

(103) 各種連続繊維補強材の海洋環境下における暴露試験

(株)ピー・エス 開発技術部 正会員 ○高島 秀和
 建設省土木研究所 材料施工部 西崎 到
 建設省土木研究所 材料施工部 佐々木 巖
 (株)ピー・エス 開発技術部 正会員 川本 幸広

1. はじめに

近年、炭素、アラミド、ガラス、およびビニロンなどの高強度連続繊維に樹脂などの繊維結合材を含浸硬化させ一体成形したFRP材が、鉄筋やPC鋼材の代替材料として使われ始めている。それらのFRP材はコンクリートを補強する目的で使用されるので連続繊維補強材と呼ばれており、鋼材と比べて耐塩性に対して非常に優れた耐久性能を有しているため、海洋環境下にあるコンクリート構造物への適用が進められている。既に、我が国においては、塩害対策として連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の施工例が多数報告されている。しかし、連続繊維補強材は極めて歴史の浅い材料であり、室内試験や劣化促進試験による評価はあるものの、実際の海洋環境下における長期的な耐久性能を実証した研究はほとんどなされていないのが現状である。したがって、材料組成も成形方法も異なる多数の連続繊維補強材が、長期にわたり海洋環境下で一様に十分な耐久性能を発揮しうるのであるかどうか、不明である。また、一概に海洋環境下と言っても色々な状況があり、その上、その環境に曝される連続繊維補強材の状態も多種にわたると考えられる。

本報告は、上記の問題を解明するために、建設省土木研究所化学研究室の委託により昭和63年より「マリステーション-するが-」で開始した連続繊維補強材の海洋環境下暴露試験の中間調査結果を取りまとめ、連続繊維補強材の耐久性能評価を報告するものである。

2. 海洋暴露施設

本試験を実施した海洋暴露施設は、図-1に示すように、静岡県大井川河口沖の駿河湾内(海岸線から約250m、水深7.5m)に建設された建設省所有の海洋技術総合研究施設「マリステーション-するが-」(写真-1)を使用した。「マリステーション-するが-」には暴露供試体を設置するために三つのデッキが設けられている。第1デッキは海面上約14mの高さで耐候暴露架台と観測棟がある。第2デッキはコンクリート供試体設置用のデッキであり、海面上約9mの高さにある。そして、第3デッキは高さ約2mの位置にあり、常にしぶきを受ける状況で、コンクリート供試体および鋼材の防食試片の暴露が行われている。また、海中部では電気防食に関する試験も行われており、一方、第1デッキ上には海面上29mの高さの観測塔があり、風向・風速計などが取り付けられている。

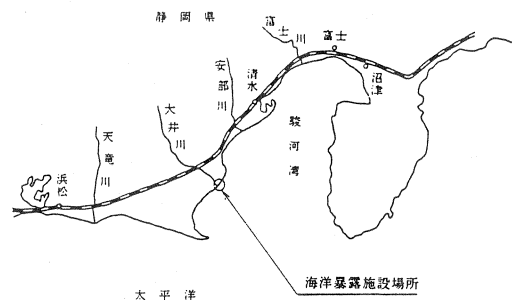


図-1 海洋暴露施設場所

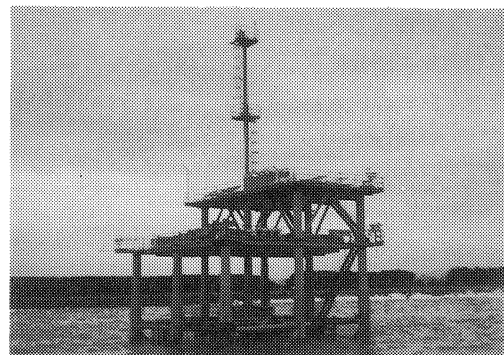


写真-1 マリステーション-するが-

3. 暴露供試体

3.1 供試体の設置

連続繊維補強材の暴露試験供試体は、昭和63年2月より平成6年3月にかけて、都合5種類の供試体架台を6回に分けて「マリステーション-するがー」に設置した。その設置状況は、連続繊維補強材を緊張あるいは無緊張で架台に取り付け、第2デッキ、第3デッキおよび海中に暴露した。本試験はその内の1部分を回収し、調査・試験したものである。

