

ファイバーモデルを用いた橋梁の耐震設計 ー鋼上路式アーチ橋についてー

(株)横河ブリッジ 佐野泰如

1

はじめに

内 容

1. 鋼上路式アーチ橋のモデル化
2. 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例
3. 既設橋の耐震補強設計事例
4. 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

2

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

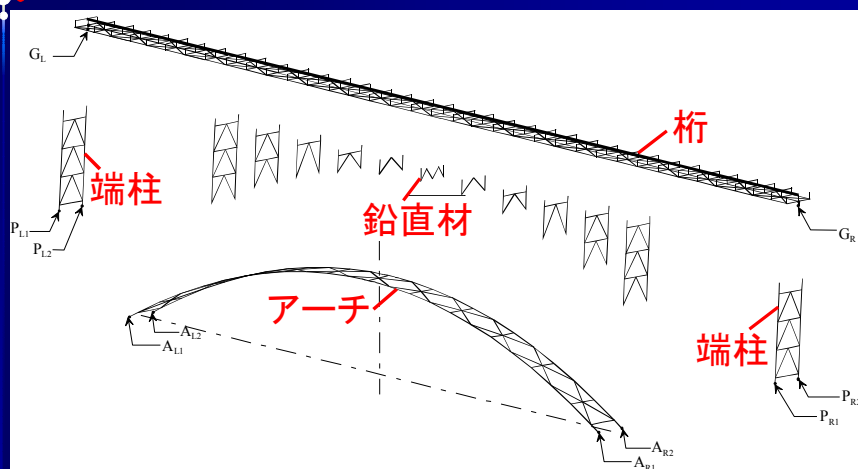
目的

1. ファイバーモデルを用いた動的解析モデルの標準化をはかる。
2. モデル化の違いによる動的解析結果のバラツキを抑制し、耐震設計の信頼性を向上させる。

3

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロック

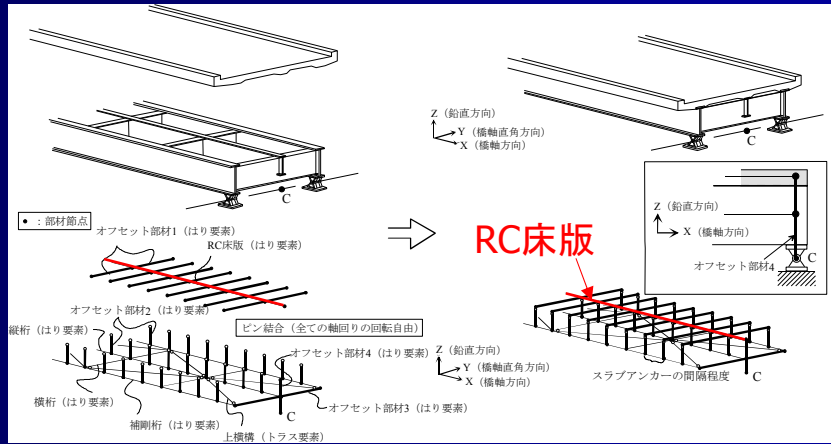


4

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

(1) 桁 RC床版は1本の梁要素+オフセット部材



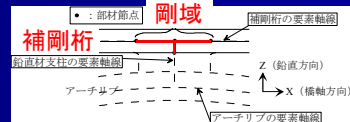
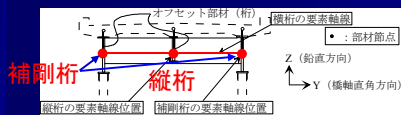
5

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

桁(細部)

補剛桁, 縦桁, 横桁軸線をあわせる
アーチクラウン部を剛域とする



部材	要素	材料構成則
RC床版	はり要素	線形弾性
補剛桁	はり要素	バイリニア移動硬化則
縦桁	はり要素	バイリニア移動硬化則
横桁	はり要素	バイリニア移動硬化則
上横構	トラス要素	線形弾性
オフセット部材 1~4	はり要素	線形弾性

