

第6編 ア 一 千 橋

ア ー チ 橋

株式会社 長 大
主任技師 深谷 茂広

要 旨

鋼アーチ橋は、部材数および部材の種類が多く、構造が複雑である。このため解析モデルの作成が難しく、変位の影響を考慮する必要があるなどのため動的解析は慎重に行う必要がある。また、構成される部材は軸圧縮力が大きいことから、弾性範囲内の限界状態だけでなく、部材座屈しない限界状態も考える必要があるためレベル2の地震に対する耐震設計は慎重に行う必要がある。

そこで、最初にアーチ橋の形式分類と特徴を概説して、力学的基本事項を紹介する。次に、モデル化に注意しなければならない点について具体的な事例を紹介し、死荷重載荷解析および固有振動解析が解析条件によりどのように影響をうけるかを紹介し、設計に用いる解析方法を提案している。最後に、レベル2地震動に対する鋼アーチ橋の照査事例を紹介する。

1. アーチ橋の設計一般

(1) アーチ橋の形式と特徴

- ・ 主なアーチ橋の形式とその特徴

(2) アーチの基本的な力学的性質

- ・ 等分布荷重を受けるアーチの力学

(3) アーチの解析における留意点

- ・ たわみ理論の基本式
- ・ 変位の影響

2. モデル化の基本

(1) 立体解析における全体座標と部材座標

(2) 上部構造のモデル化

3. 耐震解析事例の紹介

(1) 死荷重載荷解析の条件と方法

(2) 固有振動解析の条件と方法

4. 動的照査法による照査例の紹介

(1) 上路式2ヒンジアーチ橋

(2) 上路式固定アーチ橋

1. アーチ橋の設計一般

(1) アーチ橋の形式と特徴

アーチ橋には図-1 に示す形式がある。主な形式の力学的性質とその特徴を以下に示す。

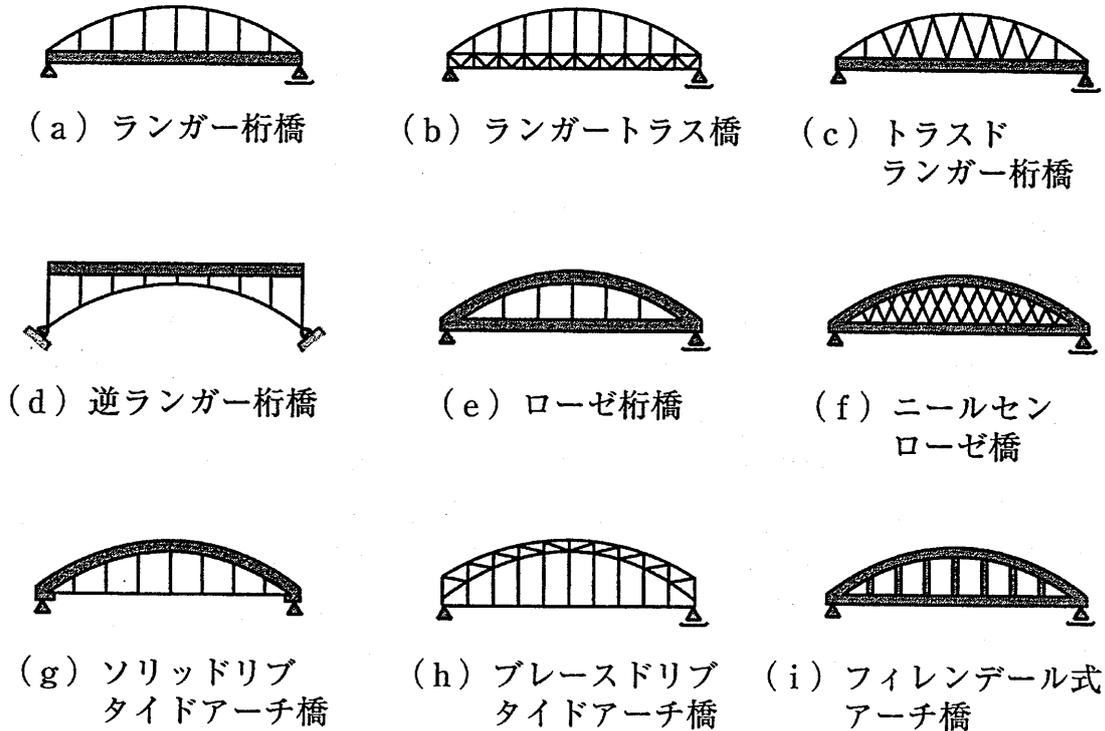


図-1 アーチ橋の概念図[日本橋梁建設協会, 2004]

① アーチ橋

アーチ橋は、大きな曲げ剛性を有するアーチリブが全鉛直力を支え、桁と鉛直材の曲げ剛性は期待しない形式である。

特徴：アーチリブの軸線は放物線形状をなし、桁の全長に渡って等分布荷重が作用したとき、水平力とせん断力の合力である軸方向力が部材軸線方向と一致し、アーチリブには軸方向力のみが作用する。このため、昔より石材を使用したアーチ橋が多く作られてきた。アーチの支点には大きな水平力が作用するため、良好な地盤条件を必要とする。

アーチ橋の一種であるタイドアーチ橋は、桁を引張材としてアーチリブの支点間を繋いだ下路式アーチ橋で、下部構造に大きな水平力が作用しないため、軟弱な地盤条件にも適用できる。

