

# 研 究 報 告

令和 7 年 4 月 21 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 京都大学大学院工学研究科

氏 名 : 松本 理佐

研究課題名 : 溶射被膜の機械的性質に着目した桁端部の耐久性向上に関する研究

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

溶射被膜の機械的性質に着目した桁端部の耐久性向上に関する研究

Durability Improvement of Girder-End Focusing on Mechanical Properties of Thermal Spray Coatings

京都大学大学院工学研究科 助教 松本 理佐

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 背景

鋼橋の桁端部では、腐食・疲労による損傷が激しい．この桁端部に対して溶射を施すことにより、腐食耐久性を向上させる技術が開発されている．他方、溶接部に金属溶射を施すことで、溶射被膜が健全な条件下では疲労寿命が 10 倍以上になるという結果が得られている(内田ら：鋼構造年次, 2013)．本研究の目的は、桁端部の疲労耐久性向上のため、溶射皮膜の機械的性質および溶射を施した溶接継手の疲労強度を明らかにすることである．本研究では、疲労耐久性向上として必須条件である【溶射被膜が健全である条件】を明らかにする．具体的には、溶射被膜の機械的性質・付着特性を明らかにし、溶射による疲労強度向上効果が得られる設計条件を決定する上で必要となる基礎的なデータを取得する．

2. 試験概要

実験項目を表 1 に示す．基材は炭素鋼又はステンレス鋼とし、溶射材料はマルテンサイト系ステンレス鋼とした．材料試験は、引張試験、圧縮試験、曲げ試験とした．

表 1 実験項目

| 試験条件       | 試験体の種類                                           |
|------------|--------------------------------------------------|
| 引張試験 (図 1) | 炭素鋼板(CS), ステンレス鋼板(SS)<br>溶射被膜(YS,マルテンサイト系ステンレス鋼) |
| 圧縮試験 (図 2) | ステンレス鋼丸棒(SS), ステンレス鋼丸棒+溶射被膜(SS+YS)               |
| 曲げ試験 (図 3) | 炭素鋼板+溶射被膜(CS+YS)                                 |

