

関西航測(株)小柴友彦
 関西航測(株)山本佳克
 関西国際空港(株)江村剛
 大阪工業大学 堀川都志雄

一般に、河川改修に伴う鉄道橋の架け替えを行う際、計画高水位と既設の軌道高との制約条件から桁高の制限を受けることになる。既設のレールとの整合性をとるには、図-1のようなスラブ上面にU型断面を設け、レールを設置することにより確保できる。このような版厚の薄い軌道直結のRCスラブ桁はあまり例がなく、スラブとしての耐荷力特性を検討するために実験を行った。

その第一段階として、供試体(試験桁)としては、列車の1車輪に作用する荷重は均等に分担すると考え、軌道の片方を想定したはりモデルを採用した。なお、寸法は図-2に示すように、設計桁(実際に供用される桁)の $\frac{1}{2}$ モデルであるが、版厚と配筋等はせん断力による影響に着目するため、設計桁と同一とした。実験は、静的曲げ試験および疲労試験を行い、測定項目はたわみ、鉄筋とコンクリートのひずみ、およびひびわれの開閉量である。なお、たわみについては有限要素法で用いられるアイソパラメトリック要素によって補正を行った。²⁾

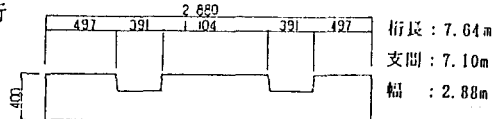


図-1 設計桁の構造図

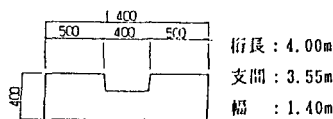


図-2 試験桁の構造図

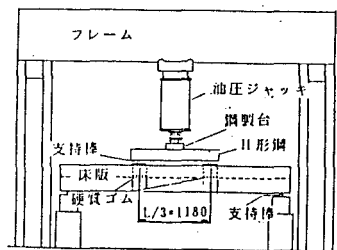


図1-1 供試体のセットアップ

1. 試験方法

(1) 静的曲げ試験

本試験では、油圧ジャッキを用いて、図1-1に示すように供試体を設置した。載荷方法は設計最大曲げモーメントに相当する総荷重47tf(死荷重分を含む)で載荷、除荷を3回繰返し、その後、破壊を生じさせるように10tfずつ荷重を増加させた。

(2) 疲労試験

疲労試験は、静的曲げ試験と同様の供試体で行った。スラブ桁の疲労特性を調査するために、載荷荷重を設計最大曲げモーメントに相当する47tfで載荷したものを1体(疲労試験(1))と、10tfを初期の繰返し荷重とし、その後漸増させることによって、スラブ桁の疲労性状を確認するためのものを1体(疲労試験(2))の計2体行った。この2体の載荷プログラムを図1-2および図1-3に示す。

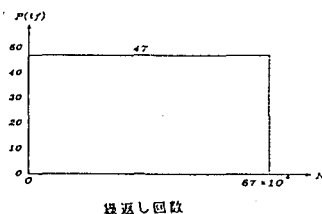


図1-2 疲労試験(1)の載荷プログラム

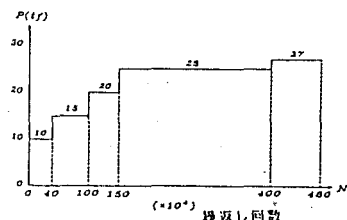


図1-3 疲労試験(2)の載荷プログラム

2. 試験の結果と考察

(1) 静的曲げ試験

① 静的に載荷した結果、15tfで初期ひびわれを確認した(目視による)。その後の載荷で斜めひびわれ

が発生し、120tf付近で鉄筋が降伏した。最終的には133tfでコンクリート部の圧壊により、破壊に至った。また、破壊荷重は、コンクリート標準示方書の終局耐力 108tf を上回っていた。各耐力の計算値の比較表を表1-1に示す。

単位: tf

	1	2	3	4
	曲げ耐力	せん断耐力	斜め圧縮破壊耐力	押し壊せん断耐力
耐力	108	28.8	108	74.0
破壊耐力	108	63.8	100	148.0

表1-1 計算耐力の比較

② たわみ、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみは荷重の増加に伴い、はり理論による全断面有効の値から引張無視の値に近づいており、供試体は版の性状を示していなかった。

③ ひびわれ幅は、設計荷重時(47.0tf)で0.25mmであった。

(2) 疲労試験(1)

各荷重段階における支間中央断面のたわみ、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみの結果を図1-4～図1-6に示す。

① 載荷荷重47tfで繰返し載荷を行った結果、67万回で破壊した。破壊の形状は曲げ試験と同じであった。

② 疲労強度に対する検討

(1) 鉄筋

鉄筋の疲労強度の面から実験値との比較検討を行う。繰返し回数67万回時での設計疲労強度fsrdは以下になる。¹⁾

$$f_{srd} = 1900 \frac{10}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{sd}}\right) / r_s$$

$$f_{srd} = 1886 \text{ kgf/cm}^2$$

20万回での鉄筋ひずみは1000μで、応力に換算すれば2100kgf/cm²となり、fsrdの近傍にある。しかし、67万回では2320kgf/cm² > 1886kgf/cm²であり設計疲労強度を越えており、鉄筋の破断が供試体の破壊をもたらしたと推測される。

