

既設鋼下路桁における疲労変状のメカニズムおよび対策方法

構造物技術研究部 鋼・複合構造

副主任研究員 小林裕介

1. はじめに

開床式鋼下路桁は、縦桁と横桁から構成される床組に軌道部材を載せた構造であり、上路桁と比較して橋台高さからのレールレベルを低く抑えられる。このため、線路下の空頭の確保が困難な箇所において多数用いられている。この開床式鋼下路桁の縦桁・横桁連結部(図1)において疲労き裂の発生が報告されている。

中には、部材の破断に至った重大な変状例も報告されており、当該き裂に対する原因究明、および効果的な補強方法が求められている。本研究では、疲労き裂の特徴を整理し、実橋測定、有限要素解析および実橋部材を用いた実験を実施し、疲労き裂発生メカニズムについて究明した。さらに、補強方法を提案し、上記実験においてその効果を確認した。

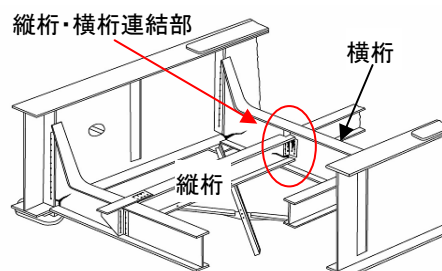


図1 開床式下路プレートガーダー

2. 変状事例調査

図面調査および過去の変状調査により、縦桁・横桁連結部の疲労変状の特徴について分析した。その結果、縦桁・横桁連結部においては、図2に示すように概ね3タイプの疲労き裂が発生していることが分かった。このうち、き裂タイプ①については、縦桁上フランジとウェブとの首部に発生する。き裂は首に沿って進展するが、あるところで斜め下方向に進展方向を変え、縦桁を破断させる可能性がある。

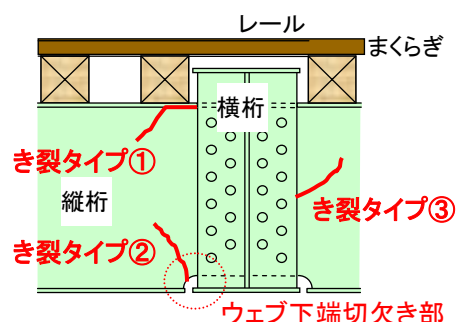


図2 縦桁・横桁の疲労き裂

き裂タイプ②は、縦桁下フランジと横桁下フランジのレベルを合わせているディテールにおいて、ウェブ下端を切欠いている場合に、当該箇所から発生する。発生した疲労き裂は斜め上方向に進展し、最終的に縦桁を破断させている事例もあった。き裂タイプ③は、リベット孔から発生し斜め上方向にき裂は進展していく傾向がある。なお、き裂タイプ①は下路プレートガーダーにおいてのみ、またき裂タイプ③については下路トラスにおいてのみ疲労き裂の発生報告を受けている。

疲労き裂による縦桁の冗長性がき裂タイプ①および②は低いこと、き裂タイプ③は変状原因と対策方法がある程度明らかになっていることから、本研究ではき裂タイプ①と②について検討を実施することとした。

3. 検討方法

本研究では、実橋測定、有限要素解析および実橋梁部材を用いた実験によって検討を実施している。実橋測定、有限要素解析、実験により縦桁・横桁連結部の変形挙動の把握および疲労き裂発生メカニズムについて検討した。実験ではさらに、疲労試験を実施することによってき裂タイプ

の疲労強度について確認し、補強部材を設置した後の補強効果確認も行っている。なお、軌道部材による荷重の分散効果も考慮するため、図3に示すように軌道部材を載せた状態で実験を実施している。また、縦桁・横桁連結部の変形挙動が、列車の移動に伴って変化することから、荷重は10ステップ分を移動載荷させた。移動載荷の結果を図4に示す。載荷位置によって着目点（縦桁ウェブ下端切欠き部）の応力性状が大きく変化していることが分かる。



