

鉄道橋疲労設計曲線設定のための列車荷重シミュレーション解析

関西大学工学部 坂野 昌弘

関西大学工学部 三上 市藏

関西大学大学院 ○西村 剛

1. はじめに

鋼鉄道橋設計標準¹⁾では特に疲労設計曲線は設定されておらず、変動応力の影響は修正マイナー則により評価されている。しかしながら、修正マイナー則を適用した場合には微小応力範囲による疲労被害を過大評価してしまうため、過大に安全側、即ち不経済な寿命評価となる傾向がある。したがって、鉄道橋部材に対し、低応力域の疲労特性まで安全性を損なわずかつ経済的に評価できるような疲労設計曲線を設定することが望ましい。

従来より、疲労設計曲線は疲労試験結果に基づいて設定されるのが一般的である。しかし、実用上重要な低応力長寿命域の疲労試験を数多くの継手および各種の変動応力に対して実施するには膨大な時間を必要とするため、疲労試験による長寿命疲労設計曲線の設定は事実上不可能と考えられる。著者の1人ら²⁾は、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析により疲労設計曲線の設定を試みている。即ち、Weibull分布で表される連続的な応力範囲頻度分布を持つ変動応力を用いて各種の継手モデルを対象とした疲労寿命解析を行い、疲労設計曲線の変動応力に対する打ち切り限界について検討している。JSSC疲労設計指針(案)³⁾では、これらの結果を参考として、変動応力に対する打ち切り限界をもつ疲労設計曲線を設定している。しかし、鉄道橋部材に生じる変動応力は離散的な応力範囲頻度分布となる場合が多いため、それらの変動応力特性を十分に考慮した合理的な疲労設計曲線の打ち切り限界を設定する必要がある。

本研究では、実際に鉄道橋に生じる変動応力をできるだけ忠実に再現するために列車荷重のシミュレーション解析を行い、疲労設計曲線の打ち切り限界について検討した。即ち、モンテカルロ法によって発生させた列車荷重列が橋梁上を通過するときに生じる部材力の変動を影響線解析により求め、それらの変動応力波形を用いて疲労亀裂進展解析により疲労設計曲線の打ち切り限界について検討した。

2. 解析方法

2.1 列車荷重モデル

電車列車専用線では、一般に列車本数が多い上に、1列車毎の応力繰返し数が特に床組等の影響線基線長の短い部材では非常に多くなる傾向がある。そこで、本研究では、列車モデルとして図1に示す新幹線旅客列車を仮定した。各車両の軸重 P_i の分布は、図2に示すような平均167kN、最大186kN、最小157kNの対数正規分布を仮定した⁴⁾。

