

輪荷重走行試験における I 形鋼格子床版の疲労耐久性評価手法の検討

Study on Methods to Evaluate the Fatigue Durability of Concrete-Filled I-beam Grid Slabs under Wheel Running Test

○藤井康盛*, 森 忠彦**, 高木優任***, 松井繁之****
Yasumori FUJII, Tadahiko MORI, Masahide TAKAGI, Shigeyuki MATSUI

- * 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)
- ** 工修 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)
- *** 工修 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)
- **** 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

At present, studies on performance-based design are under way in the civil engineering division. In performance-based design, calculation of the life-cycle cost of a steel bridge is required. To reduce the life-cycle cost of a steel bridge, securement of fatigue durability of slab is important. In this connection, the establishment of methods to examine the fatigue durability of slab is pursued.

In this paper, the results of the wheel running test on Concrete-filled I-beam Grid slab under the stepped load increase are reported. The test results are compared with that of reinforced concrete (RC) slab which is the standard slab. Then, the results of the analysis and evaluation based on the fatigue life estimation method proposed for Concrete-filled I-beam Grid slab are also reported. In this type of fatigue test, the excessive wheel load could cause the I-beam to yield in the final of the test, and affect the fatigue life of slab. As a result of these investigations, compared with RC slab, Concrete-filled I-beam Grid slab has a sufficient durability.

Key words : wheel running test, fatigue durability, composite slab

1. はじめに

道路橋の床版は輪荷重を直接支持する部材であるため疲労損傷しやすく、鋼橋のライフサイクルコストを低減する上で床版の疲労耐久性の確保は重要である。また、現在土木分野において性能規定の導入の検討が進められており、この関連として床版の疲労耐久性を照査する手法の確立が求められている。

I 形鋼格子床版の疲労耐久性に関しては、一連の試験研究に基づき疲労破壊形態の解明と疲労照査方法の提案がなされている¹⁾。これに基づき疲労耐久性向上のための構造改良が研究・実施され、鋼少数主桁橋用に長支間対応型が開発されている²⁾³⁾。

本論文は、I 形鋼格子床版について階段状荷重漸増載荷による輪荷重走行試験を行い、提案する疲労照査方法を検証するとともに、基準床版との相対比較を行った結果を報告するものである。

なお、試験は建設省土木研究所、(財)土木研究センター、民間企業 19 社 17 グループによる「道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究」⁴⁾の一環として行われた。

2. I 形鋼格子床版の疲労照査方法

2.1 I 形鋼格子床版の概要

I 形鋼格子床版は、構造的には I 形鋼と異形棒鋼を交

差配置した鋼格子骨組とコンクリートとの合成床版である。鋼格子骨組みの下面に型枠用底板を溶接したプレハブパネルが型枠・支保工を兼ね、パネル上に敷き鉄板を置けば作業車の通行も可能である。一般的なコンクリート場所打ちの RC 床版と比べ仮設工事の大幅軽減による安全施工と工期短縮、床版厚低減による死荷重軽減のメリットがある。底板には一般的に垂鉛鉄板が使用されるが板厚、めっき仕様、塗装仕様を選択可能である。

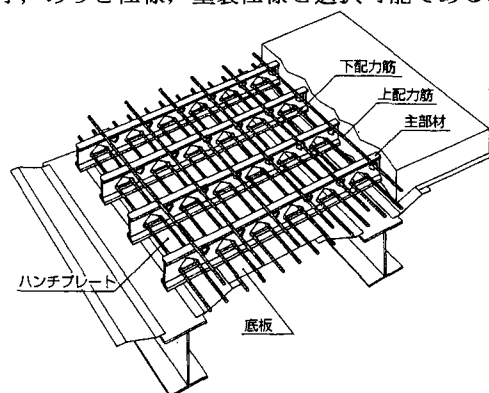


図-1 I 形鋼格子床版

2.2 疲労照査の着目部

I 形鋼格子床版に関しては、これまでに I 形鋼単体・コンクリート合成梁・実物大床版に関する一連の疲労実験研究が行われ、以下のことが判明している¹⁾。

- ① I 形鋼の疲労現象は、配力筋を通すために I 形鋼のウェブに打ち抜いた孔部 (パンチ孔と呼ぶ) から疲労亀

裂を生じ、荷重繰り返し数の増加とともにその亀裂が下側フランジに進展することによって、最終的にI形鋼が破断に至る。

- ② I形鋼の破断位置は、曲げモーメントによる軸方向応力とせん断力による二次曲げ応力の合成応力が最大となるパンチ孔隅角部に生じ、かつパンチ孔を貫通する下側配筋筋の点溶接部が主である。

