

海洋環境下に長期暴露した FRP-PC 部材における環境負荷の算出

京都大学 正会員 Bruno Ribeiro 東京製綱インターナショナル (株) 非会員 幸田英司
神鋼鋼線工業 (株) 正会員 細居清剛 正会員 武市知大 三井住友建設 (株) 正会員 永元直樹
(一財) 東海技術センター 非会員 浅井一行 京都大学 正会員 服部篤史 正会員 塩谷智基

1. 目的

FRP 緊張材は従来の PC 鋼材とは異なり、電気化学的に安定しているため腐食せず、構造物の供用期間を延ばす目的で海洋環境付近の構造物の補強材としての適用が期待される。したがって、維持管理作業が縮小できるとなると、PC 鋼材と比較して環境負荷面で利点となりえる。そこで、FRP を含む 4 種類の緊張材を用いた PC 梁の環境負荷として CO₂ 排出量を算出し、部材レベルの性能変化を考慮し環境負荷を評価した。

2. 供試体概要

PC 梁の寸法は 150×150×1180mm、コンクリート配合は 1 水準 (W/C : 35.7%, 圧縮強度 : 52.8N/mm²) とした。緊張材は、炭素より線 (CS)、アラミド組紐 (AB)、アラミド異形 (AD) の FRP3 種類に比較用の異形 PC 鋼棒 (SD) を加えた 4 種類とした。導入プレストレスは 2.0~2.4N/mm² で、荷重 (P_{cr}) 31.2~32.3kN でひび割れが発生するように設計した。緊張材の物性値を表 1 に示す。部材性能の変化を確認するために、太平洋沿岸の飛沫帯に設置し 28 年間の暴露を行った。

3. CO₂ 排出量算出の条件および実験方法

CO₂ 排出量の算出に用いた、緊張材 1mあたりの使用材料・消費電力および梁 1 体あたりのコンクリート体積を表 2 に示す。表 1 に示すように、ひび割れ発生荷重を揃えるために公称断面積がほぼ同じである入手可能なものを用いた。しかし、若干異なるため、各梁に使用するコンクリート体積が異なる。算出で使用する原単位は、LCA ソフトウェアである「MiLCA」に搭載されている LCI データベース「IDEA ver. 1.0」を利用した。ただし、アラミド繊維^[1]、ビニルエステル樹脂^[2]および引抜成型^[3]は、参考文献を利用した。曲げ載荷試験は、スパン 800mm (全長 1180mm) に対し曲げスパン 200mm の 4 点載荷とした。10kN 毎および、ひび割れ発生荷重で一旦除荷し、ひび割れ発生後は破壊 (コンクリート圧壊または FRP 緊張材破断) まで静的載荷を行った。

4. 実験結果および考察

緊張材生産時の単位質・単位長さあたりおよび PC 梁 1 体あたりの CO₂ 排出量を、SD を 1 とした比率および PC 梁の曲げ載荷試験の結果とともに表 3 に示す。FRP 緊張材の単位質量あたりの CO₂ 排出量は SD の約 8.38~19.2 倍と高くなる。しかし、PC 梁 1 体あたりの CO₂ 排出量には、それぞれのケースに大きな差が見られない。FRP 緊張材が軽量であり、単位長さあたりの CO₂ 排出量は SD の約 1.28~3.91 倍と大差なくなるためである。

表 1 緊張材の物性値

記号	緊張材の種類	使用長繊維	マトリックス	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張荷重 (kN)	弾性係数 (N/mm ²)	弾性伸び (%)
SD	PC鋼材異形	—	—	7.0	38.5	58.5	1.96×10 ⁵	0.675
CS	炭素より線	炭素	エポキシ樹脂	7.6	45.3	57.0	1.38×10 ⁵	1.30
AB	アラミド組紐	アラミド	エポキシ樹脂	7.3	42.0	62.6	6.86×10 ⁴	2.00
AD	アラミド異形	アラミド	ビニルエステル樹脂	6.0	28.3	49.9	5.30×10 ⁴	3.70

表 2 CO₂ 排出量算出の条件

記号	コンクリート (cm ³)	鉄筋 鋼棒 (g)	炭素 繊維 (g)	アラミド 繊維 (g)	ポリ エステル 繊維 (g)	エポキシ 樹脂 (g)	ビニルエステル 樹脂 (g)	引抜 成型 (MJ)
SD	26505	302.0	—	—	—	—	—	—
CS	26506	—	42.0	—	6.0	12.0	—	0.35
AB	26494	—	—	43.9	2.3	11.8	—	0.35
AD	26512	—	—	27.0	—	—	14.6	0.35

キーワード FRP, 曲げ耐荷挙動, 環境負荷

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京大桂 C3-b4S16 TEL 075-383-3496

