

懸垂型モノレール用剛結式軌道桁の解析手法

三菱重工業（株）＊ 正会員 ○土生修二 夏目晶子 （株）ハンダイシステム 正会員 大坂憲司

1. はじめに

懸垂型モノレールの軌道桁は図1の様な断面を有し、車両の台車部が箱桁内を走行する構造となっている。そのため脱線の恐れがなく、降雪時の運行支障がないなどの特長がある一方、構造的には純振り定数の小さい開断面とならざるを得ず、断面設計において曲げ振りを考慮した構造解析が要求されている。

今回耐震性向上などを目的に一般高架橋と同様の剛結構造を採用することとした。従来から車両の移動荷重を影響線載荷した精密な解析を行っていたが、橋脚との剛結を立体モデルで解析するプログラムを開発した。既往の研究では明らかでなかった、曲げ振りモーメントと剛結拘束の関係などについて解析結果を報告する。

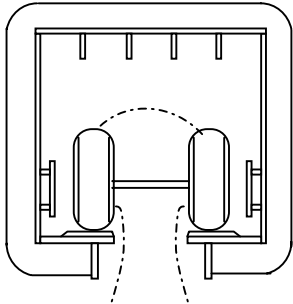


写真1 懸垂型モノレール（千葉市）

図1 軌道桁断面

2. 軌道桁と橋脚（鋼支柱）の剛結化

軌道桁と橋脚（鋼支柱）の剛結化により、高架橋と同様の効果（軌道桁の落下防止、全体耐震性の向上、重複部材の廃止など）があるほか、図2のように支点部のコンパクト化による景観向上にも寄与する。