このため、疲労耐久性を向上すべく応力集中を生じにくいパンチ孔形状や配筋筋交点溶接位置の改良が検討⁵⁾されている。

2.3 着目部の疲労寿命曲線

(1) I形鋼の疲労亀裂発生点の応力表現式

I形鋼の疲労亀裂発生点の応力表現式として式(1)が提案されている。

$$\alpha_x = \alpha \frac{Y_w M}{I_v} + \beta \frac{y_w}{I_t} \frac{A_s}{(B \frac{X_n}{n} + A_s)} \frac{I_u}{(I_u + I_{tu})} 11 Q \quad \text{式(1)}$$

ここに、

- M: 曲げモーメント, Q: せん断力 (I形鋼1本当たり)
- α, β : パンチ孔形状による応力集中係数
- Y_w : 合成断面の中立軸から着目点までの距離
- I_v : I形鋼1本当たり鋼換算合成断面の断面2次モーメント
- B: コンクリートの梁幅 (I形鋼間隔)
- I_t : 着目点での引張側T断面部分の断面2次モーメント
- A_s : せん断力による二次曲げモーメントの変曲点を通る断面におけるI形鋼だけの断面積
- X_n : コンクリート有効厚 (床版圧縮縁と中立軸の距離)
- n: 鋼とコンクリートのヤング係数比 (E_s/E_c)
- I_{tu} : 開口部中央引張側T断面の断面2次モーメント
- I_{tu} : 開口部中央圧縮側T断面の断面2次モーメント
- 11: 開口部引張側T断面部分の2次曲げスパン
- y_w : 引張側T断面の中立軸から着目点までの距離

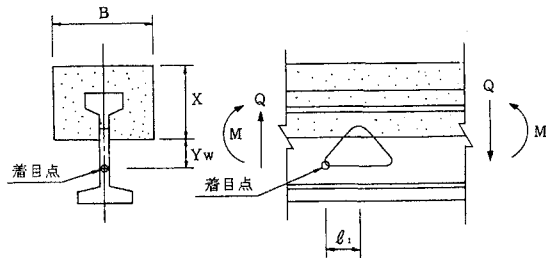


図-2 I形鋼パンチ孔隅角部の応力

(2) 疲労寿命曲線 (S-N曲線)

I形鋼単体の疲労試験結果から疲労寿命曲線 (S-N曲線) が提案されている。応力範囲は亀裂発生点のものであり、繰り返し回数は亀裂が発見されるまでの荷重回数である。なお、応力範囲は、FEM解析より求めたゲージ貼付位置とパンチ孔隅角部の応力関係を用いて、実測ひずみより得られたゲージ貼付位置での応力範囲から亀裂発生点での応力範囲の推定値としている。

通常よく使われるサイズのI形鋼 (I-130, I-150) の疲労試験データを図-3に示す。これら全てのデータを対象として最小2乗法を適用し以下のS-N曲線を得た。

・50%非破壊確率:

$$\log(\Delta\sigma) = -0.1408 \log N + 3.3557 \quad \text{式(2)}$$

・95%非破壊確率:

$$\log(\Delta\sigma) = -0.1408 \log N + 3.2524 \quad \text{式(3)}$$

S-N曲線の傾きの逆数は $m = 1/0.1408 = 7.1$ である。

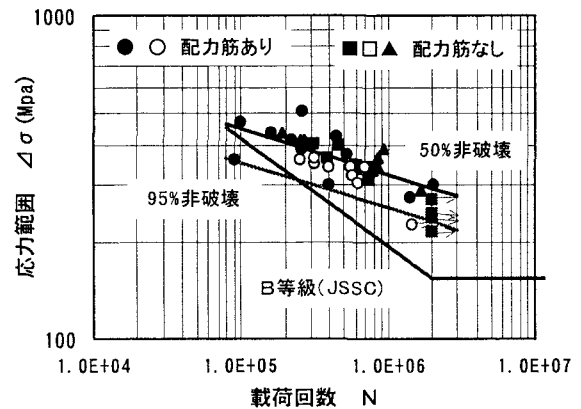


図-3 I形鋼パンチ孔疲労亀裂発生時のS-N図

3. 階段状荷重漸増荷重による輪荷重走行試験

3.1 試験方法

(1) 供試体概要

供試体は、床版支間3mの連続版でB活荷重対応、大型車日交通量2000台以上という条件にて設計された。

供試体の概要を図-4、寸法諸元を表-1、材料試験結果を表-2に示す。プレハブパネル間の継手を輪荷重走行範囲に2箇所配置した。支持条件は橋軸直角方向を支間2.5mで単純支持し、橋軸方向を弾性支持した。