② ローゼ桁橋

ローゼ桁橋は、桁とアーチリブがともに曲げ剛性を有し、桁とアーチの間を曲げ剛性を期待しない吊材（鉛直材）で結んだ形式である。

特徴：補剛桁及びアーチリブが鉛直荷重を分担し合うアーチ橋で、アーチリブは曲線である。補剛桁とアーチリブの荷重分担はその剛性に依りて任意に設定できる。

③ ニールセンローゼ橋

ニールセンローゼ橋は、桁とアーチリブがともに曲げ剛性を有し、桁とアーチリブの間

を斜めケーブル（ロープ）によりトラス組みされた形式で、ローゼ桁橋の仲間である。

特徴：アーチと補剛桁の間をケーブルでトラス組しているため、下路式ローゼ桁橋と比べ、剛性が高い。

④ ランガー桁橋、ランガートラス橋

ランガー桁橋は、桁に大きな曲げ剛性を有し、アーチリブと鉛直材の曲げ剛性を期待しない形式である。

特徴：補剛桁が主に鉛直荷重を支え、アーチリブは格点間で直線のトラス部材として桁を補剛する。比較的小規模なアーチ橋に適用される。

桁がトラス構造のランガートラス橋は、ランガー桁橋より補剛桁の剛性を増加させることができるため、適用支間が大きい。

⑤ トラウドランガー桁橋

トラウドランガー桁橋は、桁に大きな曲げ剛性を有し、曲げ剛性を期待しないアーチリブと吊材でトラス組みした形式である。

特徴：桁とアーチリブの間をトラスで結合することで橋のたわみ剛性を増し、ランガー桁橋より適用支間を大きくできる。

また、上記の他に、アーチリブの支点条件、桁の位置関係およびアーチリブの部材構成により表-1のように分類される。

表-1 アーチ橋の形式

分類の着目点	形式	特徴
アーチの支点条件による分類	1 ヒンジアーチ	アーチの両端は固定で中間にヒンジ結合点を有する特殊なアーチ橋である。
	2 ヒンジアーチ	アーチリブの両端がヒンジ構造のアーチで、鋼アーチ橋では一般的である。
	3 ヒンジアーチ	アーチの両端はヒンジ構造で、中間にヒンジ結合点を有する特殊なアーチ橋である。
	固定アーチ	アーチリブの両端が固定のアーチで、コンクリートアーチ橋では一般的である。
道路を支える桁の位置による分類	上路式アーチ	桁がアーチより上方にある場合
	中路式アーチ	桁がアーチの中間にある場合
	下路式アーチ	桁がアーチより下方にある場合
アーチの部材構成による分類	ソリッドリブアーチ	アーチリブが1つの箱桁断面あるいは円形断面で構成される
	ブレースドリブアーチ	アーチリブが複数のアーチリブとその間をブレースした構造からなる

アーチ橋の適用支間は表-2に示すとおりである。

表-2 アーチ橋の適用支間

	50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		250		300		国内最大
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250	300																			
RC床版桁橋	■																																				
鋼床版桁橋	■																																				
ラーメン橋	■																																				
トラス橋	■																																				
アーチ橋	■																																○	大三島橋297			
ローゼ桁橋	■																																○	伊万里湾大橋250			
ニールセン橋	■																																○	新浜寺大橋254			
ランガー桁橋	■																																○	新弁天橋150			
ランガートラス橋	■																																○	大矢野橋156			
トラスランガー桁橋	■																																				

注) ■ 一般によく適用される範囲 ■ 比較的適用される範囲 ○ 適用された大支間

参考に、アーチ橋の部材名称を図-2 に示す。

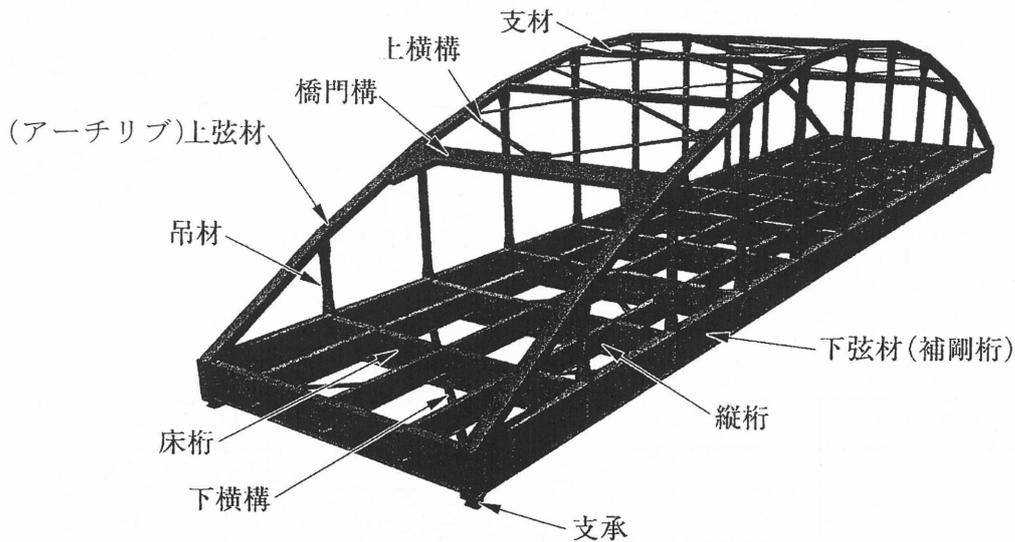


図-2 アーチ橋の部材名称[日本橋梁建設協会, 2004]

(2) アーチの基本的な力学的性質

図-3 に示すように、等分布荷重 w がアーチ橋に満載されたときの力学的性質を紹介する ([伊藤,1971], [中井ら,1992]).

