

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成果報告レポート  
No. 2020-8

研究テーマ

PC 鋼材，定着具，鉄筋にステンレス鋼を用いた  
新たな高耐久プレストレストコンクリート構造の開発

研究代表者：長岡技術科学大学教授	下村 匠
共同研究者：金沢工業大学教授	宮里心一
愛知製鋼株式会社	中川英樹
愛知製鋼株式会社	近藤洋介
日鉄 SG ワイヤ株式会社	今井昌文
株式会社エスイー	中井督介
株式会社エスイー	藺田紘一郎
オリエンタル白石株式会社	東 洋輔

令和 5 年 5 月

新道路技術会議

# 目次

研究概要.....	1
第1章 はじめに.....	3
1. 1 本研究の背景と目的.....	3
1. 2 研究範囲.....	3
第2章 ステンレス PC 鋼より線の引張特性.....	4
2. 1 実験概要.....	4
2. 2 実験結果.....	4
2. 3 SUSPC 鋼より線の設計用応力-ひずみ関係と破断ひずみの設計用値の提案.....	5
2. 4 まとめ.....	6
第3章 ステンレス PC 鋼より線を用いたプレテンション PC 部材の力学特性.....	7
3. 1 プレストレス伝達特性.....	7
3. 2 曲げ耐荷性状.....	8
3. 3 まとめ.....	10
第4章 ステンレス鋼を用いたシングルストランド用 PC 定着具の開発.....	11
4. 1 はじめに.....	11
4. 2 試験方法.....	11
4. 3 定着具開発の方法.....	12
4. 4 試験結果.....	13
4. 5 セットロス.....	14
4. 6 まとめ.....	14
第5章 ステンレス鋼を用いたマルチストランド用 PC 定着具の開発.....	15
5. 1 はじめに.....	15
5. 2 試験方法.....	15
5. 3 供試体.....	15
5. 4 試験結果.....	16
5. 5 まとめ.....	16
第6章 ステンレス製定着具を用いたポストテンション PC 部材の力学特性.....	17
6. 1 実験概要.....	17
6. 2 プレストレスの減少.....	18
6. 3 曲げ載荷試験.....	19
6. 4 ステンレス PC 鋼より線とシースの摩擦特性の検討.....	20
6. 5 まとめ.....	22

第7章 ステンレス鋼製 PC 鋼材の耐久性に関する検討.....	23
7. 1 実験概要.....	23
7. 2 緊張の有無が腐食速度に及ぼす影響 .....	23
7. 3 塩化物イオン量が腐食速度に及ぼす影響 .....	24
7. 4 まとめ .....	25
第8章 ステンレス鋼制定着具の耐久性に関する検討.....	26
8. 1 実験概要.....	26
8. 2 実験手順.....	26
8. 3 実験結果.....	27
7. 4 まとめ .....	28
第9章 ステンレス鋼を用いた PC 構造の設計法の提案 .....	29
9. 1 はじめに.....	29
9. 2 ステンレス PC 鋼より線の設計用応力-ひずみ関係および破断ひずみの設計値.....	29
9. 3 部材終局時の照査 .....	29
9. 4 プレストレス力.....	29
9. 5 PC 鋼より線の付着特性.....	30
9. 6 耐久性の照査 .....	31
第10章 ステンレス鋼を用いた PC 建造物のライフサイクルコストの検討 .....	32
10. 1 はじめに.....	32
10. 2 実橋梁における塩害環境の違いによるライフサイクルコストの検討.....	32
10. 3 塩害対策を想定した橋梁における構造形式の違いによる ライフサイクルコストの検討.....	33
10. 4 まとめ.....	35
第11章 ステンレス PC 鋼材, 定着具の規格試案の提案.....	36
11. 1 ステンレス PC 鋼材の規格試案.....	36
11. 2 定着具の規格試案.....	38
第12章 まとめ .....	39
参考文献.....	41

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和2年度採択)  
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.2020-8	PC鋼材, 定着具, 鉄筋にステンレス鋼を用いた新たな高耐久プレストレストコンクリート構造の開発	長岡技術科学大学 教授 下村 匠

内部鋼材のすべてにステンレス鋼を用いることにより、鋼材腐食の懸念を一切なくした高耐久プレテンションおよびポストテンションのプレストレストコンクリート(PC)構造の開発に取り組む。

**1. 研究の背景・目的**

プレストレストコンクリート構造の耐久性を盤石なものとするためには、鉄筋、PC緊張材、シーース、定着具などの内部鋼材のすべてが非腐食材料により構成されたPC構造を開発することが有効と着想した。腐食の懸念が事実上皆無であるPC構造が実現できれば、環境条件、施工品質に左右されることなく、確実に高耐久PC構造が実現できると考えたのである。そこで本研究では、既存のステンレス鉄筋、ステンレスPC鋼材、さらに新たに試作したステンレス製のPC定着具を用いて、内部鋼材のすべてにステンレス鋼を用いた高耐久プレテンPCおよびポストテンPC構造の開発に取り組むこととした。

ステンレス鉄筋は、JISと土木学会指針が制定され、コンクリート構造物に適用する技術基盤が整えられている。ステンレスPC鋼材はすでに製品化されているが、緊張材にステンレスPC鋼材を用いたPC構造は、海外ではあるものの国内ではまだ実用されていない。さらに、定着具を含む内部鋼材のすべてをステンレス鋼材としたポストテンPC構造は未だ世界に類を見ない。

**2. 研究内容**

■ステンレス鋼材を用いたプレテンションPC構造の性能試験

ステンレスPC鋼より線を用いたプレテンションPC部材の耐荷性能を試験する。ステンレスPC鋼より線の耐腐食性を試験する。

■ステンレス製PC定着具の開発

ステンレスPC鋼より線の端部定着に使用するステンレス鋼製PC定着具を開発する。耐腐食性を試験する。シングルストランド用およびマルチストランド用定着具を開発する。

■ステンレス鋼材を用いたポストテンションPC構造の開発および性能試験

開発した定着具を用いてポストテンションPC部材を製作し、耐荷性能を試験する。ステンレスPC鋼より線とシーースの摩擦の試験を行う。

■ステンレス鋼材を用いたPC構造の実用化のための検討

本研究で得られた試験に基づき、ステンレス鋼材を用いたPC構造の設計・施工上の留意点を取りまとめる。種々の条件下でライフサイクルコストを試算し、実用化のメリットを明確化する。ステンレスPC鋼材および定着具の規格化の案を検討する。

**3. 研究成果**

■ステンレス鋼材を用いたプレテンションPC構造の性能試験

ステンレスPC鋼材を用いたプレテンション部材は、従来PC部材と同様の設計と応答解析が可能であることを確認した。ステンレス鋼の腐食速度は普通鋼の腐食速度に比べ極めて遅く1/10以下であること、緊張力の有無によって腐食速度が変化しないことを確認した。

■ステンレス製PC定着具の開発

PC定着具のウェッジ、アンカーヘッドそれぞれに用いるス



写真1 ステンレス製シングルストランド用PC定着具

ステンレス鋼の鋼種、形状、処理を実験変数として試行錯誤した結果、安定して定着効率 95%を有し、破壊や変形の起こらないシングルストランド用 PC 定着具の開発に成功した（写真 1）。開発したシングルストランド用 PC 定着具の仕様を用いて、複数本のストランドを一括定着する 12 本タイプのマルチストランド用 PC 定着具を試作した（写真 2）。

■ステンレス鋼材を用いたポストテンション PC 構造の開発および性能試験

ステンレス PC 鋼材とステンレス製定着具を用いたポストテンション PC 部材は、従来 PC 部材と同様の設計と応答解析が可能であることを確認した。ステンレス PC 鋼より線とシースの摩擦による緊張力の減少の算定には、従来用いられている摩擦係数の値を適用してよいことを確認した。

■ステンレス鋼材を用いた PC 構造の実用化のための検討

ステンレス PC 鋼より線の応力-ひずみ関係は、普通 PC 鋼より線よりも剛性の変化点や破断伸びが小さいので、それらを考慮した応力-ひずみ関係モデルと破断ひずみの設計値を用いるのがよい。ステンレス PC 鋼材を用いた PC 構造は、終局限界状態の照査において、破壊モードが鋼材の破断とならないことを確認しなければならない。その他の事項については普通 PC 鋼材を用いた場合と同じ設計法を適用してよい。

中小規模橋梁では、ステンレス PC 鋼を用いた PC 桁が従来構造よりもライフサイクルコストで優位性となることを確認した。ステンレス PC 鋼より線の規格の試案、ステンレス鋼を用いた PC 定着具の規格の試案を作成した。



写真 2 ステンレス製マルチストランド用 PC 定着具

#### 4. 主な発表論文

- 1) 浦上和也, 宮里心一: ステンレス製 PC 鋼より線の耐食性評価, 土木学会中部支部研究発表会, 2022. 3
- 2) 関根未菜, 宮里心一, 東洋輔: SUS 製 PC 定着具の腐食評価, 土木学会中部支部研究発表会, 2022. 3
- 3) 下村 匠, 小松侑矢, 齊藤駿介: 内部鋼材のすべてにステンレス鋼を用いた高耐久 PC 構造の開発, プレストレストコンクリート工学会第 31 回シンポジウム論文集, pp. 37-42, 2022. 10
- 4) 浦上和也, 宮里心一: ステンレス製 PC より線の腐食速度評価, プレストレストコンクリート工学会第 31 回シンポジウム論文集, pp. 411-416, 2022. 10
- 5) 浦上和也, 伊藤大翔, 宮里心一: モルタルの塩化物イオン含有量がステンレス鉄筋の腐食速度に及ぼす影響, 土木学会中部支部研究発表会, 2023. 3

#### 5. 今後の展望

プレテンション PC 構造については、技術的にはすぐにでも実用できる。たとえば、床版取替えに用いるプレキャスト PC 床版にいくつか試験的に適用することが考えられる。

ポストテンション PC 構造用のステンレス鋼製 PC 定着具は実験室内においてプロトタイプを完成させたに過ぎないので、実構造物への適用のためには、製品化し、安定的に、量産できるようにする必要がある。

本研究において開発した技術を広く世の中のインフラに適用するためには、学会の委員会等において、多くの委員の共通認識の下で設計施工基準やガイドラインを策定するのがよいと考える。

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与

本研究で開発した内部鋼材のすべてにステンレス鋼を用いたプレレストレストコンクリート構造は、鋼材の腐食のおそれがないことから、厳しい塩害地域における橋梁に適用した場合、維持管理コストの低減、構造物の信頼性向上に大きく貢献することが期待される。

#### 7. ホームページ等

なし

# 第1章 はじめに

## 1.1 本研究の背景と目的

プレストレストコンクリート構造の耐久性を盤石なものとするためには、鉄筋、PC緊張材、シース、定着具などのすべての内部鋼材を非腐食材料により構成されたPC構造を開発することが有効と着想した。本研究では、既存のステンレス鉄筋、ステンレスPC鋼材、さらに新たに試作したステンレス製のPC定着具を用いて、内部鋼材のすべてにステンレス鋼を用いた高耐久プレテンPCおよびポステンPC構造の開発に取り組んだ。

ステンレス鉄筋については、2008年に土木学会から「ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)」<sup>1)</sup>が刊行され、コンクリート構造物に適用する技術基盤が整えられた。PC橋にも適用され始めている<sup>2)</sup>。一方、ステンレスPC鋼より線を用いたPC構造に関する研究は、これまでも白濱らにより行われている<sup>3)</sup>。しかしまだ、構造設計に必要な技術情報が体系化されておらず、国内では実構造物に適用されていない。そこで本研究では、発想を一段飛躍させ、腐食しないもしくは腐食の可能性が極めて低い材料のみで構成されるPC構造部材の開発を目指すこととした。腐食の懸念が事実上皆無であるPC構造が実現できれば、環境条件、施工品質に左右されることなく、確実に高耐久PC構造が実現できると考えたのである。

研究期間内を通じて、本研究では内部鋼材のすべてにステンレス鋼を用いたプレテンション（以下プレテン）PC構造、ポストテンション（以下ポステン）PC構造の開発に取り組む。ステンレスPC鋼材はすでに製品化されているが、緊張材にステンレスPC鋼材を用いたPC構造は、海外では適用例があるものの国内ではまだ適用されていない。ただし、近年盛んに行われて

いるPC床版を用いた更新の検討過程において、ステンレスPC鋼材をプレテンPC床版の緊張材に用いることが提案される<sup>4)</sup>など、実用化への関心は芽生えている。一方、定着具を含む内部鋼材のすべてをステンレス鋼材としたポステンPC構造は世界に類を見ない。本研究が成功すれば最初の例となる。

## 1.2 研究範囲

以下の課題に取り組む。カッコ内は本報告書における該当章を表す。

### (1) ステンレス鋼材を用いたPC構造の開発

- ステンレスPC鋼より線の引張特性（2章）
- ステンレスPC鋼より線を用いたプレテンションPC部材の力学特性（3章）
- ステンレス鋼を用いたシングルストランド用PC定着具の開発（4章）
- ステンレス鋼を用いたマルチストランド用PC定着具の開発（5章）
- ステンレス製定着具を用いたポストテンションPC部材の力学特性（6章）
- ステンレス鋼製PC鋼材の耐久性に関する検討（7章）
- ステンレス鋼製定着具の耐久性に関する検討（8章）

### (2) ステンレス鋼材を用いたPC構造物の実用化のための検討

- ステンレス鋼を用いたPC構造の設計法の提案（9章）
- ステンレス鋼を用いたPC構造物のライフサイクルコストの検討（10章）
- ステンレスPC鋼材、定着具の規格試案の提案（11章）

## 第2章 ステンレスPC鋼より線の引張特性

### 2.1 実験概要

まずステンレスPC鋼より線（以下SUSPC鋼より線）が従来の普通PC鋼より線と比較してどのような引張特性を有しているかを把握するために引張試験を行った。特に、SUSPC鋼より線は普通PC鋼より線に比べて破断ひずみが小さいことが明らかとなっているので、引張特性を正確に把握し、構造計算と対応付けることが重要となる。そこで、計測方法によるひずみの計測値の違いについても検討した。

使用するPC鋼より線を写真-1に示す。SUSPC鋼より線はSUS304N1鋼材を用いた7本の素線からなる径15.2mmのものを用いた。また、同形状の普通PC鋼より線を比較対象として用いた。

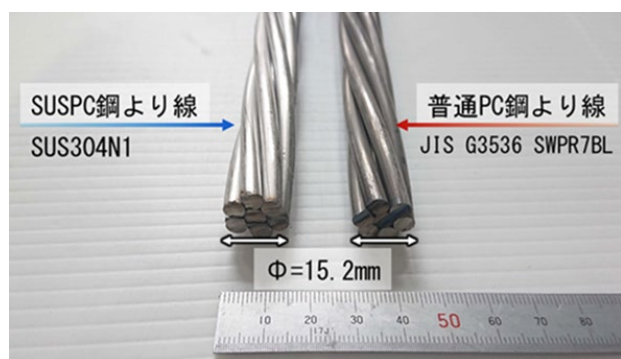


写真-1 使用するPC鋼より線

引張試験は、JISG3536に基づいて行った。載荷は油圧万能試験機を用いて行った。PC鋼より線のひずみの測定は、伸び計、素線に貼り付けたひずみゲージ、クロスヘッドの移動量から算出されるひずみの3通りで行った。ひずみの測定方法の模式図を図-1に示す。

伸び計によるひずみは、伸び計を標点距離600mmで材料に直接取り付け、標点距離の変化をダイヤルゲージで計測することにより算出した。伸び計は鋼材破断の衝撃により損傷する

恐れがあるため、鋼材のひずみが12,000 $\mu$ に達した時点で取り外している。

通常、引張試験の試験成績表で報告される荷重-ひずみ関係と0.2%降伏ひずみの算出には伸び計による計測値が用いられており、破断ひずみの算出にはクロスヘッドの移動量が用いられている。

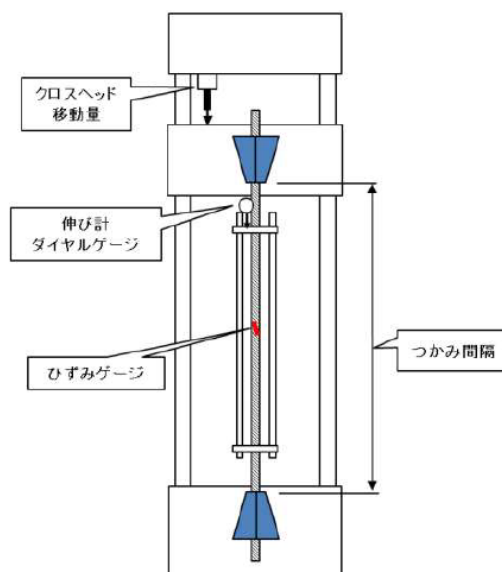


図-1 PC鋼より線のひずみの測定方法

### 2.2 実験結果

図-2に異なるひずみの測定方法で得られたSUSPC鋼より線と普通PC鋼より線の応力-ひずみ関係を示す。クロスヘッド移動量から求めた破断ひずみは、普通PC鋼より線71,000 $\mu$ 、SUSPC鋼より線34,000 $\mu$ であった。

クロスヘッド移動量により測定したひずみは、ひずみゲージおよび伸び計によるデータと比較し、1.5~2倍ほど大きくなっている。これは、クロスヘッド移動量には、端部のより線を

把持する鋼製チャックの食い込みなどが伸び量に含まれるためである。ひずみゲージは厳密にはより線全体のひずみではなくより線を構成する素線のひずみを計測していることになるが、より線全体のひずみを測定している伸び計によるひずみとの差は小さい。

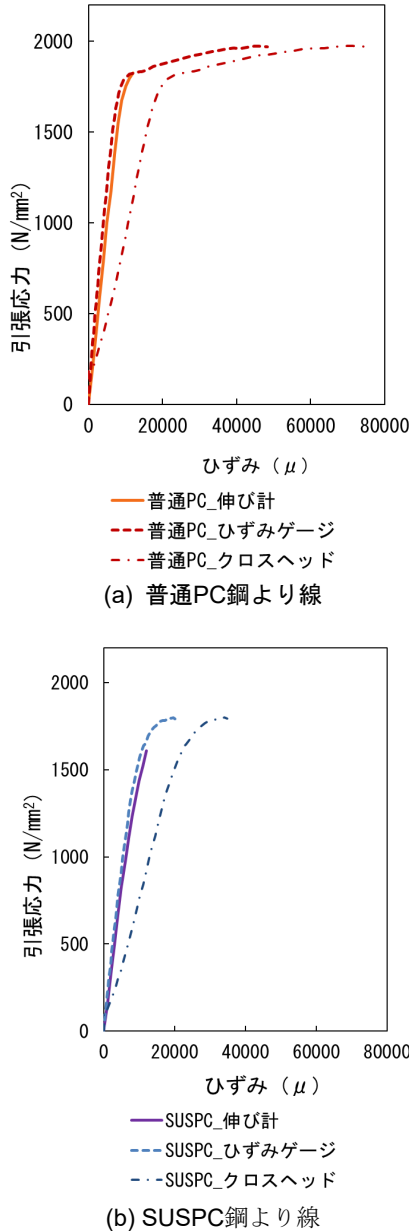


図-2 PC鋼より線の応力-ひずみ関係

構造計算における鋼材ひずみはより線のひずみである。原理的にそれに対応するのは伸び計により計測されたひずみである。ひずみゲージによるひずみもそれとほぼ同じ値となる。クロスヘッドにより得られた破断ひずみを構造計算にそのまま用いると、破断ひずみを大きく見積もることになるので、注意が必要である。

