

九州大学工学部 学生員 高海克彦

九州大学工学部 正会員 彦坂 照

1. 緒言

図-1のように、下フランジに開口部をもつ薄肉断面ばりをフレームで補剛した構造が、懸垂型モノレールの軌道桁として用いられる。この構造の力学的特性として、ねじり剛性が小さく極めて大きなそりた力が生ずることのほか、断面変形が避けられないこと、および台車走行レールを兼ねる stringer と下フランジに大きな局部た力の発生することが挙げられる。本研究は、かかる薄肉構造の断面変形とフレームの補剛効果を考慮した簡易解析法を提示し、設計に資せんとするものである。

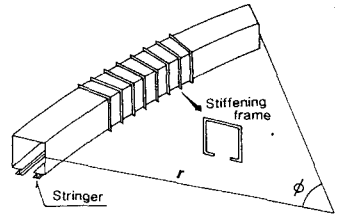


図-1 フレームにより補剛される薄肉開断面ばり

2. た力法による簡易解析

鉛直荷重 P が任意断面に作用する場合の解析をた力法により行うため、本構造を図-2のようにスキナプレートのみからなる薄肉開断面ばり、断面を補剛するフレーム（断面二次モーメント I_s ）、および局部た力の生じる stringer（断面二次モーメント I_r ）の3要素に分けて考える。断面変形を考えない薄肉断面ばりが本構造の基本構となり、その曲げた力 M_0 とそりた力 M_1 は既往の薄肉断面ばり理論により求められる。stringer は補剛フレームで弾性支持されるものと見なしてその反力 X_i ($i=1, \dots, N$, N はフレーム総数) を不静定力に選ぶ。ただし、 N 個の不静定力 X は互に独立ではなく、stringer の鉛直方向の力のつり合い条件と任意点の法線および接線方向のモーメントのつり合い条件からなる、次の3式を満足しなければならない。

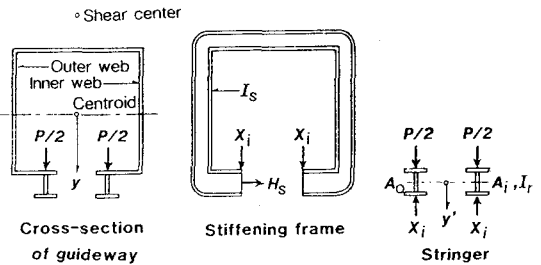


図-2 構造要素間の相互作用

stringer には荷重 P と N 個の不静定力による曲げモーメント M_n が付加され、付加た力 $\sigma = M_n y / I_r$ が生じる。また、 i 番目の補剛フレームには、不静定力 X_i による曲げモーメント M_s のほかに、曲りばりの場合に限り外曲側 stringer との接合部に働く曲率中心方向水平力 H_s による曲げモーメント M_h が加わる。

不静定力は次式で表わされるひずみエネルギー U について、式(1)の付帯条件つき極値問題の解として求められる。

$$U = \int_0^\phi \int_{A_i} \frac{(\sigma_0 + \sigma_w + \sigma_r)^2}{2E} r dA d\theta + \int_0^\phi \int_{A_0} \frac{(\sigma_0 + \sigma_w + \sigma_r)^2}{2E} r dA d\theta + \sum_{j=1}^N \int_{S_j} \frac{(M_0 + M_n)^2}{2EI_s} ds \quad (2)$$

ここに、 ϕ , r は曲りばりの開角と曲率半径、 A_i , A_0 は内曲側および外曲側 stringer の断面積、 S_j は j 番目の補剛フレームの軸線長。

Lagrange の未定乗数 λ_j を導入して、式(1), (2)より新たな関数

$$U^* = U + \sum_{j=1}^N \lambda_j f_j(X_1, X_2, \dots, X_N, P) \quad (3)$$

を定義すれば、不静定力を求める次の連立方程式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U^*}{\partial X_i} &= \frac{\partial U}{\partial X_i} + \sum_{j=1}^3 \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial X_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \\ \frac{\partial U^*}{\partial \lambda_i} &= f_i(X_1, X_2, \dots, X_N, P) = 0 \quad (i=1, 2, 3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3. フレームの補剛効果のパラメトリック解析