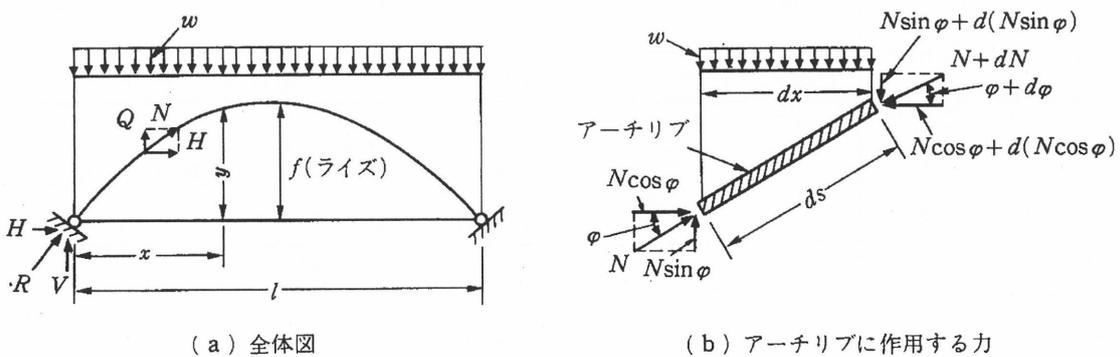


図-3 等分布荷重が満載するアーチ橋[中井ら, 1992]

水平力のつり合いおよび鉛直力のつり合いから次式が成り立つ。

$$N \cos \phi = N \cos \phi + d(N \cos \phi) \quad \therefore d(N \cos \phi) = 0 \quad (1)$$

$$N \sin \phi = w dx + N \sin \phi + d(N \sin \phi) \quad \therefore w dx + d(N \sin \phi) = 0 \quad (2)$$

式(1)の両辺を積分すると式(3)が得られる。

$$N \cos \phi = \text{一定} = H \quad (3)$$

式(3)に式(2)を代入し、 $\tan \phi = dy/dx$ であるので、式(4)が得られる。

$$d^2y/dx^2 = -w/H \quad (4)$$

この微分方程式を解いて、境界条件として、 $x=0$ および $x=L$, $y=0$ を満たすように積分定数を定めると、アーチの軸線形状は式(5)となる。

$$y = wL^2(L-x)/(2H) \quad (5)$$

次に、等分布荷重 w によってアーチに曲げモーメントが生じないような軸線形状を選ぶとすると、支間中央の曲げモーメント $M(x=L/2) = wL^2/8 \cdot Hf = 0$ となる。これより、水平力 H は式(6)となる。

$$H = wL^2/(8f) \quad (6)$$

また、アーチに曲げが生じない軸線形状は式(7)の放物線となる。

$$y = 4fx(L-x)/L^2 \quad (7)$$

(3) アーチ橋の解析における留意点

支間長が比較的小さいアーチ橋の静的設計は微小変位解析（弾性理論）が適用されている。しかし、アーチの支間長が大きい場合や変形が大きい場合には、変位前のアーチ形状を基にして構造解析すると危険側な結果が得られることがある。このため、変位後の形状にて力のつり合いを解く有限変位解析（たわみ理論）が用いられる。

次に、アーチ橋のたわみ理論の基礎式について紹介する([堀井ら,1973], [中井ら, 1992])。

図-4 に変位後のアーチの微小要素を示す。座標 (x,y) の方向の変位を (u,v) とする。前項と同様に水平と鉛直のそれぞれについて力のつり合いを解き、アーチの軸線が放物線で、微小項を無視すると、アーチのたわみ理論の基本式(8)が得られる。

$$EI d^4v/dx^4 + Hd^2v/dx^2 = p \cdot 8f \Delta H/L^2 \quad (8)$$

ここに、 H ：変形後の水平力、 ΔH ：水平力の増分

上記の基本式は、梁の曲げ方程式 $EI d^4v/dx^4 = p$ と比べ、アンダーラインの項が加わっている。アンダーラインの項が変位の影響であり、この項のため式(8)の解は非線形となる。

この基本式をもとにした種々な数値解析結果より、有限変位理論による曲げモーメント M_D は微小変位変位理論による曲げモーメント M_E を用いて近似的に式(9)で表される[日本道路協会,2002a]。

$$M_D = M_E / (1 - H/H_{cr}) \quad (9)$$

ここに、 H ：アーチの水平力、 H_{cr} ：限界水平力（弾性座屈荷重）

[日本道路協会,2002a]の 13.3 変位の影響において、設計荷重が載荷された場合に、変位の

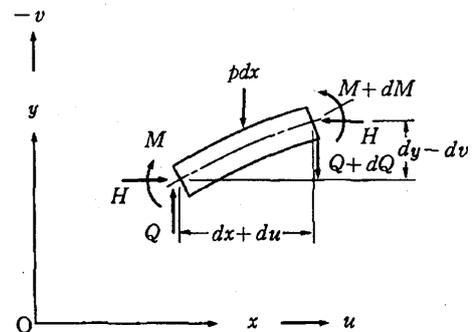


図-4 アーチリブの変位と断面力
[中井ら, 1992]

