

鋼箱桁ソールプレートに生じた疲労き裂の原因究明と補強対策

1. はじめに

鋼道路橋の支承部では、主桁下フランジとソールプレートの溶接部に疲労き裂の発生事例が報告されている。ウェブ直下の剛性急変による応力集中や溶接による下フランジの角変形、支承の固着化による応力増加などがその原因と一般的にいられている。

本業務は、1 支承構造の鋼箱桁橋梁のソールプレートに生じたき裂の調査および補修検討を行ったものであるが、応力計測や変位計測などの調査により、上記とは異なる原因により発生したき裂であることが判明した。原因について分析を行い、ソールプレートと縦リブの配置に着目した補修計画を立案したものである。

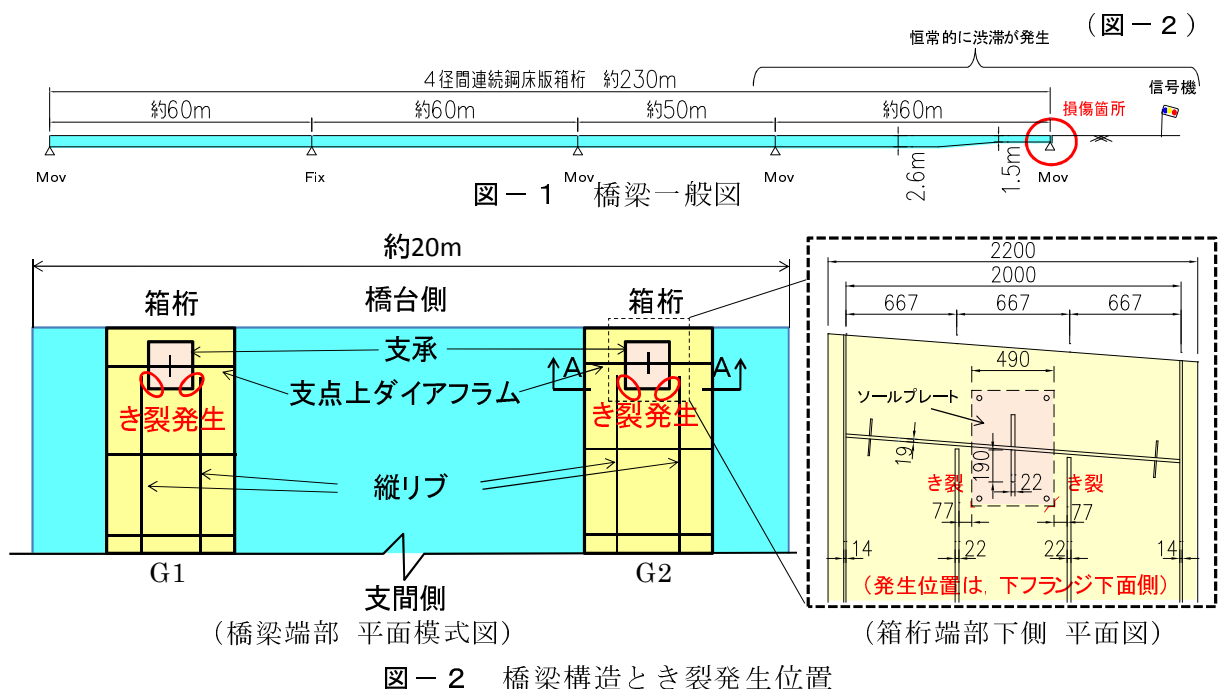
2. 損傷状況

2.1 橋梁概要

本橋は、1990 年代にしゅん功した 4 径間連続鋼床版箱桁橋梁である。主要幹線道路の下り線に位置し、大型車交通量が多く日中は恒常的に渋滞する。退出側橋台の先には信号があるため、赤信号時には退出側 1 径間は、車線全面に活荷重が载荷される。(図-1)

2.2 損傷概要

2 本の箱桁はそれぞれ桁中央の一つの支承(350t)で受けている。支点上補剛材は、支点上ダイヤフラム表裏に 2 枚で、縦リブはソールプレート両外側上に配置されている。点検により、退出側橋台の 2 箇所の支承において、ソールプレート($t=28$)と下フランジ($t=19$ (G1 桁), 12 (G2 桁))の溶接に疲労き裂が確認された。き裂はソールプレート支間側の角部 4 箇所に生じていた。