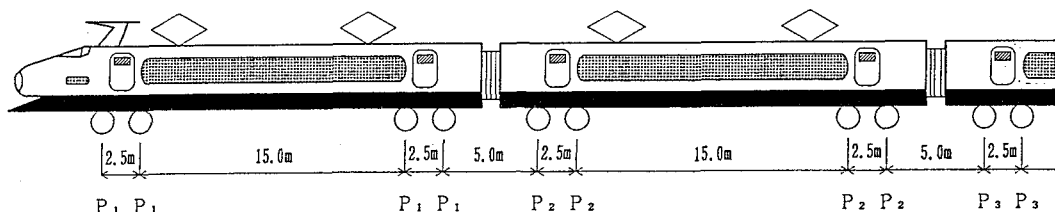


図1 シミュレーションに用いた新幹線旅客列車モデル

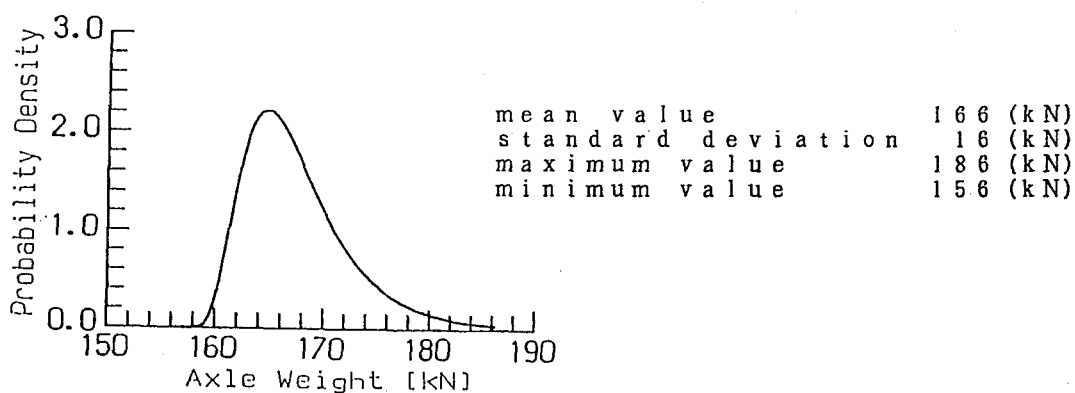


図2 軸重分布

2.2 橋梁形式および対象部材

前項で述べたように影響線基線長の短い部材では応力変動の繰返し回数が増える傾向があり、そのような部材では疲労限界状態の照査によって断面が決まる場合が多くなる。そこで、本研究では、床組や比較的短支間の橋梁に用いられるプレートガーダーを想定し、図3に示すような中間垂直補剛材取付部を対象として疲労寿命解析を行った。プレートガーダーの支間（影響線基線長）は10～50m、解析モデルは荷重非伝達型（リブ）十字溶接継手である。

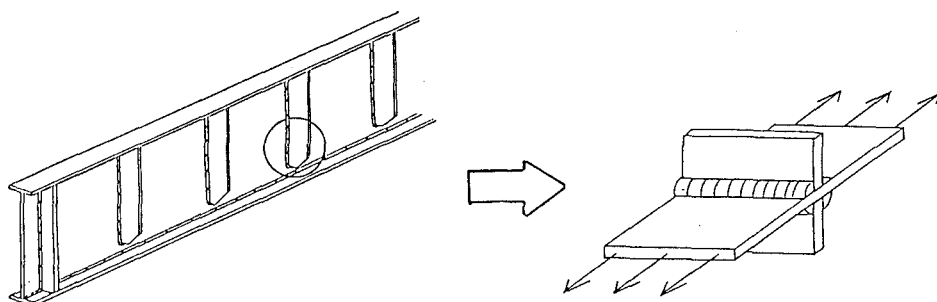


図3 対象とした部材とその解析モデル

2.3 変動応力の発生

変動応力は、モンテカルロ法により軸重分布が図2に従うようにして発生させた活荷重列が単純桁上を通過する際に、桁中央に生じる曲げモーメントの変動として求めた。垂直補剛材取付部の疲労照査が曲げモーメントにより生じる面内長手方向の引張応力に対して行われることに対応している。変動応力範囲の頻度分布はレインフロー法により求めた。また、変動応力に対する等価応力範囲 S_{req} は式(1)により求めた。

$$S_{req} = \left\{ \sum_{i=1}^N (S_{ri}^m \cdot n_i) / \sum_{i=1}^N n_i \right\}^{1/m} \quad (1)$$

ここで、 S_{ri} は i 番目の応力範囲、 n_i は S_{ri} の頻度、 N は頻度分布の分割数、 m は $S-N$ 関係 ($S^m \cdot N = C$) のべき定数である。後述するように、亀裂進展解析においてJSSC指針(案)の設計進展曲線を適用していることから、 $m=2.75$ として等価応力範囲を求めた。

2.4 疲労亀裂進展解析

疲労亀裂進展解析の方法は文献2)と同様である。即ち、まずすみ肉溶接止端部に生じる半楕円表面亀裂に対する応力拡大係数範囲 ΔK を式(2)で表す。

$$\Delta K = F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_g \cdot S_r \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここに、 S_r は公称応力範囲、 a は亀裂深さ、 F_e 、 F_s 、 F_t 、および F_g はそれぞれ亀裂形状、表面亀裂、有限板幅、および応力分布に対する補正係数である。 F_e 、 F_s 、 F_t は式(3)、(4)、(5)の式で与えられる。

$$F_e = 1 / \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}} \quad (3)$$

$$F_s = 1 + 0.12(1 - a/b) \quad (4)$$

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^2) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad (5)$$