影響によるアーチ部材，補剛桁の応力度の増加が微小変位理論による応力度のおおむね10%を超えないように求められた死荷重強度に対する条件が示されている．死荷重強度が求められた死荷重強度の条件より大きい場合には，変位の影響を考慮する必要がある．

2. モデル化の基本

ここでは，一般的な上路式ローゼ桁橋を例としてモデル化の基本を述べる．

(1) 立体解析における全体座標系と部材座標系

アーチ橋では図-5のような立体骨組みモデルによる立体解析が必要である．その際，全体座標系と部材座標系の関係を理解する必要がある．

節点座標，節点荷重および節点変位は全体座標系 (X,Y,Z) で定義され，部材の剛性，部材断面力および部材のたわみ角は部材座標系(x,y,z)により定義される．部材座標の y 軸と z 軸の方向は解析に用いるソフトにより定義が異なるので，特に注意が必要である．

座標系

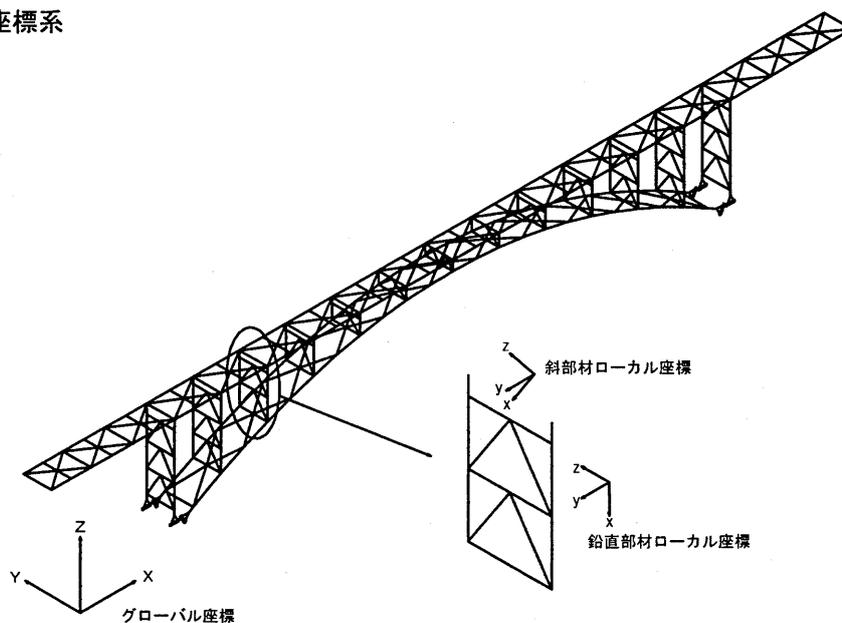


図-5 モデル橋の骨組みモデルと座標系

[日本鋼構造協会, 2003]

(2) 上部構造のモデル化

アーチ橋は部材数および部材の種類が多く，RC床版を含む補剛桁のモデル化，アーチクラウンとセンターポストのモデル化，部材の結合条件のモデル化を適切に行うことが重要である．ここでは，これらに関し[日本鋼構造協会, 2003]に示されているモデル化の推奨案を紹介するとともに，設計に適用されている簡便なモデル化も紹介する．

a) RC床版を含む補剛桁のモデル化

アーチ橋のRC床版は補剛桁との合成作用を考えていない．このため静的設計では，床版の剛性を無視して安全側となるように解析および設計が行われている．

床版の剛性寄与には，主桁と非合成の重ね梁，主桁と不完全合成，主桁と完全合成の3

種類が考えられるが、既往の非合成プレートガーダー橋の载荷試験から主桁と完全合成により近いことが知られている。床版の剛性寄与により固有周期がやや短くなり、床版の合成作用を無視した場合より応答加速度が大きくなるため、耐震設計では固有振動特性がより正確に得られるように床版の合成作用を期待した剛性を考慮する。

現状では、床版および補剛桁のレベル2の地震動に対する限界状態としては、弾性範囲を超えない状態か、床版の一部が副次的な塑性化にとどまる状態と考え、塑性化を考慮しないのが一般的である。床版と補剛桁の塑性化を考慮しない場合には、床版および補剛桁完全合成された1つの弾性梁部材として、図-6に示すフィッシュボーンモデルによるモデル化が簡便である。