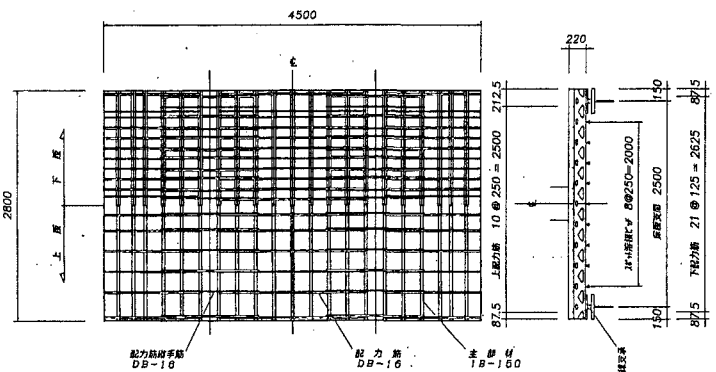


図-4 供試体の概要

(2) 荷重方法

輪荷重走行試験は建設省土木研究所の試験機を用いて、供試体上に20×50cmの荷重ブロックを並べた軌道上を幅50cmの鉄輪による輪荷重を3m間で往復走行させる。荷重ステップは、初期荷重を157kN(16tf)とし、走行回数4万回ごとに19.6kN(2tf)づつ荷重を増加させる階段載

荷である。本試験結果に対して、平成 8 年道路橋示方書に準じて製作された RC 床版 (RC 8) 供試体、および床版支間方向にフルプレストレスの 50% で設計された PC 床版 (PRC 50) 供試体の結果を比較⁶⁾した。

表-1 供試体諸元

供試体寸法	幅 2.8 m × 長 4.5 m × 厚 22cm
床版支間	2.5 m (単純版)
I 形鋼	SS400, I-150@220mm
配力筋	SD295A, 上側 D16@250mm 下側 D16@125mm
底板	SGCC, t=1mm
コンクリート	普通コンクリート, $\sigma_{28}=24 \text{ N/mm}^2$

表-2 材料試験結果 (単位: N/mm²)

材料	項目	公称値	試験平均
コンクリート	圧縮強度	24 以上	43.1
	弾性係数	(2.45×10^4)	3.04×10^4
I 形鋼 (SS400)	降伏点	245 以上	374.6
	引張強さ	400~510	434.6
鉄筋 (SD295)	降伏点	295 以上	374.2
	引張強さ	440~600	550.1
底板 (SGCC)	降伏点	(205 以上)	252.7
	引張強さ	(270 以上)	331.1

※表中の () 内は参考値

3.2 試験結果

(1) 荷重～たわみ～走行回数の関係

図-5 に荷重、床版中央たわみと走行回数の関係を示す。I 形鋼格子床版のたわみは、載荷時、除荷時とも荷重と走行回数の増加につれて漸増する傾向にあるが、その絶対値は RC 8 供試体 (床版厚 25cm) の概ね半分程度である。PRC 50 供試体 (床版厚 23cm) とは 20 万回程度までほぼ同等である。

終局時については、40 万回 (荷重 353kN) で載荷時たわみが 6mm を超え、繰り返し載荷に伴うたわみ増加率が増え始め、43 万回程度から更に増大した。最終的に 45 万回 (373kN) で変位計測が不可能になり試験を終了した。

I 形鋼格子床版は RC 8 供試体に比べ、高い剛性を保持し、より大きな荷重の繰り返しに耐え、終局時においてねばりのあるたわみ性状を示す。

(2) 破壊状況

試験後に解体調査を行ったが、I 形鋼について図-6 に示すように載荷点直下の床版中央から支点側に第 1 番目のパンチ孔 (第 1 パンチ孔と呼ぶ) 支点側隅角部から疲労亀裂が発生し、それが下フランジまで進展し破断していた。破断は配力筋との交点溶接がある中央部の I 形鋼に 1 箇所、交点溶接のない I 形鋼 4 本に各 1 箇所生じていた。その他のパンチ孔では亀裂は認められなかった。