3.2 A供試体(第1回目回収供試体)

A供試体は、図-2に示すように、コンクリート製の架台に3本一組で連続繊維補強材を緊張定着したものであり、昭和63年2月に第2デッキに設置した最も初期の供試体である。使用した連続繊維補強材の種類は炭素繊維系2種類[C(I)、C(II)]、アラミド繊維系2種類[A(0)、A(II)]の4種類で、各々5tonf/本(49KN/本)で緊張定着した。コンクリート架台は16体製作し、環境条件による耐久性の違いを比較するため「マリステーション-するがー」に8体、建設省土木研究所構内に8体設置した。設置に際して、事前にそれぞれの連続繊維補強材の定着荷重および弾性係数を測定した。A供試体の詳細については、表-1および表-2に試験結果とともに記す。

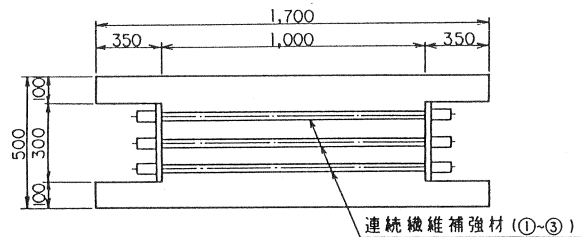


図-2 A供試体

3.3 B供試体(第2回目回収供試体)

B供試体は長尺の連続繊維補強材である。これは「マリステーション-するがー」の第2デッキ床から海中部まで一本の供試体で配置することにより、海上、飛沫部および海中の各海洋環境下の暴露を一度に実施したものである。なお、設置した連続繊維補強材は無緊張であり、その種類は炭素繊維系1種類[C(I)]、アラミド繊維系2種類[A(I)、A(II)]、ガラス繊維系1種類[G]、ビニロン繊維系1種類[V]の5種類である。B供試体の設置状況を図-3に示すが、海中部や海上部のない所は、暴露中において台風や高波などの風雨、波浪により切断紛失した部分である。B供試体の暴露に際して、事前に各連続繊維補強材の引張強度および弾性係数を測定した。B供試体の暴露は平成2年5月に開始された。

3.4 C供試体(第3回目回収供試体)

C供試体の暴露試験は、海中部における連続繊維補強材の耐久性評価を目的に実施したものである。図-4に示すように、鋼製の架台に炭素繊維系2種類[C(I)、C(II)]、アラミド繊維系2種類[A(I)、A(II)]、ガラス繊維系1種類[G]、ビニロン繊維系1種類[V]の6種類の連続繊維補強材を各1本ずつ無緊張で取り付け、海中、第2デッキの直射日光部および日影部の3ヶ所に分けて設置したものである。C供試体の暴露は平成6年3月から開始された。