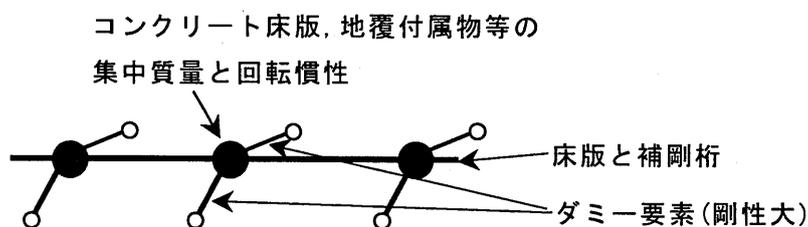
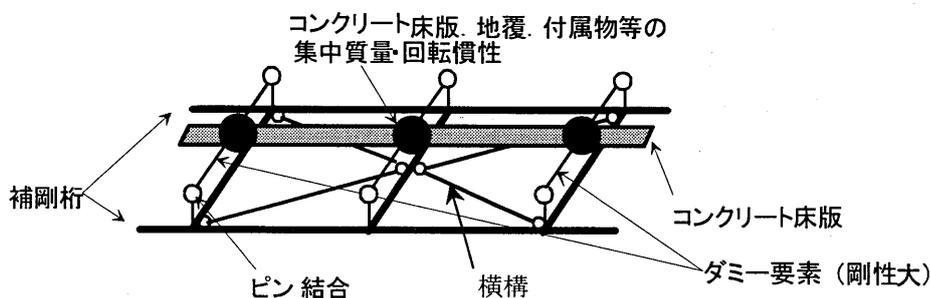


図-6 床版と補剛桁のフィッシュボーンモデル

RC床版と補剛桁の材料非線形の影響を検討する場合、[日本鋼構造協会,2003]においてRC床版と補剛桁は別々にはり要素でモデル化し、床版と補剛桁の間は剛部材で剛結合とする図-7に示す結合モデルを推奨している。

床版は死荷重をほとんど負担しないように施工されるので、死荷重载荷後の完成状態では無応力状態と考えられる。このため、床版および補剛桁の材料非線形を考慮する場合、死荷重载荷の解析では床版剛性をゼロとし、動的解析においてのみ床版剛性を考えるのが望ましい。



*ピン結合：橋軸直角水平軸回りの回転のみ拘束し、その他の軸回りの回転は自由

図-7 床版と補剛桁のモデル化

b) アーチクラウン部のセンターポストのモデル化

上路式アーチのクラウン部は補剛桁の橋軸方向の慣性力が確実に伝達されるように設計されている。すなわち、センターポストは補剛桁およびアーチリブにせん断力および曲げモーメントが確実に伝わるような格点構造となっているので、モデル化にあたっては、[日本鋼構造協会,2003]に示されているように図-6の剛域を考慮するのがより実際の挙動

を近似する。

一方、一般部の鉛直材（吊材）に関しては、主桁あるいはアーチリブに取り付けられたガセットによりフランジのみを接合する構造が一般的であり、ガセット位置でヒンジ結合としてモデル化し、ガセットから補剛桁図心あるいはアーチリブ図心までを剛域部材で扱うのがより実体に近いモデルである。

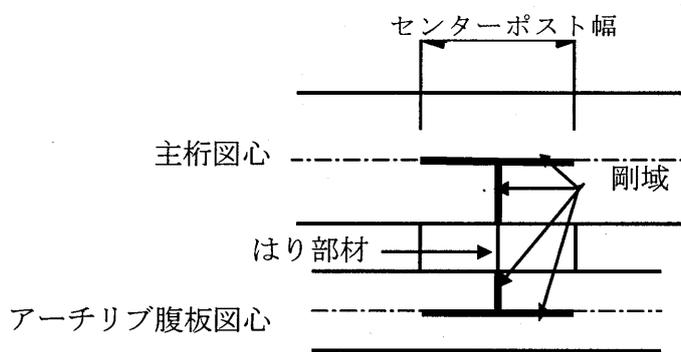


図-8 アーチクラウン部のモデル化

3. 耐震解析事例の紹介

アーチ橋の耐震解析は次の手順で行われる。

- ① 動的解析モデルの作成，② 死荷重の載荷，③ 固有振動解析，
- ④ レーリー減衰の設定に用いる2つのモードの抽出
- ⑤ レベル1，レベル2地震動に対する線形動的解析による耐震性能の照査

ここでは、[日本鋼構造協会,2003]に示されている死荷重載荷解析および固有振動解析の比較検討事例を紹介する。解析対象のモデル橋は、補剛桁の支間割が $26.5+120+26.5\text{m}$ ，アーチ支間長 114m ，アーチライズ 16.87m の上路式ローゼ桁橋で、解析モデルは図-5 に示すとおりである。

(1) 死荷重載荷解析の条件と方法

一般に、アーチ橋は上げ越し形状で鋼部材（アーチリブ、補剛桁、鉛直材）を閉合し、その後に床版に極力応力が入らないように床版打設が行われ、設計完成時形状となる。そのため、アーチ橋の静的設計では、死荷重載荷後の床版は無応力で、死荷重はすべて鋼材で負担すると仮定している。

動的解析に先立って実施される死荷重載荷解析においても、床版剛性を無視するのが適切であるが、床版剛性を考慮して行われるのが一般的である。

死荷重載荷解析の条件を種々比較した結果を表-3 および図-8 に示す。その結果より次のことが分かった。

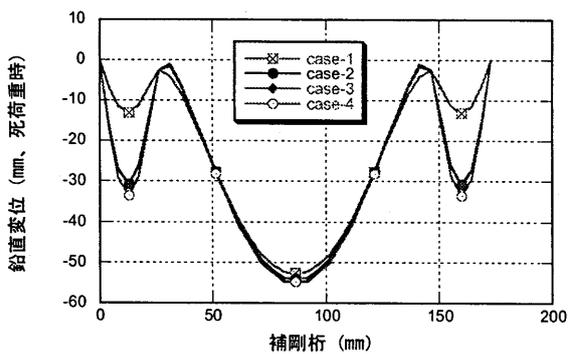
- ① 床版剛性の有無の影響は、アーチの変形及び断面力への影響は比較的小さいが、補剛桁については、床版剛性を考慮しない場合、軸圧縮力は生じないが、床版剛性を考慮した場合には無視できない軸方向力が作用する他、端支点から端柱付近までの曲げモーメントが卓越する部分の相違が無視できない。
- ② 幾何学的非線形の支配要因である幾何剛性（軸方向力による変位の影響）の有無による差異はおよそ1%以内であり、比較的影響が小さい。