(2) コンクリート

繰返し回数20万回におけるコンクリートの疲労強度の算定を行うと以下になる。¹⁾

$$f_{rd} = K_1 f_d (1 - \sigma_{sp} / f_d) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right)$$

$$= 196.9 \text{ kgf/cm}^2$$

一方、実験値から得られたコンクリート上縁の応力(Ec=1.4×10⁵kgf/cm²)は、20万回と60万回でそれぞれ60kgf/cm²と63kgf/cm²となり、196.9kgf/cm²以下である。すなわち、コンクリート部の疲労破壊によって供試体は破壊していないと言える。

③ 大きな活荷重下では、繰返し回数の増加に伴って、たわみやひずみは全断面有効から引張無視の値に近づいていく。破壊前での挙動は特に顕著であり、床版の劣化状況を表す指標の1つと言える。

④ ひびわれの最大幅は0.27mmであった。

(3) 疲労試験(2)

① 実際の疲労の影響は活荷重に支配される。載荷点間隔が設計車両とほぼ等しいことから1輪5tf、すなわちP=10tfを初期の荷重とし、その後荷重を漸増させて、スラブ桁の疲労性状を確認した。

最初に10tfで繰返し載荷を行い、最終的に27tfまで増加させた結果、計480万回においても破壊には至らなかった。たわみおよびひずみは疲労試験(1)と比較して、かなり全断面有効に近く、健全な状態を保持していると言える。

② ひびわれ幅の最大値は0.15mmであった。

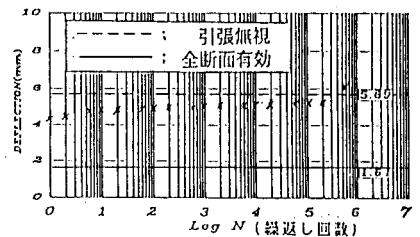


図1-4 弾性たわみの変化

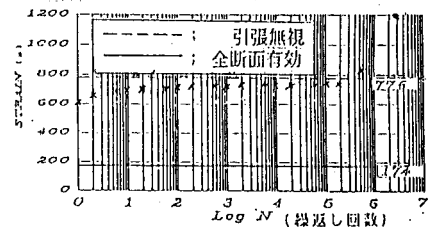


図1-5 引張側鉄筋の弾性ひずみの変化

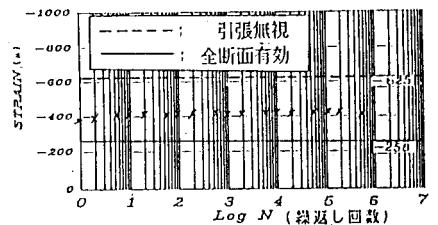


図1-6 コンクリート上縁の弾性ひずみの変化

3. 設計桁の寿命の推定

試験桁は、疲労試験(1)において、 $P=47.0\text{tf}$ の繰返し荷重、 67×10^4 回で疲労破壊した。実際には、この一体の試験結果のみでは、応力と繰返し回数の関係を表すS-N線図は求められないが、本報告書ではこの破壊結果に基づき、疲労破壊に関する理論式を使って実際の設計桁の安全性、疲労寿命の推定を行う。

疲労試験(1)の破壊形状は曲げ破壊によるコンクリート部の圧壊であったが引張側鉄筋疲労破断が原因であると想定できる。しかし、せん断力による破壊が先行する可能性もあることからせん断破壊についても検討を加える。

3-1 曲げモーメントによる疲労破壊

(1) 試験桁の疲労破壊と設計桁

疲労試験(1)の試験桁は、荷重 47tf 、繰返し回数 $N=67\times 10^4$ 回で破壊した。これは鉄筋の疲労破断によるものと考えられる。この載荷時の桁中央のモーメントは $M=27.87\text{tf}\cdot\text{m}$ である。

設計桁においても $M=27.87\text{tf}\cdot\text{m}$ 、 67×10^4 回の繰返しで疲労破壊すると考えれば、設計桁の設計軸重載荷によって発生するモーメントと、繰返し回数の関係から、設計桁の寿命を推定する。

(2) レンジベア法による繰返し回数

桁の上を電車が走行した場合、桁に発生するモーメントの時間変化を計算すると、一軸によって発生するモーメントが軸数だけ繰返されるのは非常に短いスパンの場合に限られる。モーメントの影響線を用いて計算すると、長スパンほどモーメントの変化は少なくなり、繰返し回数は減少する。このような重なり合ったモーメントの変化による繰返し回数を決める方法はいくつかあるが、ここでは、レンジベア法を採用する。