底板は I 形鋼にスポット溶接により取り付けているが、

第 3 ステップの 8 万~10 万回で支間中央部分のスポット溶接部において剥離を生じた。

コンクリートについては、床版下面では I 形鋼に沿うひびわれ、I 形鋼に直角にはほぼ下配力筋に沿ったひびわれが生じた。A-A の床版切断面では床版中央付近で I 形鋼の上フランジ側面に沿って上側に貫通するひびわれを生じ、かぶり部分のコンクリートが圧壊していた。

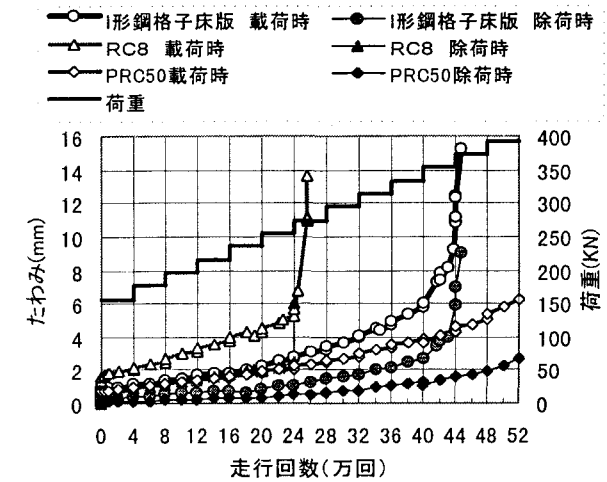


図-5 床版中央たわみと走行回数の関係

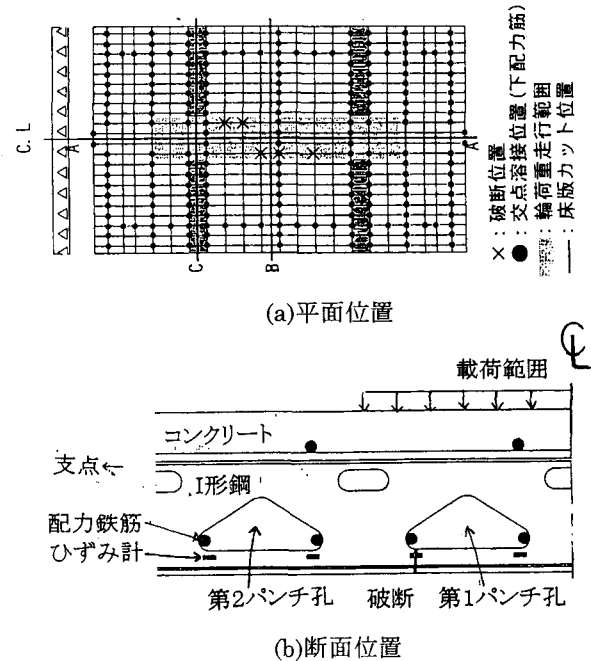


図-6 I 形鋼の破断状況

(3) 着目点のひずみ

図-7 に破断した床版中央の I 形鋼のウェブ (パンチ孔下 6mm) と下フランジ (側面) のひずみ分布を示す。ひずみはパンチ孔の影響により単純梁理論に基づく滑らかな分布をしていない。ウェブは曲げとせん断力による二次曲げと孔の応力集中が加わっている。フランジは曲げとせん断力による二次曲げの合成応力のためである。