③ せん断変形の影響は十分小さく，無視できる。

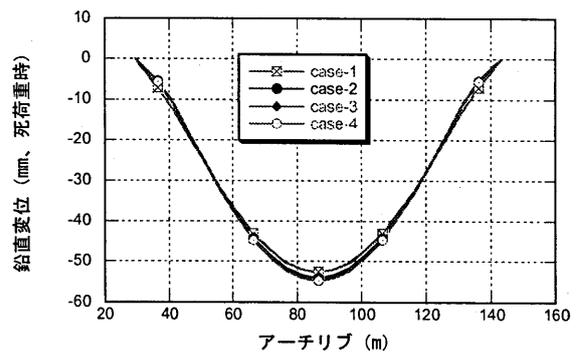
表-3 死荷重に対する比較解析結果

着目		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	
解析条件	床版剛性	考慮	無視	無視	無視	
	幾何剛性	無視	無視	考慮	考慮	
	せん断変形	無視	無視	無視	考慮	
補剛桁の鉛直たわみ (mm)	支間中央	-52.6 (0.96)	-54.0 (0.99)	-54.7 (1.00)	-54.7 (1.00)	
	1 / 4 点	-33.5 (0.98)	-34.0 (0.99)	-33.9 (0.99)	-34.2 (1.00)	
支点反力 (kN)	鉛直	補剛桁	436.3 (0.97)	447.0 (1.00)	447.4 (1.00)	449.0 (1.00)
		アーチ	2534.3 (1.00)	2520.6 (1.00)	2522.1 (1.00)	2531.6 (1.00)
		端支柱	1070.6 (1.01)	1073.5 (1.01)	1071.6 (1.01)	1060.5 (1.00)
	水平	アーチ	4470.8 (0.99)	4511.4 (1.00)	4525.2 (1.00)	4526.8 (1.00)
アーチ部材力	曲げ My (kNm)	1 / 4 点	341.9 (0.97)	357.2 (1.01)	352.4 (1.00)	353.5 (1.00)
	軸方向力 N (kN)	中央部	-4306.1 (0.98)	-4345.2 (0.99)	-4359.7 (1.00)	-4377.8 (1.00)

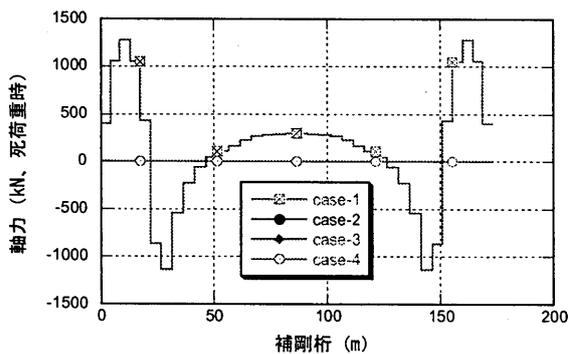
注) 曲げモーメントの着目点は部材端，() 内の数値は Case-4 の値に対する比率



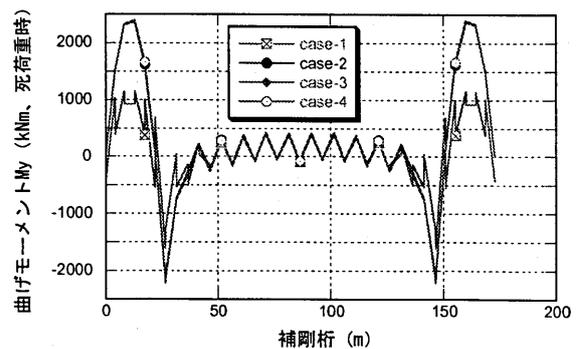
(a) 補剛桁の鉛直変位の比較



(b) アーチリブの鉛直変位の比較



(c) 補剛桁の軸方向力



(d) 補剛桁の曲げモーメント

図-9 死荷重に対する解析条件の違いによる変形および断面力の比較

死荷重による断面力はレベル2の地震動による応答値と比べ格段に小さいため、死荷重応力度の評価が多少誤差を有するとしても結果に大きな影響を与えないと考えられるため、動的解析の前段階解析である死荷重載荷解析の推奨方法として[日本鋼構造協会,2003]では次を提案している。

- 1) 床版は考慮し、全断面有効とする。
- 2) 骨組線は設計形状とする。
- 3) せん断変形の影響は無視する
- 4) 有限変位理論による弾性解析を標準とする。すなわち、完成系に全死荷重を載荷して弾性有限変位解析を行えばよい。また、線形化有限変位解析が利用できる場合はそれを用いる。