図3 実験状況

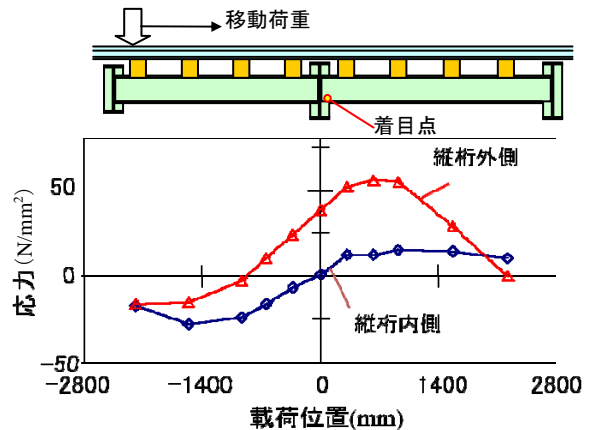


図4 移動載荷の結果（着目点応力）

4. 疲労き裂発生メカニズムと疲労強度

4.1 縦桁ウェブ上端におけるき裂発生メカニズム

有限要素解析から得られた、縦桁・横桁連結部に近い位置での縦桁ウェブ上端の鉛直方向応力を図5に示す。ウェブの軌道中心側と反対側で、それぞれ圧縮と引張応力が発生しており、縦桁上フランジの首部では、図6に示すような面外変形を呈していることが考えられる。これが縦桁の中間部であれば、縦桁鉛直補剛材によって変形がある程度拘束されることとなるが、縦桁端部においては上フランジの首振り拘束している部材がないため、高い応力が発生しき裂タイプのような疲労き裂が発生しているものと考えられる。したがって、き裂タイプのような疲労き裂発生を防止するためには、上フランジを横桁に連結するなどして、上フランジの首振り拘束すれば良いことが分かる。

なお、上フランジの首振りの程度については、枕木と上フランジの接触状態に大きく依存し、場合によっては上フランジが軌道中心側とは反対側に首を振るような（図6とは反対）挙動も、実橋測定（図7）および実験から確認している。

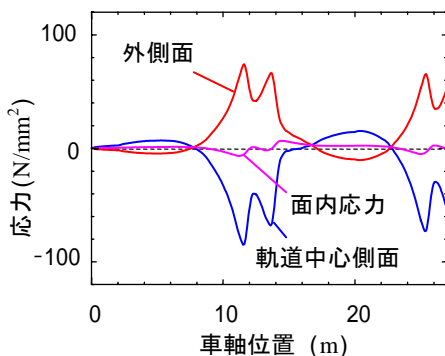


図5 縦桁ウェブ上端における鉛直方向応力 (FEM)

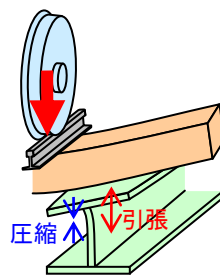


図6 縦桁首部の変形

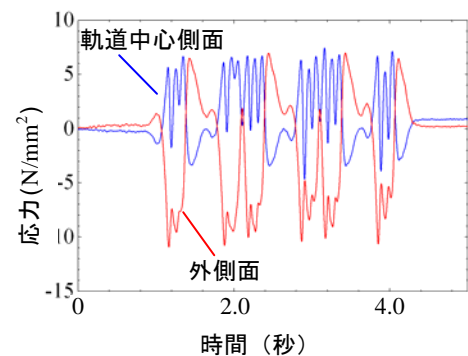


図7 縦桁ウェブ上端における鉛直方向応力 (実橋測定)

4.2 縦桁ウェブ下端切欠き部におけるき裂発生メカニズムと疲労強度

縦桁ウェブ下端切欠き部に発生する応力の原因となる変形挙動について、有限要素解析から得られた結果を図8および図9に示す。切欠き部においては、列車荷重の移動に伴って切欠きが開閉口することによって発生する面内応力と（図8）、縦桁断面が“くの字”に変形することによって発生する面外応力が（図9）、応力成分として存在していることが明らかとなった。縦桁断面の“くの字”の変形については、図6に示した枕木からの受ける力が原因ではないかと考えられる。

縦桁ウェブ下端の切欠き部に対しては、図3に示した試験体を用いた疲労試験も実施した。発生した疲労き裂を図10に示す。実橋で発生した疲労き裂と同様の発生状況であり、下フランジとウェブとの縦ビードからではなく、切欠き部が疲労き裂の起点となっていることが分かる。疲労試験から得られた切欠き部の疲労強度を図11に示す。