3.5 供試体の回収

暴露供試体の回収は、以下に示すように3回分けて実施した。

1)第1回目回収

平成元年9月、A供試体の内海上暴露4体(12本)、土木研究所構内暴露4体(12本)回収
暴露期間1年7カ月。

2)第2回目回収

平成4年7月、B供試体回収 暴露期間2年2カ月。

3)第3回目回収

平成8年11月、C供試体の内海中暴露18体、海上暴露24体 暴露期間2年8カ月。

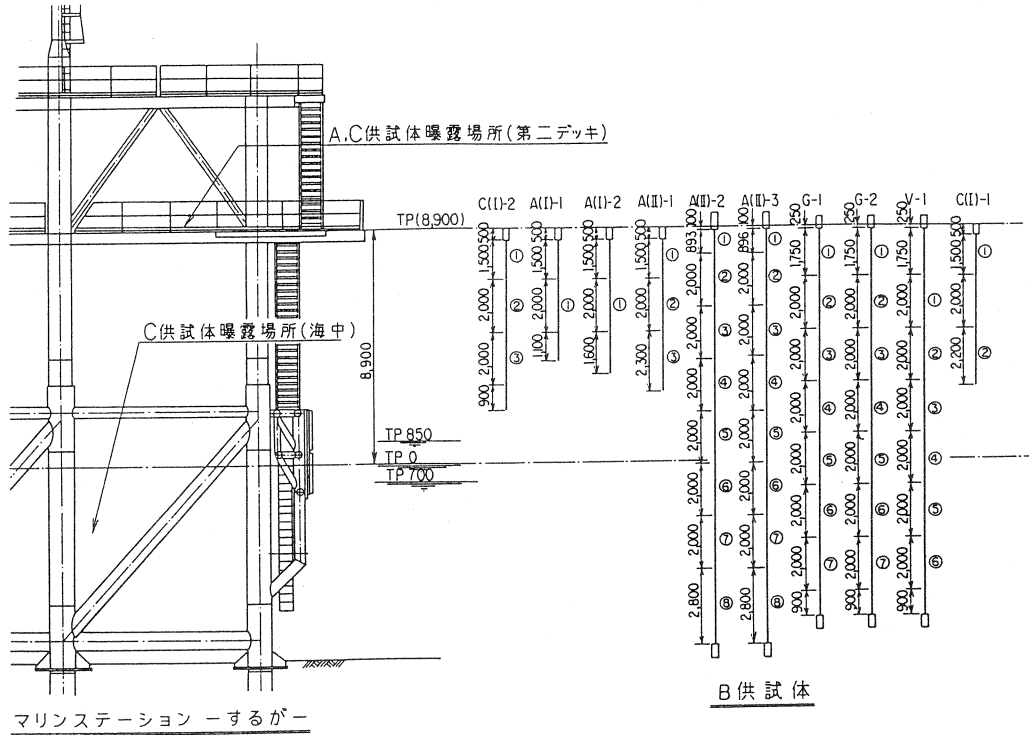


図-3 B供試体設置状況

4. 第1回目回収A供試体調査

第1回目回収のA供試体については、外観調査、残存緊張力の測定および引張試験を実施した。

4.1 A供試体外観調査結果

「マリンステーション-するがー」上暴露および土木研究所構内暴露の両方の供試体において、A(II)が縦割れを起こし、アラミド繊維が飛び出していた。また、同じく両方の供試体において、C(I)の表面に付着している樹脂がはがれていた。

4.2 A供試体残存緊張力測定結果

A供試体残存緊張力の測定結果を表-1に示す。

通常のPC鋼材の正規の緊張減少率は15%程度である。これは、鋼材の見掛けリラクセーションによる減少量(5%) + コンクリートのクリープ・乾燥収縮による減少量(10%)である。一方、炭素繊維系連続繊維補強材の見掛けのリラクセーションによる減少量は約6%、弾性係数はPC鋼材の約75%であるので、正規の緊張減少量は概略 $49\text{KN} \times (0.06 + 0.10 \times 0.75) = 6.62\text{KN}$ とし、同様に、アラミド繊維系連続繊維補強材の見掛けのリラクセーションによる減少量は約25%、弾性係数はPC鋼材の約35%であるので、正規の緊張減少量は $49\text{KN} \times (0.25 + 0.10 \times 0.35) = 13.97\text{KN}$ と仮定する。

連続繊維補強材 (C(I), C(II), A(I), A(II), G, V)

| | | | | | | | | | | | |
|----|-----|----|-------|----|-----|----|-------|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | |
| 75 | 350 | 75 | 1,000 | 75 | 350 | 75 | 2,000 | | | | |