(2) 固有振動解析の条件と方法

ここでは、幾何学的非線形性の有無およびせん断変形の有無が固有振動特性に与える影響を紹介する。

固有値解析において幾何学的非線形性を考慮するとは次のようなことを意味する。

$$[K]\{y\} = \omega^2 [M]\{y\} \quad (10)$$

$$[K] = [K_0] + [K_G(N^{(0)})] \quad (11)$$

ここに、 ω : 固有円振動数、 $\{y\}$: 変位ベクトル、 $[K]$: 剛性マトリックス、 $[M]$: 質量マトリックス、 $[K_0]$: 微小変位理論による剛性マトリックス、 $[K_G(N^{(0)})]$: 幾何剛性マトリックス、 $N^{(0)}$: 死荷重載荷により生じる軸方向力である。

幾何学的非線形性を無視する場合は、式(11)で幾何剛性マトリックス $[K_G(N^{(0)})]$ を無視することに相当し、線形化有限変位の場合は $N^{(0)}$ を微小変位弾性解析により求め、幾何剛性マトリックスを考慮することになる。

表-4には10次までの固有周期を示し、その固有振動モード形状は表-5に示す。

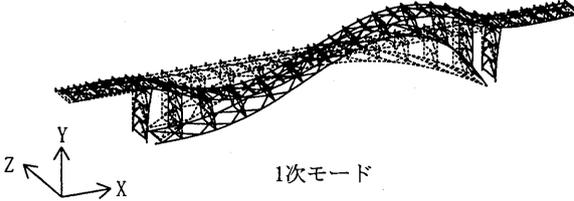
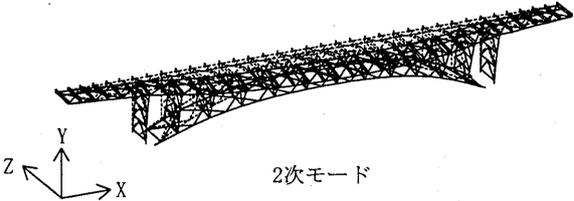
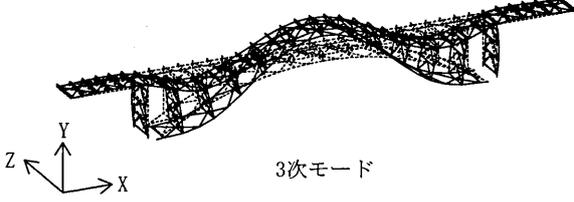
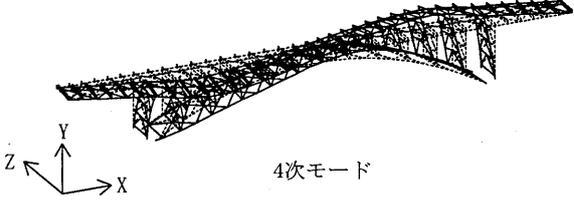
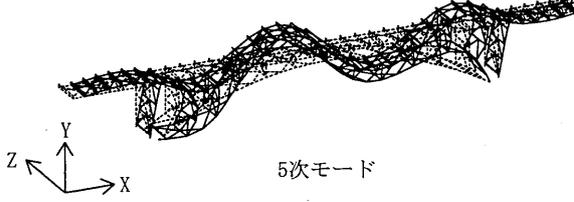
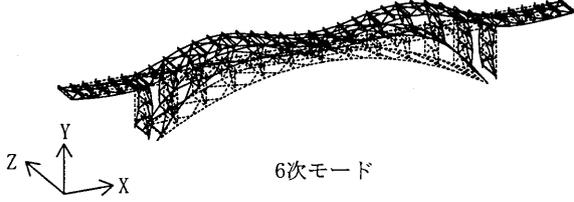
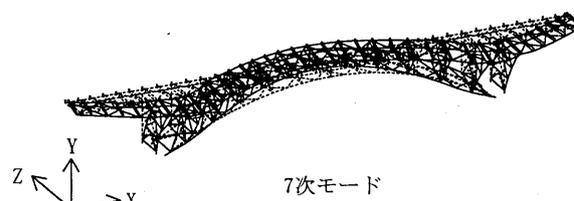
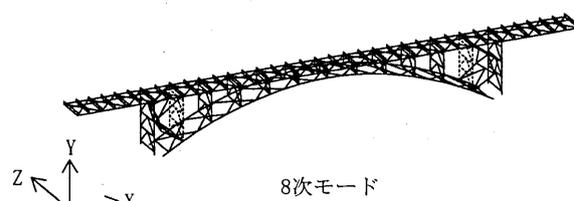
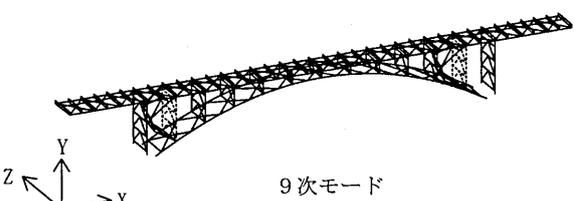
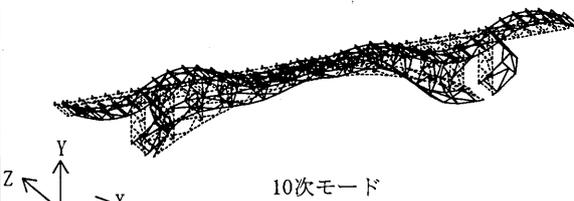
表-4 固有周期