## 2.3 SUSPC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係と破断ひずみの設計用値の提案

### (1) 応力-ひずみ関係

伸び計により計測した普通PC鋼より線の応力-ひずみ関係、ひずみゲージにより計測した普通PC鋼より線の応力-ひずみ関係、コンクリート標準示方書に示されている設計用のPC鋼より線の応力-ひずみ関係モデルを図-3(a)に重ねて示す<sup>5)</sup>。これらを参考に本研究で提案するSUSPC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係を、試験結果とともに図-3(b)に示す。

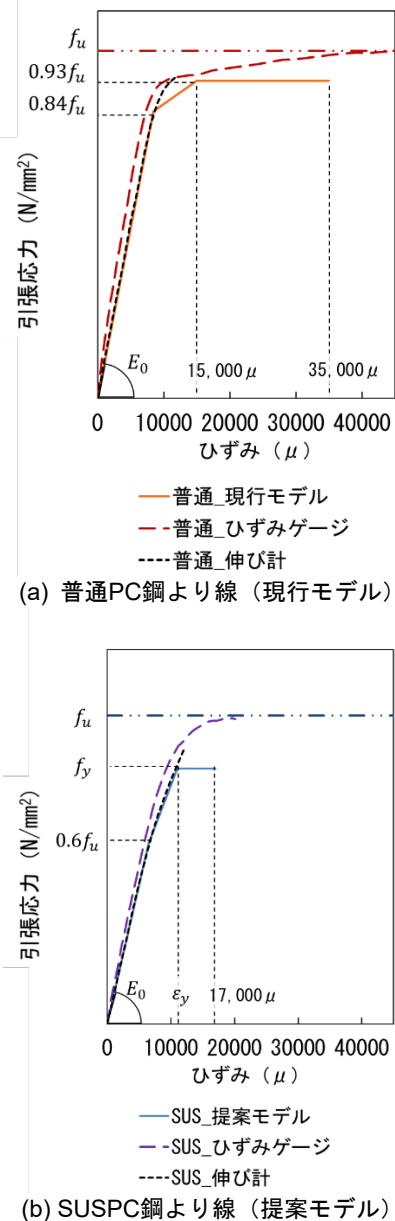


図-3 PC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係

普通鋼より線用の従来のモデルの場合、線形関係が保たれる $0.84P_u$ まで初期剛性の傾きの直



線であり、その後は $0.93P_u$ と $15,000\mu$ ひずみ点を繋ぎ以降は $0.93P_u$ 一定値で伸びるモデルである。

SUSPC鋼より線は普通PC鋼より線と異なる挙動を示すため、新たにSUSPC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係のモデルを提案する。

SUSPC鋼より線は従来の普通PC鋼より線よりも低い応力レベルで剛性が低下するため、一つ目の折れ点を $0.6P_u$ とした。従来のモデルで用いられる $0.93P_u$ に対応するひずみの正確な計測が困難であることから、2つ目の折れ点については、安全側に考慮し降伏強度および降伏ひずみとした。また、降伏強度を応力の上限值とし、以降は一定値とした。

## (2) 破断ひずみ

普通鋼より線とSUSPC鋼より線の破断ひずみについて表-1にまとめる。

本試験で用いた普通PC鋼より線の破断ひずみはJIS規格で定められたクロスヘッドの移動量から求めた $71,000\mu$ である。これは、JIS規格で定められた破断ひずみの最低保証値の $35,000\mu$ の倍程度である。これに倣い、SUSPC鋼より線においてもクロスヘッドの移動量から求めた $34,000\mu$ の半分程度を目安とすることとした。また、具体的な数値の決定には、 $12,000\mu$ 以降に伸び計により測定された伸びが $17,000\mu$ であることから、これを破断ひずみの設計用値とした。

表-1 PC 鋼より線の破断ひずみの設計用値

	クロスヘッド移動量から求められる破断ひずみ( $\mu$ )	破断ひずみの設計用値( $\mu$ )
普通 PC 鋼より線	71,000	35,000
SUSPC 鋼より線	34,000	17,000

## 2.4 まとめ

本章では、SUSPC鋼より線の引張試験の結果から、SUSPCより線の応力-ひずみ関係や破断ひずみに関して検討を行った。

- PC鋼より線のひずみは測定方法により相違があることが確認された。設計計算で用いるより線のひずみに対応するのは伸び計により測定されたひずみである。ひずみゲージで測定されるのは正確には素線のひずみであるが、弾性範囲では伸び計により測定されたより線のひずみに近い値であることが確認された。クロスヘッドの移動量より求めたひずみは、伸び計やひずみゲージで測定されたひずみよりも1.5～2倍程度大

きな値となるので、設計に用いるには注意が必要である。破断ひずみは伸び計での測定は困難であるので、ひずみゲージやクロスヘッドの移動量より求めたひずみを参考にしなければならないが、より線の真のひずみより2倍程度大きい値であることに注意しなければならない。

## 2.4 まとめ

- SUSPC鋼より線は普通鋼PCより線と比較し、低い応力レベルで剛性の低下がみられた。
- SUSPC鋼より線は、普通PC鋼より線と比較し、破断ひずみが小さく、本試験ではひずみが $20,000\mu$ 程度で破断することが確認された。
- 試験により明らかとなったSUSPC鋼より線の引張特性を踏まえて、新たにSUSPC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係と破断ひずみの設計用値を提案した。

# 第3章 ステンレスPC鋼より線を用いたプレテンションPC部材の力学特性

## 3.1 プレストレス伝達特性

プレテンションPCにおいて、PC鋼より線とコンクリートとの付着によるプレストレスの伝達特性をSUSPC鋼より線と普通PC鋼より線とで比較した。試験体概要を図-4に示す。SUSPC試験体、普通PC試験体それぞれ、短期計測用と長期計測用の試験体を作製した。ひずみゲージを貼付けたD6鉄筋をPC鋼より線に沿わせてコンクリート中に埋設し、プレストレスによってコンクリートに発生するひずみ分布を計測した。コンクリート打設後18日間湿布養生を行い、その後脱枠し10日間気中養生を行い、材齢29日でプレストレス導入を行った。プレストレス導入時のコンクリート強度は $58\text{N/mm}^2$ であった。

図-5(a)にプレストレス導入直後のコンクリートのひずみ分布を示す。SUSPCの方が普通PCよりも部材端部からのひずみの勾配が生じる区間が短い。すなわち、SUSPC鋼より線の方が普通PC鋼より線よりも付着によるコンクリートとの応力伝達に優れることがわかる。図中の計算値は付着応力伝達長を $33\phi$ とした計算値である。

付着応力伝達の経時変化を確認するため半年間の計測を行った。静置場所は長岡技術科学大学内の大型実験棟の屋内である。プレストレ

ッシングから182日後のコンクリートのひずみ分布を図-5(b)に示す。全計測点のひずみが増加している。これは、コンクリートの乾燥収縮およびプレストレスによるクリープによるものである。また、伝達長においては特筆すべき変化は見られず、182日経過後もプレストレッシング直後と同様に普通PCで $450\sim 400\text{mm}$ 、SUSPCで $200\sim 250\text{mm}$ であった。

SUSPC鋼より線の方が普通PC鋼より線よりも付着によるコンクリートとの応力伝達に優れる原因は、普通PC鋼より線とSUSPC鋼より線の製造工程の違いにあると考えられる。PC鋼より線は、素線を伸線加工する際に潤滑剤を用いる。普通PC鋼より線は製造後に脱脂を行わないことで潤滑剤を残し、副次的な防錆効果を期待している。一方、SUSPC鋼より線は脱脂を行い、表面を空気に触れさせることで、クロムと空気中の酸素とが結合し緻密な不動態被膜が形成される。表面に残存する潤滑剤の有無がコンクリートとの付着性状の違いを生み出していると考えている。

なお、SUSPC鋼より線の方が普通PC鋼より線よりもコンクリートとの付着に優れるが、その差は大きくないので、その性質を積極的に考慮しない場合は設計上従来の普通PC鋼より線と同じとみなしても問題ないと考えている。

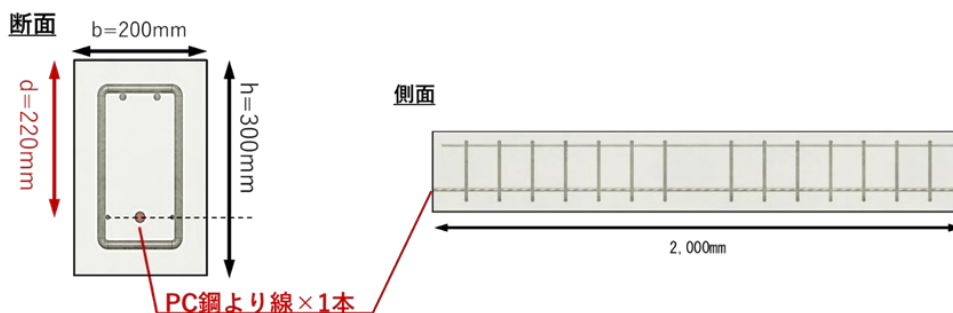
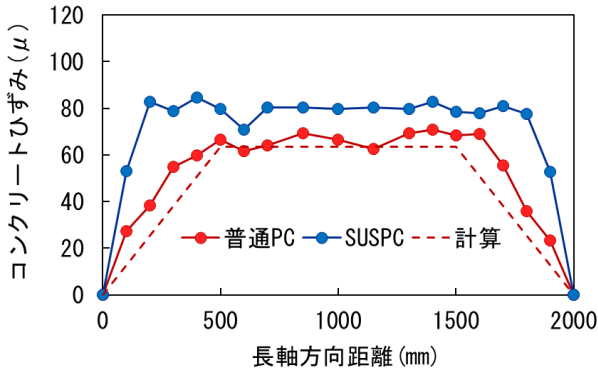
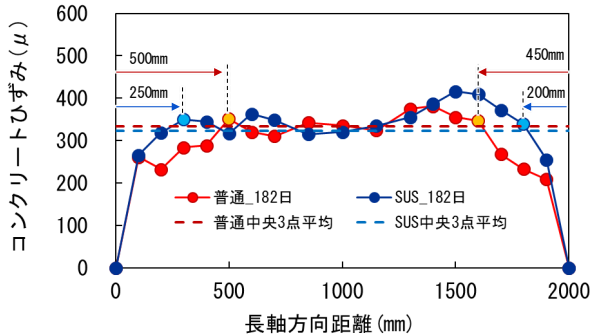


図-4 伝達長測定用試験体



(a) プレストッシング直後（短期試験体）



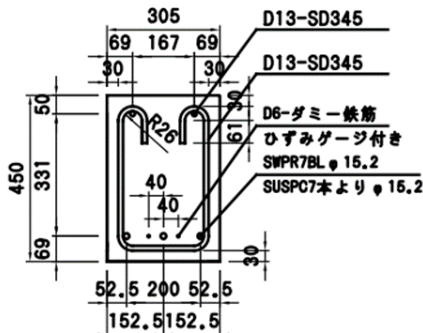
(b) プレストッシングから182日後（長期試験体）

図-5 プレストレス導入によるコンクリートのひずみ分布

### 3.2 曲げ耐荷性状

#### (1) 実験概要

PC 鋼より線を 3 本配置した全長 7m のプレテン PC 試験体を作製し、曲げ試験を行った。図-6 に試験体概要を示す。普通 PC 鋼より線を用いた試験体と SUSPC 鋼より線を用いた試験体の 2 体を試験した。SUSPC 鋼より線を用いた試験体は、せん断補強鉄筋、上縁鉄筋ともにステンレス鉄筋を用いた。実験に使用したコンクリートの配合を表-2 に、鋼材の種類を表-3 に、載荷試験時のコンクリートの強度と弾性係数を



支間・載荷点

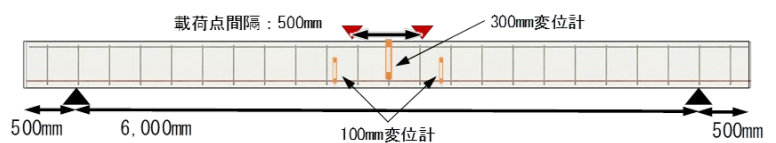


図-6 載荷試験用プレテンションPC試験体

表-4 に、PC 鋼より線の強度と弾性係数を表-5 にそれぞれ示す。

表-2 示方配合

粗骨材最大寸法 G <sub>max</sub> (mm)	水セメント比 W/C (%)	粗骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 A (g/m <sup>3</sup> )
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
20	38	42	153	403	742	1036	2.42

表-3 使用鋼種・製品一覧

試験体名	PC 鋼より線	せん断鉄筋	上縁鉄筋
普通 PC	SWPR7BL	SD345(D13)	SD345(D13)
SUSPC	SUS304N1	SUS SD345(D13)	SUS SD345(D13)

表-4 載荷試験時のコンクリートの圧縮強度

試験体名	材齢 (days)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
普通 PC	73	60.5	39714.4
SUSPC	83	62.4	34308.5

表-5 PC 鋼より線の各種強度および弾性係数

PC 鋼より線	0.2%降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
普通 PC	1776	1940	194000
SUSPC	1500	1769	163000

導入緊張力は普通 PC 試験体 357kN, SUSPC 試験体 371kN とした。コンクリート打設後、蒸気養生を行い、材齢 3 日でプレストレスを導入した。載荷試験用試験体はオリエンタル白石技術研究所（栃木県真岡市）で製作し、長岡技術科学大学（新潟県長岡市）に運搬し、試験した。

曲げ載荷試験は図-6 および写真-2 に示すように、支点間距離 6000mm, 載荷点間距離 500mm の 2 点載荷により行った。載荷時材齢は普通 PC 試験体は 73 日, SUSPC 試験体は 83 日であり、載荷試験時のコンクリート強度はそれぞれ 60.5N/mm<sup>2</sup>, 62.4N/mm<sup>2</sup>であった。



写真-2 プレテンションPC試験体載荷試験状況

## (2) 載荷試験結果

図-7 に両試験体の荷重-中央変位関係を示す。曲げひび割れ発生荷重は、普通 PC が 93.02kN, SUSPC が 89.52kN と両試験体で同程度であった。コンクリート強度も同水準であったことから、残存するプレストレスは同程度であったと考えられる。

図-8 に示すように、曲げひび割れ性状も両試験体で酷似しており、特段の違いは認められなかった。

写真-3 に示すように、破壊モードは、普通 PC 試験体は上縁コンクリートの圧縮破壊、SUSPC 試験体は鋼材破断となった。実験計画時には SUSPC 試験体の破壊モードが鋼材破断となることを意図したわけではないが、材料試験で得られた破断ひずみ  $34,000\mu$  をより線の真の破断ひずみと考えていたため、結果的に鋼材破断モードとなった。本試験結果を受けて、2 章で述べたように SUSPC 鋼より線の破断ひずみの設計用値の設定の重要性にあらためて気づいた次第である。

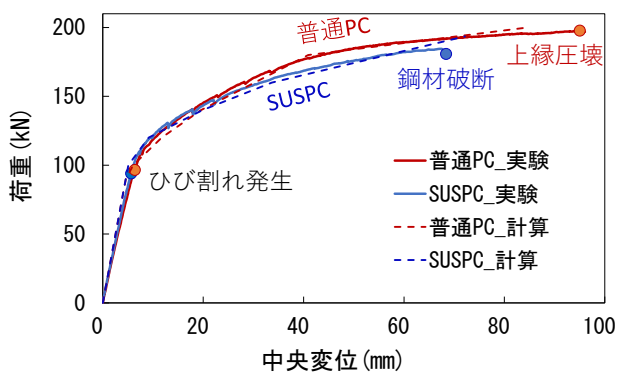


図-7 プレテンションPC試験体の荷重-たわみ関係

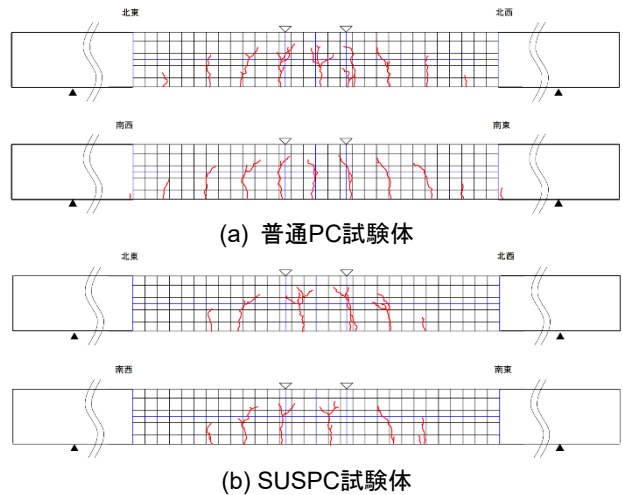
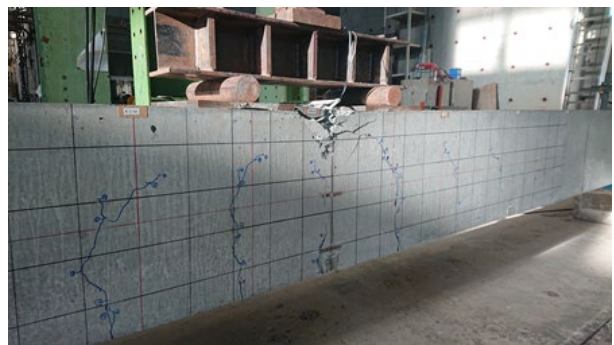


図-8 プレテンションPC試験体の曲げひび割れ性状



(a) 普通PC試験体 (上縁圧壊)



(b) SUSPC試験体 (鋼材破断)

写真-3 プレテンションPC試験体の破壊状況

実構造物では破壊モードが鋼材破断であると、構造物の突然の崩壊につながるため、避けなければならない。現在の設計法では、十分な伸び能力のある普通PC鋼材の使用を前提としているので曲げ終局時において鋼材ひずみが破断ひずみに達していないことの確認は省略してよいこととなっている<sup>5)6)</sup>。しかし、SUSPC 鋼より線は破断ひずみが小さいのでこの前提は無条件に満足されるわけではない。したがって、設計では曲げ終局時すなわちコンクリート上縁圧壊時に鋼材が破断ひずみに達していないことの確認を省略せずに実施する必要がある。