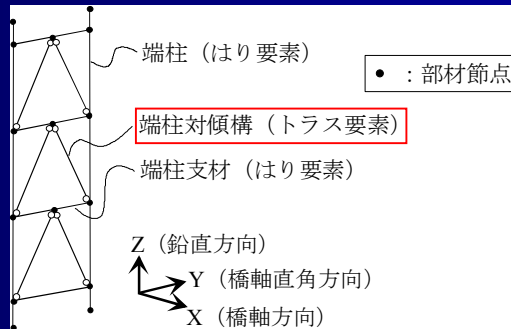
6

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

(2) 端柱

対傾構をトラス要素とする

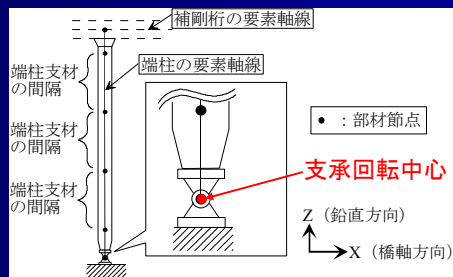


7

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

端柱細部 支承の回転中心までを部材端とする
部材交差部に剛域は設定しない



部材	要素	材料構成則
端柱	はり要素	バイリニア移動硬化則
端柱支材	はり要素	バイリニア移動硬化則
端柱対傾構	トラス要素	線形弾性

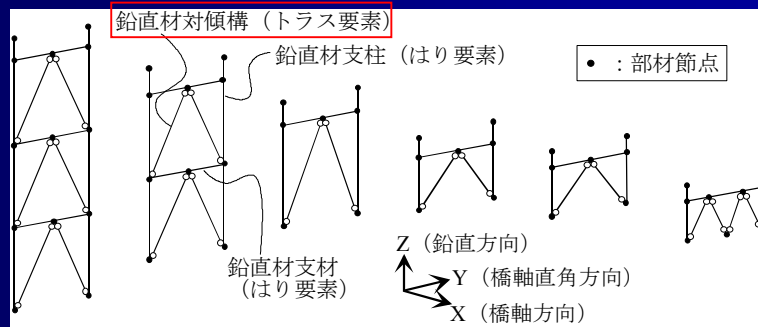
8

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

(3) 鉛直材

対傾構はトラス要素とする

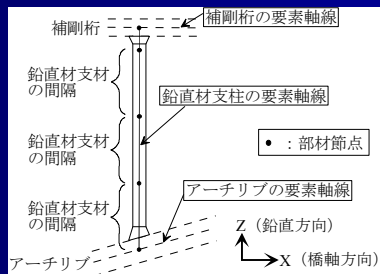


9

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

鉛直材細部 部材交差部に剛域は設定しない



部材	要素	材料構成則
鉛直材支柱	はり要素	バイリニア移動硬化則
鉛直材支材	はり要素	バイリニア移動硬化則
鉛直材対傾構	トラス要素	線形弾性

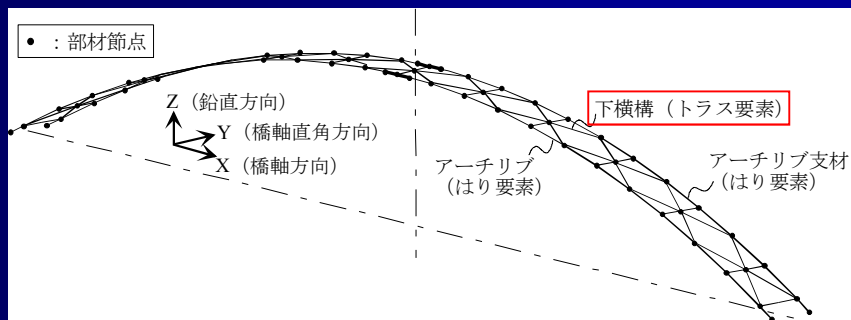
10

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

(4) アーチ

下横構はトラス要素とする

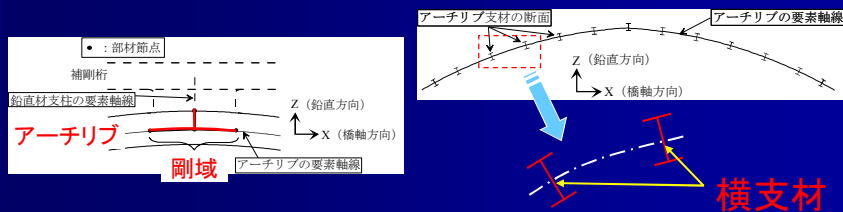


11

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

構成ブロックごとのモデル化

アーチ細部 クラウン部に剛域を設定する
横支材の傾きを考慮する



部材	要素	材料構成則
アーチリブ	はり要素	バイリニア移動硬化則
アーチリブ支材	はり要素	バイリニア移動硬化則
下横構	トラス要素	線形弾性
アーチリブ (剛域)	はり要素	線形弾性

12

1 鋼上路式アーチ橋のモデル化

モデル化における今後の課題

1. 補剛桁と床版のモデル化は、実際の挙動を表現できているのか？
2. 部材端の接合条件は、ピンと剛結のどちらが正しいのか？



- ・実験的な検証が望ましい。
⇒強震時の実橋の振動記録があれば・・・

13

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

目的

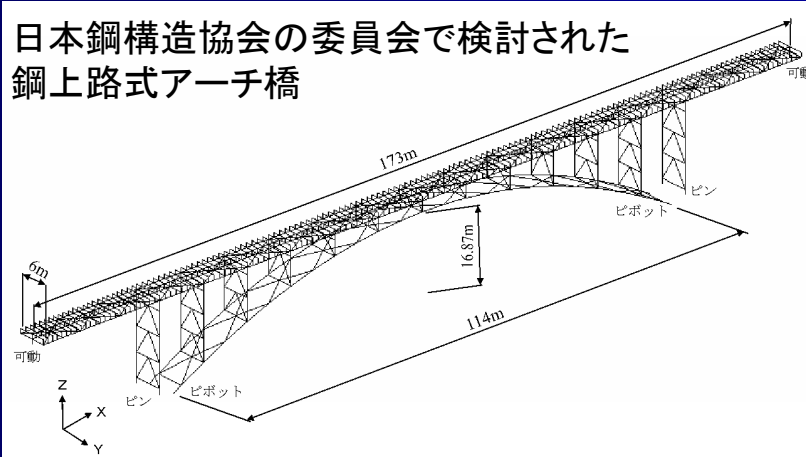
1. ファイバーモデルを用いた動的解析結果に誤差が生じる原因を明らかにする。
2. 動的解析結果の誤差を抑制できるモデル化を検討する。