床版中央に配置された I 形鋼のパンチ孔支点側隅角部

近傍（パンチ孔下6mm）のひずみについて、破断した第1パンチ孔と亀裂のない第2パンチ孔での測定結果をそれぞれ図-8、図-9に示す。

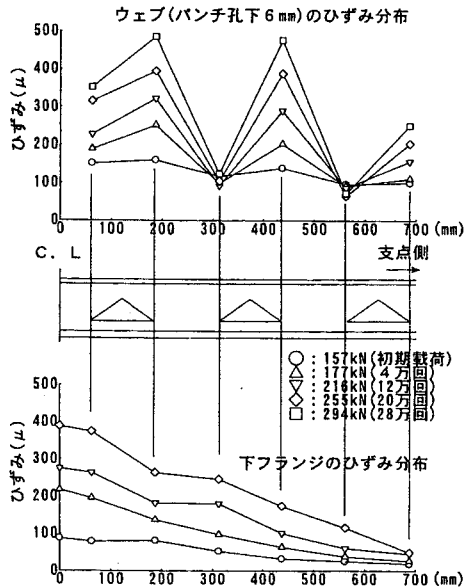


図-7 静的載荷時のI形鋼のひずみ分布

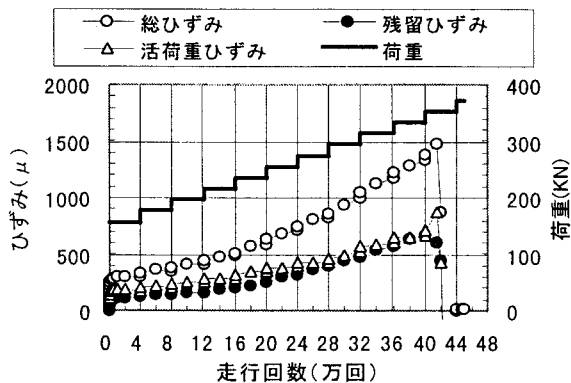


図-8 第1パンチ孔近傍ひずみ (IW19 破断位置)

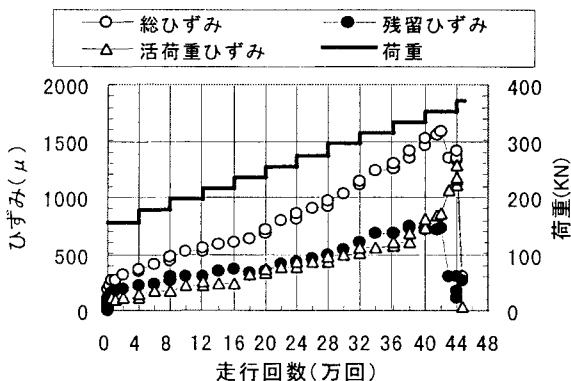


図-9 第2パンチ孔近傍ひずみ (IW23 亀裂なし)

第1および第2のパンチ孔のひずみは載荷時（総ひずみ），除荷時（残留ひずみ）とも載荷の進行につれて漸増するが42万回（353kN）段階で急変した。第1の活荷重ひずみ（載荷時－除荷時）は42万回段階で急減した。同段階で第2の活荷重ひずみの変化は殆どなく、43万回段

階で急増した。42万回段階以降のひずみ急変は第1孔の急変の影響と考えられる。

4. 輪荷重走行試験における構成部材の疲労照査

4.1 検討手順

I形鋼格子床版の疲労破壊モードは、I形鋼の疲労破壊である。従って、I形鋼に着目し、輪荷重走行試験における疲労照査を以下の手順で行った。

- ① 構造解析によるパンチ孔隅角部の応力範囲算出
- ② 測定データに基づく応力範囲との相関
- ③ 輪荷重走行試験の累積損傷度検討

4.2 構造解析による応力範囲の算定

(1) 床版のたわみと断面力の解析

FEMによる直交異方性板解析を行い、たわみと断面力の理論値を求めた。板剛性の算定はHuber式を適用し⁷⁾、表-2に示すケースを検討した。なお、通常的设计モデルはCase-1である。荷重は床版中央の載荷ブロック(20×50cm)上に等分布作用し床版厚半分まで45度で分散すると仮定した。

表-2 解析ケース

	Case-1	Case-2	Case-3
底板	無視	考慮	考慮
引張側コンクリート	無視	無視	考慮

図-10にて157kNの初期載荷時たわみ分布は全断面有効のCase-3でヤング係数比 $n=10$ と設定した方が実測とよく近似する。その後、動的載荷が始まり、たわみは増加傾向を示す。

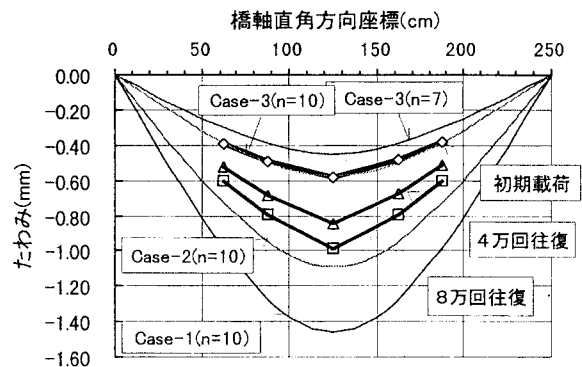


図-10 157kN 載荷換算たわみの橋軸直角方向分布

図-11のたわみ比は床版中央活荷重たわみの157kN載荷換算値とCase-1($n=10$)の値の比である。初期載荷では先に述べたようにCase-3に一致したが、載荷回数増加につれて構造系が変化し、40万回段階のたわみは底板・引張側コンクリート無視のCase-1に一致するようになった。図-12にCase-1での衝撃を含まない輪荷重による曲げモーメントとせん断力分布を示す。橋軸直角方向せん断力が最大となる位置は第2パンチ孔である。