ると考えられる。

### (3) 曲げ耐荷性状の再現解析

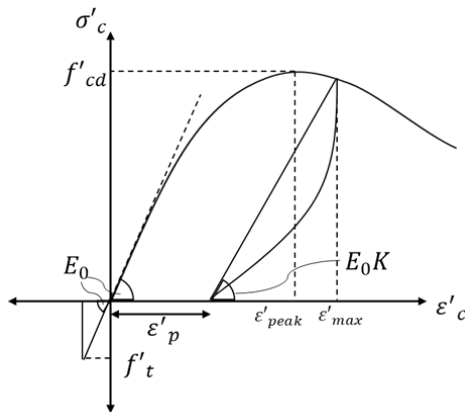


図-9 計算に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係

図-7には、材料試験で得られた図-2のPC鋼より線の応力-ひずみ関係を忠実にトレースしたモデルにより与え、コンクリートの応力-ひずみ関係は図-9のモデル<sup>5)</sup>を用い、鋼材の完全付着を仮定した曲げ解析より得られた両試験体の荷重-たわみ関係の計算結果を重ねて示している。両試験体ともに実験結果が良好に再現できており、SUSPC鋼より線を用いたプレテンションPC部材の曲げ耐荷性状が、普通PCに対する従来の計算仮定に基づき表現できることが確かめられる。

### (4) 設計用SUSPC鋼より線の応力-ひずみ関係の検証

2章で提案したSUSPC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係のモデルを用いてプレテンションPC試験体の荷重たわみ関係を再計算したものを図-10に示す。

荷重が約150kN未満の場合両試験体において実験値と計算値とで精度よく再現できていることが分かる。また、SUSPCの提案モデルにおいて、150kN以降で実験値から乖離している。これは、鋼材ひずみが降伏ひずみに達しモデルの一定値の区間に到達したためである。SUSPC鋼材を用いた実構造物の設計においては、破壊モードが鋼材破断モードとなることを避けるため、実験で見られたこのような大ひずみ領域に鋼材のひずみが到達する前に上縁コンクリートの圧壊により終局となるように設計することになるので、その範囲ではここで示した計算方法でも十分な再現性が実現されているといえる。

普通PCにおいては、破断までひずみが大きく、

降伏以降は剛性が大きく低下し示方書モデルのように $0.94P_u$ 以降を一定値とした場合でもある程度の近似が可能である。そのため、普通PC試験体においては終局レベルまで高い精度で実験を再現できている。

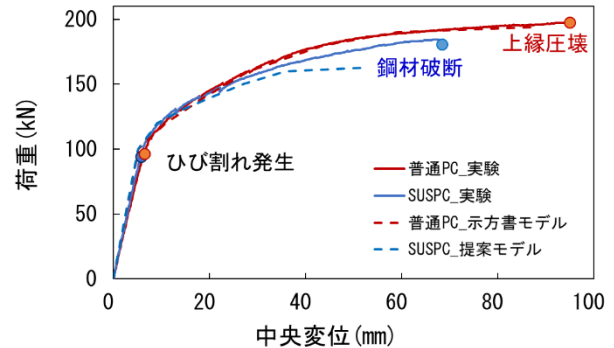


図-10 提案した設計用PC鋼より線の応力-ひずみ関係を用いたプレテンションPC試験体の再現解析

### 3.3 まとめ

本章では、ステンレスPC鋼より線を用いたプレテンションPC試験体の力学性状について検討した。

- SUSPC鋼より線は普通PC鋼より線よりと同等以上のコンクリートとの付着性能を有する。設計では普通PC鋼より線と同じ付着伝達長を仮定してよい。
- SUSPCと普通PCとでは曲げひび割れ分散性に違いはなかった。
- SUSPC鋼より線は破断ひずみが小さいため、曲げ終局時に鋼材破断モードとならないように設計段階において確認する必要がある。
- 普通PC鋼より線を用いたプレテンPC部材と同様に、SUSPC鋼より線を用いたプレテンPC部材の曲げ載荷試験の実験値は、従来の計算仮定を用いた計算により精度よく再現することができた。このことから、SUSPC鋼より線を用いたプレテンPC部材は従来の設計法により設計可能であるといえる。

## 第4章 ステンレス鋼を用いたシングルストランド用PC定着具の開発

### 4.1 はじめに

くさび式の定着具は、ウェッジとアンカーヘッドおよび支圧板で構成される。PC鋼より線に緊張力が作用することで、PC鋼より線とともにウェッジがアンカーヘッドのテーパ孔内へ引き込まれることで、ウェッジの把持力が向上するというくさび作用によりPC鋼より線を定着する機構である（図-11）。この機構はシングルストランドタイプ（モノストランドタイプともいう）でもマルチストランドタイプでも同じであり、一般にそれらに用いられるウェッジは同一のものである。そこで、コンクリートと組み合わせ合わせて試験をして特徴をつかめるなど利点があるため、マルチストランドタイプ定着具の開発に先立って実験規模の小さいシングルストランドタイプ定着具の開発を行うこととした。

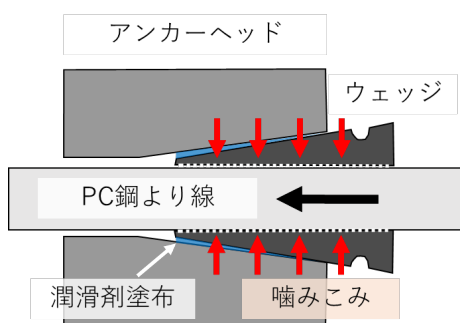


図-11 くさび式定着具の定着機構

### 4.2 試験方法

写真-4.5に引張試験状況を示す。引張試験は写真-4に示す縦型の2000kN油圧式万能試験機にて実施した。固定側（写真下部）は試験機チャックにて定着し、緊張側（写真上部）は写真-5に示すように試作したステンレス鋼製定着具

を設置し、50kNで測定を行ったのち安全のため金属製の箱で覆った。試験に使用したPC鋼より線は、日鉄SGワイヤ株式会社製の高防食ステンレスPC鋼より線7本より直径15.2mmであり、試験機チャックから定着具までのステンレスPC鋼より線の定着間距離は概ね1200mmとした。載荷速度はJIS規格「PC鋼線及びPC鋼より線」（JIS G 3536 2014）の10.2「引張試験」に規定される力を加える速度に準拠し、引張試験における載荷ひずみ速度が0.5~50（%/min）の範囲内になるよう定着間伸び量を7（mm/min）で変位制御した。

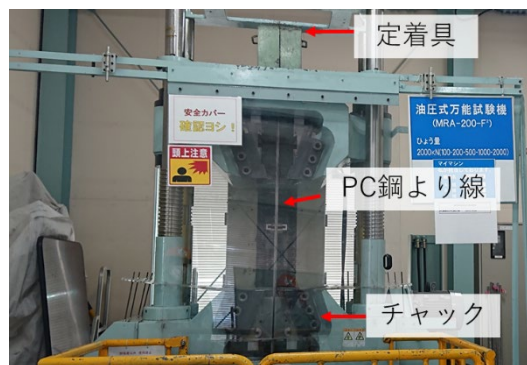


写真-4 引張試験の様子



写真-5 定着具設置状況

試験荷重および破断伸びのほかに、定着具各位置での突き出し量や外径を測定した。また、試験ステップは載荷前、試験荷重が20kN時、50kN時、ストランド破断後の4回とした。

### 4.3 定着具開発の方法

#### (1) 開発目標

土木学会プレストレストコンクリート工法設計施工指針<sup>7)</sup>の規定に基づき、以下の開発目標を設定した。

- ① 付着のない状態での静的引張試験において、定着効率95%以上(破断荷重が緊張材の規格引張荷重の95%以上)を満足すること
- ② 緊張材の規格引張荷重以下で定着具が破壊したり著しい変形を起こしたりしないこと

#### (2) 課題

くさび式定着具は、ウェッジの内径歯がPC鋼より線に噛みこむことでPC鋼より線を定着し、ウェッジの内径歯がPC鋼より線に噛みこむためにはウェッジの硬度がPC鋼より線より高い必要がある。PC鋼より線はその製造工程において伸線加工をされており、表面硬度がおおよそHv420となり、特に処理を行っていないステンレス鋼に比べ非常に高い。そこで定着具開発の際にはウェッジ鋼材に処理を行って硬度を高めることになるが、一般にステンレス鋼は硬度を高くすると耐食性や靱性が低下する。よって、ステンレス鋼の耐食性をなるべく落とさないうまPC鋼より線よりも硬いウェッジを作製する必要がある。

### (3) 開発に使用したステンレスの鋼種と処理

表-6に使用したステンレス鋼の種類と用途を示す。表-7に処理の種類を示す。

表-6 使用したステンレス鋼の種類と用途

系統	鋼種	本研究での使用用途
オーステナイト系	SUS304	ウェッジ, アンカーヘッド, 支圧板
	SUS304N1	PC鋼より線
	SUS304N2	鉄筋
フェライト系	SUS430	ウェッジ, アンカーヘッド
マルテンサイト系	SUS420J2	ウェッジ, アンカーヘッド
析出硬化系	SUS630	ウェッジ, アンカーヘッド

表-7 処理の種類と施した鋼種

処理の種類	鋼種	
固溶化熱処理	オーステナイト系 析出硬化系	SUS304
		SUS630
焼きなまし処理	フェライト系 マルテンサイト系	SUS430
		SUS420J2
焼入れ焼き戻し処理	マルテンサイト系	SUS420J2
析出硬化処理	析出硬化系	SUS630
Hi-Nito 処理	フェライト系 マルテンサイト系	SUS430
		SUS420J2

#### (4) 開発の流れ

図-12に開発の流れを示す。大きく分けて6回の定着具の試作、引張試験を行った。



図-12 定着具開発の流れ

## 4.4 試験結果

以下に試験ごとのまとめを記す。

### (1) 第1回, 第2回試験

ウェッジ：SUS420J2にHi-Nito処理

アンカーヘッド：SUS304

定着効率は95%を満足したがウェッジ先端、後端が欠けた（図-13）。潤滑剤を5種類試験し、潤滑剤の種類によって定着効率やウェッジの破壊を制御することは難しいと考え、次回から最も定着挙動が滑らかなモリコートGペーストに固定した。

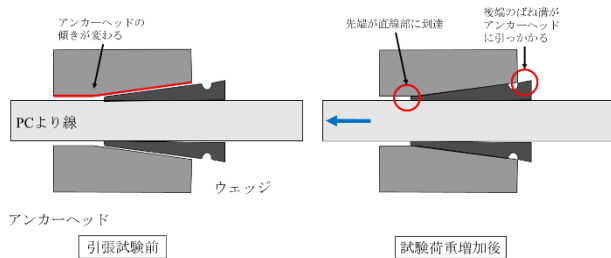


図-13 ウェッジ破損の原因

### (2) 第3回, 第4回試験

ウェッジ：SUS430にHi-Nito処理

アンカーヘッド：SUS304, SUS430にHi-Nito処理

第1回, 第2回試験結果よりウェッジの表面硬度はHv630前後で定着可能であると考え、その硬度で製作でき、より靱性・耐食性の高いSUS430にウェッジ鋼種を変更した。またウェッジの先端後端欠けに対策するため、外径の太径化および後端の細径化を行った。試験結果はアンカーヘッドにSUS304を用いたケースは定着効率95%を満足し、また先端後端の欠けは対策を行ったケースでなくなった。しかしウェッジに横割れが発生した（写真-6）。



写真-6 ウェッジの横割れ

### (3) 第5回試験

ウェッジ：SUS430にHi-Nito処理

アンカーヘッド：S45C

ウェッジの横割れはアンカーヘッドの硬度によるものか確かめるため、ステンレス製のウェッジと普通鋼製のアンカーヘッドを組合わせて試験した。結果としてアンカーヘッドを変えても横割れは発生したため、割れはアンカーヘッド鋼種によるものであるとは考えにくい。

### (4) 第6回, 第7回試験

ウェッジ：SUS420J2にHi-Nito処理と酸洗, 未酸洗, SUS630

アンカーヘッド：SUS304, SUS630

第1回, 第2回試験ではウェッジに横割れが起きなかったことに着目し、ウェッジ鋼種をSUS420J2に戻し、Hi-Nito処理を行った。また耐食性の観点から酸洗処理の有無による定着性能も確認した。横割れが起こらないことを期待したが、目標よりもはるかに低い荷重レベルで横割れが発生した。

### (5) 第8回試験

ウェッジ：SUS420J2焼き入れ焼き戻し

アンカーヘッド：SUS420J2焼きなまし, 焼入れ焼き戻し, SUS304

ウェッジ横割れの改善のために、いままでの表面処理に比べて内部まで硬度が高くなる焼入れ焼き戻し材でウェッジを試作しアンカーヘッド3種類を組合わせて試験するとアンカーヘッド鋼種によって試験後の割れ方が異なっていた。最も硬いSUS420J2の焼入れ焼き戻し材ではウェッジは完全に割れ、中間の硬さのSUS420J2の焼きなまし材では一部割れがないものもあったが微小な割れが発生、最も柔らかいSUS304の場合にはウェッジ後端の割れはなかったものの先端が欠けた。本試験の中で初めて目標を満たす試験ケースができた。

### (6) 第9回, 10回試験

ウェッジ：SUS420J2焼き入れ焼き戻しで硬さHv580,585,600,625の4水準

アンカーヘッド：SUS420J2, SUS403焼きなましで開口部拡大およびテーパ角変更

アンカーヘッドのテーパ角変更とウェッジの靱性向上により、安定して定着効率95%および破壊や変形の起こらない定着具の開発ができた。最終的な仕様を以下にまとめる。

#### i. ウェッジ

鋼種は、SUS420J2の焼入れ焼き戻し材で硬さHv585~600とする。

形状は、標準寸法から+1.4mmで後端を細径化したものとする。

#### ii. アンカーヘッド

鋼種は、SUS420J2の焼きなまし材とする。



形状は、現状普通鋼のものより、開口部を拡大し、テーパ角はウェッジと同角度のものとする。

### iii. 潤滑剤

潤滑剤はモリコートGペーストとする。

## 4.5 セットロス

緊張材を定着具に定着する際に、緊張材がくさび等とともに定着具に引き込まれる(図-14)。くさび式定着具では比較的大きいセット量を生じるため、セット量をあらかじめ調査しておく、その値を安全側に仮定して、緊張材の引張力の減少量とその影響範囲を検討しておくなければならない<sup>5)</sup>。本章で開発したステンレス製定着具のセット量を把握し、それにより減少するPC鋼材の緊張力(セットロス)を求めた。長岡技術科学大学内の大型実験棟地下室の柱で緊張力の反力を取り、ステンレスPC鋼より線に緊張を行った。

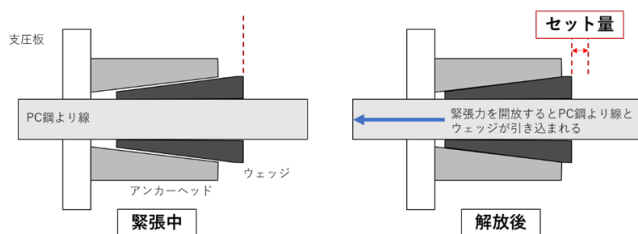


図-14 セットの模式図

その結果、セット量は約4mmであり、標準的なセット量と大差ない結果であることが確認された。

## 4.6 まとめ

ステンレスPC鋼より線を、定着効率95%以上で定着することができ、かつ破壊や変形の起こらないステンレス鋼製のシングルストランド用PC定着具(写真-7,8,表-8)を開発した。



写真-7 ステンレス鋼製アンカーヘッド



写真-8 ステンレス鋼製ウェッジ

表-8 ステンレス鋼製定着具の鋼種など

ウェッジ	鋼種	SUS420J2
	熱処理	焼入れ焼き戻し
	外径太径化	+1.4mm
	後端細径化	対策あり
アンカーヘッド	鋼種	SUS420J2
	処理	焼きなまし
	内径	+φ1.8mm
	修正角度	大

# 第5章 ステンレス鋼を用いたマルチストランド用PC定着具の開発

## 5.1 はじめに

実橋においてPC工法ポストテンション方式を適用する際、シングルストランド定着具を用いることはほぼなく、複数本のストランド（一般的に7本，12本，19本）を一括定着するマルチストランド用定着具が用いられる。

そこで一般的に適用される12本タイプのマルチストランド定着具の開発を進めることとした。ウェッジについてはシングルストランド用定着具もマルチストランド用定着具も同様である。アンカーヘッドについては材質，硬度，ウェッジ孔形状はシングルストランド用定着具の仕様を踏襲し，アンカーヘッド外径を大きくし，ストランド本数分だけウェッジ孔を設ける必要がある。

本章では，12本タイプのステンレス製マルチストランド用定着具を試作し，引張試験を実施した内容について報告する。

## 5.2 試験方法

### (1) 試験機概要

株式会社エスイー山口工場が所有する5500kN横置き引張試験機を用いて，12本タイプのマルチストランド用定着具の定着性能確認試験を実施した（写真-9）。

試験機の定着点間距離は約4000mmであり，試験機両端にそれぞれマルチストランド用定着具を配置し，ステンレスPC鋼より線12本を配線，ウェッジで仮定着した後，試験機に装着された油圧ジャッキを作動させ，ケーブルに引張荷重を作用させる。

### (2) 測定項目と測定方法

定着性能確認試験時の測定項目および測定方法については基本的にシングルストランド

定着具での引張試験と同様である。

①載荷荷重，②ケーブル伸びについては，引張試験機に内蔵，付属されたロードセル，伸び測定器具により載荷中随時リアルタイムで測定した。③破断形態については，最大荷重到達前に破断した際に破断部の状況を目視にて観察することとした。④ウェッジ突き出し量，⑤ウェッジ外径，⑥アンカーヘッド外径については，デジタルノギスを用いて測定した。



写真-9 マルチストランド定着具の定着性能確認試験状況

## 5.3 供試体

マルチストランド供試体は，ステンレスPC鋼より線，ウェッジ，アンカーヘッド，ウェッジ-アンカーヘッド界面の潤滑剤によって構成される。本試験でのそれぞれの仕様は概ねシングルストランド用定着具の開発にて確立されているが以下の表-9の通りである。アンカーヘ

ッド形状概要図を図-15に示す. 試験前のアンカーヘッドとウェッジを写真-10に示す.

表-9 供試体の各材料・部品仕様

材料・部品名称	仕様
ステンレス製 PC 鋼より線	シングルストランド引張試験適用品と同一ロット (母材破断強度: 239kN)
ウェッジ	材質: SUS420J2, 表面硬度: Hv600 外径: 標準+1.4mm 増厚
アンカーヘッド	材質: SUS420J2, 表面硬度: Hv207 ウェッジとの角度差: 0° ※アンカーヘッド外径, 高さ, 孔配置については株式会社エスイーの普通 PC 鋼より線用 FUT12T アンカーヘッド寸法を踏襲し, ウェッジが装着されるテーパ孔形状についてのみ一連のシングルストランド定着具開発で確立した形状としている.
ウェッジアンカーヘッド 界面の潤滑剤	東レ・ダウコーニング社製 モリコート G ペーストを薄くウェッジ背面側に塗布

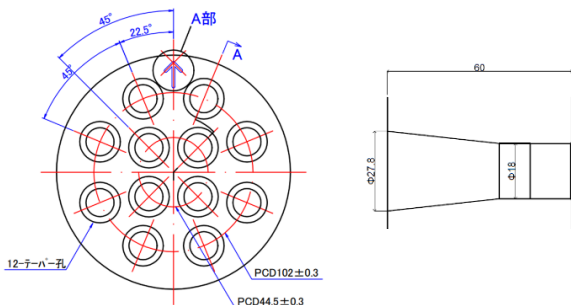


図-15 アンカーヘッド形状概要図



写真-10 試験前アンカーヘッド, ウェッジ

## 5.4 試験結果

本試験では最大載荷荷重をステンレスPC鋼より線の規格荷重222kNの95%以上とした. 具体的な最大載荷荷重は,  $12本 \times 222kN \times 0.95 \simeq$

2531kN以上となる.