14

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

解析対象橋梁

日本鋼構造協会の委員会で検討された
鋼上路式アーチ橋



15

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

解析モデルの統一事項

1. 各部材に使用する要素と材料構成則
2. 要素分割・断面分割
3. 開断面部材のねじれ定数
4. オフセット部材の剛性
5. 質量(回転慣性)
6. 減衰

16

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

解析機関と解析ソフトウェア

標準モデルにて、8機関での検証を行った
Bのみ幾何学的非線形性が考慮できない

番号	各解析機関を識別する記号	使用ソフトウェア	ファイバー要素の変位関数			幾何学的非線形性
			たわみ	断面法線の回転角	せん断変形による回転角	
1	A	A	1次	1次	(1次)	有限変位・微小ひずみ
2	B	B	1次	1次	(1次)	無視
3	C1	C	3次	(2次)	一定	有限変位・微小ひずみ
4	C2					
5	D	D	1次	1次	(1次)	有限変位・微小ひずみ
6	E	E	1次	1次	(1次)	2次解析(II)
7	F	F	3次	(2次)	1次	有限変位・微小ひずみ
8	G	G	1次	1次	(1次)	有限変位・有限ひずみ

※1) () は変位関数が他の成分から従属的に求まるものを示す。

※2) 2次解析(II) はひずみ・変位関係において線形項のみ考慮し、曲げによる軸方向変位を無視した場合に対応する。

17

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

実施した解析

1. 死荷重解析
2. 震度法解析
3. 固有振動解析
4. 弾性微小変位時刻歴応答解析
5. 複合非線形時刻歴応答解析

チェック用
に実施

1~4で、剛性行列、質量行列、減衰行列、地震動の入力方法等をチェックした

18

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

死荷重解析結果

全体的にバラツキは小さい
Bは微小変位解析だが、差は小さい

着目	平均値に対する各解析機関の応答値の比								平均値	変動係数	備考		
	A	B	C1	C2	D	E	F	G					
変位	補剛桁支間中央	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	-50 (mm)	0.8%	Pt.2074	
	補剛桁1/4点	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.01	1.00	1.02	-34 (mm)	0.9%	Pt.2049	
反力	鉛直	補剛桁	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	857 (kN)	0.2%	Pt.30001	
		アーチ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2558 (kN)	0.2%	Pt.4001	
	水平	端支柱	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01	1092 (kN)	0.4%	Pt.6017
		アーチ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4501 (kN)	0.2%	Pt.4001
曲げモーメント	補剛桁1/4点	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	-873 (kNm)	1.1%	No.2011 i	
軸力	アーチ1/4点	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	-4444 (kN)	0.4%	No.4024 j	

19

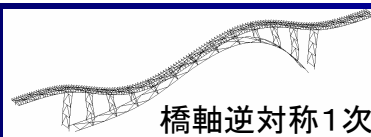
2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

固有振動解析結果(幾何学的非線形考慮)

橋軸逆対称1次モードで最大4%程度長周期になる
各固有周期でのバラツキは小さい

モード形状	平均値に対する各解析機関の応答値の比								平均値	変動係数
	A	B	C1	C2	D	E	F	G		
①橋軸逆対称1次	1.00	0.96	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.173 (sec.)	1.7%
②橋直対称1次	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.936 (sec.)	0.3%
③鉛直対称1次	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.569 (sec.)	0.9%
④橋直逆対称1次	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.01	0.99	0.438 (sec.)	0.6%
⑤鉛直対称2次	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	0.372 (sec.)	0.4%
⑥橋軸逆対称2次	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.00	0.365 (sec.)	0.9%
⑦橋直対称2次	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	1.00	1.01	0.282 (sec.)	0.3%
⑧橋軸逆対称3次	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.01	1.04	1.00	0.264 (sec.)	1.6%
⑨橋直対称3次	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	1.06	0.99	0.99	0.247 (sec.)	2.1%
⑩鉛直対称3次	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.236 (sec.)	0.5%

※) グレーに塗りつぶしている箇所は平均値に対して5%以上の誤差があることを表す。
—は該当するモードが出力されなかったことを示す。



橋軸逆対称1次

20

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

震度法解析結果

(橋軸方向)

D, Fの水平変位の誤差が5~7%とやや大きい
D, F以外のバラツキは小さい

着目		平均値に対する各解析機関の応答値の比								平均値	変動係数	備考	
		A	B	C1	C2	D	E	F	G				
水平変位	補剛桁中央点	1.00	0.99	1.00	0.99	0.95	1.01	1.07	0.99	73	(mm)	3.0%	Pt.2074
	アーチ中央点	1.01	1.00	1.00	1.00	0.98	1.01	1.01	0.99	85	(mm)	0.9%	Pt.4050
	アーチ1/4点	1.01	1.00	1.00	1.00	0.98	1.01	1.01	1.00	102	(mm)	1.0%	Pt.4025
鉛直変位	補剛桁1/4点	1.01	0.99	1.00	1.00	0.98	1.01	1.01	1.00	-188	(mm)	1.0%	Pt.2049
	補剛桁3/4点	1.01	0.99	1.00	1.00	0.98	1.01	1.01	1.00	188	(mm)	1.0%	Pt.2099
軸力	アーチ左端	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4471	(kN)	0.1%	No.4001
	アーチ右端	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-4471	(kN)	0.1%	No.4098
	端柱基部左	1.00	0.99	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	0.99	-966	(kN)	0.7%	No.6017
	端柱基部右	1.00	0.99	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	0.99	966	(kN)	0.7%	No.6109
せん断力	センターボスト上端	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	0.96	1.00	6305	(kN)	1.7%	No.6055 i
曲げモーメント	補剛桁1/4点	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.03	-2138	(kNm)	1.1%	No.2050 j
	補剛桁3/4点	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	0.97	2337	(kNm)	1.2%	No.2097 j
	アーチ1/4点	1.00	0.99	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00	0.98	-2501	(kNm)	1.1%	No.4026 j
	アーチ3/4点	1.01	1.00	1.02	0.98	1.00	1.01	1.00	0.98	2490	(kNm)	1.2%	No.4073 i