3. 調査内容と原因推定

3.1 調査内容

3.1.1 概略調査

まず概略調査として、①磁粉探傷試験によりき裂の詳細な位置を確認し、超音波探傷試験により、板厚方向のき裂高さを調査した。また、②ダイヤルゲージによりソールプレートと縦リブ直下の下フランジの変位差を確認した。

①き裂調査

き裂は G1 桁、G2 桁のソールプレート支間側の角 4 箇所全ての回し溶接部下フランジ側の止端部に沿って生じていた。最も長いき裂 4 は、止端部から下フランジに橋軸に対し約 45° の方向で進展していた。4 箇所とも UT 調査の結果より下フランジ母材板厚方向への進展が確認された。き裂 4 は、ほぼ貫通状態で進展高さは板厚 12 mm 中 11 mm であった。

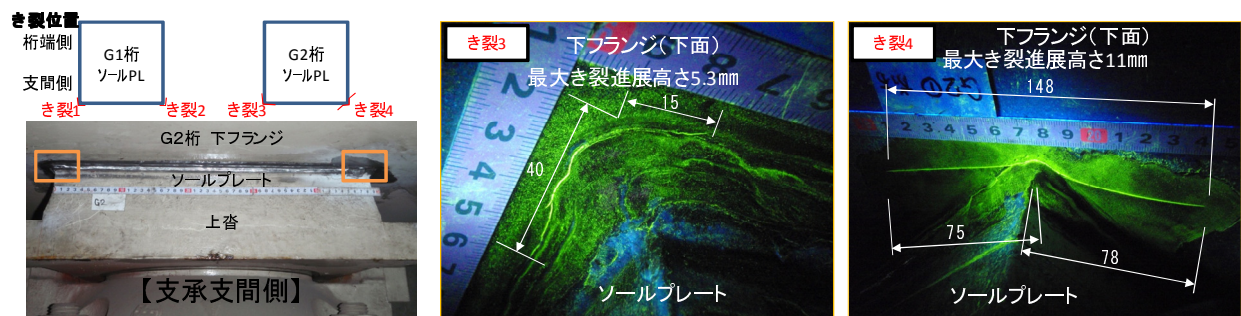


図-3 き裂状況写真 (MT)

②ダイヤルゲージによる変位調査

き裂の位置や、縦リブとソールプレートの配置より、ソールプレート角部近傍の下フランジの局部変形、および支承の回転に着目した変位測定を行った。その結果、図-4 に示すようなソールプレートの下フランジの回転に対する変位差を確認した。

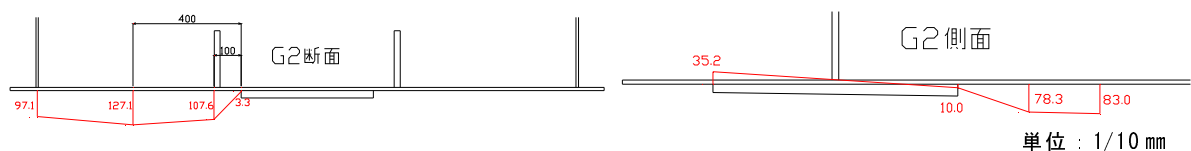


図-4 桁およびソールプレートの変位状態 (ダイヤルゲージ)

3.1.2 詳細調査

概略調査の結果より、詳細調査として、①桁のたわみと支承の回転に着目した変位計測、②縦リブとソールプレート間の下フランジの局部変形に着目した応力計測を行った。また、③ FEM 解析により、実橋の挙動と応力性状を再現した。計測は、荷重車両 (25ton) の走行による動的な計測と、一般交通車両による 24 時間の応力頻度計測を行った。