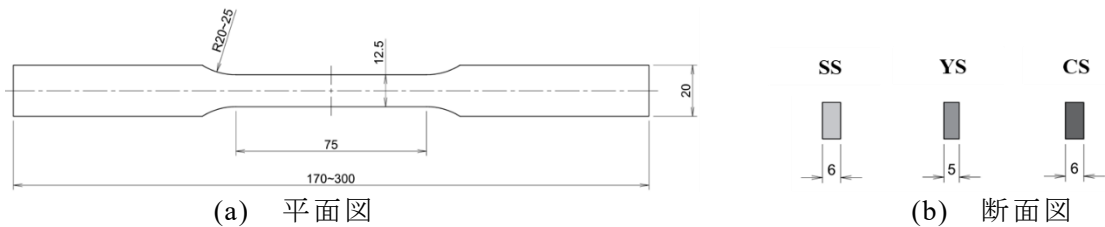


図 1 引張試験体

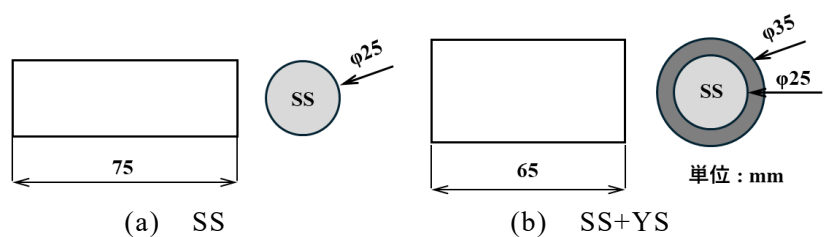


図 2 圧縮試験体

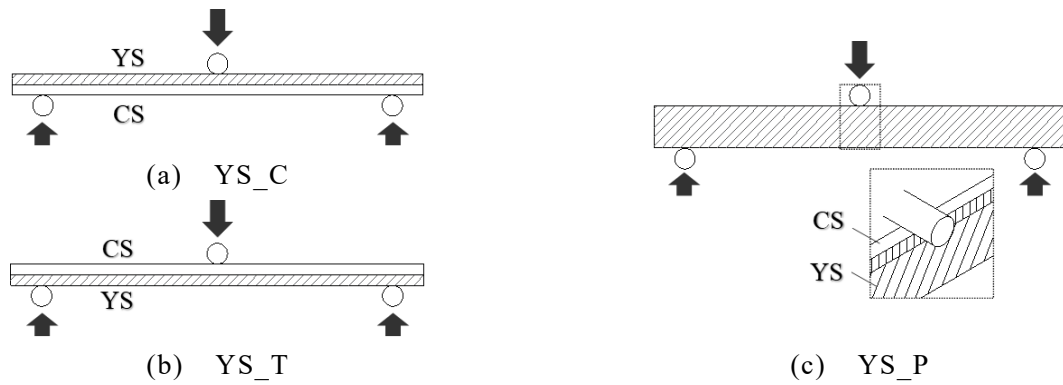


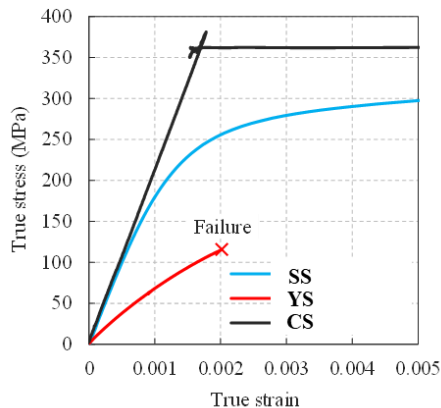
図 3 曲げ試験

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### 3. 試験結果

##### 3. 1 引張試験

図 4(a)に引張試験で得られた真応力－真ひずみ関係を、図 4(b)に引張試験の破壊後の様子を示す．炭素鋼板(CS)とステンレス鋼板(SS)は、弾性域から塑性域に遷移しているのに対し、溶射被膜(YS)では、弾性域内で破断している．図 4(b)からもわかるように、溶射被膜(YS)では、破壊時に試験体の伸びが生じず、脆性破壊が生じた．表 1 には、引張試験で得られた弾性係数、ポアソン比、降伏強度、破断強度の一覧を示す．溶射被膜の弾性係数は 70MPa 程度、引張強度は 100MPa、ポアソン比は 0.15 程度であった．



(a) 真応力－真ひずみ関係



(b) 破壊時の様子

図 4 引張試験結果

表 1 引張試験の結果一覧

| Material | Specimen ID | E (MPa) | $\nu$ | $\sigma_y$ or $\sigma_{0.2}$ (MPa) | $\sigma_u$ (MPa) |
|----------|-------------|---------|-------|------------------------------------|------------------|
| SUS304   | SS1         | 191,000 | 0.268 | 285                                | 667              |
|          | SS2         | 192,000 | 0.267 | 287                                | 676              |
|          | SS3         | 196,000 | 0.272 | 285                                | 665              |
|          | SS4         | 193,000 | 0.269 | 286                                | 661              |
|          | SS5         | 192,000 | 0.258 | 286                                | 662              |
|          | Ave.        | 193,000 | 0.267 | 286                                | 666              |
| YS420    | YS1         | 68,100  | 0.140 | -                                  | 78               |
|          | YS2         | 71,900  | 0.158 | -                                  | 109              |
|          | YS3         | 71,900  | 0.146 | -                                  | 129              |
|          | YS4         | 68,600  | 0.129 | -                                  | 131              |
|          | YS5         | 68,900  | 0.138 | -                                  | 116              |
|          | Ave.        | 69,900  | 0.142 | -                                  | 113              |
| SS400    | CS1         | 210,000 | 0.279 | 381                                | 438              |

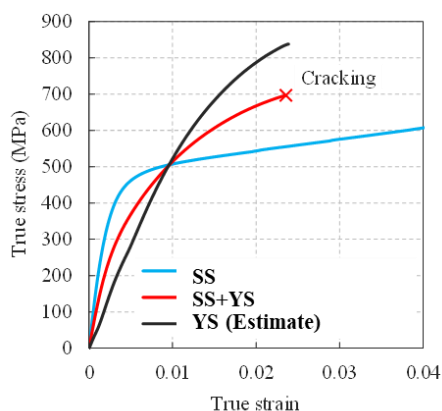
### 3. 2 圧縮試験

図 5(a)に圧縮試験で得られた真応力－真ひずみ関係を、図 5(b)に圧縮試験の破壊時の様子を示す．図 5(a)中には、式(1)から算出される溶射被膜のみの真応力－真ひずみ関係の推定線も示している．

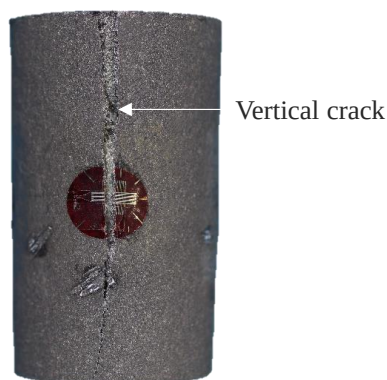
$$P = \sigma_{SS}A_{SS} + \sigma_{YS}A_{YS} \quad (1)$$