ここに、 b は亀裂表面長さ、 λ は a/W (W は板幅) である。 F_g は止端角度 $\theta=60^\circ$ および曲率半径 $\rho=0.75\text{mm}$ を仮定して亀裂が無い場合の応力分布をFEM解析により計算し、亀裂分布が作用する場合と重ね合わせるにより求めた。初期亀裂深さ a_i は 0.1mm に、また限界亀裂深さ a_r は板厚の80%に仮定し、疲労亀裂進展速度 da/dN と ΔK の関係はJSSC(案)の最安全設計曲線(式(6))を用いた。

$$da/dN = \begin{cases} 2.7 \times 10^{-11} \cdot \Delta K^{2.75} & (\Delta K > \Delta K_{th}) \\ 0 & (\Delta K \leq \Delta K_{th}) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は $2.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 da/dN の単位は m/cycle である。変動応力に対しては各応力範囲成分から計算した ΔK が ΔK_{th} を越える場合にのみ亀裂が進展するとして、式(6)を適用した。また、変動応力下の疲労寿命は、応力範囲頻度分布の高応力側からと低応力側から計算した対数平均値として求めた。

3. 解析結果および考察

3.1 変動応力範囲の頻度分布

スパン10, 15, 20, 30, 40, 50mについてレインフロー法により求めた変動応力範囲の頻度分布を図4に示す。

縦軸は相対頻度、横軸は最大応力との比である。図中に2.75乗平均値として求めた等価応力範囲 S_{req} を示す。最大応力範囲は、スパン15m以下では隣合う2台の台車毎に生じ、スパン20m以上では1列車毎に生じている。また、各頻度分布図で最も頻度が高い応力範囲は、いずれのスパンでも隣合う2台の台車によって生じたものである。スパン15～30mの場合には、それらの応力範囲はそれぞれの等価応力範囲とほぼ一致している。スパン40m以上では、高頻度の応力範囲は低応力側に偏っており、1列車毎に生じる比較的数量少ない大きな応力範囲の他には微小な応力範囲成分のみがカウントされている。このように、鉄道橋部材に生じる変動応力範囲の頻度分布は影響線基線長によって全く異なった分布形状を示す。