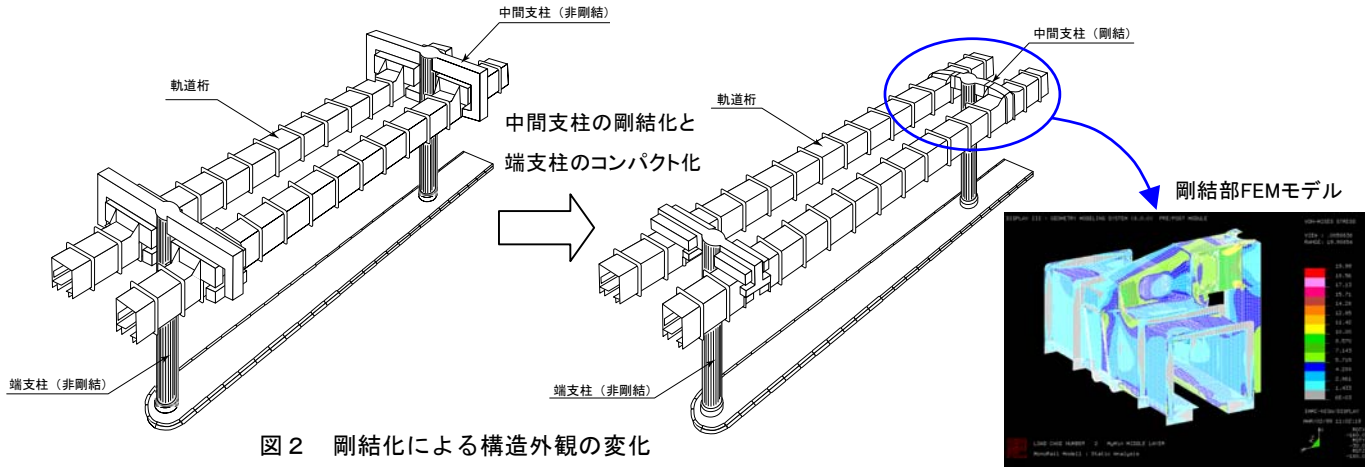


図2 剛結化による構造外観の変化

3. 解析モデルと載荷荷重

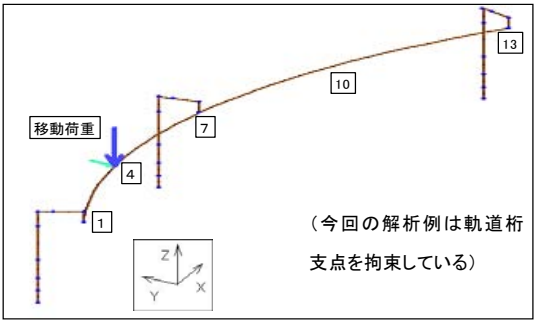


図3 解析モデル（単線軌道）と移動荷重

表1 解析ケース（支点拘束条件、曲げ振り定数考慮有無）

解析ケース	支点拘束条件(全支点共通)	荷重条件
Case11	1111111 完全拘束	車両荷重想定／ 鉛直50tf(490kN) 水平15tf(147kN)
Case12	1111110 曲げ振り拘束フリー	
Case13	1111000 Case12+水平/鉛直軸回転拘束フリー	
Case14	1110000 Case13+桁軸回転拘束フリー	
Case15	1111000 Case13+曲げ振り定数lw=0	

1111110等は7自由度(x,y,z,θx,θy,θz,θ'x)を表す

4. 解析結果（曲げ振り拘束と曲げ振り剛性が変位、断面力に及ぼす影響）

図3に示す2径間曲線桁（2@24m，R=50m）に車両1台分相当の単純化した集中荷重（鉛直方向490kN，水平方向147kN）を載荷した場合の変位と断面力を求めた。結果の表2に支間中央と中間支点上だけを表示したが、各値は荷重を全径間移動させた場合の影響線に基づく最大・最小値である。本プログラムは曲げ振り拘束（第7番目の自由度 $\theta'x$ ）の条件と曲げ振り定数 Iw を考慮できるのが特徴であるので、解析ケースとして（表1）、全支点完全拘束（Case11）の場合、曲げ振り拘束のみフリー（Case12）の場合と水平・鉛直回転拘束もフリーの場合（Case13）を考慮した。また曲げ振りと水平・鉛直回転拘束フリーで曲げ振り定数 $Iw=0$ の場合も求めた（Case15）。なおCase14は参考として回転拘束を全て（桁軸周り回転も）フリーにした場合である。

表2 変位と断面力の計算結果例

解析 ケース	格点 No.	変位(mm)		断面力(kN)			断面力(kN・m)			kN・m ² Mw
		水平 Δy	鉛直 Δz	N	Sy	Sz	T	max/min My	Mz	
Case11	4	-2.971E+00	-5.509E+00	-4.718E+02	-6.605E+01	2.451E+02	-1.676E+02	-1.383E+03	-2.079E+02	7.830E+02
	7	—	—	-3.931E+02	7.054E+00	-3.352E+02	3.148E+01	1.811E+03	1.003E+02	-5.668E+02
Case12	4	-3.071E+00	-5.537E+00	-5.239E+02	-6.528E+01	2.457E+02	-1.613E+02	-1.362E+03	-1.828E+02	7.763E+02
	7	—	—	-3.693E+02	2.452E+01	-3.787E+02	5.398E+01	1.845E+03	1.225E+02	-3.431E+02
Case13	4	-4.291E+00	-1.652E+01	-8.202E+02	-6.578E+01	1.950E+02	-1.414E+02	-2.376E+03	2.460E+02	1.269E+03
	7	—	—	2.080E+02	-4.482E+01	5.098E+01	6.632E+01	1.234E+03	-6.434E+01	-2.374E+02
Case14	4	-4.137E+00	-5.083E+03	-7.854E+02	-8.172E+01	1.884E+02	5.445E+01	-2.243E+03	1.246E+01	1.077E+03
	7	—	—	2.296E+02	-3.209E+01	6.402E+01	2.681E+02	1.483E+03	-4.740E+02	-3.773E+02
Case15	4	-1.762E+00	-2.958E+03	-3.364E+02	-6.411E+01	1.727E+02	2.913E+00	-2.105E+03	-3.412E+02	—
	7	—	—	2.651E+01	-1.058E+01	7.249E+01	2.571E+02	1.744E+03	1.046E+02	—