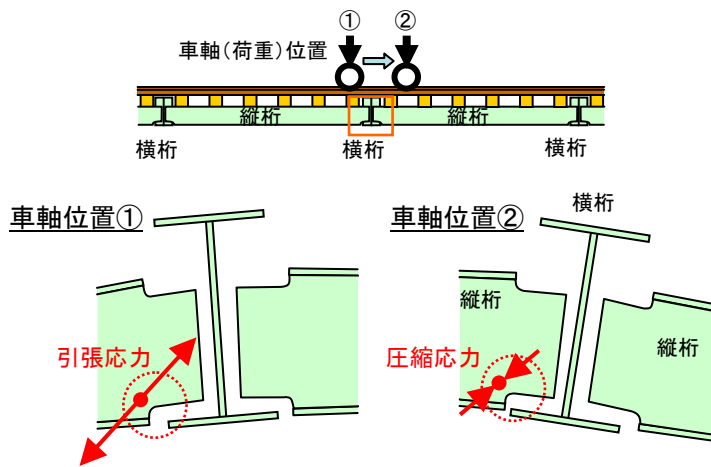


図8 切欠き部の変形と応力（面内）

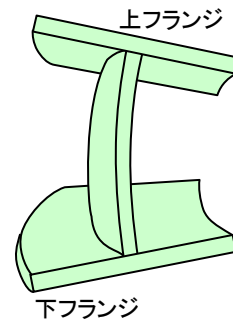
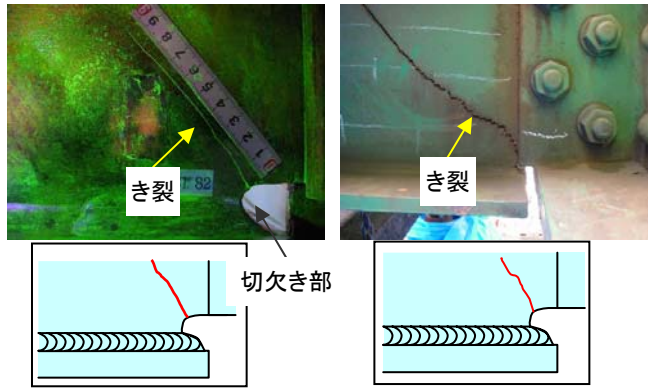


図9 縦桁端部の変形（面外）



(a) 疲労試験で発生したき裂 (b) 実橋で発生したき裂
図10 縦桁ウェブ下端切欠き部から発生した疲労き裂

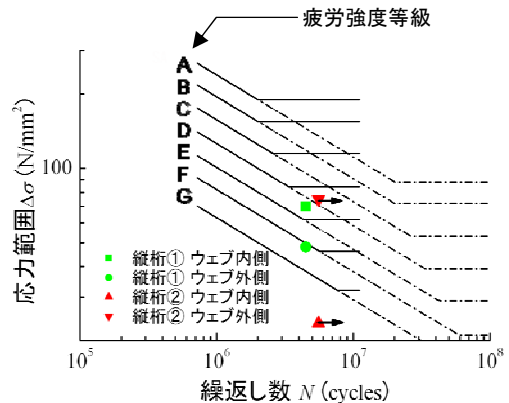


図11 疲労試験結果(S-N線図)

5. き裂発生メカニズムと補強に関する検討

5.1 縦桁ウェブ上端に対する補強方法

縦桁ウェブ上端から発生する疲労き裂については、縦桁上フランジの首振り（ねじり）が原因である。このため、補強方法はこの首振りの変形を拘束する部材（図12）が有効であると考え、当該部材による補強効果の確認試験を実施した。結果を図13に示す。面外応力が大幅に低減しており、十分な補強効果が得られることが明らかとなった。

5.2 縦桁ウェブ下端切欠き部に対する補強方法

縦桁下端切欠き部からのき裂発生を予防するための補強方法として、図 14 に示す補強方法 A～C について検討した。補強 A は従来から実施されてきている方法で、縦桁下フランジを横桁ウェブに接続する方法である。補強 B は、縦桁下フランジの下側と連結補剛材を接続する方法で、ここではブラケット補強と呼ぶ。補強 C は、縦桁ウェブと連結補剛材を接続するものである。なお、補強 C は縦桁の面外変形についても拘束効果を得られるよう、補強部材にはアングル材を用いており、縦桁下フランジにもボルトで接続している。