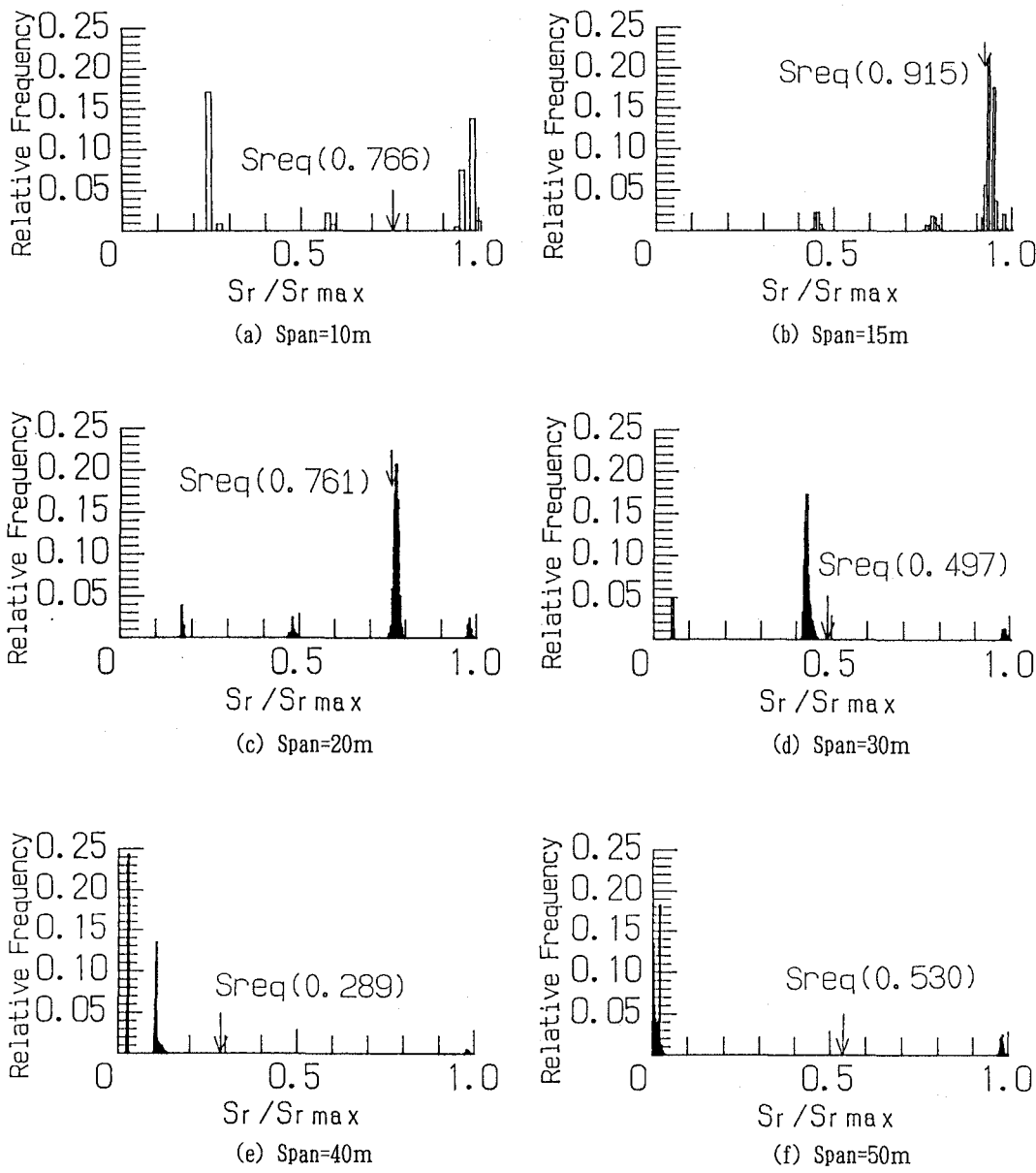


図4 変動応力範囲の頻度分布

3.2 疲労寿命曲線の形状

疲労亀裂進展解析によって求めた疲労寿命曲線を図5に示す。疲労限付近よりも下の領域では、スパン15～30mの疲労寿命曲線の傾きが長寿命側に変化している。これは、全体的に応力が下がるにつれて中間部の応力範囲成分のうちで疲労亀裂寿命に寄与しない部分が増加するため、その分の繰返し数だけ寿命が長くなることによるものと考えられる。それとは対照的に、スパン10および40m以上の曲線の傾きは一定している。これらのスパンの応力範囲頻度分布を見ると、スパン15～30mの場合にみられる中間的な応力範囲成分はほとんど存在せずに最大値付近と微小成分に分かれていることから、全体的に応力が上下しても、微小な応力範囲成分は疲労亀裂進展にはほとんど寄与していないものと推察される。

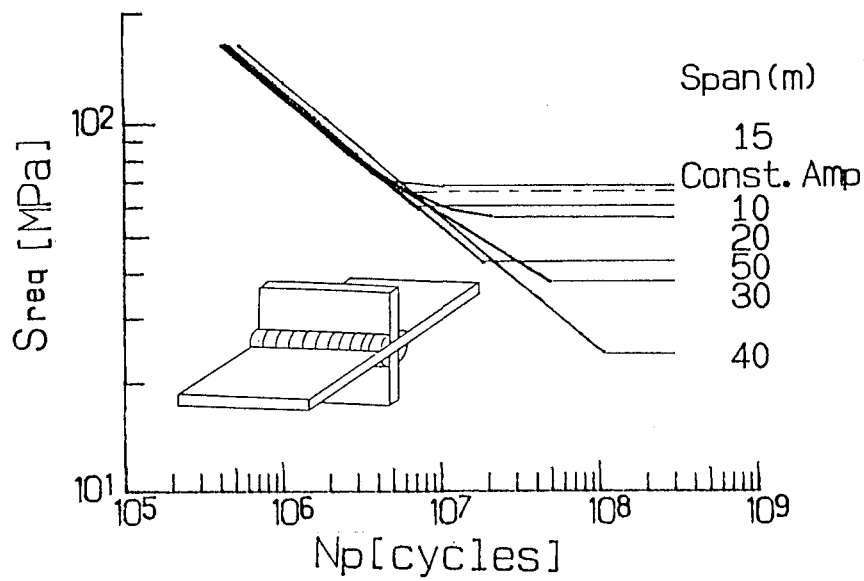


図5 疲労寿命曲線

3.3 変動応力に対する打ち切り限界

変動応力に対する打ち切り限界は図6に示すように、変動応力範囲の頻度分布の高応力側から計算したマイナー和が1に達したときの応力範囲として求めた²⁾。応力範囲の頻度の合計は、亀裂進展解析により求めた疲労寿命と等しくとっている。

