第I部門　　繰返し熱サイクルを受けた鋼・CFRP 接着接合部の剥離強度に関する実験的研究

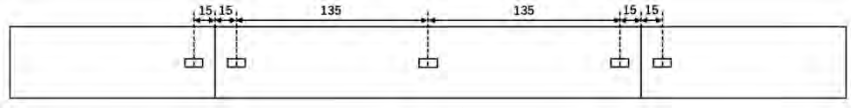
神戸大学大学院工学研究科　〇澤田莉涼
神戸大学都市安全研究センター　橋本国太郎
三菱ケミカルインフラテック（株）　加川大樹
九州大学大学院　楊沐野，キムアラン

1．はじめに

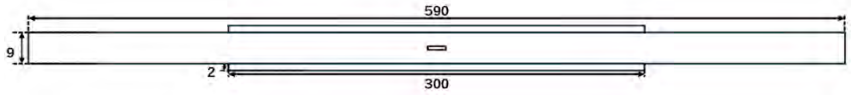
高度経済成長期に整備された鋼道路橋の老朽化対策として CFRP 接着補強工法が注目されているが，鋼材との線膨張係数の違いによる熱サイクル下での界面耐久性の低下が懸念されている．また，熱サイクルのみが剥離強度や劣化プロセスに及ぼす影響を，異なる材料間で定量比較した実験的研究は不十分である．そこで本研究は，実環境を想定した熱サイクル試験を鋼・CFRP 接合部に実施し，熱サイクル数や材料特性が剥離挙動に及ぼす影響を実験的に検討することで，耐久性評価の基礎的知見を提供することを目的としている．

２．試験概要

本試験に用いた試験体は，高強度(GM 材)および高弾性（HM 材）の 2 種類の CFRP と鋼材で構成される．被着体である CFRP には寸法 300×50×2mm の板材を使用し，鋼材には寸法 590×50×9mm の平鋼を用いた．鋼材の表裏中央部に CFRP を二液性エポキシ樹脂系接着剤で接着し，23℃の環境下で 10 日間の常温養生を施し，試験体とした．熱サイクルが接着接合部の引張性能に与える影響を段階的に評価することを目的に実環境下を想定し，－5℃～40℃を 1 サイクルとして，熱サイクル数を 0，100，200，500 サイクルの 4 水準に設定した．その後，各サイクルの GM 材および HM 材について、それぞれ 3 体ずつ引張試験を実施した。また，引張試験時のひずみゲージの配置については，図―1 に示すように CFRP の中央部と端部および鋼材の側面部中央と端部にそれぞれ表裏左右対称に貼り付けた．



(a)正面図



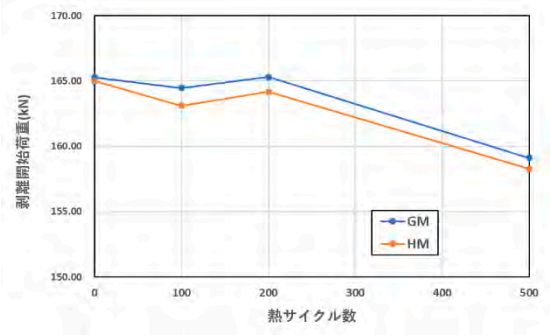
(b)側面図

図―1 試験体概略図(寸法 mm)

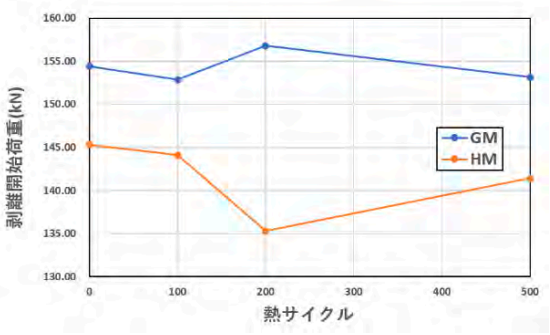
3．結果と考察

引張試験では，CFRP の端部と中央部において，ひずみが低下し始めた際の荷重を「剥離開始荷重」と定義して，各サイクルごとの変化を調べた．CFRP 中央部の剥離開始荷重を図－2 に，

Risuke　SAWADA，Kunitaro　HASHIMOTO
260t117t@stu.kobe-u.ac.jp



図－2　剥離開始荷重(中央部)



図－3　剥離開始荷重(端部)

CFRP 端部の剥離開始荷重を図－3 に示す．まず，CFRP 中央部については，材料に関わらず 0 から 200 サイクルにかけて，剥離開始荷重は 163～165kN と概ね一定の値を示していたが，500 サイクルにかけては，GM 材，HM 材ともに 158～159kN へと若干低下している．その要因としては，長期の繰り返し熱ストレスによる樹脂の熱疲労によるものであると考えられる．一方，CFRP 端部については中央部に比べて，剥離開始荷重が減少するとともに，材料間でも剥離開始荷重に大きな差が出た．特に GM 材については熱サイクル数が増加しても，剥離開始荷重にほとんど変化が生じなかったが，HM 材については 200 サイクル時に剥離開始荷重が大きく減少し，500 サイクル時には，また上昇するような挙動を示した．まず，材料ごとに差が生じた要因としては，補強材の剛性の違いに起因するものと考えられる．高剛性である HM 材は，温度変化時において鋼材との熱膨張差を抑制しようとする拘束力が大きく，接着界面に発生する熱応力が GM 材よりも高くなる．その結果，HM 材は 200 サイクル程度の熱履歴であっても接着端部界面への負荷が大きく，剥離開始が早まったものと推察される．続いて，500 サイクル時に HM 材の剥離開始荷重が上昇した要因については，200 サイクル以降の過酷な熱ストレスにより，最端部の接着界面が試験開始前にすでにミクロな先行破壊（初期剥離）を起こしていた可能性が挙げられる．これにより，最端部の応力集中が消失し，引張試験時における「実質的な剥離の起点」が内側の健全な接着領域へと移行したことで，測定上の剥離開始荷重が見かけ上高く測定されたと考えられる．最後に，破壊形態の変化について考察する．GM 材については CFRP 裏面の全面にわたり接着樹脂が残留する「凝集破壊」を呈していたのに対し，200 サイクル経過後の HM-200 や 500 サイクル経過後の HM-500 では，特に端部付近において接着剤がほとんど付着していない「界面破壊」へと破壊モードが遷移していた．

4. まとめ

本研究では，CFRP 板により補強した鋼部材を対象に，補強材の剛性差および熱サイクル負荷が接着界面の健全性に与える影響を実験的に検討した．高剛性な HM 材は，鋼材との線膨張係数差に起因する熱応力が接着端部に著しく集中し，早期の先行的界面破壊を引き起こす主因となることが明らかとなった．また，長期の熱サイクル負荷に伴い，樹脂の後硬化が進む一方で熱疲労による劣化も進行し，500 サイクル時には部材中央部においても剥離開始荷重の低下が確認された．したがって，高弾性 CFRP の適用において長期耐久性を担保するためには，接着端部の応力集中を効果的に低減させる詳細設計が不可欠である．