補強効果の結果を図 15 に示す。従来から用いられてきた補強方法 A については、今回実施した試験において面外応力を低減する効果はあるものの、面内応力を殆ど低減できず、結果として補強効果としては A～C の中で最も低いものとなった。有限要素解析の結果から、面内応力を低減できなかったのは、切欠き部の開口変位を十分に拘束できなかったことが原因であることも明らかにしている。今回の試験に

おいて最も補強効果の高かったのは補強方法 C であった。補強方法 C については、当板が切欠き部に発生している面内応力を負担しつつ、面外変形についても拘束しているためであると考えられる。

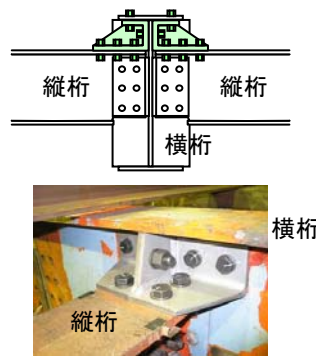


図 12 縦桁上端への補強案

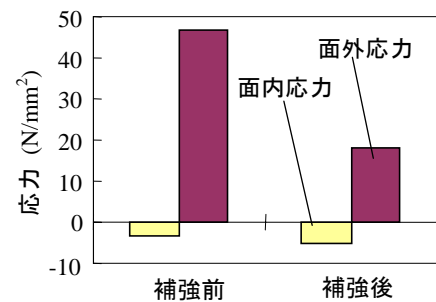


図 13 縦桁上端の補強効果
(ウェブ上端首部の鉛直方向応力)

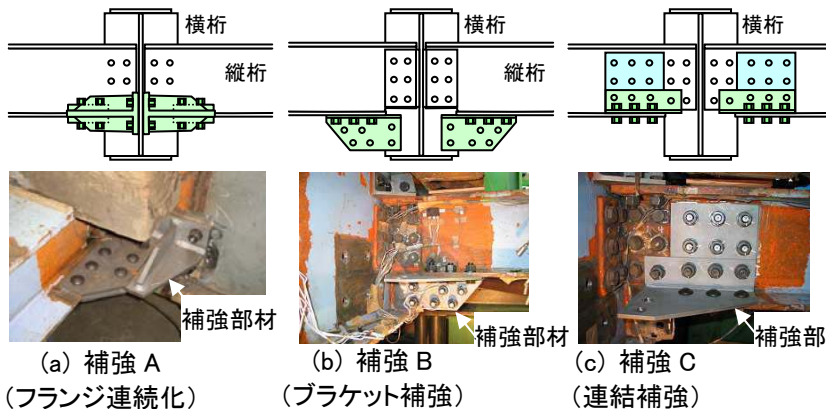


図 14 縦桁ウェブ下端の切欠き部の補強案

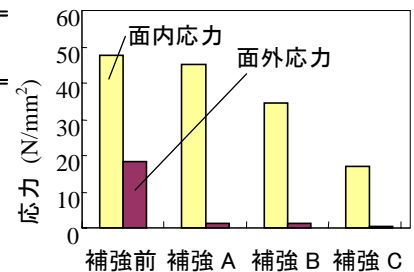


図 15 ウェブ下端切欠き部における主応力方向の面内・面外応力

図 15 ウェブ下端切欠き部における補強効果

6. おわりに

開床式の鋼下路桁の縦桁・横桁連結部から発生する疲労き裂について、その発生メカニズムを把握した。縦桁上フランジ首部に発生する疲労き裂は、上フランジ首振りの変形挙動が原因であり、首振りを拘束するような補強部材の設置が効果的であることを明らかにした。縦桁ウェブ下端の切欠き部に発生する疲労き裂については、列車荷重の移動により切欠き部が開閉口、および面外変形することが応力集中の原因であることが分かった。これについては、従来からの補強方法（フランジ連続化）では面外変形しか拘束できないこともあり、切欠き部を覆うような当板補強を施す必要があることを明らかにした。