※) グレーに塗りつぶしている箇所は平均値に対して5%以上の誤差があることを表す。

21

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

震度法解析結果

(橋軸直角方向)

Eの鉛直変位の誤差が5%だが、全体的に3%以下で小さい

着目		平均値に対する各解析機関の応答値の比								平均値	変動係数	備考	
		A	B	C1	C2	D	E	F	G				
水平変位	補剛桁中央点	0.99	1.02	1.00	1.00	0.98	1.01	1.00	0.99	262	(mm)	1.1%	Pt.2074
	アーチ中央点	1.00	1.02	1.00	1.00	0.98	1.01	1.00	0.99	224	(mm)	1.1%	Pt.4050
	アーチ1/4点	1.00	1.02	1.00	1.00	0.98	1.00	1.01	0.99	128	(mm)	1.1%	Pt.4025
鉛直変位	補剛桁中央点	0.98	1.02	1.00	1.00	0.98	1.05	0.98	0.99	-54	(mm)	2.3%	Pt.2074
	アーチ左端	1.00	1.02	1.00	1.00	0.99	1.00	1.01	0.98	-17475	(kN)	1.0%	No.4001
軸力	下端下横構	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	0.98	5342	(kN)	0.8%	No.8101
	端柱基部	1.00	1.00	0.99	0.99	1.01	1.01	0.98	1.02	12756	(kN)	1.2%	No.5017
	端柱対傾構	1.01	1.00	0.99	0.99	1.02	0.99	0.98	1.02	4311	(kN)	1.3%	No.8201
	アーチ1/4点	0.98	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	0.97	142	(kN)	1.9%	No.4026 j
曲げモーメント	端柱基部	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	0.96	0.99	1.02	-1984	(kNm)	2.0%	No.5017 j

22

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

弾性微小変位時刻歴応答解析結果 (橋軸方向)

D~Gで最大8%と誤差が大きい
A~C2は4%以内の誤差となっている

着目	項目	平均値に対する各解析機関の応答値の比										平均値	変動係数	備考
		A	B	C1	C2	D	E	F	G					
水平変位	補剛桁中央点	絶対値最大	1.01 (6.58)	0.98 (6.57)	1.01 (6.57)	1.01 (6.57)	0.99 (6.53)	1.00 (6.59)	1.00 (6.57)	0.99 (6.58)	-76 (mm)	0.9%	Pt.2074	
	アーチ1/4点	絶対値最大	1.01 (7.13)	0.99 (7.12)	1.01 (7.12)	1.00 (7.12)	0.97 (7.09)	1.02 (7.13)	1.00 (7.12)	1.00 (7.13)	120 (mm)	1.4%	Pt.4025	
鉛直変位	補剛桁1/4点	max	1.01 (6.58)	0.99 (6.55)	1.01 (6.57)	1.00 (6.56)	0.94 (6.54)	1.03 (6.58)	1.00 (6.57)	1.01 (6.57)	232 (mm)	2.5%	Pt.2049	
		min	1.00 (5.92)	1.01 (5.90)	1.00 (5.91)	1.00 (5.91)	1.00 (5.88)	1.01 (7.13)	1.00 (5.91)	0.99 (5.91)	-243 (mm)	0.6%		
軸力	アーチ左端	min	1.00 (8.01)	0.98 (8.70)	0.99 (8.00)	1.00 (8.70)	1.07 (7.98)	1.00 (9.16)	0.98 (8.01)	0.99 (8.00)	-10080 (kN)	2.6%	No.4001	
		max	1.03 (9.58)	0.96 (9.58)	1.01 (9.57)	1.01 (9.57)	1.03 (7.11)	0.92 (5.94)	1.04 (9.57)	1.00 (9.57)	-2568 (kN)	3.7%	No.6017	
せん断力	ピラー上端	絶対値最大	1.00 (8.19)	0.99 (8.19)	1.00 (8.19)	1.01 (8.18)	1.04 (8.16)	0.95 (9.31)	1.02 (8.18)	0.98 (8.19)	-8442 (kN)	2.5%	No.6055	
		max	1.03 (8.91)	0.96 (8.90)	1.02 (8.90)	1.01 (8.90)	0.92 (8.87)	1.02 (8.91)	1.08 (8.90)	0.94 (6.53)	2743 (kNm)	5.0%	No.2050	
曲げモーメント	補剛桁1/4点	min	1.01 (5.91)	1.01 (5.90)	1.01 (5.90)	1.01 (5.90)	1.05 (5.86)	1.00 (5.92)	0.95 (5.90)	0.97 (5.91)	-3007 (kNm)	2.8%		
		max	1.00 (6.55)	0.99 (6.51)	1.01 (6.53)	1.01 (6.53)	0.98 (6.51)	1.01 (5.93)	1.02 (6.53)	0.97 (6.54)	2973 (kNm)	1.7%	No.4026	
	アーチ1/4点	min	1.00 (5.92)	1.00 (5.91)	1.01 (5.91)	1.01 (5.91)	1.03 (5.87)	0.99 (6.55)	0.97 (5.91)	0.98 (5.91)	-3182 (kNm)	1.7%		

※) グレーに塗りつぶしている箇所は平均値に対して5%以上の誤差があることを表す。
括弧内の数値は、最大応答値の発生時刻(sec.)を表す。

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

弾性微小変位時刻歴応答解析結果 (橋軸直角方向)