	解析条件	Case-1eig	Case-2eig	Case-5eig
	床版	考慮	考慮	考慮
	幾何学的非線形性	無視	考慮	考慮
	せん断変形	無視	無視	考慮
1次	橋軸逆対称1次	1.173	1.234	1.254
2次	橋直対称1次	0.967	0.973	1.002
3次	橋軸対称2次	0.585	0.598	0.610
4次	橋直逆対称2次	0.451	0.452	0.467
5次	橋軸逆対称2次	0.379	0.383	0.390
6次	橋軸対称1次	0.371	0.373	0.376
7次	橋直対称2次	0.282	0.283	0.290
8次	鉛直材1次対称	0.269	0.280	0.280
9次	鉛直材1次逆対称	0.268	0.279	0.280
10次	端柱1次逆対称	0.260	0.262	0.271

表-4 より以下のことが分かる。

- ① 幾何学的非線形性が固有周期に与える影響は、1次モード（橋軸逆対称1次）で5%，鉛直材の振動モード（8,9次）で4%生じ、影響は小さくない。
- ② せん断変形が固有周期に与える影響は2%から3%であり、鉛直材の振動モード（8,9次）には影響がほとんどない。

表-5 振動モード図

鉄筋	無し	コンクリート	弾性	幾何学的非線形性	考慮
1次モード			2次モード		
 <p>1次モード</p>			 <p>2次モード</p>		
3次モード			4次モード		
 <p>3次モード</p>			 <p>4次モード</p>		
5次モード			6次モード		
 <p>5次モード</p>			 <p>6次モード</p>		
7次モード			8次モード		
 <p>7次モード</p>			 <p>8次モード</p>		
9次モード			10次モード		
 <p>9次モード</p>			 <p>10次モード</p>		

死荷重応力解析との整合性も考慮し、[日本鋼構造協会,2003]では次の方法を設計時の固有振動解析の推奨法として提案している。

- 1) 床版は考慮し、全断面有効とする。
- 2) 骨組線は設計形状とする。
- 3) せん断変形の影響は無視する。
- 4) 微小変位理論による弾性解析を行い、軸方向力 $N^{(0)}$ を求める。
- 5) 幾何剛性マトリックスを考慮して固有値解析を行う。

なお、アーチ橋のスペンが短く幾何学的非線形性の影響が小さいときは、幾何剛性を省略して固有値解析を行えばよい。そのときは、4)の解析は不要となる。

4. 動的照査法による照査例の紹介

(1) 上路式2ヒンジアーチ橋

補剛桁およびアーチリブ等の上部構造の塑性領域での耐力及び変形性能に関しては、[日本道路協会,2002b]の14.2に解説されているように、実験データをはじめとして研究実績が少なく未解明な部分が多いことから、弾性範囲を超えない状態か座屈応力度を超えない状態を限界状態と考えて耐震設計を行っている。

上部構造の塑性化を考慮しない場合のレベル2地震動に対する照査は、[日本道路協会,2002b]の14.1に規定されているとおり。[日本道路協会,2002a]に規定されている設計荷重時の詳細に準じて行っている。

アーチリブおよび鉛直材等は、軸方向力と曲げモーメントを受け、軸方向力が圧縮の場合に該当するため、[日本道路協会,2002a]の4.3に規定される式(12)と(13)により照査を行っている。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \leq 1 \quad (12)$$

$$\sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \leq \sigma_{cal} \quad (13)$$

上記の照査を行うに当たって、軸圧縮力の最大値と曲げモーメントの最大値（最小値）を用いて照査を行うと過大な設計となる。そのため、上記の照査を動的解析ソフトに組み込んで照査を実施するか、次の同時刻における断面力の組合せを抽出して上記の照査を行えば安全と考えられる。

- ① 軸圧縮力の最大値とそれが発生した時刻の曲げモーメント
- ② 曲げモーメントの最大値（最小値）とそれが発生した時刻の軸圧縮力

(2) 上路式固定アーチ橋

レベル2地震動に対する上路式2ヒンジアーチ橋の耐震設計において、橋軸方向については特に問題が生じないが、橋軸直角方向については、アーチリブの支承あるいは端柱の支承に大きな負反力とせん断力が同時に発生し、設計が極めて困難なケースが見られる。

この対応策には、次の対策が考えられる。

- ① 支承位置での主構間隔を広くして引抜き力を極力小さくする。
- ② アンカーボルトによりアーチ基部（端柱基部）を固定化し、大きな引抜き力にも対応できる構造に変更する。
- ③ アーチの横組みをトラス組からフィーレンディール形式に変更して、引抜き力とせん断力を低減する。

なお、固定アーチ橋とした場合、架設作業及び精度管理が難しくなるので、架設時は仮支承で2ヒンジアーチとして施工し、補剛桁の施工後にアーチ端部の固定化を行う等の施工への配慮が必要となる。

参考文献

伊藤学(1971)：構造力学，森北出版，1971.5.

堀井健一郎，長井敬二．西脇威夫(1973)：橋（I），わかり易い土木講座 8,彰国社，1973.4

中井博，北田俊行(1992)：鋼橋設計の基礎，共立出版，1992.5.

日本道路協会（2002a）：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善，2002.3.

日本道路協会（2002b）：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2002.3.

日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会(2003)：土木構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，2003.10

日本橋梁建設協会編(2004)：新版日本の橋－鉄・鋼橋のあゆみ－，朝倉書店，2004.5.