レンジベア法により発生モーメントの頻度を求めると

$$18.30\text{tf}\cdot\text{m} \rightarrow 1\text{回} \quad 3.45\text{tf}\cdot\text{m} \rightarrow 1\text{回}$$

となる。

(3) 等価繰返し回数と疲労寿命

設計桁の不規則なモーメントの変化を試験桁の一定荷重によるモーメントの単純繰返しの何回分に相当するかを求める。なお、この計算には、S-N線図、マイナー則を利用する。³⁾

等価繰返し回数： n_{eq1}

$$n_{eq1} = \frac{N_1}{N_{tj}} = \sum_{i=1}^m \cdot n_{tj} \left(\frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_1} \right)^{1/K} = 1 \times \left(\frac{18.30}{27.87} \right)^{1/0.12} + 1 \times \left(\frac{3.45}{27.87} \right)^{1/0.12} = 0.03$$

$$N_{tj} = \frac{N_1}{n_{eq1}} = \frac{67 \times 10^4}{0.03} = 2.23 \times 10^7$$

$$\text{疲労寿命: } T = \frac{N_{tj}}{250 \times 365} = \underline{\underline{245\text{年}}}$$

列車編成 : 1両
通過列車本数 : 250回/日
ボギー通過回数 : 1両あたり2回

3-2 せん断破壊

(1) 試験桁のせん断耐力

試験桁ではせん断補強鉄筋を配置していないので、せん断補強鉄筋を用いない部材の設計せん断疲労耐力の式を参照する。

疲労試験(1)において

ここで、

$$\begin{aligned} V_{rcd} &= V_{cd} (1 - V_{pd}/V_{cd}) (1 - \log N/11)^{1/11} & V_{rcd} &= 47.0 \times 1/2 = 23.5\text{tf} \\ &= V_{cd} \left(1 - \frac{\log N}{11} \right) & N &= 67 \times 10^4 \\ & & V_{pd} &= 0 \\ & & &= 50.0\text{tf} \end{aligned}$$

試験桁がせん断疲労破壊すると仮定すれば、せん断耐力 26.9tf より大きい値となっている。

(2) 設計桁のせん断耐力

設計せん断耐力 V_{cd}

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot B_w \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

試験桁のせん断耐力を50tfとすれば

$$\text{設計桁のせん断耐力: } V_{cd} = 50.0 \times \sqrt{\frac{240}{500}} = 39.2\text{tf} \text{ と推定される。}$$

(3) 疲労寿命

$$V_{rcd} = V_{cd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{cd}}\right) \left(1 - \frac{\log N}{11}\right)$$

$$\log N = 11 \left\{1 - \frac{V_{rcd}}{V_{cd} \left(1 - V_{pd}/V_{cd}\right)}\right\}$$

$$\log N = 11 \left\{1 - \frac{6.125}{39.2 \times (1 - 5.7/39.2)}\right\}$$

$$N = 9.75 \times 10^8$$

$$\text{疲労寿命: } T = \frac{9.75 \times 10^8}{4 \times 250 \times 365} \approx 2670 \text{年}$$

ここで、

$$\text{試験桁 } \sigma_{ck} = 500\text{kgf/cm}^2$$

$$\text{設計桁 } \sigma_{ck} = 240\text{kgf/cm}^2$$

$$f'_{cd} = \sigma_{ck}/1.3$$

$$\text{ここで、 } V_{cd} = 39.2\text{tf}$$

$$V_{pd} = 5.7\text{tf (設計せん断力)}$$

$$V_{rcd} = 5 \times (1 + 0.225) = 6.125\text{tf}$$

4. 設計桁の安全性について

- ① 疲労試験によれば、破壊の形態は曲げによる引張鉄筋の疲労によるものと推定される。これは試験桁の配筋は設計桁と同鉄筋比であり、釣合鉄筋比以下であることから、断面破壊時には鉄筋の破壊が先行することも予想される。

設計桁の耐用年数は約250年と推定され、コンクリート構造物としては十分な耐力を有していると言える。

- ② ひびわれについても、破壊時(67×10^4 回)までの最大幅は0.27mmであり、許容ひびわれ幅の0.28mm (異形鉄筋・腐食性環境: $W_s = 0.004\text{C}^{1/3}$)より小さく、使用限界の1つの指標でもあるひびわれ幅についても問題はないと推定される。

- ③ 今回の桁の疲労試験では、タイププレートと同サイズの載荷板を用いて定点での繰返し載荷を行った。実橋においては、レールは締結装置により直接スラブ桁に固定させており、この締結ボルトによるコンクリートスラブ上縁部の損傷の発生が予想される。今後の課題としては、この締結部の構造等について、検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編
- 2) KLAUS-JURGEN BATHE: FINITE ELEMENT PROCEDURES IN ENGINEERING ANALYSIS
- 3) 構造物設計資料 (No.70), (No.71) 日本国有鉄道構造物設計事務所

列車編成 : 1両
通過列車本数 : 250回/日
通過軸数 : 1両あたり4回