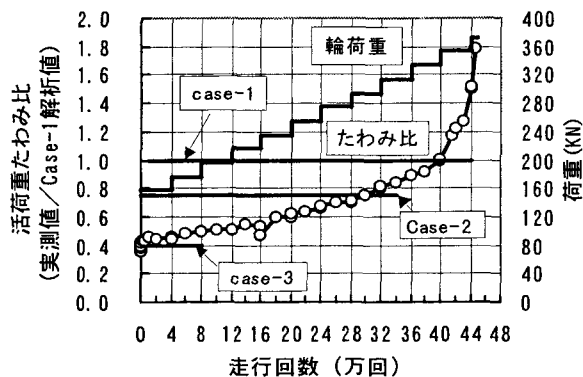


図-11 床版中央の活荷重たわみの解析値との対比

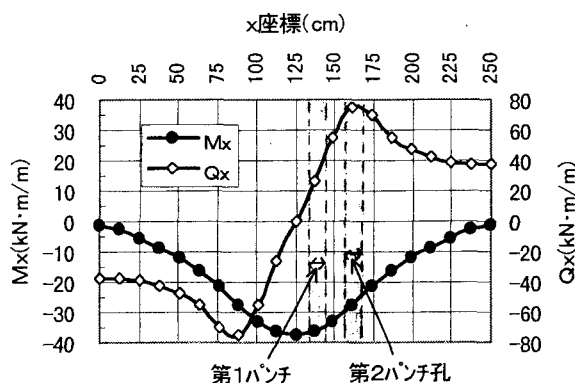


図-12 157kN 載荷時の橋直角方向の断面力分布

(2) I 形鋼の応力算定

I 形鋼パンチ孔隅角部応力の簡易算定式(1)における応力集中係数 α , β は I 形鋼単体での FEM 解析により設定する。I 形鋼単体疲労試験においてゲージ貼付位置での実応力と FEM 解析値を対比して解析の妥当性を検証している。

表-3 は Case-1 で計算した衝撃を考慮しない応力を示す。下フランジ部外縁についても同様な手法で簡易算定式を作成した。同一パンチ孔に着目すると、せん断力による二次曲げの影響で隅角部応力は支点側が大きく中央側が小さい。下フランジ下縁は逆に中央側が大きくなる。

表-3 I 形鋼パンチ孔の応力算定結果 (157kN 載荷時)

着目点	曲げ M'_x	せん断 Q_x	孔隅角 部下縁	下フランジ下 縁(ゲージ)
(単位)	kN·m/m	kN/m	N/mm ²	N/mm ²
載荷点直下	33.08	0	—	75.0(IF11)
第 1 孔	中央側	12.86	84.7	76.0(IF12)
	支点側	40.47	140.5	62.6(IF10)
第 2 孔	中央側	65.01	5.7	69.9(IF14)
	支点側	72.15	148.1	35.6(IF15)

*: $M'_x = M_x - (\nu_c / \sqrt{\alpha}) M_y$, α : 剛比=0.5, $\nu_c=0.167$

4.3 測定データに基づく応力範囲の相関

(1) 実測値と計算値との対比

簡易応力算定が可能で応力勾配が比較的緩やかな下フ

ランジ下縁を対象として、計算値と実測値を対比した結果を図-13 に示す。

応力比(実応力/計算応力)は、設計荷重レベル(157kN)では底板効果等により 0.3~0.6 と小さく、載荷進行に伴い漸増するが、中央側 (IF11, IF12) の方が大きい。

第 1 パンチ孔支点側下フランジ(破断箇所 IF10)に着目すると、8~36 万回の範囲で第 2 パンチ孔側 (IF14, IF15) より小さい。当該部では、計算上せん断力による二次曲げの影響が大きいほど応力が小さい。第 1 パンチ孔側の方が曲げモーメントが大きく、コンクリート部分のひびわれによる剛性低下が先行することから、これに対応して鋼材の負担割合が増加している状況が考えられる。