D, Eで最大12%と誤差が大きい
Eはデータ入力ミスが疑われる
A, C1, C2の誤差が2%以内と小さい

着目	項目	平均値に対する各解析機関の応答値の比										平均値	変動係数	備考
		A	B	C1	C2	D	E	F	G					
水平変位	補剛桁中央点	絶対値最大	1.01 (8.56)	0.97 (5.79)	1.00 (8.56)	1.00 (8.56)	1.02 (8.54)	1.03 (8.55)	1.00 (8.56)	1.01 (8.55)	405 (mm)	1.3%	Pt.2074	
	アーチ1/4点	絶対値最大	1.01 (8.54)	0.96 (5.80)	0.99 (8.55)	0.99 (8.55)	1.03 (8.52)	1.11 (5.79)	1.00 (8.55)	1.02 (8.54)	182 (mm)	2.0%	Pt.4025	
鉛直変位	補剛桁中央点	絶対値最大	0.99 (5.80)	0.99 (5.79)	1.00 (5.78)	1.00 (5.78)	1.02 (5.78)	0.97 (8.56)	0.99 (5.78)	1.01 (5.78)	-98 (mm)	1.0%	Pt.2074	
		max	1.01 (8.12)	0.99 (8.14)	1.00 (8.12)	1.00 (8.12)	1.00 (8.10)	1.04 (8.10)	1.01 (8.12)	0.99 (8.11)	18905 (kN)	0.8%	No.4001	
軸力	アーチ左端	min	1.00 (8.55)	0.96 (5.79)	1.00 (8.55)	1.00 (8.55)	1.03 (8.52)	1.07 (5.79)	1.00 (8.55)	1.00 (8.54)	-30098 (kN)	1.9%		
		max	1.02 (8.08)	0.99 (8.16)	0.98 (8.07)	0.98 (8.15)	0.99 (8.93)	1.08 (5.79)	0.93 (8.15)	1.00 (8.95)	-4971 (kN)	4.5%	No.8101	
端柱基部	max	min	1.00 (8.55)	0.93 (8.57)	0.98 (8.55)	0.98 (8.55)	0.98 (8.52)	1.12 (8.10)	0.98 (8.55)	1.04 (8.54)	16247 (kN)	4.6%	No.5017	
		min	1.00 (8.11)	0.96 (8.13)	0.99 (8.11)	0.99 (8.11)	1.04 (8.10)	0.96 (8.53)	0.98 (8.11)	1.03 (8.10)	-17710 (kN)	2.4%		
端柱対傾構	min	min	1.01 (8.11)	0.96 (8.13)	0.99 (8.11)	0.99 (8.11)	1.05 (8.94)	1.07 (8.53)	0.98 (8.12)	1.03 (8.11)	-5457 (kN)	2.9%	No.8201	
		max	1.02 (8.57)	0.96 (5.79)	0.99 (8.56)	0.99 (8.56)	1.03 (5.78)	0.90 (5.70)	1.04 (8.12)	0.97 (8.56)	302 (kNm)	2.7%	No.4026	
曲げモーメント	アーチ1/4点	min	0.99 (8.14)	0.99 (8.13)	1.00 (8.12)	1.00 (8.12)	0.99 (8.11)	0.99 (6.19)	1.06 (5.79)	0.98 (8.12)	-316 (kNm)	2.5%		
		max	0.99 (8.11)	0.95 (8.13)	0.98 (8.11)	0.98 (8.11)	1.11 (8.52)	0.96 (8.10)	0.97 (8.12)	1.02 (8.11)	2515 (kNm)	4.7%	No.5017	
端柱基部	min	max	1.01 (8.55)	0.94 (8.56)	1.00 (8.54)	1.00 (8.54)	1.01 (8.94)	1.00 (8.53)	0.99 (8.54)	1.05 (8.54)	-2572 (kNm)	3.2%		

※) グレーに塗りつぶしている箇所は平均値に対して5%以上の誤差があることを表す。太字は10%以上の誤差があることを表す。
平均値はEの結果を除いて算出した。
括弧内の数値は、最大応答値の発生時刻(sec.)を表す。

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

各解析結果のまとめ

Eはデータ入力ミスが疑われる

解析の種類		A	B	C1	C2	D	E	F	G
死荷重解析		○	○	○	○	○	○	○	○
震度法解析(橋軸)		○	○	○	○	○	○	△	○
震度法解析(橋直)		○	○	○	○	○	○	○	○
固有振動解析	(橋軸方向モード)	○	○	○	○	○	○	○	○
	(橋軸直角方向モード)	○	○	○	○	○	△	○	○
	(鉛直方向モード)	○	○	○	○	○	○	○	○
弾性微小変位時刻歴応答解析(橋軸)		○	○	○	○	△	△	△	△
弾性微小変位時刻歴応答解析(橋直)		○	△	○	○	×	×	△	△

※) 平均値に対する誤差の最大値が 5%未満: ○, 5~10%: △, 10%以上: ×

25

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

複合非線形時刻歴応答解析結果 (橋軸方向)

A, C1, C2の誤差が4%以下で小さい
Bは微小変位解析のため、誤差が最大19%と大きくなっている
F, Gは弾性解析と同程度のバラツキとなる
Dは弾性解析結果よりも改善している