ここに、 $P$ は圧縮荷重(N)、 $\sigma_{SS}$ 、 $\sigma_{YS}$ はそれぞれステンレス鋼板および溶射被膜に生じる直応力(MPa)、 $A_{SS}$ 、 $A_{YS}$ はそれぞれステンレス鋼板および溶射被膜の断面積(mm<sup>2</sup>)である．

図 5(a)からわかるように、溶射被膜の圧縮強度は 800MPa 程度であり、引張強度の 8 倍程度を有した．図 5(b)に示したように、圧縮試験では鉛直ひずみが生じて破壊に至った．これは、ポアソン効果による引張ひずみが原因で鉛直ひび割れが生じたと考えられる．表 2 には、圧縮試験で得られた弾性係数、ポアソン比、降伏強度、破断強度の一覧を示す．溶射被膜の弾性係数は 70MPa 程度であり、引張試験の結果と同程度であった．



(a) 真応力－真ひずみ関係



(b) 破壊時の様子(YS)

図 5 引張試験結果

表 2 圧縮試験の結果一覧

| Material             | Specimen ID | E (MPa) | $\nu$ | $\sigma_y$ or $\sigma_{0.2}$ (MPa) | $\sigma_u$ (MPa) | $\epsilon_{uv}$ | $\epsilon_{ut}$ |
|----------------------|-------------|---------|-------|------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| SUS304               | C-SS1       | 184,000 | 0.226 | -402                               | -                | -               | -               |
|                      | C-SS2       | 198,000 | 0.236 | -443                               | -                | -               | -               |
|                      | C-SS3       | 200,000 | 0.281 | -452                               | -                | -               | -               |
|                      | C-SS4       | 197,000 | 0.282 | -439                               | -                | -               | -               |
|                      | Ave.        | 195,000 | 0.256 | -434                               | -                | -               | -               |
| SUS304<br>with YS420 | C-SS+YS1    | 116,000 | 0.133 | -407                               | -667             | -0.0188         | 0.00961         |
|                      | C-SS+YS2    | 120,000 | 0.158 | -383                               | -713             | -0.0263         | 0.0145          |
|                      | C-SS+YS3    | 124,000 | 0.165 | -389                               | -715             | -0.0216         | 0.0115          |
|                      | C-SS+YS4    | 122,000 | 0.164 | -369                               | -697             | -0.0236         | 0.0126          |
|                      | C-SS+YS5    | 123,000 | 0.165 | -387                               | -691             | -0.0218         | 0.0114          |
|                      | Ave.        | 121,000 | 0.157 | -387                               | -696             | -0.0224         | 0.0119          |
| YS420<br>(Estimate)  | C-SS+YS1    | 71,600  |       | -592                               | -795             |                 |                 |
|                      | C-SS+YS2    | 63,100  |       | -575                               | -866             |                 |                 |
|                      | C-SS+YS3    | 66,100  |       | -594                               | -879             |                 |                 |
|                      | C-SS+YS4    | 59,500  |       | -587                               | -838             |                 |                 |
|                      | C-SS+YS5    | 66,000  |       | -589                               | -833             |                 |                 |
|                      | Ave.        | 65,300  |       | -587                               | -842             |                 |                 |

### 3. 3 曲げ試験

曲げ試験では、基材と溶射被膜の付着を向上させる目的で Ni-Al 下地処理を行った試験体と下地処理を行わなかった試験体に対して、試験を行った。図 6 に、曲げ試験の荷重－スパン中央の変位関係と破壊時の様子を示す。図 6(a)~(c)より、すべての試験体で、溶射被膜による断面二次剛性の増加による初期剛性の増加が確認された。図 6(a)より、溶射被膜が圧縮を受ける条件では、最大荷重の大幅な増加がみられ、弾性域の後に塑性域に入った。最終的には、溶射被膜が基材より剥離した。図 6(b)より、溶射被膜が引張を受ける条件では、弾性域内で荷重が低下した。これは、溶射被膜が引張破断した後に、基材から溶射被膜が剥離したためである。図 6(c)より、炭素鋼板 CS と溶射被膜 YS の両方に等しい曲げ荷重が作用する YS\_P では、荷重は直線的に増加した後、急激に減少した。その後、荷重は一時的に増加し、再び減少した。最初の荷重減少は、溶射被膜 YS が引張側で亀裂が発生したことが原因であり、2 回目の荷重減少は、溶射被膜 YS の剥離が原因であった。すべての試験ケースにおいて、溶射試験片の初期剛性は基材試験片のそれよりも大きく、溶射被膜が剛性の工場に貢献していることが示された。最後に、NiAl 下地処理の有無が曲げ試験結果に与える影響は確認されなかった。