試験の結果, 供試体3ケーブルすべてにおいて, 破断することなく規格荷重の95%以上に到達したため, そこで試験終了とした. 載荷試験中のアンカーヘッド外径, ウェッジ外径の測定結果より, 著しい変形は認められなかった. しかし, 載荷試験後, 各供試体で緊張側・固定側全24個のウェッジのうち, それぞれ1個もしくは2個のウェッジにて微小な亀裂が確認された(写真-11).



写真-11 ウェッジ亀裂状況 (供試体No.2)

この亀裂の原因は, マルチストランド用定着具の試験では試験体を水平方向に手作業でセットするため, 十分な設置精度を確保することが難しく, いくつかのウェッジに設置不整があるまま載荷したことによると考えている. 亀裂は微小であり, 定着性能に悪影響を及ぼすものではないと判断できる.

定着性能は確保されていることから, 本研究で到達目標としたステンレス製マルチストランド用PC定着具のプロトタイプを試作には成功したものと考えている.

## 5.5 まとめ

4章で開発したステンレス製シングルストランド用PC定着具のアンカーヘッドとウェッジの仕様をもとに, 12本のマルチストランド用PC定着具を製作し, 定着性能試験を行った. PC鋼より線の規格荷重の95%以上の荷重に対する定着を満足することを確認した.

# 第6章 ステンレス製定着具を用いたポストテンションPC部材の力学特性

## 6.1 実験概要

### (1) 試験体

製作したポストテンションPCはり試験体の寸法を図-16に示す。同断面でせん断スパン比の異なる大型はりと小型はりの2種類を作製した。それぞれ大きさのはりについて、定着具、PC鋼より線、鉄筋のすべてにステンレス鋼を用いた SUSPC試験体 (S3.5とS7.0) と、鋼材すべてが普通鋼である普通PC試験体 (N3.5とN7.0) を製作した。PC鋼材の配置は2段×3本の計6本とした。ステンレスPC鋼より線は普通PC鋼より線に比べて降伏後の伸びが小さく、はりの破壊時に鋼材降伏が先行する曲げ引張破壊に設計するのが難しいため、鋼材量を増やして曲げ圧縮破壊となるよう設計した。緊張材は直線配置としている。シーすには、内径35mm、外径42.5mmのポリエチレンシーすを用いた。

表-10に実験に使用したコンクリートの配合を示す。大型はり、小型はりに共通である。表

-11にPC鋼より線の物性値を示す。PC鋼より線はステンレス鋼、普通鋼ともに7本よりの直径15.2mmのものを用いた。

表-10 コンクリートの配合

W/C (%)	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
					C	W	S 砂	S 砕砂	G(20) 砕石	AE 減水剤
43	36	12	4.5	45.8	398	171	544	239	947	4.38

表-11 PC鋼より線の物性値

	SUSPC 鋼より線	普通 PC 鋼より線
種類	SUS304N1	SWPR7BL
より本数	7本	7本
直径 (mm)	15.2	15.2
公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	138.7	138.7
最大試験力 (kN)	248	272
0.2%永久伸びに対する試験力 (kN)	218	249
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	159	191

定着具は開発したステンレス鋼製のくさび式シングルストランドタイプ定着具と、普通鋼製のくさび式シングルストランドタイプ定着具を用いる。ステンレス製定着具は4章で述べ

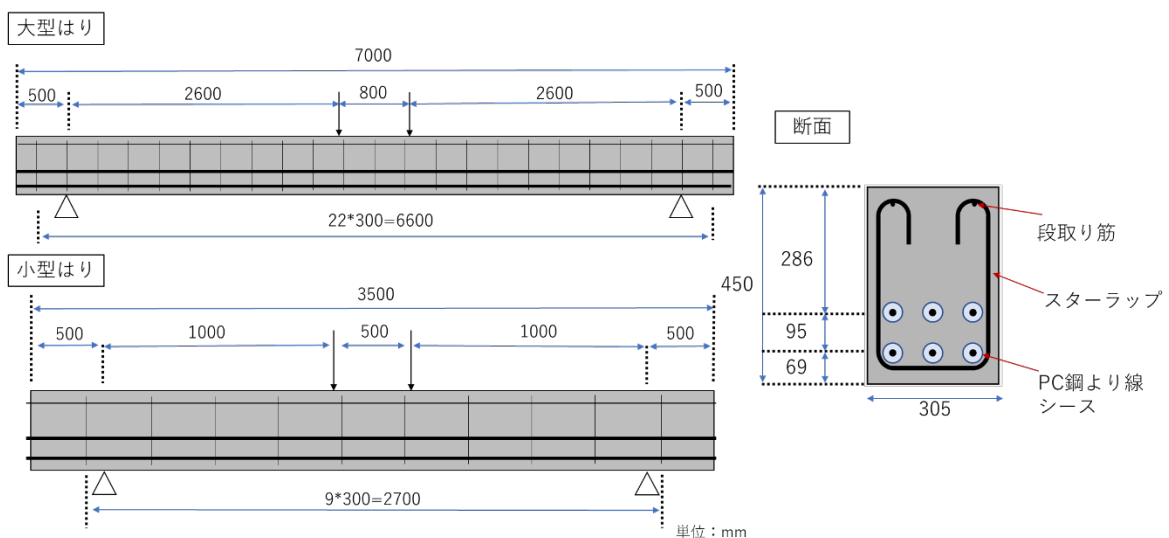


図-16 ポストテンションPCはり試験体

た最終仕様のものではなく、表-12に示す開発途中のものを用いた。なお、最終仕様でなくても定着性能は問題なく満足している。

表-12 ステンレス製定着具の鋼種など

ウェッジ	鋼種	SUS420J2
	表面処理	Hi-Nito
	戻し温度	300℃
	外径太径化	+0.8mm
	後端細径化	対策あり
アンカー ヘッド 支圧板	鋼種	SUS304
	処理	固溶化熱処理

## (2) 試験体の製作

ポステンPCはり試験体はオリエンタル白石株式会社技術研究所（栃木県真岡市）にて製作した。プレストレスの導入はコンクリート打設から7日後に所定強度の36 (N/mm<sup>2</sup>) に達していることを確認してから行った（写真-11）。緊張荷重はすべてのはりで112 (kN) とした。これは大型はりにおいて緊張時にコンクリート上縁の引張応力がコンクリートの引張強度を超えないように設定した値である。

プレストレス導入から4日後、あらかじめシーすに取り付けたホースよりグラウトを注入した（写真-12）。グラウトは超低粘性型のプレミックスタイプを用いた。

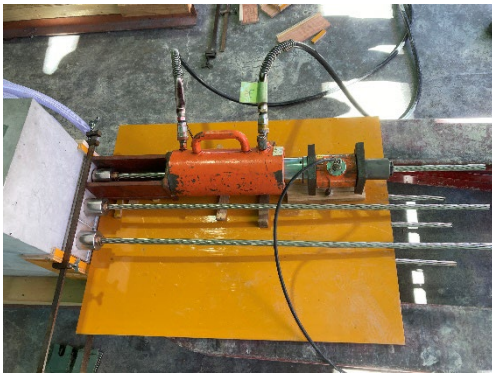


写真-11 緊張作業



写真-12 グラウトの注入作業

グラウト工から3日後（材齢14日）オリエンタル白石株式会社技術研究所から搬出し、翌日に長岡技術科学大学（新潟県長岡市）に搬入し、順次載荷試験を行った。

## 6.2 プレストレスの減少

緊張後から曲げ載荷試験までの期間における大型はり試験体におけるPC鋼より線のひずみの減少量を図-17に示す。途中の欠測は試験体の運搬によるものである。図に示すひずみの減少は、鋼材のリラクセーションのほかにコンクリートの乾燥・クリープ、温度などの影響を含んでいる。ただし両試験体はコンクリート、寸法、導入プレストレス力、環境条件が共通しているため、ひずみの減少に違いがあるとすればPC鋼より線のリラクセーションの違いによるといえる。しかし、両試験体の試験値に大きな差はなく、本試験の範囲内ではSUSPC鋼より線と普通PC鋼より線とで鋼材のリラクセーションの有意な違いは認められなかった。図-18には長岡技術科学大学に搬入後の全試験体の鋼材ひずみの減少量を示している。試験体間の有意な差異は認められない。

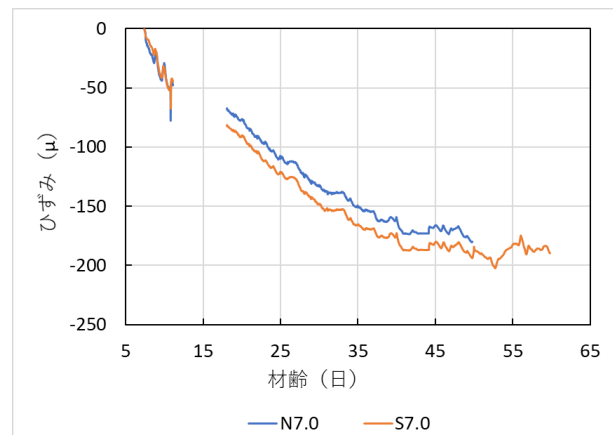


図-17 大型はり試験体のPC鋼より線のひずみの減少量

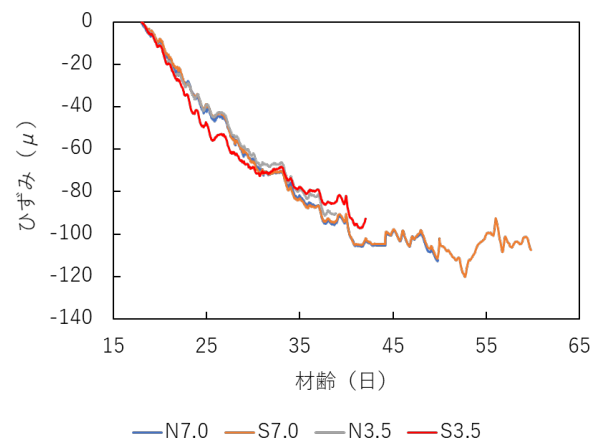


図-18 実験室搬入後のPC鋼より線のひずみの減少量

### 6.3 曲げ載荷試験

#### (1) 載荷試験方法

図-16に示したように大型はり試験体(N7.0とS7.0)はせん断スパン2600mm, 等曲げ区間800mmとして, 小型はり試験体(N3.5とS3.5)はせん断スパン1000mm, 等曲げ区間500mmとして, 曲げ載荷試験を行った. 大型はり試験体の載荷試験状況を写真-13, 14に示す.



写真-13 載荷試験状況 (大型はり試験体)

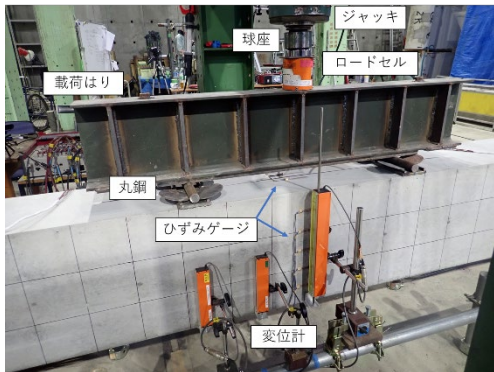


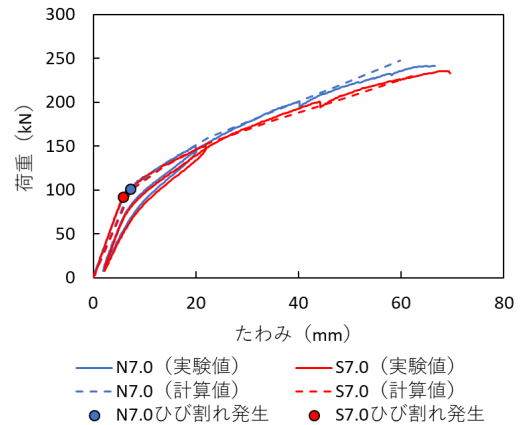
写真-14 はり中央部の状況 (大型はり試験体)

#### (2) 載荷試験結果

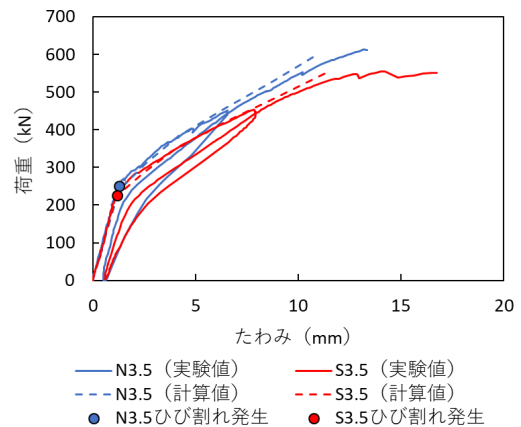
図-19に荷重-たわみ(中央変位)を示す. 表-13に試験結果の主要な数値を示す. 破壊モードはすべての試験体で曲げ圧縮破壊となった. 普通鋼製はりとステンレス鋼製はりを比較すると, ステンレス製定着具のほうがセット量は大きかったことからS7.0, S3.5はN7.0, N3.5よりプレストレス力が低くなり, それに従ってひび割れ発生荷重は小さくなった. また終局荷重はS7.0, S3.5のほうがN7.0, N3.5と比較して小さな値となった. これは ステンレスPC鋼より線の方が弾性係数が小さいことによると考えられる.

図-20にひび割れ状況を示す. ひび割れ間隔については, プレテンションPCの場合と同様, ポストテンションPCの場合も, 普通PCはりとステ

ンレスPCはりにひび割れ性状に有意な差はないといえる.



(a) 大型はり試験体の荷重-たわみ関係

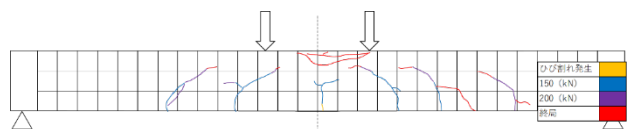


(b) 小型はり試験体の荷重-たわみ関係

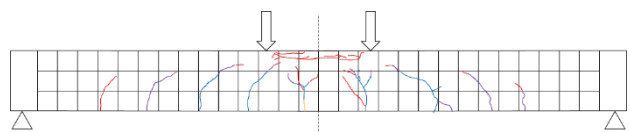
図-19 荷重-たわみ関係

表-13 試験結果

試験体名	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	プレストレス (kN)	曲げひび割れ 発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	最大たわみ (mm)	破壊モード
N7.0	46.2	555.6	100.7	241.7	66.0	曲げ圧縮破
S7.0	45.8	534.6	91.9	235.7	69.0	曲げ圧縮破
N3.5	45.4	479.4	250.4	612.6	13.2	曲げ圧縮破
S3.5	46.8	438	225.5	555.4	14.2	曲げ圧縮破



(a) 大型普通PC試験体 (N7.0)



(b) 大型ステンレスPC試験体 (S7.0)

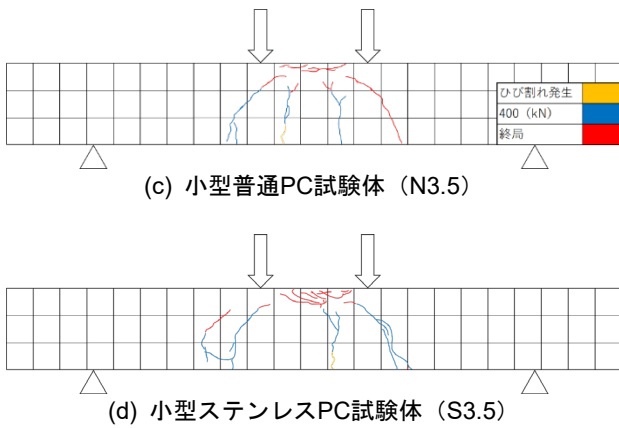


図-20 曲げひび割れ状況

### (3) 曲げ耐荷性状の再現解析

3章で述べたプレテンションPCはり試験体の曲げ解析と同様の計算方法を用いて、ポストテンションPCはり試験体の曲げ載荷試験結果の再現解析を行った。ただし、コンクリートの応力-ひずみ関係は、プレテンションPCの場合よりも簡便な図-21のものを用いた。解析に用いた材料強度などの各種物性値を表-14に示す。プレストレス導入ひずみは曲げ解析結果が実験結果に合うように逆算した。

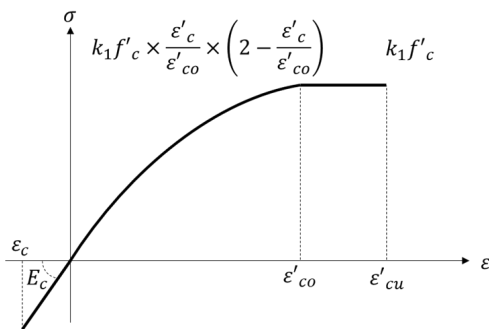


図-21 計算に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係

表-14 解析に用いた物性値

	コンクリート					プレストレス 導入ひずみ ( $\mu$ )
	圧縮強度 ( $N/mm^2$ )	引張強度 ( $N/mm^2$ )	弾性係数 ( $N/mm^2$ )	$\epsilon'_{co}$ ( $\mu$ )	$\epsilon'_{cu}$ ( $\mu$ )	
N7.0	46.1	$0.23f'_c{}^{2/3}$	30435	2500	2760	3350
S7.0	45.8		30367	2543	2805	3500
N3.5	45.4		28292	2576	2769	3100
S3.5	46.8		29713	2469	2611	3350

各試験体の荷重-たわみ関係の計算値は、図-19に実験結果とともに示してある。すべての試験体において、計算結果は実験結果をよく再現している。破壊モードは計算結果においても曲げ圧縮破壊となった。

これらの結果より、ステンレスPC鋼より線、ステンレス製定着具を用いたポストテンションPCはり部材は、プレストレス導入、プレストレスの減少、曲げ耐荷挙動が、従来のポストテンションPCはり部材と同様であること、従来用いられている一般的な計算仮定により、曲げ耐荷挙動が再現できることがわかる。したがって、ステンレスPC鋼より線の応力-ひずみ関係や破断ひずみなどの物性値を試験に基づき考慮すれば、これを用いたポストテンションPC部材の力学的な性能は従来と同じ考え方で設計することが可能であるといえる。

## 6.4 ステンレスPC鋼より線とシースの摩擦特性の検討

### (1) 実験概要

ポストテンション方式でPC鋼材を緊張する際、PC鋼材はシースの内面に接触するため両者間に摩擦が生じ、緊張端から離れるに従って緊張材の緊張力は減少する。この緊張力の減少量はシース内の緊張材長さや角度変化に依存するとして算定式が提案されている<sup>5)</sup>。PC鋼材とシースの摩擦による緊張力の減少特性は、PC鋼材の種類、シースの材質および内面形状により異なる。したがって、新しい材料の組み合わせで緊張する際は緊張力減少量を確認する必要がある。そこで、ステンレスPC鋼より線とシースの摩擦による緊張力減少特性を実験し、普通PC鋼より線と比較した。