着目	項目	平均値に対する各解析機関の応答値の比										平均値	変動係数	備考							
		A	B	C1	C2	D	E	F	G												
水平変位	補剛前中央点	絶対値最大	1.00	(8.56)	0.88	(6.57)	0.99	(8.55)	0.99	(8.55)	1.01	(8.56)	1.04	(8.56)	1.02	(12.08)	0.97	(8.56)	83 (mm)	2.0%	Pt.2074
	アーチ1/4点	絶対値最大	1.00	(6.48)	0.92	(7.12)	1.00	(6.47)	1.01	(6.47)	1.01	(10.35)	1.03	(6.68)	1.00	(6.67)	0.98	(10.92)	130 (mm)	2.5%	Pt.4023
鉛直変位	補剛前1/4点	max	0.98	(10.37)	0.88	(6.55)	1.00	(10.36)	0.99	(10.35)	1.02	(10.36)	1.05	(10.38)	0.97	(6.65)	1.00	(10.37)	260 (mm)	2.4%	Pt.2049
		min	1.04	(10.92)	0.92	(5.90)	1.00	(10.91)	1.00	(10.90)	1.01	(10.91)	1.01	(10.93)	0.95	(7.19)	1.00	(10.91)	-265 (mm)	2.6%	
軸力	アーチ左端	min	1.01	(9.17)	0.91	(9.16)	1.01	(9.16)	1.01	(9.16)	1.00	(9.16)	1.01	(9.17)	0.95	(9.19)	1.00	(9.17)	-10802 (kN)	2.0%	No.4001
		max	1.03	(9.59)	0.96	(5.94)	1.02	(9.58)	1.03	(9.58)	1.03	(9.58)	1.01	(9.79)	0.89	(5.94)	1.00	(9.58)	-2531 (kN)	4.7%	No.6017
せん断力	ピカ子 1/4上端	絶対値最大	1.00	(9.18)	0.99	(8.19)	1.01	(9.17)	1.01	(9.17)	1.00	(9.17)	0.99	(9.18)	0.96	(9.19)	1.03	(9.18)	-8605 (kN)	2.1%	No.6055
		max	1.00	(13.94)	0.81	(6.50)	1.00	(13.93)	1.00	(13.92)	1.01	(13.93)	0.99	(10.38)	1.00	(13.91)	1.00	(10.36)	3158 (kNm)	0.8%	No.2050
曲げモーメント	補剛前1/4点	min	1.03	(10.92)	0.94	(5.90)	1.01	(10.92)	1.01	(10.91)	1.02	(10.91)	1.05	(14.49)	0.92	(7.18)	0.96	(10.92)	-3213 (kNm)	4.1%	
		max	1.01	(10.37)	0.83	(6.51)	1.02	(10.36)	1.00	(10.36)	1.02	(10.36)	0.99	(10.94)	0.98	(10.35)	0.99	(10.36)	3555 (kNm)	1.6%	No.4026
	アーチ1/4点	min	1.01	(10.93)	0.93	(5.91)	1.01	(10.92)	1.00	(10.91)	1.01	(10.92)	1.05	(10.37)	0.95	(7.18)	0.97	(10.92)	-3423 (kNm)	3.1%	

※) グレーに塗りつぶしている箇所は平均値に対して3%以上の誤差があることを表す。赤字は10%以上の誤差があることを表す。

平均値、変動係数にはBの結果は含まない。

Gtは $\Delta t=0.002(\text{sec})$ で解析

括弧内の数値は、最大応答値の発生時刻(sec)を表す。

Bは微小変位解析、Eは線形化有限変位解析の結果である。

26

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

複合非線形時刻歴応答解析結果 (橋軸直角方向)

- A, C1, C2の誤差が3%以下で小さい
- Bは微小変位解析だが、誤差は5%以下で小さい
- D, Gは弾性解析結果よりも改善している
- Eはデータ入力ミスが疑われる

着目		平均値に対する各解析機関の応答値の比														平均値	変動係数	備考
		A	B	C1	C2	D	E	F	G									
水平変位	補剛桁中央点	絶対値最大	1.00 (5.80)	1.00 (5.80)	1.00 (5.80)	1.00 (5.80)	0.99 (5.79)	1.04 (5.79)	—	—	1.00 (5.80)	378 (mm)	0.5%	Plt.2074				
	アーチ1/4点	絶対値最大	1.00 (5.81)	1.00 (5.80)	1.00 (5.80)	1.00 (5.80)	0.99 (5.80)	1.16 (5.80)	—	—	1.00 (5.80)	171 (mm)	0.6%	Plt.4025				
鉛直変位	補剛桁中央点	絶対値最大	1.00 (5.80)	0.98 (5.80)	1.01 (5.79)	1.01 (5.79)	1.00 (5.79)	0.93 (5.87)	—	—	1.00 (5.80)	-94 (mm)	1.1%	Plt.2074				
	アーチ左端	max	0.99 (8.16)	1.05 (8.16)	1.02 (8.16)	1.02 (8.16)	0.96 (8.16)	1.05 (8.15)	—	—	0.97 (8.16)	13071 (kN)	3.3%	No.4001				
軸力	下座下機構	min	1.00 (5.82)	0.99 (5.80)	1.01 (5.81)	1.01 (5.81)	0.99 (5.81)	1.04 (5.79)	—	—	0.99 (5.81)	-28197 (kN)	0.6%					
		max	1.01 (8.16)	1.00 (8.17)	1.01 (8.17)	1.01 (8.17)	0.98 (8.16)	1.17 (8.16)	—	—	1.00 (8.17)	-5845 (kN)	1.2%	No.8101				
	端柱基部	min	0.99 (5.82)	0.99 (5.82)	1.00 (5.81)	1.00 (5.81)	0.99 (5.82)	1.14 (8.15)	—	—	1.02 (5.78)	10545 (kN)	1.2%	No.5017				
		max	0.99 (8.19)	0.99 (8.19)	1.01 (8.19)	1.01 (8.19)	0.99 (8.19)	0.88 (5.81)	—	—	1.01 (8.11)	-12118 (kN)	0.9%					
	端柱対縦構	min	1.00 (6.24)	0.99 (8.15)	1.01 (6.23)	1.00 (6.23)	1.00 (6.23)	1.06 (5.77)	—	—	1.00 (8.13)	-3854 (kN)	0.5%	No.8201				
		max	1.01 (5.80)	1.00 (5.79)	1.00 (5.79)	1.01 (5.79)	1.02 (5.79)	1.01 (5.88)	—	—	0.96 (5.79)	267 (kNm)	2.1%	No.4026				
曲げモーメント	アーチ1/4点	min	1.00 (8.22)	0.97 (8.13)	1.03 (8.13)	1.03 (8.13)	0.99 (8.14)	0.97 (8.14)	—	—	0.98 (8.13)	-253 (kNm)	2.5%					
		max	0.97 (8.90)	1.00 (8.92)	1.01 (8.91)	1.01 (8.91)	0.97 (8.90)	0.93 (5.26)	—	—	1.03 (8.90)	1097 (kNm)	2.2%	No.5017				
	端柱基部	min	0.99 (7.60)	0.98 (7.60)	1.01 (7.60)	1.01 (7.60)	0.99 (7.59)	0.95 (7.63)	—	—	1.01 (7.59)	-1750 (kNm)	1.2%					