① 桁のたわみと支承の回転

ソールプレートと下フランジの下面に変位計を設置し、変位から支承の回転と下フランジの変位差を調査した。桁のたわみは支点上垂直補剛材と桁中央の応力により確認した。

図-5 のように、下フランジの回転に対して、ソールプレートの回転が小さく、支承が桁の回転に追随していないことが確認された。

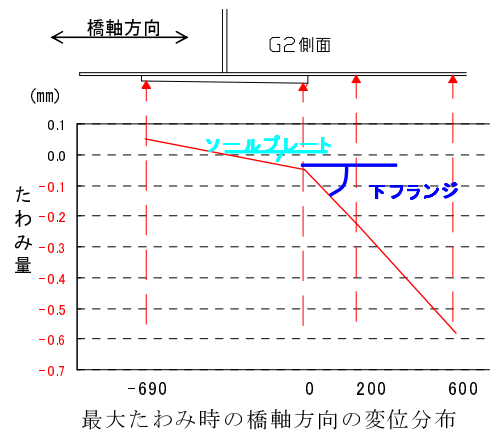
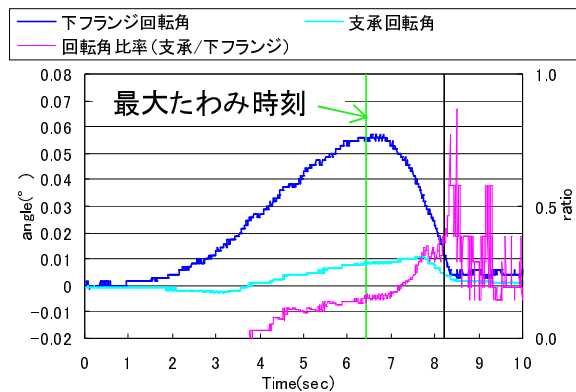


図-5 下フランジとソールプレート（支承）の回転（変位計測による）

② ソールプレート角部の応力

応力計測は、主にソールプレート角部付近に対して行い、下フランジ表裏の応力、主応力方向、応力分布、溶接止端部の応力（HOT SPOT 応力）などを測定した。

計測の結果、図-6のように下フランジでは正負の異なる応力が生じており、曲げ変形が生じていることが確認された。この変形による応力は、桁のたわみに連動して発生し、たわみが最大となる時刻にピークとなる。なお、直上車線 25 t 車走行時の下フランジ表面の発生応力は、約 40MPa(止端部から 12 mm 離れ)であった。

③ FEM 解析

橋梁 2 径間をシェル要素でモデル化し FEM 解析を行った。モデルの妥当性は、荷重車走行時に生じる応力の実測値と解析値を比較することにより確認した。特に、支承部については局部的応力性状と支承の回転性状を再現するため、図-7のように回転ばね要素を用い、支点上垂直補剛材に発生する応力が、計測値と近似されるばね定数($10 \times 10^4 \text{KN} \cdot \text{m/rad}$)を選定し解析を行った。このモデルを用いて補強構造の検討を行った。

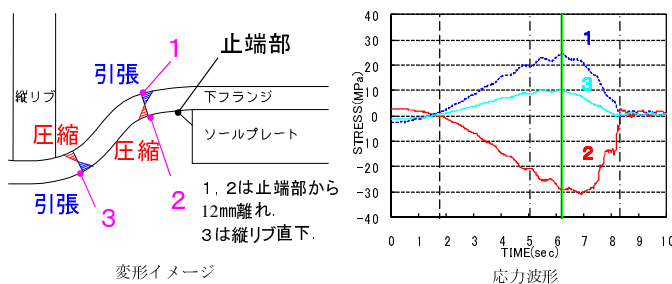


図-6 応力計測値による下フランジの局部変形状態の推定

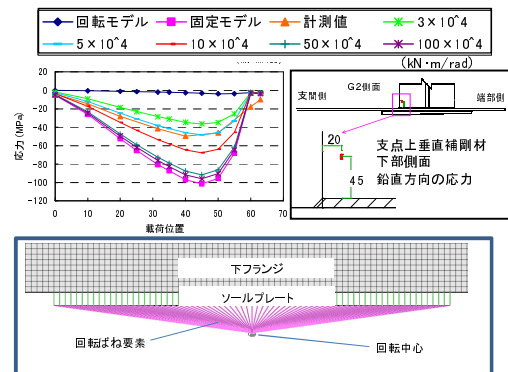


図-7 支承部のモデル化

3.2 原因推定

き裂発生の原因は詳細調査の結果より、以下のように推定した。

桁のたわみに支承の回転が追随していない。そのため、箱桁とソールプレートに変位差が生じ、ベースプレートと縦リブ間の下フランジに局部変形が生じた。これにより、溶接止端部に高い応力が繰返し生じ、疲労き裂の発生・進展に至った。