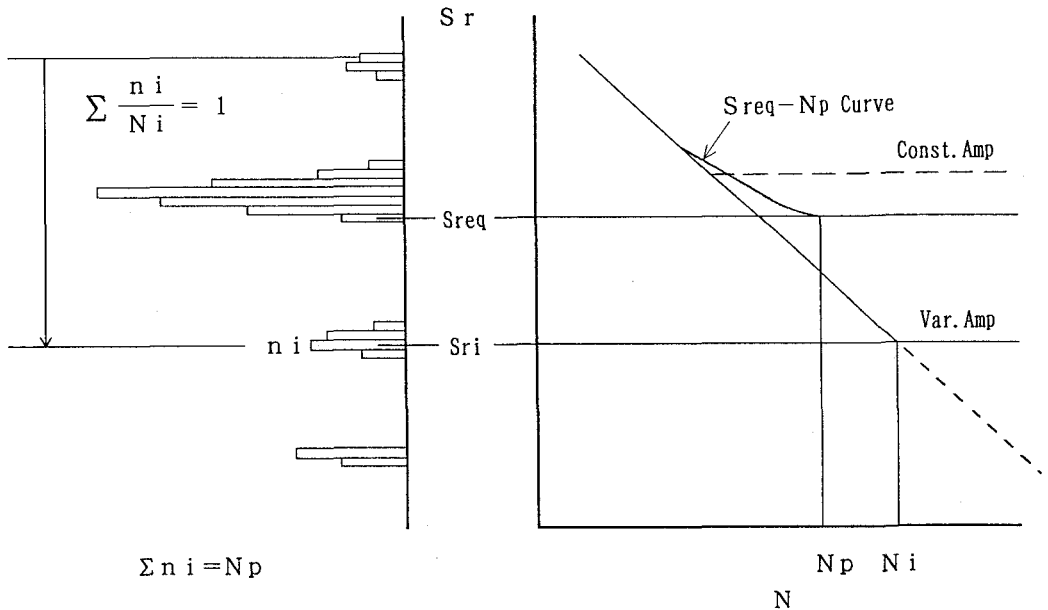
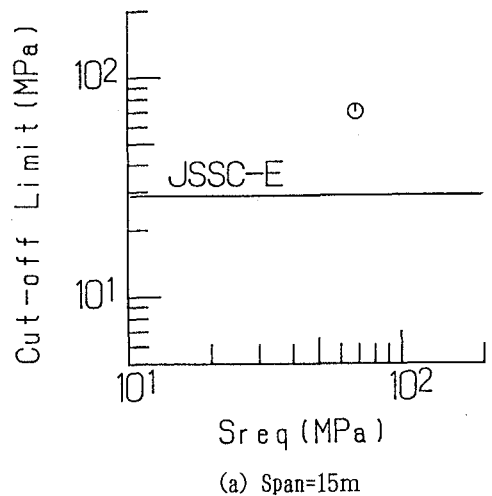
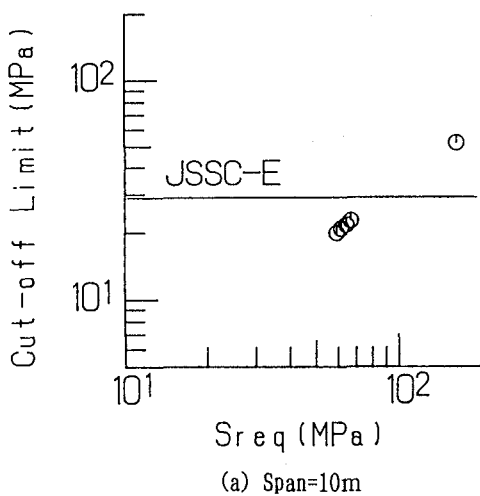


図6 変動応力に対する打ち切り限界の設定法

図7に各変動応力に対して求めた打ち切り限界と等価応力範囲の関係を示す。図中の水平線はJSSC指針(案)で設定されているE等級の変動応力に対する打ち切り限界を表す。

ここで求めた打ち切り限界は、スパン15, 20, 30および50mではJSSC(案)の値よりも全て高応力側となっているが、スパン10および40mでは S_{req} によってはJSSC(案)の値よりも低くなるケースが生じ、特にスパン40mではJSSC(案)の値よりも全体的に低くなっている。したがって、スパン10および40mの変動応力に対してJSSC(案)の打ち切り限界を用いた場合には危険側の評価となる。