※) グレーに塗りつぶしている箇所は平均値に対して5%以上の誤差があることを表す。太字は10%以上の誤差があることを表す。
 括弧内の数値は、最大応答値の発生時刻(sec)を表す。
 平均値、変動係数にはEの結果は含まない。
 Bは微小変位解析、Eは線形化有限変位解析の結果である。
 Fは解析が途中で終了したため、有意な結果が得られなかった。
 Gは自動時間増分機能 (0.01~0.0006sec) を使用している。

2 複数機関における鋼上路式アーチ橋の動的解析実施例

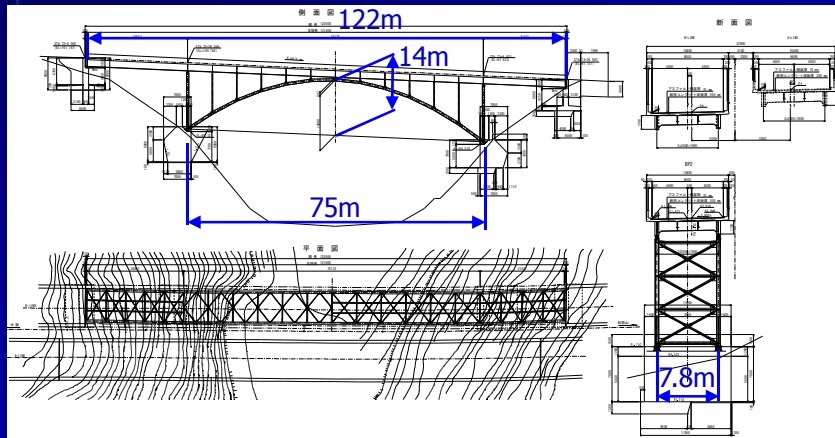
解析結果の誤差に影響を与える要因

- 解析担当者のデータ作成ミスの影響がほとんどであった。
 例えば、断面形状、要素分割、局所座標系、非線形特性、減衰の設定等である。
- AとCの比較より、解析ソフトによる差は小さい。