図-22に示す試験装置を製作した。実験棟地下室の柱で緊張力の反力をとった。

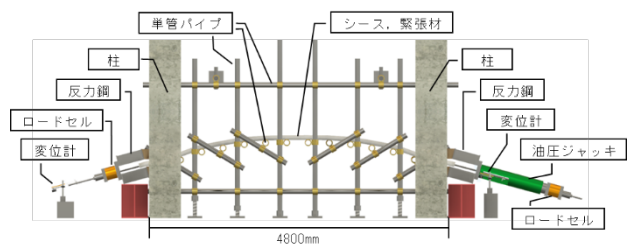


図-22 摩擦緊張試験装置

緊張端と固定端の間に単管パイプを配置し、シースを所定の曲げ角度変化となるように固定した。曲げ角度は $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ の3水準とした(図-23)。緊張はセンターホールジャッキを用いて行い、試験装置両端に取り付けたロードセルによってPC鋼より線の加力側の緊張力と固定側の緊張力を測定し、両者の差を摩擦による緊張力損失とした。緊張端側の最大導入緊張力は規格値の約0.75倍とした。

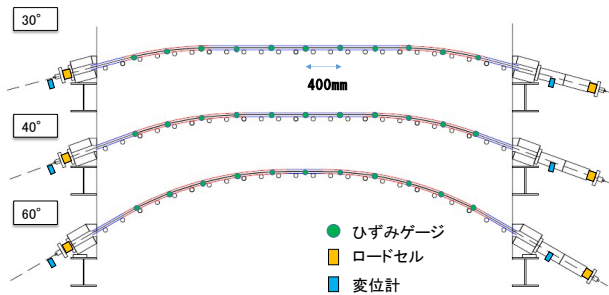


図-23 シースの配置形状

表-15に実験に用いたPC鋼より線の物性値を示す。ステンレスPC鋼より線と、より本数が同じ普通PC鋼より線を実験し比較した。シースは鋼製シースとポリエチレン (PE) シースを使用した。種類と寸法を表-16に示す。

表-15 実験に用いたPC鋼より線の物性値

	普通PC鋼より線	SUSPC鋼より線
種類	SWPR7BL	SUS304N1
より本数	7本	7本
直径 (mm)	15.34	15.27
断面積 (mm <sup>2</sup> )	141.59	141.27
最大試験力 (kN)	272	248
0.2%永久伸びに対する試験力 (kN)	249	218
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	191	159

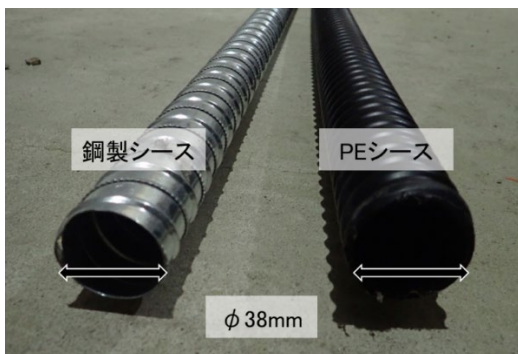


写真-15 実験に用いたシース

## (2) 実験結果

図-24に40°配置した際の緊張端荷重-固定端荷重の関係を示す。すべての鋼種・シース種類の組み合わせにおいて、緊張端荷重-固定端荷重が比例関係にあることがわかる。これは加力した緊張力に対して摩擦により減少する緊張力の割合が一定であることを示す。角度変化が30°、60°の場合も同様であった。この結果より、摩擦による緊張力減少の特性は、緊張端荷重と固定端荷重の直線の傾き (P/P<sub>0</sub>) を指標とすることができる。そこで、図-25にP/P<sub>0</sub>をケースごとに示した。

角度の影響に着目すると、各シリーズとも角度変化が大きくなるほど減少が大きくなる傾向が確認できる。ステンレスPC鋼より線では、

60°のケースがこの傾向からはずれた結果となっているが、実験上の不備によるものと考えている。

シース種別による影響に着目すると、PEシースは、普通PC鋼より線、ステンレスPC鋼より線の場合ともに、鋼製シースよりも緊張力減少が小さい傾向が確認できる。また、PEシースを用いた場合、PC鋼より線の違いによる緊張力減少傾向に違いは確認されなかった。石田らの研究<sup>8)</sup>においても、PEシースは鋼製シースと比較して緊張材の鋼材種類による影響が小さいことが報告されている。

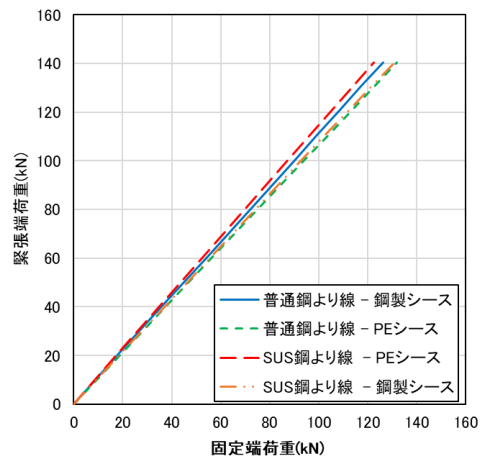


図-24 緊張端-固定端の緊張力関係 (角度40°)

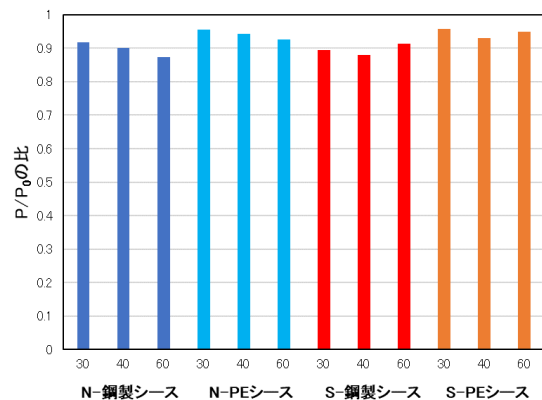


図-25 緊張時のP/P<sub>0</sub>

## (3) PC鋼より線とシースの摩擦係数の算出

PC鋼材とシースの摩擦による緊張力の減少は、シース内のPC鋼材の図心線の角変化と長さの関数とした式により算定する方法が用いられている<sup>5)</sup>。

$$P_x = P_i \cdot e^{-(\mu \cdot \alpha + \lambda \cdot l)} \quad (1)$$

ここに、

$P_x$  : 設計断面におけるPC鋼材の引張力



- $P_i$  : PC 鋼材のジャッキの位置の引張力
- $\mu$  : PC 鋼材の角変化 1rad あたりの摩擦係数
- $\alpha$  : PC 鋼材の角変化(rad)
- $\lambda$  : PC 鋼材の長さ 1m あたりの摩擦係数 (/m)
- $l$  : PC 鋼材長さ(m)

である。

摩擦係数は、詳細にはシースの材質や種類によって異なるが、設計では普通PC鋼より線を用いる場合は鋼製シース、PEシースを用いる場合ともに表-16の値が用いられている<sup>5)</sup>。この値は、現場で導入する緊張力が不足することがないよう、安全側に設定されているものと考えられる。

表-16 摩擦係数の設計値

種類	$\mu$	$\lambda$
PC 鋼線, PC 鋼より線	0.30	0.004
PC 鋼棒	0.30	0.003

ステンレスPC鋼より線はポストテンションPCに使用された実績がないため、摩擦係数の標準値は提案されていない。そこで、本研究の試験結果を用い、摩擦係数を算出する。既往の方法<sup>7)</sup>にならい、距離に関する摩擦係数 $\lambda$ と角度に関する摩擦係数 $\mu$ の間に一定の関係 ( $\lambda/\mu = 0.0133$ ) を仮定することにより簡便に算定することとする。

算出した摩擦係数を表-17に示す。P-P<sub>0</sub>関係は良好な比例関係が認められることから、約0.75Py(142kN)のときの実験値を用いて摩擦係数を算出した。ステンレスPC鋼より線の摩擦係数は、普通PC鋼より線の摩擦係数と近い値であった。

ステンレスPC鋼より線、普通PC鋼より線いずれの場合も、PEシースを用いた場合は鋼製シースを用いた場合よりも摩擦係数が小さく、1/2程度となった。細木ら<sup>10)</sup>は、12S12.4mmのPC鋼より線を用いて確認したところ、鋼製シースとPEシースの摩擦係数の比率の平均が0.58であったと報告している。本研究と同様の傾向である。

表-17 実験により求めた摩擦係数の値

より線	シース	$\mu$	$\lambda$
普通 PC 鋼より線	鋼製シース	0.137	0.0018
普通 PC 鋼より線	PE シース	0.075	0.0010
SUSPC 鋼より線	鋼製シース	0.153	0.0020
SUSPC 鋼より線	PE シース	0.075	0.0010

ステンレスPC鋼より線は高い耐久性を期待

して用いられるものであるためPEシースとの併用が想定される。表-17より、PEシースに対してはステンレスPC鋼より線は普通PC鋼より線と同じ摩擦係数が得られている。また、「PEシースを用いたPC橋の設計施工指針(案)」<sup>11)</sup>における摩擦係数の実績調査では、普通PC鋼より線と鋼製シースとの組み合わせにおいても $\mu = 0.149$ であり、設計で用いられている値 $\mu = 0.30$ に比べると実際の摩擦損失は小さいことが確認されている。すなわち、従来より設計用の摩擦係数の値は諸々を考慮し余裕のある設定がなされている。その値に基づき実構造物の導入緊張力が設定され、これまで特段の問題が生じていないことから、ステンレスPC鋼より線を用いた場合であっても、従来と同じ摩擦係数を用いることが適当と考えている。

## 6.5 まとめ

本章では、ステンレスPC鋼より線とステンレス製定着具を用いたポストテンションPC試験体の力学性状について検討した。

- ステンレスPC鋼より線を用いたポストテンションPC部材のプレストレス減少は普通PC鋼より線を用いた場合と大差なかった。
- ステンレスPC鋼より線、ステンレス製定着具を用いたポストテンションPCはり部材は、曲げひび割れ性状、荷重-変形関係、破壊形態を含め曲げ耐荷挙動が、普通PC鋼より線を用いた従来のポストテンションPCはり部材と同様であった。
- ステンレスPC鋼より線、ステンレス製定着具を用いたポストテンションPCはり部材の曲げ耐荷挙動は、従来用いられている一般的な計算仮定に基づき再現できる。したがって、ステンレスPC鋼より線の応力-ひずみ関係や破断ひずみなどの物性値を試験に基づき考慮すれば、力学的な性能は従来と同じ考え方で設計することが可能であるといえる。
- 設計では、ステンレスPC鋼より線とシースの摩擦係数は、普通PC鋼より線に対して従来用いられてきた値を用いることが適当である。

# 第7章 ステンレス鋼製PC鋼材の耐久性に関する検討

## 7.1 実験概要

本章では緊張力の有無およびセメント種類が、ステンレス鋼製PCより線の腐食速度に与える影響を明らかにする。3水準の塩化物イオンを含有するコンクリートに、ステンレス鋼製のPC鋼より線と普通鋼製のPC鋼より線を埋設し、緊張力の有無に相違を設け、緊張力の有無が腐食速度へ及ぼす影響を電気化学的測定を用いて評価する。次に、5水準の塩化物イオンを含有する、3水準の結合材を用いた、モルタル供試体により、結合材ごとに塩化物イオン量がステンレス鋼の腐食速度の変化に及ぼす影響を評価する。

## 7.2 緊張の有無が腐食速度に及ぼす影響

### (1) 実験ケース

実験ケースを表-18に示す。PC鋼より線はステンレス鋼(SUS304)と普通鋼(SD345)の2種類を使用し、鋼材ごとに持続的な緊張力を導入した供試体と導入しない供試体の2水準を設けた。コンクリートの配合および圧縮強度を表-19に示す。

表-18 実験ケース

PC 鋼より線	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	緊張力	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )		
ステンレス鋼 (SUS304)	1738	あり	0	12	24
		なし			
普通鋼 (SD345)	1949	あり			
		なし			

表-19 コンクリートの配合と強度

Cl <sup>-</sup> 量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							圧縮強度 [28日] (N/mm <sup>2</sup> )
			W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤	NaCl	
0	50.0	44.0	168	336	774	991	3.36	10.01	0	36.1
12									19.8	27.4
24									39.6	27.1

### (2) 供試体

供試体概要を図-26に示す。緊張力を導入する供試体はプレテンション方式で作製し、75kNの緊張力を導入した。緊張力は治具を用いて保持し、ひずみの経時的な計測により、1年間の暴露におけるプレストレスの持続的な付与を確認した。

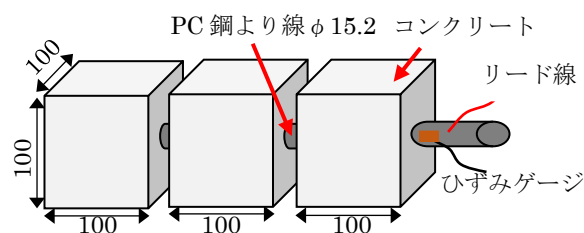


図-26 供試体概要

### (3) 暴露試験概要

高温(40℃)下で、材齢2日目から4週目まで湿度が80%RHの環境で暴露を行い、4週目から6週目まで湿度が30%RHの環境で暴露にした。以降、2週間ごとに乾湿繰返しを行った。計測は乾燥環境時に実施した。腐食ひび割れが発生した時点で終了し、最長で1年間に亘り暴露した。

図-27に示すように、対象となる 100×100×100mm の供試体の上面に対極板を設置し、交流インピーダンス法を用いてコンクリート内部の PC 鋼より線の分極抵抗(R<sub>p</sub>, kΩ)を測定した。

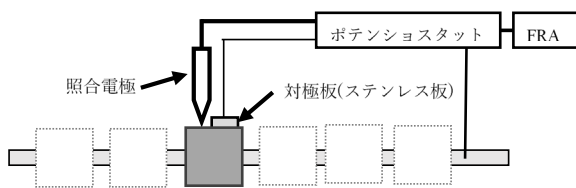


図-27 交流インピーダンス計測の概略図

測定したR<sub>p</sub>と、PC鋼より線がコンクリートに

接触している部分の表面積(A, cm<sup>2</sup>)を用いた次式により, 腐食速度(I<sub>corr</sub>, mg/cm<sup>2</sup>/年)に換算した<sup>12)13)</sup>. 表面積Aには, より線の全素線の表面積を採用した.

$$I_{corr} = \frac{0.0209}{R_p \times A} \times 9.1 \times 1000 \quad (2)$$

#### (4) 実験結果

普通鋼では塩化物イオン量が12kg/m<sup>3</sup>と24kg/m<sup>3</sup>において, コンクリート表面において腐食ひび割れが発生し, 計測不能となったのに対し, ステンレス鋼は1年間に亘り計測を継続できた. 以下では全暴露期間中に計測された腐食速度の平均値を評価する.

緊張力が導入されたより線の腐食速度を図-28に, 緊張力が導入されていないより線の腐食速度を図-29に示す. 塩化物イオン量が12kg/m<sup>3</sup>において普通鋼では, 緊張の有無に拘わらず腐食した. 一方でステンレス鋼では腐食しなかった. これは, SUS304の腐食発生限界量の15kg/m<sup>3</sup>よりも添加した塩化物イオン量が少ないためと考えられる. 塩化物イオン量が24kg/m<sup>3</sup>では, ステンレス鋼においても, 腐食が確認された. ただし, 普通鋼に比べてステンレス鋼の腐食速度は1/10以下であり, 十分に遅い. また, ステンレス鋼と普通鋼ともに緊張力の有無に拘わらず, 腐食速度は同等であることを確認できた.

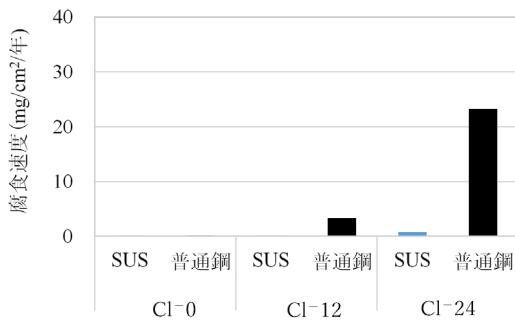


図-28 緊張力を導入したPC鋼より線の腐食速度

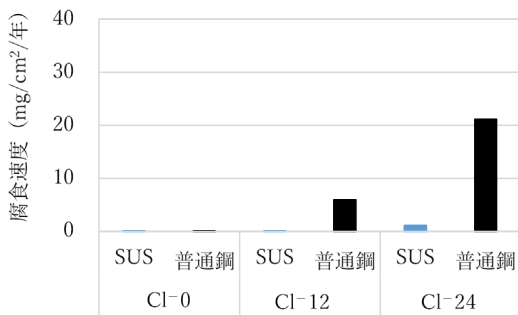


図-29 緊張力を導入していないPC鋼より線の腐食速度

暴露後に供試体を解体しPC鋼より線の腐食状態を確認した. 緊張力の有無による結果の差異は認められなかった. 緊張力を導入したシリーズの結果を表-20に示す. 写真の赤枠は腐食発生箇所を示す. 普通鋼においては12kg/m<sup>3</sup>と24kg/m<sup>3</sup>の2水準で, より線全面に広がる激しい腐食を確認できた. 一方ステンレス鋼の場合は, 24kg/m<sup>3</sup>で部分的な腐食を確認した.

表-20 暴露試験後のPC鋼より線の表面 (緊張力を導入したシリーズ)

Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	SUS		普通鋼	
	写真	発錆	写真	発錆
0		無		無
		無		無
12		無		有
		無		有
24		有		有
		有		有

### 7.3 塩化物イオン量が腐食速度に及ぼす影響

#### (1) 実験ケース

実験ケースを表-21に, 配合を表-22に示す. 鉄筋種類はステンレス鋼(SUS304)と普通鋼(SD345)の2水準を設けた. PC鋼材には緊張力は導入しない. セメント種類の影響を顕著に確認するため, コンクリートではなくモルタルを用いた. セメント種類として, 普通ポルトランドセメント(以下, N), 高炉セメントB種(以下, BB), およびフライアッシュ混和セメント(以下, FA)を用いた.