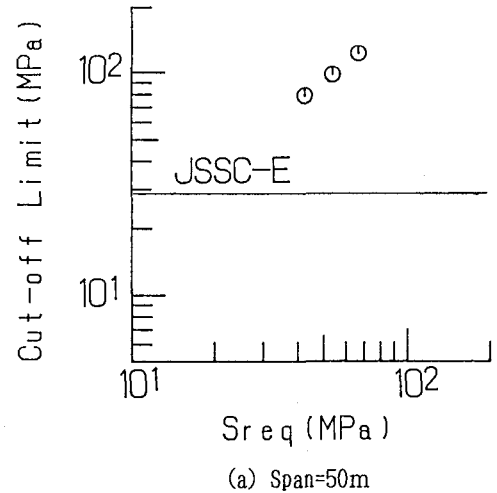
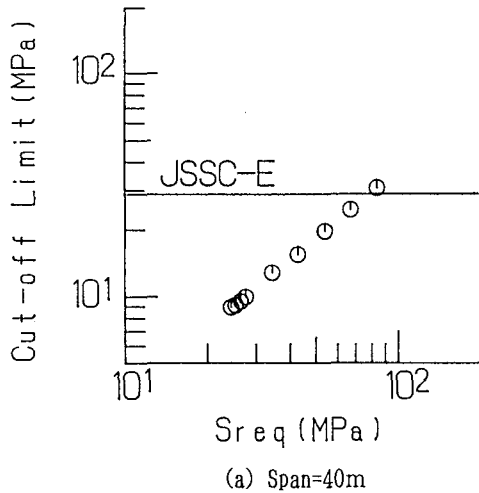
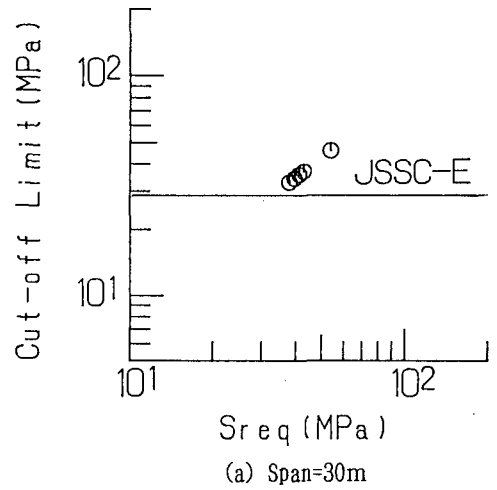
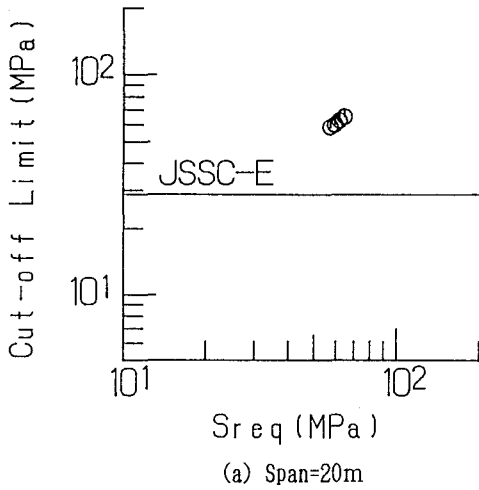


図7 各変動応力に対する打ち切り限界

4. おわりに

新幹線旅客列車および比較的短スパンのプレートガーダーを対象とした列車荷重シミュレーション解析により、疲労設計曲線の変動応力に対する打ち切り限界について検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 列車シミュレーションによって求められた変動応力範囲の頻度分布性状は、影響線基線長によって大きく異なったものとなる。
- (2) 疲労亀裂進展解析により求めた疲労寿命曲線は、変動応力の種類によって長寿命域の形状に違いが見ら

れる。

- (3) マイナー和が1に達したときの応力範囲として設定した変動応力に対する打ち切り限界は変動応力の種類により大きくばらつき、JSSC指針(案)の打ち切り限界を適用した場合には危険側の評価となるケースも存在する。

参考文献

- 1) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説（鋼鉄道橋編），1983.
- 2) 三木千寿・坂野昌弘：疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討，構造工学論文集，Vol. 36A, pp. 409-416, 1990.
- 3) 日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)，JSSCレポート，1989.
- 4) Miki, C. ,Murakoshi, J. ,Toyoda, Y. and Sakano, M. : Long Life Fatigue Behavior of Fillet Welded Joints under Computer Simulated Highway and Railroad Loading, Structural Eng./Earthquake Eng, Vol.6, No.1, pp.41s-48s, 1989.