また、IF10, IF14, IF15 の応力比は 36 万回段階でほぼ一致し 40 万回以降急増するが、この傾向はパンチ孔近傍のひずみの場合と一致する。

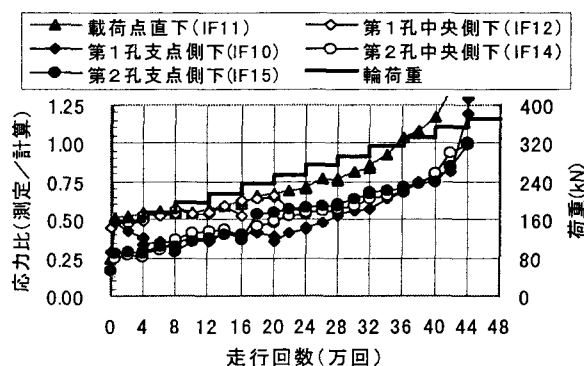


図-13 I 形鋼下フランジの応力度の対比

(2) 荷重移動の影響について

I 形鋼ウェブ第 2 パンチ孔支点側隅角部近傍 (IW23) の動的ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_D$ (走行載荷時 5 分間計測の最大値 - 最小値) と静的載荷ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_S$ (載荷時ひずみ - 除荷時ひずみ) を図-14 に示す。

$\Delta \epsilon_D$ と $\Delta \epsilon_S$ との差は 353kN(36tf) 載荷以降を除いて荷重・走行回数増加に対してあまり増加せず概ね 80~120 μ の範囲にある。換言すると動的ひずみ範囲と静的ひずみ範囲の比 $\Delta \epsilon_D / \Delta \epsilon_S$ は、荷重・走行回数の増加につれて低減する傾向にある。

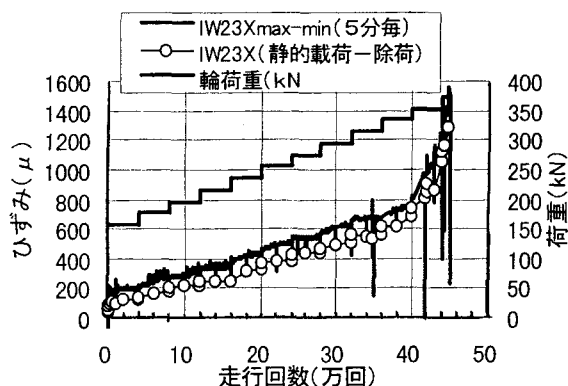


図-14 パンチ孔隅角部近傍の動的ひずみ変動 (IW23)

(3) 応力範囲の補正

底板および引張側コンクリートを無視して算定した静的載荷時の応力 σ_{max} に対して、静的載荷時の実応力と計算応力の比 k 、荷重移動による割増 i を考慮して、式(4)にて応力範囲補正值 $\Delta\sigma_i$ を算定した。

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{max} \times k \times (1+i) \quad (式4)$$

ここで、 $i = (\Delta\varepsilon_D - \Delta\varepsilon_S) / \Delta\varepsilon_S$

4.4 輪荷重走行試験の累積損傷度検討

階段状荷重漸増載荷における応力範囲 $\Delta\sigma_i$ を計算し、式(5)により累積損傷度 D を算出し、I形鋼破断箇所近傍のひずみが急変した時点で $D \geq 1$ となるかを検討した。

$$D = \sum D_i = \sum (n_i / N_i) \quad (式5)$$

ここに、 D_i : $\Delta\sigma_i$ が n_i 回繰り返されたときの損傷度

N_i : $\Delta\sigma_i$ に対応する疲労亀裂発生回数

$$(\Delta\sigma_i)^m \cdot N_i = C$$

n_i : 各荷重での走行回数 n_r の2倍 $n_i = 2n_r$

疲労寿命曲線として、I形鋼パンチ孔隅角部の亀裂発生に関する50%非破壊確率のS-N曲線式(2)を適用し、95%非破壊確率の式(3)の場合も比較した。

累積損傷度は第1パンチ孔の方が大きな値となった。

図-15に、第1パンチ孔についての応力範囲補正值と累積損傷度と走行回数の関係を示す。式(2)、式(3)を用いて計算した累積損傷度をそれぞれ $D(50\%)$ 、 $D(95\%)$ と標記する。