表-21 実験ケース

No.	セメント種類	鉄筋種類
1	N	普通鋼 (SD345)
2		ステンレス鋼 (SUS304)
3	BB	
4	FA	

表-22 モルタルの配合

No.	W/C	S/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					Cl <sup>-</sup> 量				
			W	C	FA	S						
1	0.50	2.50	280	560	-	1400	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	
2			278	556		1390						
3			280	448	112	1400						
4												

#### (2) 供試体

供試体概要を図-30に示す. φ50×100mmの

円柱供試体の中央に、かぶりは20mmでD10の異形鉄筋を埋設した。鉄筋の端部にリード線をはんだ付けした。脱型後、供試体の上面と底面にエポキシ樹脂塗装した。材齢4カ月まで20℃、90%RHの環境で暴露した。

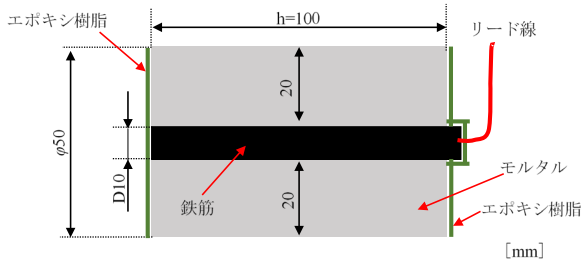


図-30 供試体概要

材齢4カ月目に、周波数応答解析装置(FRA)を用いた交流インピーダンス法による分極抵抗と、アノード分極曲線を測定した。式(2)を用いて分極抵抗から腐食速度を換算した。

### (3) 実験結果

No.1 (普通鋼, 普通セメント) およびNo.2 (ステンレス鋼, 普通セメント) における塩化物イオン量と腐食速度の関係を図-31と図-32に示す。これらによると、普通鋼とステンレス鋼ともに塩化物イオン量の増加に伴い、腐食速度は速くなることがわかる。ただし、ステンレス鋼の場合は近似式の傾きが、普通鋼に比べて1/500以下と極めて小さいことがわかる。

セメント種類毎のステンレス鋼における塩化物イオン量と腐食速度の関係を図-33に示す。これによると、セメント種類に拘わらず近似線は、おおむね重なっており、塩化物イオンと腐食速度の関係は、変わらないことがわかる。

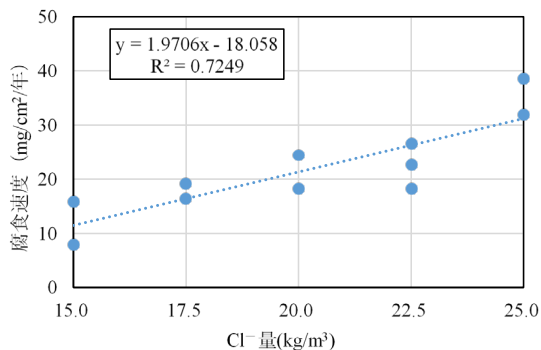


図-31 No.1 (普通鋼, 普通セメント) の塩化物イオン濃度と腐食速度の関係

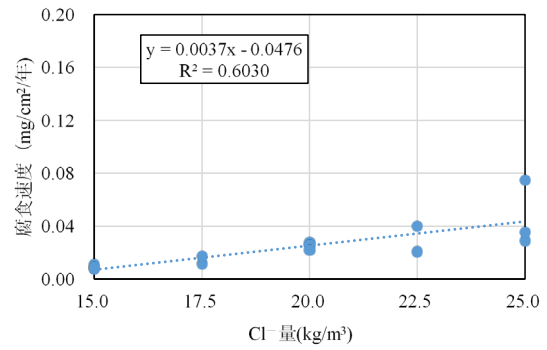


図-32 No.2 (ステンレス鋼, 普通セメント) の塩化物イオン濃度と腐食速度の関係

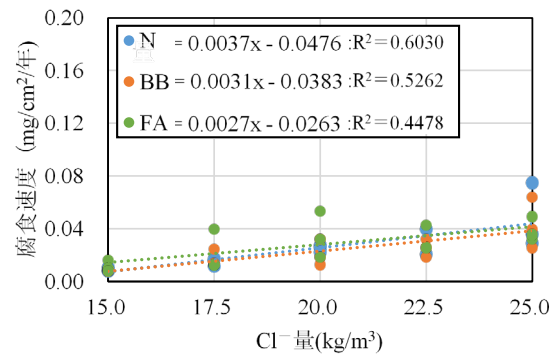


図-33 結合材の種類ごとのステンレス鋼の塩化物イオン濃度と腐食速度の関係

## 7.4 まとめ

- 緊張したPC鋼より線の内部にもペーストが進展し、内側にある中心素線は腐食する。
- ステンレス鋼の腐食速度は普通鋼の腐食速度に比べ極めて遅く、1/10以下であることが確認できた。
- 緊張力の有無に拘わらず、ステンレス鋼は普通鋼と同様に腐食速度が変化しない。
- ステンレス鋼と普通鋼ともに塩化物イオン量の増加に伴い腐食速度が増加する。ただし、ステンレス鋼の腐食速度の変化は普通鋼に比べ極めて小さい。
- 結合材種類は、ステンレス鋼の腐食速度に影響を及ぼさない。

# 第8章 ステンレス鋼製定着具の耐久性に関する検討

## 8.1 実験概要

本章では本研究で開発したSUS420J2製のウェッジと、SUS630製のウェッジ、およびSUS304製のスリーブ（アンカーヘッド）のステンレス鋼製PC定着具の分極抵抗を計測し、耐食性を評価する。また、緊張端と固定端の分極抵抗を比較し、定着具の腐食特性を検討する。

## 8.2 実験手順

### (1) 供試体

供試体概要を図-34に、コンクリートの配合を表-23に、実験ケースを表-24に示す。ステンレス鋼製PCのウェッジ以外の内部鋼材にはSUS304を用いた。

表-23 コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	Gmax(mm)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	S	G	AE剤
43.0	45.8	20	398	171	783	947	3.58

表-24 実験ケース

ケース	ウェッジ	スリーブ	PC鋼より線	緊張力	端部 固定端:F 緊張端:T 無緊張:N	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	比較ケース		
							端部	塩化物イオン	鋼材種類
普通鋼-T-0	普通鋼	普通鋼	SUS304	有	T	0		●	○
普通鋼-N-5			無	N	5			●	
普通鋼-F-5			有	F		○	○	◎	
普通鋼-T-5			有	T	15	○	●	×	
普通鋼-F-15			有	F		●	○	□	
普通鋼-T-15			有	T		●	●	■	
420J2-T-0	SUS420J2	SUS304		有	T	0		×	○
420J2-N-5			無	N	5			●	
420J2-F-5			有	F		◎	◎	◎	
420J2-T-5			有	T	15	◎	×	×	
420J2-F-15			有	F		×	◎	□	
420J2-T-15			有	T		×	×	■	
630-N-5	SUS630	SUS304		無	N	5			●
630-F-5			有	F			△	◎	
630-F-15			有	F	15			△	□

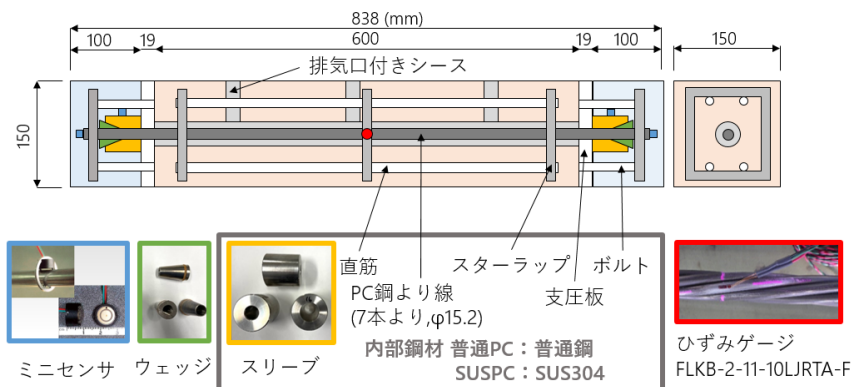


図-34 供試体概要

初引張応力度は各PC鋼材の引張強度の0.8倍（普通鋼PC：1413N/mm<sup>2</sup>，ステンレス鋼PC：1224N/mm<sup>2</sup>）とし，先打ちコンクリート（図-34のオレンジ色の部分）の材齢6日にプレストレスを導入し，7日にPCグラウトを注入した．その後定着具は塩化物イオンを添加した後打ちコンクリート（図-34の水色の部分）で被覆した．後打ちコンクリート中の塩化物イオン濃度は，普通鋼とステンレス鋼の腐食発生限界塩化物イオン濃度<sup>1)5)</sup>を参考に，5kg/m<sup>3</sup>および15kg/m<sup>3</sup>とした．

## (2) 暴露試験

後打ちコンクリートの材齢28日(先打ち部材齢47日)目から，40℃の室内に暴露した．その後，ウェッジ，スリーブ（アンカーヘッド），PC鋼より線に配置したミニセンサと周波数応答解析装置(FRA)を用いて分極抵抗を測定した．計測は材齢2カ月，材齢9カ月および材齢13カ月に実施した．ここで，単位面積当たりの分極抵抗を算出する際の表面積は，ミニセンサの径に相当する面積とした．

## 8.3 実験結果

### (1) 分極抵抗

材齢2カ月，材齢9カ月および材齢13カ月の各治具の腐食速度の経時変化を測定した結果によると，一時的には変動するケースもあるが暴露期間中は，おおむね同程度の値を示すことが確認できた．したがって，以降は3回の計測の平均値を指標とする．

ウェッジにおいてCl<sup>-</sup>量が5kg/m<sup>3</sup>と15kg/m<sup>3</sup>の分極抵抗を比較した結果を図-35に，スリーブにおいてCl<sup>-</sup>量が5kg/m<sup>3</sup>と15kg/m<sup>3</sup>の分極抵抗を比較した結果を図-36に示す．これらによると，鋼材種類にかかわらず，ウェッジとスリーブともに多くのケースが45°線よりも左上側に位置していることが確認できる．15kg/m<sup>3</sup>の方が5kg/m<sup>3</sup>よりも腐食しやすい条件であることが確認できる．

ウェッジにおいて，普通鋼とSUS鋼の分極抵抗を比較した結果を図-37に，スリーブにおいて普通鋼とSUS鋼の分極抵抗を比較した結果を図-38に示す．これらによると，鋼材種類にかかわらず，ウェッジとスリーブともに多くのケースが45°線よりも左上側に位置していることが確認できる．したがって，SUS鋼は普通鋼に比べて分極抵抗が大きく，腐食しにくいといえる．

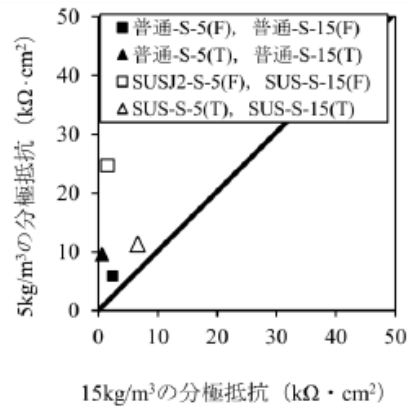


図-35 ウェッジにおけるCl<sup>-</sup>量による比較

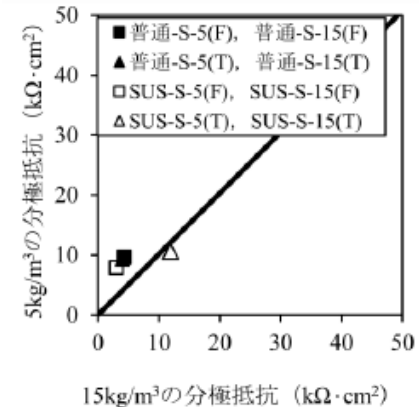


図-36 スリーブにおけるCl<sup>-</sup>量による比較

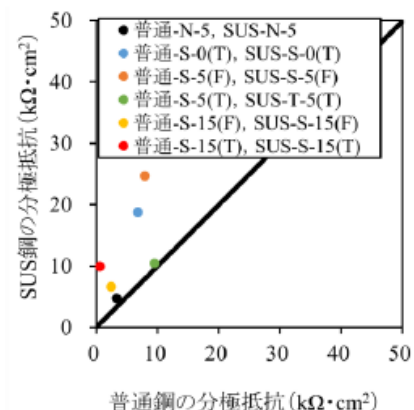


図-37 ウェッジにおける鋼種の比較

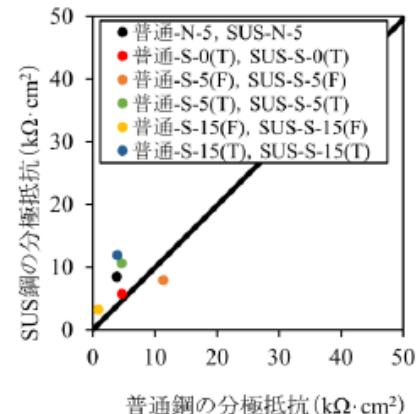


図-38 スリーブにおける鋼種の比較

## (2) 目視観察

暴露試験後、普通鋼は $0\text{kg/m}^3$ を除くすべてのケースで発錆が確認された。一方、SUS鋼はすべてのケースで発錆が確認されなかった。

また普通鋼では、FとTともに $\text{Cl}^-$ 量が $5\text{kg/m}^3$ は部分的に腐食したのに対し、 $15\text{kg/m}^3$ は全面的に腐食した(写真-16)。さらに、 $\text{Cl}^-$ 量が $5\text{kg/m}^3$ のケースにおいて、鋼材種類にかかわらずNとFあるいはNとTはどちらも部分的な腐食であり、腐食状況が同様と確認できる。東らのPC鋼棒を用いた研究によると、実施工の範囲である引張強度の80%以内であれば腐食発生に影響を及ぼさないと報告されている<sup>14)</sup>。また、中島らのSUS異形鉄筋を用いた研究では、曲げ加工などの塑性変形を施さなければ、腐食速度は変化しないことが報告されている<sup>15)</sup>。そのため、普通鋼とSUSともに緊張力が定着具の腐食に及ぼす影響はなかったと考えられる。

Nの供試体暴露試験後に部品ごとに解体が可能であった(写真-17)。普通鋼はウェッジとスリーブともに全面的に赤褐色の生成物ができた。一方で、SUS鋼はウェッジの内部の一部にわずかに腐食生成物が確認された。腐食が発生した箇所はいずれもグラウトが充填されていない箇所である。このことから、グラウトが進展しなかった箇所に水分が溜まり、塩化物イオンを含有するコンクリートより塩化物イオンが水中へ滲み出して、微かではあるがステンレス鋼でさえも腐食したと考えられる。



(a) 普通鋼F-5 (b) 普通鋼F-15  
写真-16 普通鋼の定着具の腐食状況



(a) 普通鋼N-5 (b) SUS420J2鋼N-5  
写真-17 N供試体ウェッジ内側の腐食状況

## 8.4 まとめ

- 分極抵抗の測定結果より、普通鋼、ステンレス鋼ともに、塩化物イオン濃度が高いほど腐食しやすい条件であることが確認された。
- 分極抵抗の測定結果より、ステンレス鋼製の定着具は普通鋼よりも腐食しにくいことが確認された。
- 普通鋼、ステンレス鋼定着具ともに緊張力の有無が腐食に及ぼす影響は認められなかった。
- ステンレス鋼製の定着具は塩化物イオン濃度 $15\text{kg/m}^3$ のコンクリート中においても腐食しなかった。
- 目視観察の結果、グラウトが充填されていない箇所では水分が溜まるため、ステンレス鋼の一部でわずかに腐食が発生した。

# 第9章 ステンレス鋼を用いたPC構造の設計法の提案

## 9.1 はじめに

本研究で得られたステンレスPC鋼材およびこれを用いたPC構造に関する技術的知見をもとに、実構造物の設計および施工における提案や留意事項、従来の規程を踏襲して問題ないと思われる点について、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>や道路橋示方書<sup>6)</sup>と比較しながら検討する。

## 9.2 ステンレスPC鋼より線の設計用応力ひずみ関係および破断ひずみの設計値

ステンレスPC鋼より線の設計用応力ひずみ関係および破断ひずみ設計値は、鋼材の引張試験結果に基づき2章2.3節において提案（図-3および表-1）したので2章を参照されたい。

## 9.3 部材終局時の照査

従来の普通PC鋼より線を用いた場合、部材の曲げ終局時において鋼材の破断の検討は通常省略してよいとされている。コンクリート標準示方書【設計編：標準】3編2章2.4.2.1設計断面耐力(2)において、鋼材モデルは①終局ひずみの値により部材断面耐力の値がほとんど変化しないこと、②値を規定することにより計算が煩雑になることから、終局時における鋼材ひずみの検討が規定されていない<sup>5)</sup>。実際、普通PC鋼より線の破断ひずみは十分大きいので、曲げ終局時（圧縮側コンクリートの圧縮破壊時）において鋼材のひずみが破断ひずみに達することはない。

しかしながら、ステンレスPC鋼より線の破断伸びは普通PC鋼より線も小さいため、条件によっては圧縮側コンクリートが破壊する前に引張鋼材のひずみが破断ひずみ達してしまい、部

材の破壊モードが鋼材破断となってしまうケースが考えられる。このことを防ぐためには、ステンレスPC鋼より線を用いて部材を設計する際には、終局時における鋼材破断照査を省略せずに行うこととし、終局時に鋼材破断が生じないように鋼材量を設定する必要がある。

たとえば、曲げ破壊に対する安全性の確認フローを図-39のようになる。曲げ耐力が作用曲げモーメントを上回ることでなく、終局時に鋼材が破断していないことを確認することとなる。

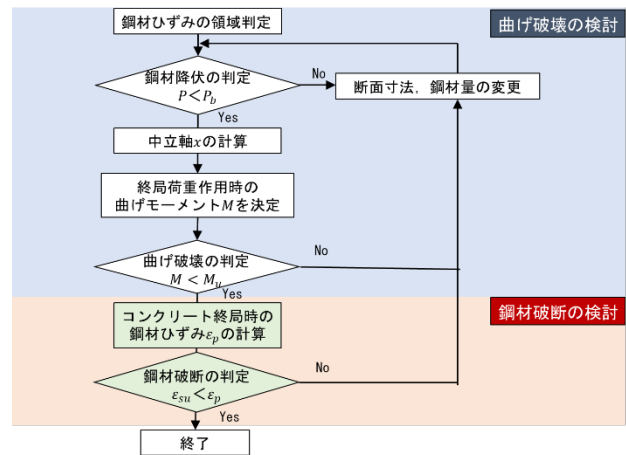


図-39 ステンレス鋼材を用いたPC部材の曲げに対する安全性検討フロー

## 9.4 プレストレス力

コンクリート標準示方書【設計編】<sup>5)</sup>では、導入したプレストレス力の減少量は、いくつかの影響を考慮して求めることとなっている。

$$P_x = P_t - [\Delta P_{i(x)} + \Delta P_{t(x)}] \quad (3)$$

ここに、



- $P_x$  : 考慮している設計断面におけるプレストレス
- $P_i$  : 緊張端材に与えた引張力による緊張作業中のプレストレス
- $\Delta P_{i(x)}$  : 緊張作業中および直後に生じるプレストレスの減少量
- $\Delta P_{t(x)}$  : プレストレス力の経時的減少量である。

プレストレス力減少の要因として、以下が挙げられている。

緊張作業中および直後に生じるプレストレスの減少量

- コンクリートの弾性変形
- 緊張材とシースの摩擦
- 緊張材を定着する際のセット
- その他（例えばプレキャストブロック工法の継目部における変形など）

プレストレス力の経時的減少量

- PC鋼材のリラクゼーション
- コンクリートのクリープ
- コンクリートの収縮
- 鉄筋の拘束

これらのうち、コンクリートの弾性変形、クリープ・収縮についてはコンクリートの物性値や周辺環境等によって左右される項目であり、鋼種をステンレス鋼としても普通鋼の場合と変わらない。以下では、鋼種を普通鋼からステンレス鋼とした際に考慮する必要がある項目について検討を行う。なお、鉄筋の拘束や継ぎ目等は本研究においても未検討である。