図-4 C供試体

表-1 A 供試体残存緊張力測定結果

| 連続繊維補強材種類 | 直径(mm) | 形状 | マリンステーションするがー | | | 建設省土木研究所構内 | | | | |
|-----------|--------|-----|---------------|-----------|-----------|------------|----|-----------|-----------|-----------|
| | | | No | 導入緊張力(KN) | 残存緊張力(KN) | 緊張減少量(KN) | No | 導入緊張力(KN) | 残存緊張力(KN) | 緊張減少量(KN) |
| 炭素繊維 | C(I) | より線 | ① | 50.60 | 42.14 | 8.46 | ① | 49.23 | 43.12 | 6.11 |
| | | | ② | 52.53 | 44.10 | 8.43 | ② | 54.07 | 48.02 | 6.05 |
| | | | ③ | 51.01 | 45.08 | 5.93 | ③ | 50.09 | 45.08 | 5.01 |
| | C(II) | 丸形 | ① | 51.36 | 49.98 | 1.38 | ① | 50.96 | 42.14 | 8.82 |
| | | | ② | 51.03 | 48.02 | 3.01 | ② | 53.60 | 43.12 | 10.48 |
| | | | ③ | 51.96 | 48.02 | 3.94 | ③ | 51.07 | 47.04 | 4.03 |
| アラミド繊維 | A(0) | 丸形 | ① | 50.59 | 47.04 | 3.55 | ① | 50.81 | 39.20 | 11.61 |
| | | | ② | 49.15 | 36.26 | 12.89 | ② | 49.24 | 38.22 | 11.02 |
| | | | ③ | 49.61 | 39.20 | 10.41 | ③ | 50.59 | 39.20 | 11.39 |
| | A(II) | 丸形 | ① | 49.26 | 6.86 | 42.40 | ① | 49.09 | 37.24 | 11.85 |
| | | | ② | 52.11 | 13.72 | 38.39 | ② | 49.49 | 36.26 | 13.23 |
| | | | ③ | 50.80 | 40.18 | 10.62 | ③ | 49.23 | 37.24 | 11.99 |

表-1から、C(I)は緊張減少量は5~8.5KNであり、ばらつきはあるもののほぼ正規の減少量(6.62KN)であると考えられる。ただし、海上暴露の方が土木研究所構内暴露と比べて減少量は大きくなっている。また、C(II)も6供試体の内、4本が正規の緊張減少量以下であるが、土木研究所構内の供試体で正規値を上回るものが見受けられた。これは、定着具のすべりの影響であると考えられる。A(0)は減少量は13KN以下であり、何ら問題はない。A(II)は海上暴露供試体の2本が素材破断となる激しい劣化を起こしており、その劣化にともなう大幅な緊張力の減少が認められた。

4.3 A 供試体引張試験結果

A 供試体引張試験結果を表-2に示す。

表-2 A 供試体引張試験測定結果

| 連続繊維補強材種類 | No | マリンステーションするがー | | | | 建設省土木研究所構内 | | | | |
|-----------|----|---------------|--------|---------------------------|-----|------------|--------|---------------------------|-----|-----|
| | | 引張荷重(KN) | | 弾性係数(KN/mm ²) | | 引張荷重(KN) | | 弾性係数(KN/mm ²) | | |
| | | 設計値 | 暴露後 | 暴露前 | 暴露後 | 設計値 | 暴露後 | 暴露前 | 暴露後 | |
| C(I) | ① | 142.30 | 143.08 | 138 | 139 | ① | 142.30 | 142.30 | 127 | 135 |
| | ② | | 142.59 | 130 | 137 | ② | | 147.98 | 131 | 123 |
| | ③ | | 142.59 | 140 | 145 | ③ | | 150.43 | 123 | 141 |
| C(II) | ① | 67.72 | 74.09 | 145 | 145 | ① | 67.72 | 80.75 | 154 | 151 |
| | ② | | 75.66 | 147 | 146 | ② | | 88.59 | 154 | 145 |
| | ③ | | 86.44 | 151 | 146 | ③ | | 84.28 | 148 | 149 |
| A(0) | ① | 74.48 | すべり | 82 | - | ① | 74.48 | 71.15 | 82 | 82 |
| | ② | | 72.13 | 83 | 82 | ② | | 68.60 | 83 | 79 |
| | ③ | | 74.68 | 86 | 82 | ③ | | すべり | 82 | - |
| A(II) | ① | 72.52 | 測定不能 | 56 | - | ① | 72.52 | 測定不能 | 54 | - |
| | ② | | 測定不能 | 52 | - | ② | | 65.86 | 54 | 48 |
| | ③ | | 66.64 | 50 | 49 | ③ | | 75.07 | 53 | 48 |

