行から解析に至るまで多くのご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

同研究室の久保田さん、西村さん、古枝さん、三上さんには学部生の頃より大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。