### (1) PC鋼より線とシースの摩擦

6章においてステンレスPC鋼より線とシースの摩擦によるプレストレス力の減少について実験し、設計では普通PC鋼より線に対する摩擦係数と同じ値を用いてよいことを提案した。

### (2) 定着具のセットロス

4章で開発したステンレス製定着具を0.9Pyで緊張し、ウェッジを圧力20MPa(44kN)程度で圧入すると、セット量は約4mmであった。定着具のセット量はそれぞれの工法や定着具によって固有の値が決まっているため、一般にプレストレスコンクリート工法設計施工指針<sup>7)</sup>やPC定着工法<sup>16)</sup>などを参考に決定する。

### (3) PC鋼より線のリラクゼーション

6章においてポストテンションPCはり試験体の緊張後から載荷試験までの間の、鋼種以外のスペック・外部条件が同じである普通鋼とステ

ンレス鋼のPC鋼より線のひずみ減少量を計測した結果、両者のリラクゼーションに有意な違いはないことを確認した。このことから、ステンレスPC鋼より線のリラクゼーションは普通PC鋼より線と同等であると考えられるため、コンクリート標準示方書【設計編：標準】8編3章(1)で示されるようなリラクゼーション率を用いて算出してよい。

### (4) 緊張中や緊張直後の鋼材引張応力度

道路橋示方書【Ⅲ コンクリート橋・コンクリート部材編】では、緊張中や緊張直後の鋼材引張応力度を以下の通り規定している<sup>9)</sup>。

緊張中： $0.8f_u$ および $0.9f_y$ の小さいほうの値以下（道路橋示方書3.4.1(8)に記載）

緊張直後： $0.7f_u$ および $0.85f_y$ の小さいほうの値以下（道路橋示方書5.1.5(2)に記載）

ステンレスPC鋼より線の緊張中や緊張直後の鋼材引張応力度について従来の規定を用いてよいか確認した。表-25より、降伏応力度 $f_y$ を適用した際の規定が破断応力度 $f_u$ に対して普通PC鋼より線よりも安全側なことが確認できるため、従来の規定を用いてもよいと判断できる。

表-25 破断強度に対する降伏強度規準

		応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断応力に対する割合(%)
緊張中	SUS0.9fy	1415	79.1
	普通0.9fy	1616	82.4
緊張直後	SUS0.85fy	1336	74.7
	普通0.85fy	1526	77.8

## 9.5 PC鋼より線の付着特性

3章のプレテンションPC部材の検討において、ステンレスPC鋼より線のコンクリートとの付着は普通PC鋼より線と同等またはそれ以上であることを確認している。このことにより、従来の設計において付着を前提としたいくつかの規定については、普通PC鋼より線と同じ設計を行ってよいと判断できる。道路橋示方書における該当箇所について示す。

### (1) ひび割れ分散性

道路橋示方書【Ⅲ コンクリート橋・コンクリート部材編】5.2.2(3)において、“乾燥収縮、温度勾配等により生じる可能性のあるひび割れが、部材設計における耐荷性能および耐久性能の前提に与える影響をできるだけ小さくする

よう、適切に鉄筋を配置しなければならない”とし、鉄筋の配置間隔や鉄筋量が規定されている<sup>6)</sup>。この記述に対し、道路橋示方書5.3.1(6)では、付着のあるPC鋼材は、ひび割れの分散効果が期待できることから、上述の鉄筋として扱うことができる」とされている。本研究の実験により、普通鋼とステンレス鋼を用いたPCはりの曲げひび割れ性状に特段の違いがないと確認している。

## (2) 定着長

3章の実験により、ステンレスPC鋼より線は普通PC鋼より線と同等以上のプレストレス伝達特性を有することを確認している。このことから、道路橋示方書【Ⅲ コンクリート橋・コンクリート部材編】5.3.2(2)1)の解説にある、プレテンション部材の定着長は $15.2\phi$ までのPC鋼より線で直径の65倍を適用して問題ないと考える。

## 9.6 耐久性の照査

7章8章において、ステンレスPC鋼より線およびステンレス製PC定着具の耐食性について実験し、きわめて高いことを確認した。ステンレス鋼材は腐食しにくい上に、万一腐食する場合であっても普通鋼材のような断面欠損が生じる著しい腐食形態となることは確認されていない。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋のように、表面の傷が原因となって腐食することは原理的に考えられない。したがって、ステンレスPC鋼材の耐食性とその信頼性は非常に高いものと考えられるが、使用実績がないことから実構造物の設計では当面、土木学会「ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)」<sup>1)</sup>に示されたステンレス鉄筋の鋼種ごとの腐食発生限界塩化物イオン濃度を用いて、塩害の照査を行ってよいと考えている。

# 第10章 ステンレス鋼を用いたPC構造物のライフサイクルコストの検討

## 10.1 はじめに

初期コスト、維持管理コストを考慮した構造物のライフサイクルコスト（以下、LCC）を種々の条件下で試算し、本研究で開発したPC鋼材、定着具、鉄筋にステンレス鋼を用いたPC部材を実構造物に適用した際の効果の検討を行う。

## 10.2 実橋梁における塩害環境の違いによるライフサイクルコストの検討

### (1) 対称構造物

本節では、北陸地方で実際に建設・供用され、塩害による補修補強の実績が確認された「M橋」を対象構造物とした。ポストテンション方式PC単純T桁橋（以下、ポステンT桁）のPC鋼材、定着具、鉄筋に一般鋼材が用いられた橋（以下、普通桁）と、これらをステンレス鋼材に置き換えた想定した橋（以下、SUS桁）について比較検討を行った。

以下に、普通桁、SUS桁の諸元を示す。なお、今回対象とした構造物の鋼材配置や種別などが不明であるため、道路橋示方書などを参考に鋼材量などの推定を行った。また、今回は上部工のみに着目することとし、下部工に関しては置換せず、普通桁と同様とした。

<共通事項>

橋梁形式：ポストテンション方式PC単純T桁橋

橋 長：26.00m

桁 長：25.92m

全 幅 員：9.25m

有効幅員：車道6.75m+歩道1.5m

斜 角：90°

<普通桁>

PC鋼材：SWPD1B 12φ7（主鋼材）、SWPD1B 12φ7（横締め鋼材）

鉄 筋：SD295

シース：鋼製シース

<SUS桁>

PC鋼材：SUSPC鋼材 12φ7（主鋼材）および12φ7（横締め鋼材）

鉄 筋：ステンレス鉄筋

シース：PEシース

### (2) 劣化作用

対象橋梁は、海岸から20m程度（ $C_0=7.7\text{kg/m}^3$ ）離れた位置に建設された実橋梁で塩害環境下にある。普通桁については以降に示す塩害劣化に伴う補修実績を踏まえて維持管理費に反映させるが、SUS桁については、塩分の侵入による鋼材腐食は発生しないものと仮定し、本検討では初期建設費および点検費のみ計上した。これは、今回の条件下において鋼材位置における塩化物イオン濃度がSUS鋼材の腐食発生限界濃度<sup>1)</sup>以下となることを塩害照査の式<sup>5)</sup>で確認しているためである。

なお、橋梁付属物、橋面工についても劣化の懸念が想定されるが、本検討では考慮しないものとする。

### (3) 補修補強

普通桁については、実際の補修補強履歴に基づいて補修を行い、以降の補修計画は既存の報文<sup>17)18)</sup>を参考に設定し、工事費や補修単価などは建設工事費デフレーターを用いて当時の価格を現在（2020年）の価値に換算した。

また、SUS桁は無対策で劣化が進行しないと仮定しているため、定期点検費用のみ計上することとした。

### (4) 初期建設費用の試算

実橋梁に相当する普通桁の総初期建設費用が判明している<sup>18)</sup>ため、SUS桁とする場合に置き換える鋼材（PC鋼材、鉄筋、定着具、シース）

の数量および単価を算出し、これらをSUS鋼材の数量、単価に置き換えることで初期建設費用を試算、比較検討を行った。

なお、普通桁、SUS桁における鋼材費の試算に当たっては、橋梁架設工事の積算<sup>19)</sup>や建設物価<sup>20)</sup>などを参照した。

SUS桁の初期建設費用は、普通桁の鋼材費をSUS鋼材費に置換することで試算した。その結果、SUS桁の工事価格は普通桁の約1.3倍となった。

なお、SUS鉄筋やSUS-PC鋼材については、現在の流通価格を参考にし、SUS定着具の価格については、未だ流通していないため、本研究における試験体製作費から推定した。

### (5) 維持管理費用の試算

既存の報告<sup>17)18)</sup>を参考に、普通桁における100年間に必要な保全費用および更新費用を試算した。保全費用の試算にあたっては、実際に供用後35年までに実施された2回の補修履歴をそのまま適用し、それ以降は以下を条件とした。

- ・ 定期点検を5年ごとに実施する
- ・ 架替え前の保全工法は、損傷部分の断面修復工および表面保護工とする（15年ごと）
- ・ 実補修履歴（2回目）以降、1回目の補修にあわせて外ケーブル補強工法を行う
- ・ 外ケーブル補強後に上記補修が必要となった時点で上部工の架替えを行う
- ・ 架け替え後の保全は表面保護工のみとする（30年ごと）
- ・ 実補修履歴（2回目）以降、地覆補修工を15年ごとに実施するが、架替え以降は上記の通り表面保護工のみとし、地覆補修工は実施しない

### (6) ライフサイクルコストの比較検討

ポステンT桁について100年間のLCC検討を行った。LCCの比較結果を図-40に示す。初期建設費は、SUS桁は普通桁の約1.30倍であった。100年間のLCCを考えた場合、普通桁の初期建設費を基準とすると、SUS桁が約1.36倍であるのに対し、普通桁が約2.58倍とSUS桁の総コストの約1.9倍となり、SUS桁が安くなった。

ステンレス鋼材の適用が有効となるのはどの程度の厳しさの塩害環境であるかを検討するため、コンクリート表面塩化物イオン濃度を変えてLCCの検討を行う。実際のM橋で確認された表面塩化物イオン濃度 $C_0=7.7\text{kg/m}^3$ に対して、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>を参考に海岸からの距離に応じた以下の $C_0$ を検討ケースとした。

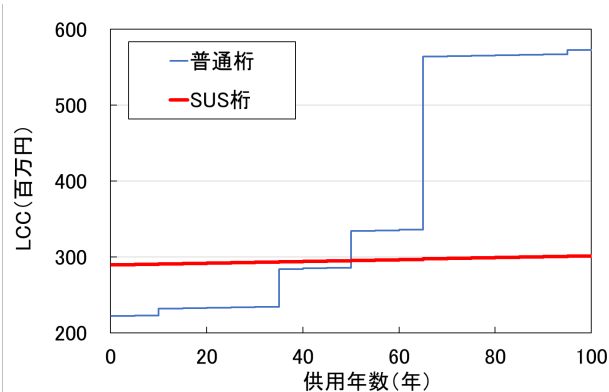


図-40 LCCの比較結果

- ①  $C_0=7.7\text{ kg/m}^3$ （海岸からの距離20m：M橋）
- ②  $C_0=4.5\text{ kg/m}^3$ （海岸からの距離100m）
- ③  $C_0=3.0\text{ kg/m}^3$ （海岸からの距離250m）
- ④  $C_0=2.0\text{ kg/m}^3$ （海岸からの距離500m）

各環境条件下における維持管理費用を試算する際の補修時期は、鋼材位置における塩化物イオン濃度が実際にM橋が補修を行った時の塩化物イオン濃度に達することで判断した。

塩害環境の異なるポステンT桁について100年間のLCCの比較結果を図-41に示す。環境条件が厳しいほど、SUS桁と普通桁のLCCが逆転する時点が早い結果となった。今回検討した橋梁では100年間のLCCにおいてSUS桁が有利となるのは、海岸からの距離100m ( $C_0=4.5\text{kg/m}^3$ ) 以内という検討結果を得た。

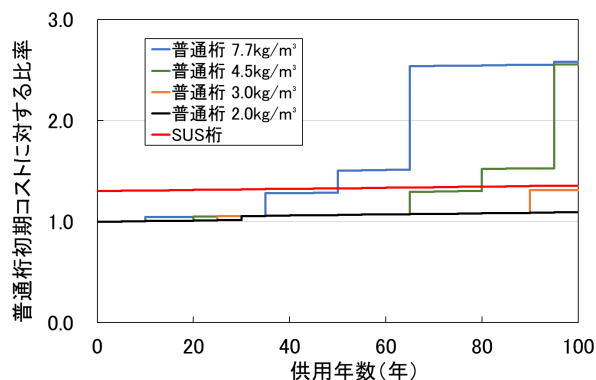


図-41 環境条件を変化させた場合のLCCの比較

## 10.3 塩害対策を想定した橋梁における構造形式の違いによるライフサイクルコストの検討

### (1) 概要

建設時に一般的な塩害対策が行われたPC橋とSUS桁との比較検討を行う。現在、塩害地域にPC橋の建設を計画する場合、鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋、PC鋼材にエポキシ樹脂被覆PC鋼

材鋼材などエポキシ樹脂塗装鋼材が採用されることが多い。さらにシースにPEシースを用いて鋼材の耐食性を高めている。これらを適用したPC橋とSUS桁を適用したPC橋のLCCについて比較検討を行う。橋梁の形式は箱桁橋、T桁橋、中空床版橋を対象とする。

## (2) 箱桁橋

ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書<sup>21)</sup>で検討されているポストテンション方式箱桁橋を対象とした。

<共通事項>

橋梁形式：PC3径間連続箱桁橋

橋 長：121.50m

支間長：40.00m

全幅員：11.50m

有効幅員：車道7.5m+歩道3.0m

斜 角：90°

<普通桁>

PC鋼材：SWPR7B 12S15.2（主鋼材），  
SWPR19 1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：SD295

シース：鋼製シース

かぶり：70mm

塗 装：無し

<エポキシ桁>

PC鋼材：エポキシPC鋼材 12S15.2（主鋼材），  
1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：エポキシ鉄筋 SD295

シース：PEシース

かぶり：35mm

塗 装：有り

<SUS桁>

PC鋼材：SUS 12S15.2（主鋼材），SUS  
1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：ステンレス鉄筋

シース：PEシース

かぶり：35mm

塗 装：無し

箱桁橋の100年のライフサイクルコストの試算結果を図-42に示す。100年間のLCCにおいて、SUS桁は普通桁の約0.35倍と安くなるが、エポキシ桁の約1.21倍と高くなる検討結果を得た。固定支保工による3径間連続、支間40.0mの箱桁橋では、保全100年間のLCCにおいてエポキシ桁に対して優位性を示さない結果となった。

この原因は、①箱桁構造で使用される鋼材数量（鉄筋、PC鋼材）が、ほかの構造形式に比べて多くなること、②塩分が付着しやすい隅角部がなく、塩害に対する適合性が高い構造である

ことから事後保全費が比較的安価になりやすいためであると考えられる。

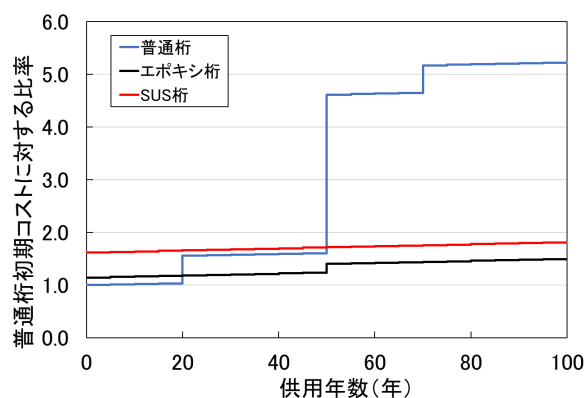


図-42 箱桁橋のLCCの比較

## (3) T桁橋

ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書<sup>21)</sup>で検討されているポストテンション方式T桁橋を対象とした。

<共通事項>

橋梁形式：PC単純T桁橋

橋 長：30.88m

支間長：30.00m

全幅員：11.50m

有効幅員：車道7.5m+歩道3.0m

斜 角：90°

<普通桁>

PC鋼材：SWPR7B 12S12.7（主鋼材），  
SWPR19 1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：SD295 ※スターラップのみエポキシ鉄筋

シース：鋼製シース

かぶり：35mm

塗 装：無し

<エポキシ桁>

PC鋼材：エポキシPC鋼材 12S12.7（主鋼材）  
および1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：エポキシ鉄筋 SD295

シース：PEシース

かぶり：35mm

塗 装：有り

<SUS桁>

PC鋼材：SUSPC鋼材 12S12.7（主鋼材）  
および1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：ステンレス鉄筋

シース：PEシース

かぶり：35mm

塗 装：無し

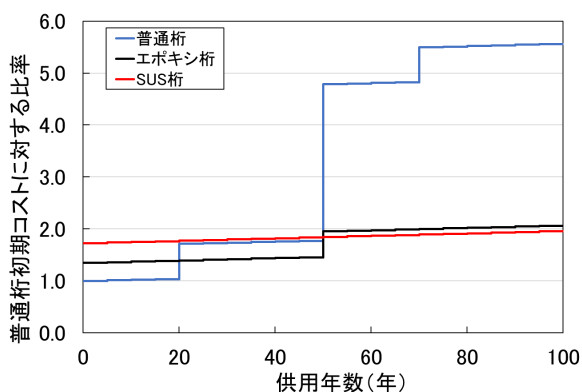


図-43 T桁橋のLCCの比較

T桁橋の100年のライフサイクルコストの試算結果を図-43に示す。100年間のLCCにおいて、SUS桁は普通桁の約0.39倍、エポキシ桁の約0.96倍となり、エポキシ桁に対しても安くなる検討結果を得た。

### (3) 中空床版橋

ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書<sup>21)</sup>で検討されているポストテンション方式中空床版橋を対象とした。

<共通事項>

橋梁形式：PC3径間連続PC中空床版橋

橋 長：75.00m

支間長：25.00m

全幅員：11.50m

有効幅員：車道7.5m+歩道3.0m

斜 角：90°

<普通桁>

PC鋼材：SWPR7B 12S12.7（主鋼材），  
SWPR19 1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：SD295

シーす：鋼製シーす

かぶり：50mm

塗 装：無し

<エポキシ桁>

PC鋼材：エポキシPC鋼材 12S12.7（主鋼材）  
および1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：エポキシ鉄筋 SD295