C(I)とC(II)は、暴露の前後で引張荷重および弾性係数とも変化はない。A(0)は、引張荷重が3~8%程度低下しているものがあつたが、弾性係数の変化はほとんどない。また、すべりとあるのは、引張試験(暴露試験)に使用した定着具の機械的問題であり、連続繊維補強材の劣化現象ではない。A(II)の測定不能とは、劣化が進行していて引張試験が不可能であつたことを示す。引張強度が8~9%程度低下しているものがあつた。弾性係数は変化なし。

5. 第2回目回収B 供試体調査

第2回目回収のB 供試体については、外観調査および引張試験を実施した。

5.1 B 供試体外観調査結果

C(I) : 部分的にラッピング材がはがれている箇所があった。

A(I) : 光沢がなく、表面の樹脂が少しはがれていた。

A(II) : 耐紫外線塗料を塗布していない供試体は、海中の部分が白色に変色し、表面がささくれていた。

耐紫外線処理を塗布した供試体は、海中部において表面リブ部の塗料のはがれが著しい。

G : 全体的に黄色に変色していた。

V : 海上部分において、片面の表面の樹脂がなくなっており繊維が露出している。また、表面のささくれも著しい。

5.2 B 供試体引張試験結果

海中部を損失した供試体(C(I)、A(I))においては、引張荷重、弾性係数とも暴露前と変わりはなかった。しかし、海中に暴露した部分を回収できた供試体(A(II)、G、V)は図-5~図-7に示すように海上部および海中部の両端部付近で引張荷重の低下が見受けられた。特に、海中部での低下状況は著しいものがあつた。

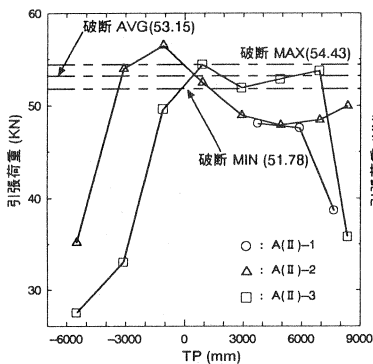


図-5 A(II)

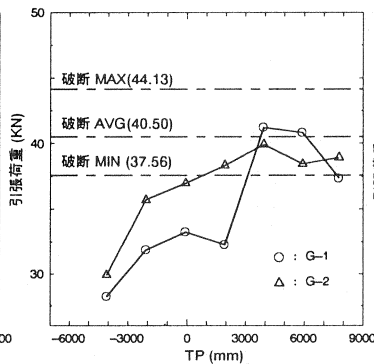


図-6 G

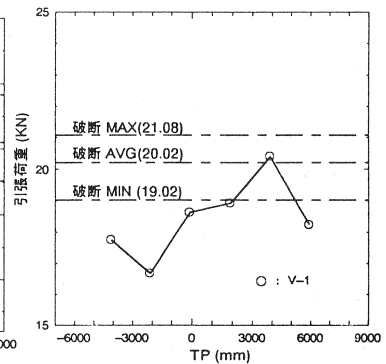


図-7 V

この強度低下の原因として以下のことが推察される。

- 1) 常時海水に曝されることが原因で、連続繊維補強材に何らかの化学反応が起こり、強度低下を起こした。
- 2) 海中暴露部分は、砂や浮遊物が常に衝突しており、常時局所的に衝撃を受けることになる。その結果、連続繊維補強材に部分的微小亀裂が発生した。
- 3) 供試体の両端部は、定着具を介して固定治具に取り付けられている。したがって、波浪や風雨により供試体に曲げが作用すると、両端部付近の連続繊維補強材に著しい曲げ疲労が発生する。

この推定事項を考慮し、海中暴露におけるより詳しい事象を把握するために、C 供試体の回収を実施し連続繊維補強材の性状を調査する。

6. 第3回目回収C 供試体調査

第3回目回収のC 供試体については、概観調査と引張試験を実施した。

6.1 C 供試体外観調査結果

C(I) : 直射日光部の供試体が、全体的に白色に変色しており、表面にささくれが発生している

C(II) : 海上部第2デッキの供試体において白色の変色が見られた。特に、直射日光部では、縦方向の亀裂が確認された。

A(I) : 海上部第2デッキの供試体において茶色の変色が見られた。特に、直射日光部では表面樹脂のはがれがあり、日影部と海中部の供試体は湾曲が認められた。

A(Ⅱ): 海上部第2デッキ直射日光部の供試体が赤黒く変色していた。海中部の全ての供試体が破断していた。

G: 海上部第2デッキ直射日光部の供試体は、表面樹脂のはくり、表面のささくれ、および湾曲が見られた。また、日影部の供試体は、表面樹脂のはくり、白色変色、および湾曲が見られた。