但し、支承の回転が桁のたわみに追随していない原因については、支承機能の低下によるものか、下フランジの剛性が低いことによるものかは明確ではない。

4. 補修計画

4.1 応急補修

図-3のき裂1, 2および3については, き裂高さが比較的浅いことから, バーグラインダーにより母材部を切削し, き裂を除去した。き裂4については, 貫通直前の状態であったため, き裂両端部にストップホールを施工した。施工後は, 切削部を滑らかに仕上げた。

4.2 補修方法の検討

原因推定より, 以下の3案を検討した。(図-8)

補強案1: 支承機能を改善する。 → 支承取替え

補強案2: 下フランジの剛性を高くする。 → ソールプレートの拡大化

補強案3: 縦リブ×ソールプレート間の剛性を高くする。 → 横リブ増設

補強案1は, 支承をゴム支承に取り換えることにより, 回転機能を回復させ根本的に局部変形の原因をなくすものであるが, 桁と橋台の離隔や施工条件などにより支承の取替えは困難であり, また, 新設支承が期待した回転をするかは不明確なため, ウェブ直下に2つの支承を新たに設ける構造として検討した。この場合, ウェブ直下には新たな応力集中が生じることがFEM解析により確認された。

補強案2は, 下フランジ全体の剛性を向上させることにより, 局部変形を抑えるとともに支承を強制的に回転させる構造で, 下フランジ下面に幅広の厚板を設置する構造として検討を行った。FEM解析の結果では, 応力性状は改善され, 新たな応力集中も確認されなかったが, 工費が高く, また施工が困難な方法である。

補強案3は, 縦リブとソールプレート間の下フランジの剛性を向上させることにより, 局部変形を抑制する構造であり, 総合的な評価からこの案を採用した。

4.3 選定された補強構造とFEM解析による評価

補強案3の補強部材は, 下フランジの剛性を高め, 縦リブとベースプレート間の板曲げを抑制するために, 横リブ付きの当て板を下フランジにボルト接合し, 横リブは縦リブからベースプレート上を横切る構造とした。さらに, 支点上垂直補剛材と補強部材を接合し, 桁の回転が支点上補剛材から補強部材に伝達される構造とした。

FEM解析では, この補強構造により, 下フランジの局部変形を低減させ, 溶接部に発生する応力を約80%低減できることを確認した。

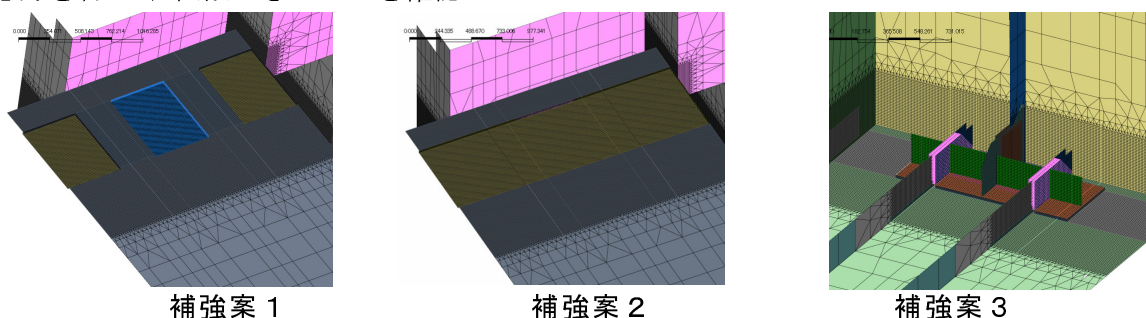


図-8 検討した補強構造

4.4 補強効果とその後の評価

補強部材設置後に, 応力計測などにより補強効果の確認を行うことが望ましいが, その機会が得られなかったため, 外観調査のみを実施している。応急補修によりき裂を除去してから約2年経過するが, き裂の再発は確認されておらず, 補強効果は得られていると推察される。