シーす：PEシーす

かぶり：50mm

塗 装：有り

<SUS桁>

PC鋼材：SUSPC鋼材 12S12.7（主鋼材）お  
よび1S21.8（横締め鋼材）

鉄 筋：ステンレス鉄筋

シーす：PEシーす

かぶり：35mm

塗 装：無し

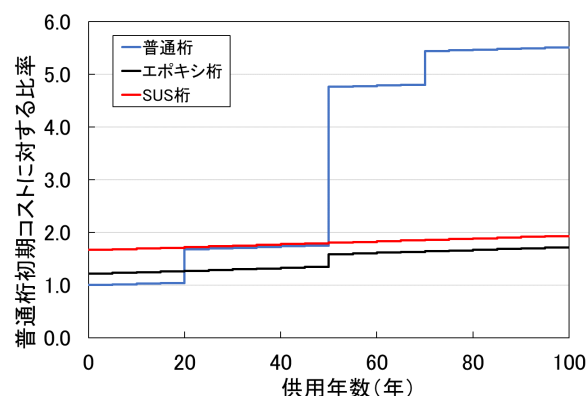


図-44 中空床版橋のLCCの比較

中空床版橋の100年のライフサイクルコストの試算結果を図-44に示す。100年間のLCCにおいて、SUS桁は普通桁の約0.35倍と安くなるが、エポキシ桁の約1.13倍と高くなる検討結果を得た。

T桁>中空床版>箱桁の順にSUS桁の適用性が高い結果となった。これは、箱桁は鋼材比率が高いことと、建設後の事後保全費用(補修面積)を低く抑えられているためと考えられる。

本研究では報告書を参考に補修時期・規模を決定したが、現実には、施工不良によるかぶり不足やグラウトの充填不良、エポキシ樹脂塗装鉄筋の傷などの不測の原因により早期劣化が発生することがある。しかしながら、ステンレスPC構造ではそのような影響を受けることなく高い耐久性を確保することができる。今回LCCの優位性が示せなかった構造形式・規模に対してもステンレス鋼を適用することの意義は十分あると考えている。

### 10.4 まとめ

- 海岸からの距離が近いなど環境条件が厳しいほど、ステンレスPC構造のライフサイクルコストにおける優位性が大きくなることが確認できた。
- ライフサイクルコストの試算結果からは、鋼材比率が高く、従来構造では維持管理費用の高い中小規模のT桁橋においてステンレスPC構造の優位性が高い結果となった。
- ステンレスPC構造は、施工の良否の影響を受けずに高い耐久性を確保することができるので、ライフサイクルコストの試算により必ずしも優位な結果とならなかった構造物においてもステンレスPC構造を適用する意義は十分あると考えている。

# 第11章 ステンレスPC鋼材，定着具の規格試案の提案

## 11.1 ステンレスPC鋼材の規格試案

ステンレスPC鋼より線の規格について、「JIS G 3536 PC鋼線及びPC鋼より線」を参考に試案を作成した。

### (1) 適用の範囲

この規格は，プレストレストコンクリートに用いるステンレスPC鋼より線（以下，SUSPC鋼より線）について規定する。

### (2) 参考規格

- JIS G 3536 PC鋼線及びPC鋼より線
- JIS G 4308 ステンレス鋼線材
- JIS G 0571 ステンレス鋼のシュウ酸エッチング試験方法
- JIS G 0572 ステンレス鋼の硫酸・硫酸第二鉄腐食試験方法
- JIS G 0573 ステンレス鋼の65%硝酸腐食試験方法
- JIS G 0575 ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法
- JIS G 0577 ステンレス鋼の孔食電位測定方法

### (3) 材料

SUSPC鋼より線に用いる材料は，JIS G 4308に適合したステンレス鋼線材のSUS304N1とする。

### (4) 製造方法

製造は JIS G 3536に準拠し，次の工程による。

- a) 線材を冷間加工する工程。
- b) a)を行った素線をより合わせた後，残留ひずみ除去のため，ブルーイングを行ってより線とする工程。

### (5) 機械的性質

SUSPC鋼より線の機械的性質を表-26に示す。

表-26 ステンレスPC鋼より線の機械的性質

呼び名	最大試験力 (kN)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	0.2%永久伸びに対する試験力(kN)	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ワラゲーション値(%)
7本より 15.2mm	222 以上	1600 以上	189 以上	1360 以上	1.4 以上	4.0 以下

伸び量がJIS G 3536に規定するPC鋼より線より著しく小さいことから，設計には留意が必要。

### (6) 形状

JIS G 3536に準拠する。

- a) より線は，バインドなしで切断したとき，ばらけてはならない。
- b) より線のより長さは，より線の各部で一樣でなければならない。よりの長さは，それぞれの径の12～18倍とする。なお，よりの長さとは，任意の素線1本が作るらせんのピッチをいう。

### (7) 寸法及び許容差

表-27 より線の寸法及び許容差 単位(mm)

呼び名	径 <sup>a)</sup>	許容差	径差(心線-側線) <sup>b)</sup>
7本より 15.2mm	15.2	+0.4,-0.2	0.08以上

注a) より線の径は，より線の外接円の直径とする。

注b) 中心にある素線と心線，外側の素線を側線という。心線の径から側線の径を引いた値を径差という。

### (8) 公称断面積及び単位質量

表-28 より線の公称断面積及び単位質量

呼び名	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	単位質量(kg/km)
7本より15.2mm	138.7	1100

### (9) 耐食性

特に注文者の指定がある場合は，(15)によっ

て腐食試験を行い、その耐食性は受渡当事者間の協定による。

なお、試験方法は、(15)によって規定する方法から、受渡当事者間の協定によって選定する。

#### (10) 外観

有害なきず、さびなどの欠点があってはならない。

#### (11) 試験片の採り方及び試験片の数

- 最大試験力及び伸びの試験片は、5条ごと及びその端数を一組とし、それぞれの組から任意の1条を選び、その一端から1個採る。
- 0.2%永久伸びに対する試験力の試験片は、30条ごと及びその端数を一組とし、それぞれの組から任意の1条を選び、その一端から1個とる。
- リラクセーション試験の試験片は、材料又は製造工程を変更した場合に、任意の1条を選び、その1条から1個採る。
- 同一の素線を用い、同一機械によって連続製造したより線を短く切断した製品に対しては、a)及びb)の規定は、切断前の1条を1条とみなす。
- a)及びb)の試験片のつかみ間隔は、600mm以上とする。
- 形状、寸法及び外観の試験片は、1条ごとに1個採る。

#### (12) 引張試験

引張試験は次のa)～c)によるほか、JIS Z 2241による。

- 試験片がつかみ部分から破断して規定に適合しなかった場合は、その試験を無効とし、更に同一の組から試験片を1個採り、試験を行う。
- 力を加える速度

表-29 引張試験における力を加える速度

測定項目	力を加える速度の種類	力を加える速度
0.2%永久伸びに対する試験力	平均応力増加率	3~100 N/(mm <sup>2</sup> ・s) a)
最大試験力 伸び	ひずみ速度	0.5~50 %/min <sup>b)</sup>

注a) 力を加える速度は、試験力の増加速度を公称断面積で除した値とする。

注b) 0.2%永久伸びに対する試験力の測定後に続けて最大試験力及び伸びを測定する場合についても、この速度によるものとする。

- つかみ間隔を(11)のe)に規定する値にとり、表-26の最大試験力の下限值の10%の初期試験力をかけ、その時の全伸びを0.1%とし、以後の試験機のヘッドの動きを測定し、破断時伸びを算出する。破断時伸びの測定において、破断する前に規定の伸び値に適合する場合は、破断時伸びは測定しなくてよい。

#### (13) リラクセーション試験

リラクセーション試験は、JIS Z 2276による。ただし、試験は常温(20±5℃)で行い、力を加える速度、初期試験力、初期試験力保持時間及びリラクセーション時間は表-30による。

表-30 リラクセーション試験条件

項目	試験条件
力を加える速度 <sup>a)</sup>	200±50 N/(mm <sup>2</sup> ・min) [3.33±0.83 N/(mm <sup>2</sup> ・s)]
初期試験力	表-9.1の最大試験力の70%に相当する値
初期試験力の保持時間	初期試験力を120±2 s 維持
リラクセーション時間	つかみ間隔を一定した状態で、1000時間保持後、試験力を測定し、リラクセーション値(初期試験力に対する低下率)を求める。 保持時間を120時間で行う場合は、JIS Z 2276の7.3.5(室温試験の場合の試験期間)の外挿法によってリラクセーション値を求める。

注a) 力を加える速度は、試験力の増加速度を公称断面積で除した値とする。

#### (14) 寸法の精度

径の測定は、任意の外接円の同一断面の最大値と最小値とを測定し、その平均を求める。

#### (15) 腐食試験

腐食試験方法は、JIS G 0571、JIS G 0572、JIS G 0573、JIS G 0575およびJIS G 0577による。

#### (16) 検査

- 機械的性質は、(5)の規定に適合しなければならない。
- 形状及び寸法は、(6)(7)(8)の規定に適合しなければならない。
- 外観は、(10)に適合しなければならない。試験片について行った最初の試験の結果が、(5)の規定に適合しなかった場合には、最初の試験片を採った条から更に1個の試験片を採り、かつ、同じ組の他の2条の一端からそれぞれ試験片を1個採り、この3個の試験片で再試験を行っても良い。再試験の結果、3個の試験片の



値がすべて(5)の規定に適合すれば、その組のより線は合格とし、1個でも適合しないときは、その組のより線は不合格とする。

#### (17) 表示

- a) 種類の記号
- b) 呼び名
- c) 質量
- d) 製品の識別番号
- e) 製造業者名又はその略号

#### (18) 報告

製造業者は、検査文書を注文者に提出しなければならない。報告は、JIS G 0404 の箇条 13 (報告) による。ただし、報告する検査文書の種類は、注文時に特に指定がない場合は、JIS G 0415 の表 1 (検査文書の総括表) の記号 2.3 (受渡試験報告書) 又は 3.1.B (検査証明書 3.1.B) とする。

### 11.2 定着具の規格試案

- (1) 定着具は、定着されたステンレスPC鋼材の規格に定められた引張荷重値に達する前に、破壊したり著しい変形を生じることのないような構造および強さを有するものでなければならない。
- (2) 定着具の性能は、土木学会規準 JSCE-E503 「PC定着工法および接続具の性能試験方法」に基づいて確かめることを原則とする。
- (3) 定着具は、ステンレスPC鋼材と異種金属接触腐食の恐れのない材料を用いなければならない。  
「2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】」特殊コンクリート 10.5.2.2 に準拠する。  
ステンレスPC鋼材は優れた耐食性を示す一方で、普通鋼材との接触により異種金属接触腐食を起こす恐れがある。したがって、ステンレスPC鋼材と接触する定着具には、異種金属接触腐食の恐れのない材料を用いる必要がある。
- (4) 定着具は、倉庫などで、風雨に晒されないよう、また、油やゴミが付着しないように保管しなければならない。  
水や汚れは定着具の腐食の原因となる。また、異物は定着の不具合を招くことから、倉庫などの屋内で、油やゴミが付着しないように保管する必要がある。

## 第12章 まとめ

### ステンレスPC鋼より線の引張特性

- SUSPC鋼より線は普通鋼PCより線と比較し、低い応力レベルで剛性の低下がみられた。
- SUSPC鋼より線は、普通PC鋼より線と比較し、破断ひずみが小さく、本試験ではひずみが20,000 $\mu$ 程度で破断することが確認された。
- 試験により明らかとなったSUSPC鋼より線の引張特性を踏まえて、新たにSUSPC鋼より線の設計用応力-ひずみ関係と破断ひずみの設計用値を提案した。

### ステンレスPC鋼より線を用いたプレテンションPC部材の力学特性

- SUSPC鋼より線は普通PC鋼より線よりと同等以上のコンクリートとの付着性能を有する。設計では普通PC鋼より線と同じ付着伝達長を仮定してよい。
- SUSPCと普通PCとでは曲げひび割れ分散性に違いはなかった。
- SUSPC鋼より線は破断ひずみが小さいため、曲げ終局時に鋼材破断モードとならないように設計段階において確認する必要がある。
- 普通PC鋼より線を用いたプレテンPC部材と同様に、SUSPC鋼より線を用いたプレテンPC部材の曲げ載荷試験の実験値は、従来の計算仮定を用いた計算により精度よく再現することができた。このことから、SUSPC鋼より線を用いたプレテンPC部材は従来の設計法により設計可能であるといえる。

### ステンレス鋼を用いたシングルストランド用PC定着具の開発

- ステンレスPC鋼より線を、定着効率95%以上で定着することができ、かつ破壊や変形の起こらないステンレス鋼製のシングルストランド用PC定着具を開発した。

### ステンレス鋼を用いたマルチストランド用PC定着具の開発

- 開発したステンレス製シングルストランド用PC定着具のアンカーヘッドとウェッジの仕様をもとに、12本のマルチストランド用PC定着具を製作し、定着性能試験を行った。PC鋼より線の規格荷重の95%以上の荷重に対する定着を満足することを確認した。
- ### ステンレス製定着具を用いたポストテンションPC部材の力学特性

- ステンレスPC鋼より線を用いたポストテンションPC部材のプレストレス減少は普通PC鋼より線を用いた場合と大差なかった。
- ステンレスPC鋼より線、ステンレス製定着具を用いたポストテンションPCはり部材は、曲げひび割れ性状、荷重-変形関係、破壊形態を含め曲げ耐荷挙動が、普通PC鋼より線を用いた従来のポストテンションPCはり部材と同様であった。
- ステンレスPC鋼より線、ステンレス製定着具を用いたポストテンションPCはり部材の曲げ耐荷挙動は、従来用いられている一般的な計算仮定に基づき再現できる。したがって、ステンレスPC鋼より線の応力-ひずみ関係や破断ひずみなどの物性値を試験に基づき考慮すれば、力学的な性能は従来と同じ考え方で設計することが可能であるといえる。
- 設計では、ステンレスPC鋼より線とシースの摩擦係数は、普通PC鋼より線に対して従来用いられてきた値を用いることが適当である。

### ステンレス鋼製PC鋼材の耐久性に関する検討

- 緊張したPC鋼より線の内部にもペーストが進展し、内側にある中心素線は腐食する。

- ステンレス鋼の腐食速度は普通鋼の腐食速度に比べ極めて遅く、1/10以下であることが確認できた。
- 緊張力の有無に拘わらず、ステンレス鋼は普通鋼と同様に腐食速度が変化しない。
- ステンレス鋼と普通鋼ともに塩化物イオン量の増加に伴い腐食速度が増加する。ただし、ステンレス鋼の腐食速度の変化は普通鋼に比べ極めて小さい。
- 結合材種類は、ステンレス鋼の腐食速度に影響を及ぼさない。

#### ステンレス鋼製定着具の耐久性に関する検討

- 分極抵抗の測定結果より、普通鋼、ステンレス鋼ともに、塩化物イオン濃度が高いほど腐食しやすい条件であることが確認された。
- 分極抵抗の測定結果より、ステンレス鋼製の定着具は普通鋼よりも腐食しにくいことが確認された。
- 普通鋼、ステンレス鋼定着具ともに緊張力の有無が腐食に及ぼす影響は認められなかった。
- ステンレス鋼製の定着具は塩化物イオン濃度 $15\text{kg/m}^3$ のコンクリート中においても腐食しなかった。
- 目視観察の結果、グラウトが充填されていない箇所では水分が溜まるため、ステンレス鋼の一部でわずかに腐食が発生した。

#### ステンレス鋼を用いたPC構造の設計法の提案

- 本研究で得られたステンレスPC鋼材およびこれを用いたPC構造に関する技術的知見をもとに、実建造物の設計および施工における提案や留意事項、従来の規程を踏襲して問題ないと思われる点についてとりまとめた。

#### ステンレス鋼を用いたPC建造物のライフサイクルコストの検討

- 海岸からの距離が近いなど環境条件が厳しいほど、ステンレスPC構造のライフサイクルコストにおける優位性が大きくなることが確認できた。
- ライフサイクルコストの試算結果からは、鋼材比率が高く、従来構造では維持管理費用の高い中小規模のT桁橋においてステンレスPC構造の優位性が高い結果となった。
- ステンレスPC構造は、施工の良否の影響を受けずに高い耐久性を確保することができるので、ライフサイクルコストの試算により必ずしも優位な結果とならなかった建造物においてもステンレスPC構造を適用する意義は十分あると考えている。

#### ステンレスPC鋼材、定着具の規格試案の提案

- 本研究で得られた知見をもとに、ステンレスPC鋼材、定着具の規格試案を提案した。

## 参考文献

- 1) ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案), 土木学会, 2008
- 2) 梅本博文: 国内初, 橋桁にステンレス鉄筋使用能生大橋架替工事, 日本鋼構造協会技術誌 JSSC, No.11, pp.23-26, 2012
- 3) 白濱昭二, 方蘇春, 小林剛, 宮川豊章: 2相ステンレス PC 鋼材の基礎的諸特性およびこれを用いたプレストレストコンクリート部材の曲げ載荷特性に関する研究, 材料, Vol.48, No.10, pp.1199-1206, 1999
- 4) プレキャスト PC 床版による道路橋更新設計施工要領, プレストレストコンクリート工学会, 2018
- 5) 土木学会: 2017 年制定コンクリート示方書[設計編], 2017
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 2002
- 7) 土木学会: プレストレストコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリー66, 1991
- 8) 石田博彰, 小林一輔, 趙力采, 則武良具: FRP ロッドを用いたプレストレストコンクリート構造に関する研究, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.657-660, 1986
- 9) プレストレスト工学会: 会誌「プレストレストコンクリート」講座集—3.施工・品質管理編(2)—, 2015.
- 10) 細木康夫, 渡辺陽太, 鬼木立行, 黒木隆二: ポリエチレン製シーす実用化に向けての研究, プレストレストコンクリート技術協会 第 8 回シンポジウム論文集, pp.493-498, 1998
- 11) プレストレストコンクリート工学会: PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針(案), 2015
- 12) 水流徹, 前田龍, 春山志郎: 交流法腐食モニターの局部腐食への適用, 防食技術, Vol.28, No.12, pp.638-644, 1979
- 13) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術 '17(基礎編), pp.196-197, 2017
- 14) 東洋輔, 宮里心一, 仁井谷教治, 山田一夫, 宮川豊章: グラウトの塩分量と PC 鋼材の緊張力が鋼材腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, pp.103-117, 2009
- 15) 中島朋子, 宮里心一: 曲げ加工を有するステンレス鉄筋のコンクリート中における腐食特性の解明, 土木学会論文集 E2, Vol.75, No.1, pp.19-33, 2019
- 16) 社団法人 プレストレストコンクリート技術協会: PC 定着工法 2010 年版, 2010
- 17) 新潟県村上地域振興局 地域整備部, 株式会社 クリエイトセンター: 平成 22 年度 橋単繕 第 101-00-02-80 号一般国道 345 号県単橋梁維持修繕村中橋塩害補修設計委託報告書, 2011
- 18) 菊池慶一: 補修設計時の点検・積算における課題の整理および LCC 比較による対策選定の提案, 長岡技術科学大学建設工学専攻修士論文, 2016
- 19) 日本建設機械施工協会: 橋梁架設工事の積算, 令和 3 年度版
- 20) 建設物価調査会: 建設物価, 2021.10
- 21) 国土交通省土木研究所, 構造橋梁部橋梁研究室, 材料施工部コンクリート研究室, 社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会: ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書, 2001.

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート No.2020-8

PC鋼材、定着具、鉄筋にステンレス鋼を用いた  
新たな高耐久プレストレストコンクリート構造の  
開発

2023.5