これによると、支間中央の変位は完全拘束のCase11に対して、曲げによる回転をフリーにすると（Case13）、変位が1.4～3倍となるが、曲げ振り拘束フリー（Case12）の影響はごく少ないことが分かる。また全回転フリーの場合（Case14）は、曲線桁のため振り回転して不安定になること、桁軸回転を拘束しても $Iw=0$ にすると（Case15）、開断面のため純振り定数が小さいことから、全回転フリーと同様に大変位を生じてしまうことが分かる。次に断面力については、支間中央、中間支点共に完全拘束の場合に比べて、回転フリー（Case13）の値は、支間で増加し支点上で減少する一般的な挙動であるが、曲げ振りフリーだけによる変化は2%程度であった。大変位を生じる桁軸回転フリーや $Iw=0$ のケースでも断面力には極端な増減がないが、これは不安定となっても断面力は構造寸法的に決まるためであろう。断面力図と影響線図の出力例を図4，5に示す。

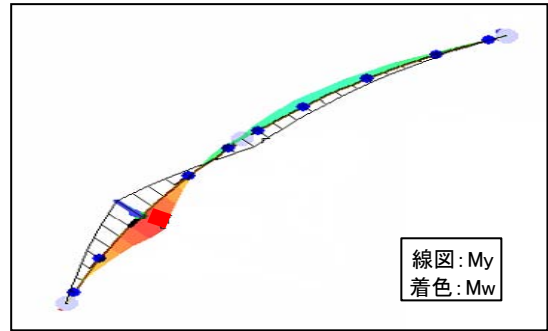


図4 断面力状態図例(MyとMw)

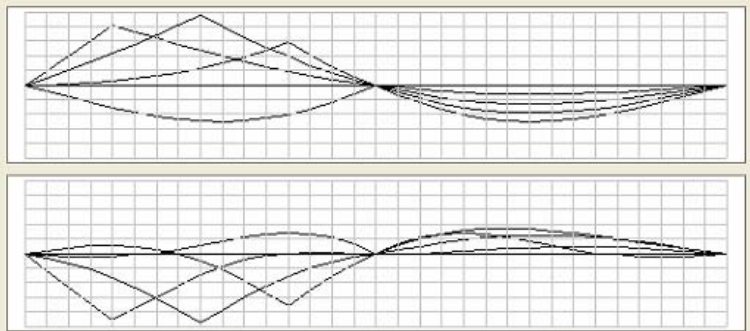


図5 断面力の影響線図例(上段:Myと下段:Mw)

5. 解析結果（固有振動数）

同じプログラムを用いて固有振動数を求めた例を表3に示す。モデルは同一で支点条件は表1と同様とした。回転フリーの影響が変位計算よりも大きく出るほか、 $Iw=0$ の場合不安定となって振動数が極端に低下する結果となった。

表3 固有振動数の計算例

支点条件	質量	固有振動数(Hz)		
		1次	2次	3次
1111111	桁質量+車	5.16	6.50	15.46
1111000	両質量(支間中央)	3.55	5.26	10.71
1111000+Iw=0		0.25	1.36	4.05

6. まとめ

懸垂型モノレールは曲線半径が小さく、都市部の狭隘な空間に設置可能であるが、そのため曲線軌道桁が多用され、振りモーメントを適切に考慮する必要がある。開発したプログラムは、開断面特有の曲げ振りモーメントを正しく評価でき、その計算例として、純振り（桁軸回転）拘束や曲げ振り定数を無視すると、設計上危険な結果が出ることを示すことができた。今回は単純化のため支点拘束で行ったが、今後は剛結支柱を考慮して全体系を精度よく計算する要領を確立していく予定である。本プログラムは立体骨組みの影響線載荷を可能にしたほか、断面応力度の最大・最小値抽出、固有振動数計算、解析結果の3D表示などの断面設計支援ツールとなっており、今後のモノレール建設事業において、設計作業の効率化に役立つものと期待している。