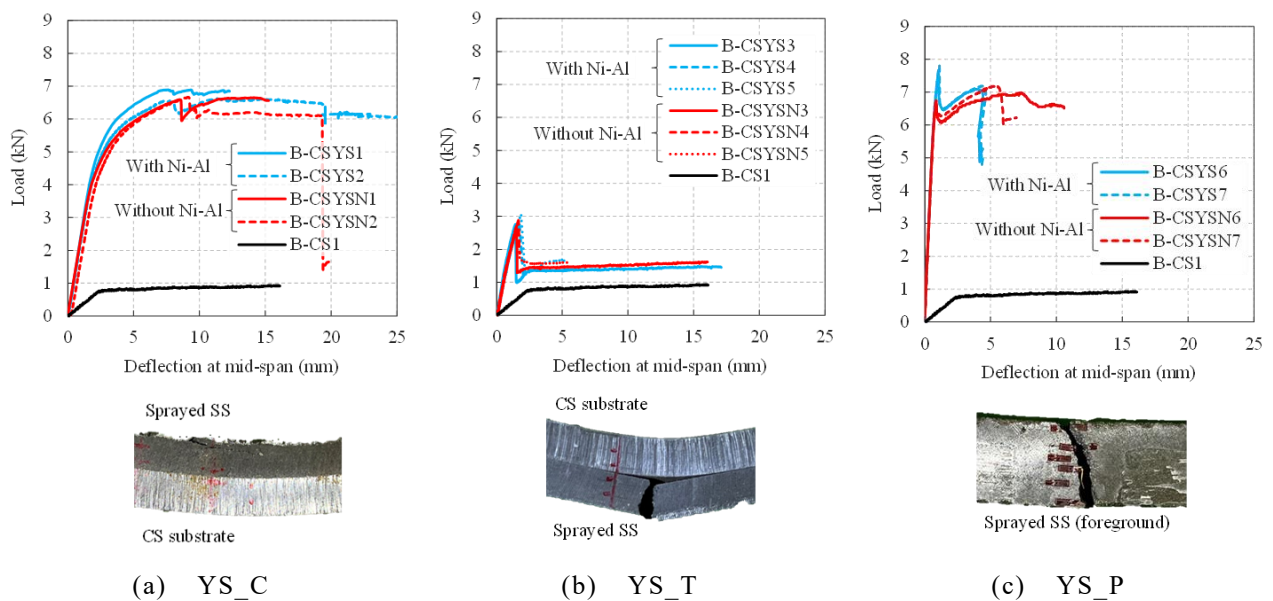


図 6 圧縮試験の結果

### 4. 研究成果のまとめ

本研究では、マルテンサイト系ステンレス鋼を材料とした溶射被膜を施した鋼板に対して、引張試験、圧縮試験、曲げ試験の 3 つの基本的な材料試験を実施し、構造物の補修に対する溶射被覆の適用性を評価した。

引張試験で得られた溶射被膜の機械的特性は、鋼板の特性とは著しく異なった。引張および圧縮負荷の両方で、溶射被覆のヤング率とポアソン比は、それぞれ鋼板の約 3 分の 1、約半分であった。溶射被覆の引張強度は鋼板のそれよりも大幅に低く、延性のある伸びは見られなかったが、引張破断時のひずみは鋼の降伏ひずみと同等であった、したがって、引張荷重下では、溶射材の耐力は弾性域にあると推定される。

円筒状試験片に周方向に溶射した試験片の圧縮試験では、溶射材は圧縮応力下で延性挙動を示し、鋼円筒とほぼ同等の強度を有することがわかった。この結果から、溶射皮膜は圧縮

応力下では塑性域まで補強効果を発揮することが確認された。

ステンレス鋼を溶射した鋼板について、3 方向の荷重を考慮した 3 点曲げ試験を実施した。溶射皮膜に圧縮応力が加わった場合、皮膜は耐荷重能力に大きく貢献し、皮膜と基材の界面で剥離が発生しても、荷重の減少はわずかであった。一方、引張応力が加わった場合、溶射ステンレス鋼も耐荷重能力を向上させましたが、圧縮の場合よりも低い荷重で亀裂が発生した。下地と溶射ステンレス鋼の両方に同一の曲げモーメントが加わった場合、亀裂とコーティングの剥離の両方が耐荷重能力の低下に大きく影響した。

本研究では、TS コーティングの基本的な機械的特性であるヤング率とポアソン比が調査された。しかし、コーティングの明確な破壊基準は特定されていない。すべての実験結果を正確に説明する包括的な破壊基準を開発するには、さらなる検討が必要である。

### （ 発 表 論 文 ）

- 1) Eitaro Horisawa, Masahide Matsumura, Risa Matsumoto, Tatsuya Tanimoto, Kunitomo Sugiura; Chihiro Morita : Mechanical behavior of structural steel clad by wire arc thermal spraying, *Journal of Constructional steel research*. (投稿中)