本構造に生じる応力のうち、 σ_0 は既述の薄肉断面はり理論により算定されるものであり、フレームの補剛効果は式(4)より求められる不静定力 X に現われる。不静定力を支配する主要な構造諸元は、はりの支間長 l と断面二次モーメント I 、補剛フレームの配置間隔 c と断面二次モーメント I_s および Stringer の断面二次モーメント I_r であり、これらを用いて次の3つの無次元パラメータを定義する。

l/c : 補剛フレームパラメータ

I_s/I : 補剛フレーム剛性パラメータ

I_r/I : Stringer 剛性パラメータ

ここでは、図-3の断面をもつ支間11mの直線はりの支間中央断面(補剛フレームなし)に荷重 $P=5$ tonが作用する場合を対象としたパラメトリック解析の結果を示す。図-4は、 l/c のみを変えた場合の Stringer 下縁応力のはり軸方向分布をプロットしたものである。図-5は I_s/I をパラメータとして、荷重断面の Stringer に生ずる最大付加応力 $\sigma_{r,max}$ とフレーム間隔 c の関係を示したものである。 l/c をパラメータとし、 I_s/I と $\sigma_{r,max}$ の関係をプロットした図-6より、 I_s/I を 4×10^{-3} より大きくしても $\sigma_{r,max}$ はあまり減少しないことがわかる。図-7は荷重断面の Stringer の最大付加曲げモーメント $M_{r,max}$ と I_r/I の関係を示したものであり、Stringer の剛性を上げても $M_{r,max}$ が増加しないことから、 σ_r の減少には I_r を大きく設計することが極めて有効といえる。

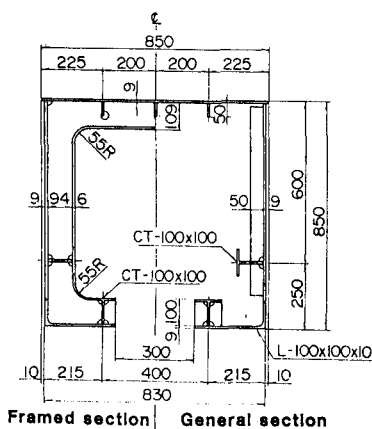


図-3 はり断面図

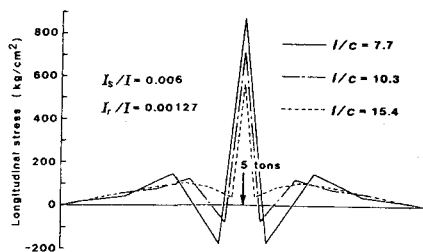


図-4 Stringer 下縁応力分布

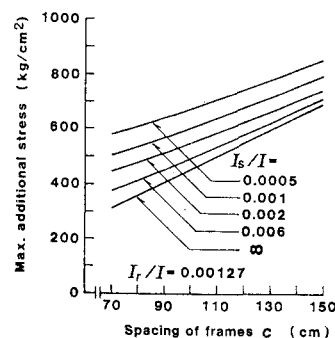


図-5 $\sigma_{r,max}$ と c の関係

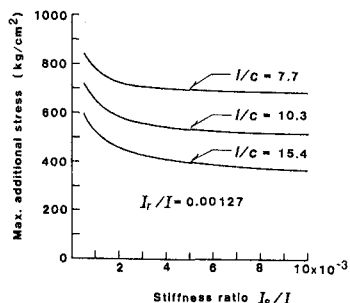


図-6 $\sigma_{r,max}$ と I_s/I の関係

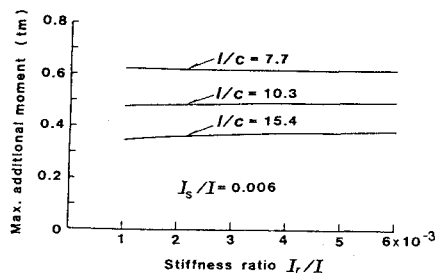


図-7 $M_{r,max}$ と I_r/I の関係