表 3 緊張材および PC 梁の CO₂ 排出量および曲げ荷重

記号	緊張材 (kg-CO ₂ /kg)	緊張材 (kg-CO ₂ /m)	PC梁 (kg-CO ₂ /梁)	ひび割れ発生荷重 P _{cr} (kN)		破壊荷重 P _{break} (kN)	
				初期値(1994年)	海洋(2022年)	初期値(1994年)	海洋(2022年)
SD	0.99 (1.00)	0.30 (1.00)	7.75 (1.00)	31.9	31.5	48.1	59.6
CS	18.92 (19.2)	1.16 (3.91)	8.77 (1.13)	34.8	32.3	59.3	73.0
AB	8.40 (8.79)	0.53 (1.78)	8.02 (1.04)	30.2	30.0	59.0	63.0
AD	8.26 (8.38)	0.38 (1.28)	7.85 (1.01)	30.5	29.5	49.1	64.2

また表 3 より、いずれの PC 梁でもひび割れ発生荷重は海洋暴露後 (2022 年) は初期値 (1994 年) と同程度となった。28 年間の海洋暴露でひび割れ発生荷重の低下を生じるまでのプレストレスの低下は無かったと考えられる。一方、破壊荷重は初期値 (1994 年) を大きく上回った。FRP 緊張材を用いた PC 梁供試体は、28 年の海洋環境下で曲げ挙動に問題ないことが確認された。なお、現時点で緊張材近傍の Cl⁻濃度は約 0.6~2.2 kg/m³ (N=4) とばらついたものの、W/C を考慮した鋼材腐食発生限界 Cl⁻濃度の 2.33 kg/m³ には達しておらず、また鋼材の目視では腐食は確認されていなかった。

性能として P_{cr} あたりの CO₂ 排出量および P_{break} あたりの CO₂ 排出量をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。図 1 より、初期値 (1994 年)・海洋暴露後 (2022 年) とともに、CS, AB および AD の P_{cr} あたりの CO₂ 排出量は SD と比較して 1.04~1.11 倍とやや大きくなったが、図 2 より、初期値 (1994 年)・海洋暴露後 (2022 年) とともにの SD の P_{break} あたりの CO₂ 排出量が他 FRP 緊張材の場合に比べて高くなった。今後、Cl⁻がさらに浸透し、鋼材が腐食した場合、SD の P_{cr}, P_{break} あたりの CO₂ 排出量のさらなる増加が予想される。

5. まとめ

- FRP 緊張材の単位質量あたりの CO₂ 排出量は異形 PC 鋼棒の約 8.38~19.2 倍高くなるが、単位長さあたりでは約 1.28~3.91 倍にまで減少する。また、PC 梁部材として比較したときに、CO₂ 排出量の差がさら小さくなり、FRP 緊張材の PC 梁の CO₂ 排出量が SD の排出量の約 1.01~1.13 倍程度に抑えられる。
- ひび割れ発生荷重および破壊荷重の結果より、いずれの PC 梁の場合でも海洋環境で 28 年間暴露しても曲げ挙動に問題なかったことから、性能としての P_{cr} あたりのおよび P_{break} あたりの CO₂ 排出量にもそれぞれのケースに大きな差がなかった。

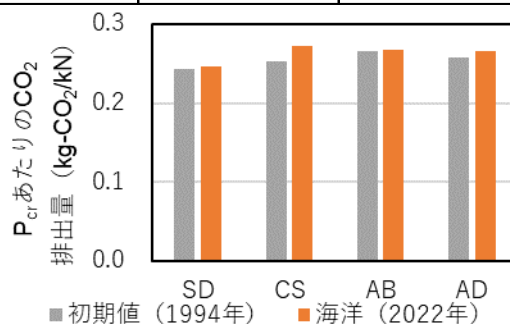
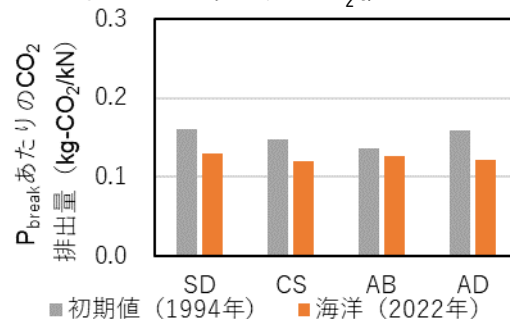
鋼材腐食が進むと FRP 緊張材を使用したケースの環境負荷軽減効果が顕著となる。さらに、腐食による補修等が必要な場合は SD のケースにおいて CO₂ 排出量が多くなる可能性が高いため、追加検討が必要である。

謝辞

本実験の遂行にあたり、連続繊維補強材 WG および京都大学インフラ先端技術コンソーシアム C05 クラスタの関係者各位の多大なるご協力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 帝人株式会社, “パラ系アラミドのライフサイクルにおける CO₂ 排出量を削減” (2021)
- [2] Callum Hill, Andrew Norton, “LCA database of environmental impacts to inform material selection process”, DACOMAT-Damage Controlled Composite Material (2019)
- [3] J. Takahashi, T. Suzuki, “Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars”, Ninth Japan Int SAMPE Symp JISSE, 9 (2005)

図 1 P_{cr} あたりの CO₂ 排出量図 2 P_{break} あたりの CO₂ 排出量