V: 海上部第2デッキの供試体は白色変色があり、海中部の供試体は破断しているものがあった。

6.2 C供試体引張試験結果

C供試体引張試験結果を表-3に示す。

炭素系の連続繊維補強材であるC(Ⅰ)、C(Ⅱ)は全ての暴露環境において、強度低下は見られなかった。アラミド系のA(Ⅰ)は全ての暴露環境において強度低下が見られた。特に、直射日光および海中部での低下が著しい。一方、同じアラミド系のA(Ⅱ)は、第2デッキの海上暴露においてはほとんど変わりはない。この結果は、第1回目回収A供試体調査結果とは異なる現象であった。その理由は、A供試体として用いたA(Ⅰ)は非常に初期の製品であり、その後、製造メーカーで改良が加えられ、耐候性が向上したA(Ⅰ)をC供試体に使用したためである。ガラス系のGは全ての暴露環境において強度低下が見られた。特に、海中部での低下が著しい。これは、第2回目回収B供試体調査結果とは同じ状況であった。

ビニロン系のVは海中部の暴露環境においてのみ強度低下が見られた。これは、Gと同様第2回目回収B供試体調査結果とは同じ状況であった。

表-3 C供試体引張試験測定結果

| 連続繊維補強材種類 | 暴露環境 | 引張荷重 (KN) | | |
|-----------|------|-----------|--------|------|
| | | 暴露前(A) | 暴露後(B) | B/A |
| C(Ⅰ) | 直射日光 | 141 | 176 | 1.25 |
| | 日影 | | 170 | 1.21 |
| | 海中 | | 170 | 1.21 |
| C(Ⅱ) | 直射日光 | 71 | 73 | 1.03 |
| | 日影 | | 75 | 1.06 |
| | 海中 | | 82 | 1.15 |
| A(Ⅰ) | 直射日光 | 66 | 33 | 0.50 |
| | 日影 | | 48 | 0.73 |
| | 海中 | | 31 | 0.47 |
| A(Ⅱ) | 直射日光 | 53 | 52 | 0.98 |
| | 日影 | | 55 | 1.04 |
| | 海中 | | — | — |
| G | 直射日光 | 36 | 32 | 0.89 |
| | 日影 | | 29 | 0.81 |
| | 海中 | | 24 | 0.67 |
| V | 直射日光 | 20 | 20 | 1.00 |
| | 日影 | | 21 | 1.05 |
| | 海中 | | 14 | 0.70 |

7. まとめ

炭素繊維系連続繊維補強材は、直射日光の有無に関わらず、海上および海中での環境において、強度低下を引き起こすような変状は見受けられなかった。

アラミド繊維系連続繊維補強材は、その種類によっては、直射日光の有無に関わらず、海上および海中での環境において、強度劣化を引き起こすものがあることが判明した。特に、直射日光暴露や海水中暴露においては暴露前の50%程度となった。

ガラス繊維系連続繊維補強材は、直射日光の有無に関わらず、海上および海中での環境において、強度劣化を引き起こした。特に、海水中暴露においてその傾向は著しい。

ビニロン繊維系連続繊維補強材は、海中においてのみ強度低下を引き起こした。

8. おわりに

本報告は、A供試体が1年7カ月、B供試体が2年2カ月およびC供試体が2年8カ月の暴露試験結果である。したがって、暴露期間としてはまだまだ短く、この結果のみで連続繊維補強材の将来を評価することはできない。その上、B、C供試体は無緊張状態での結果であり、緊張状態にある場合はこれ以上に厳しい条件であると考えられるので異なった結果となると推測される。しかし、本暴露試験は現在も続行中であり、今後はもっと長い期間で、かつより厳しい環境での結果を調査する必要があると考える。

最後に、本研究を実施するに当たりご指導・ご協力を頂いた関係各位に深く感謝いたします。