40万回終了時(333kN)では $D(50\%) = 0.05$ 、 $D(95\%) = 0.29$ と小さい。応力範囲は約290MPaで実際は降伏が生じていると考える。荷重が353kNに増加した後、応力範囲と D の増加が顕著になり、 $D(95\%)$ は約43万回で1.0を超過し、44万回時で1.2となる。この段階では応力範囲が降伏点(374.6MPa)を超過する。活荷重ひずみが急減した42万回時を使用限界と考えると、同時点で $D(50\%) = 0.11$ 、 $D(95\%) = 0.60$ である。

373kN 載荷段階では、開始から塑性域での繰り返しとなり、以下の経過を辿ったと考えられる。

① I形鋼部分降伏による剛性低下とたわみ増大 → ② コンクリートひびわれ拡大 → ③ コンクリートのせん断剛性低下 → ④ I形鋼のせん断力負担割合増加 → ⑤ I形鋼応力範

囲の更なる増大 → ⑥ 損傷度急増によるI形鋼パンチ孔隅角部からの疲労亀裂発生と進展 → ⑦ 疲労亀裂が下フランジに達して破断。

5. まとめ

I形鋼格子床版は、階段状荷重漸増載荷による輪荷重走行試験においてI形鋼の破壊により終局に至った。

本床版について、I形鋼のパンチ孔隅角部の亀裂発生に着目した疲労寿命推定方法を適用し、測定データに基づく応力範囲との相関および累積損傷度を検討し、基準床版と相対比較を行った結果、以下の知見を得た。

- ① 試験は45万回(373kN)で終了したが、載荷試験の終盤でI形鋼が降伏したことに伴いコンクリートのひびわれ進展と剛性低下が起これりI形鋼の荷重負担が急増したためI形鋼の疲労破壊が早まったと考えられる。
- ② 使用限界を着目点ひずみが急変した42万回(353kN)段階とすると十分に安全側設定となり、同時点の累積損傷度は95%非破壊確率で今回0.60程度であった。
- ③ I形鋼が降伏しない荷重範囲での比較において、本床版は基準床版のRC床版と比べて高い剛性を保持し、より大きな荷重の繰り返しに耐えた。

I形鋼格子床版の疲労照査方法には、疲労亀裂発生に関するS-N曲線、底板を無視した応力算定など、安全側仮定があるが、本手法を用いて疲労設計が可能である。

なお、今回の載荷方式は、荷重増加によって主部材が降伏して構造系が大きく変化するような床版の場合は疲労耐久性を適切に評価することは困難であり荷重レベルに留意が必要と考える。

<参考文献>

1. 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，1984.11
2. 高木優任，水口和之，檜作正登，藤井康盛，松井繁之：鋼少数主桁橋梁に適用するI形鋼格子床版の疲労耐久性，土木学会第1回鋼橋床版シンポジウム，1998.10
3. 大田孝二：大支間I形鋼格子床版の疲労特性に関する研究，東京大学学位論文，1999.3
4. 建設省土木研究所：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その1)，共同研究報告書第221号，1999.3
5. 大田孝二，高木優任，鈴木清，松井繁之：I形鋼格子床版の耐久性に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.44A，1998.3
6. 八部順一，川畑篤敬，佐々木保隆，内田賢一，宮崎和彦，西川和廣：パーシャルプレストレスを導入したPC床版の輪荷重走行試験，土木学会第1回鋼橋床版シンポジウム，1998.10
7. 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編：理論編，1999.4

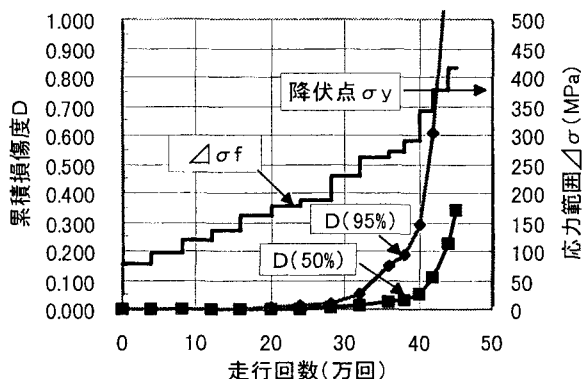


図-15 第1パンチ孔の累積損傷度計算