3 既設橋の耐震補強設計事例

橋梁概要

1972年竣工のランガー桁橋

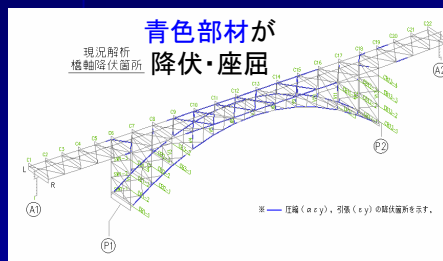


29

3 既設橋の耐震補強設計事例

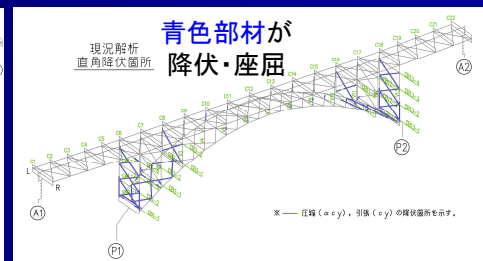
解析事例

橋軸降伏・座屈箇所



補剛桁、上横構、支柱、アーチリブ

橋軸直角方向降伏・座屈箇所



支柱、支柱対傾構、横支材、アーチリブ、下横構

30

3 既設橋の耐震補強設計事例

耐震補強事例

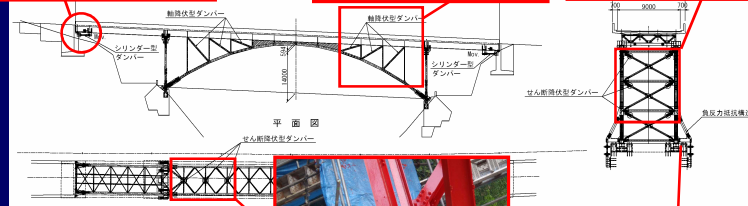
シリンダー型



軸降伏型



せん断降伏型



負反力抵抗構造



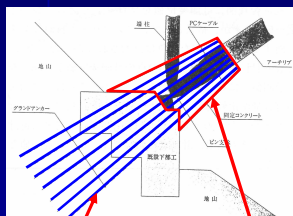
せん断降伏型

31

3 既設橋の耐震補強設計事例

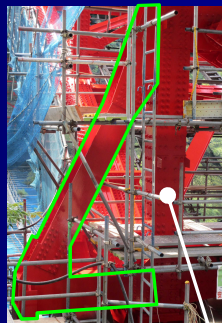
支承損傷対策事例

支点固定化



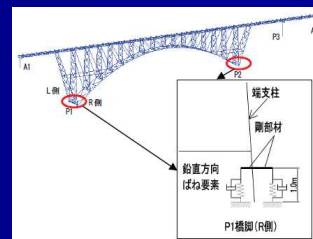
固定コンクリート
グラウンドアンカー

負反力抵抗構造



端柱

制震ダンパー



32

3 既設橋の耐震補強設計事例

支承損傷対策事例の特長

対策	支点固定化	負反力抵抗構造	制震ダンパー
目的	支点条件を 固定に変更	負反力に 別構造で抵抗	エネルギー吸収し 反力低減
課題	基礎の補強 が必要となる可能性がある	支承回りが狭隘となるため、 維持管理性の確保 に留意が必要である。	・ 水平力に抵抗する構造 が別途必要である。 ・ 想定どおりに機能するか 留意が必要である。

33

3 既設橋の耐震補強設計事例

耐震補強設計における課題

1. **支点の負反力対策**は何が最も良いのか？
2. **制震ダンパーの最適配置**を決める方法はないのか？
3. **実挙動を反映した解析モデル**になっているのか？

34

4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

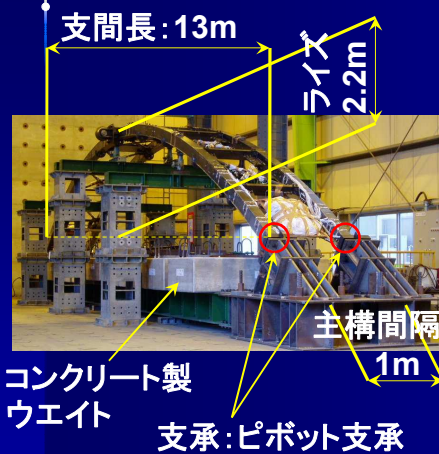
目的

1. 複弦アーチリブの橋軸直角方向地震時における**損傷メカニズム**を把握する。
2. ファイバーモデルによる解析を行う際に**実挙動と差が生じる原因**を明示し、改善方法を提案する。

35

4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

実験供試体



アーチリブの幅厚比パラメータに着目

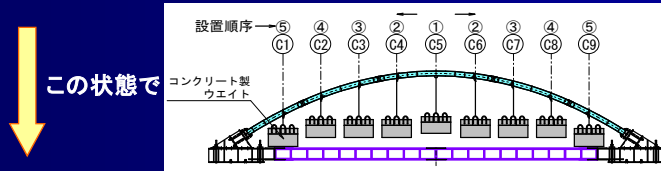
Case1	Case2
<p>アーチリブ断面</p> <p>単位: mm</p> <p>材質: SS400材相当 幅厚比: 0.7</p>	<p>アーチリブ断面</p> <p>単位: mm</p> <p>材質: SS400材相当 幅厚比: 0.5</p>
<p>横構断面</p> <p>材質: STK400</p>	<p>横構断面</p> <p>材質: STK400</p>

36

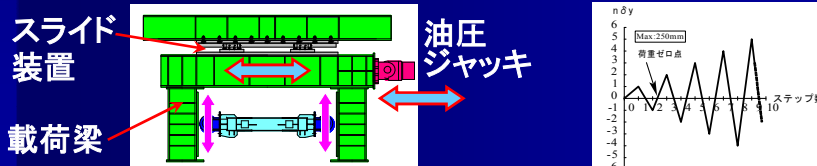
4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

荷重載荷方法

死荷重載荷: コンクリート製のウエイトにて載荷



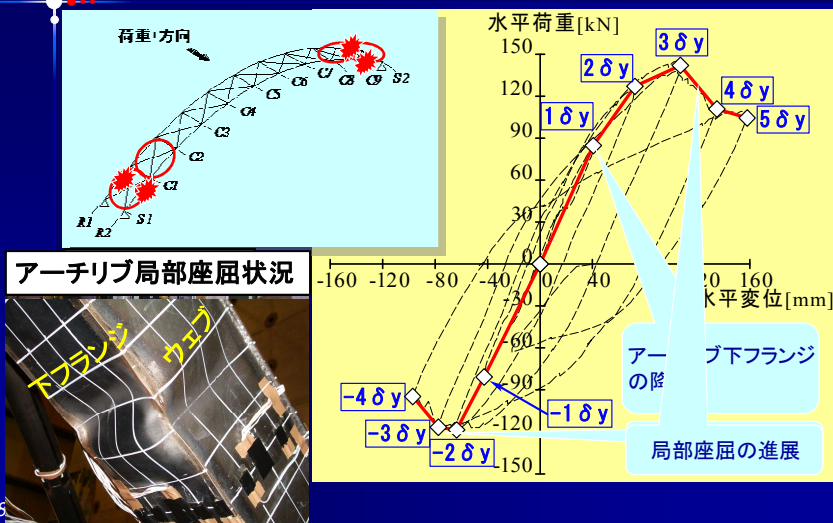
交番載荷: アーチリブクラウン部を載荷梁を介して橋軸直角方向に油圧ジャッキにて変位制御にて載荷



37

4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

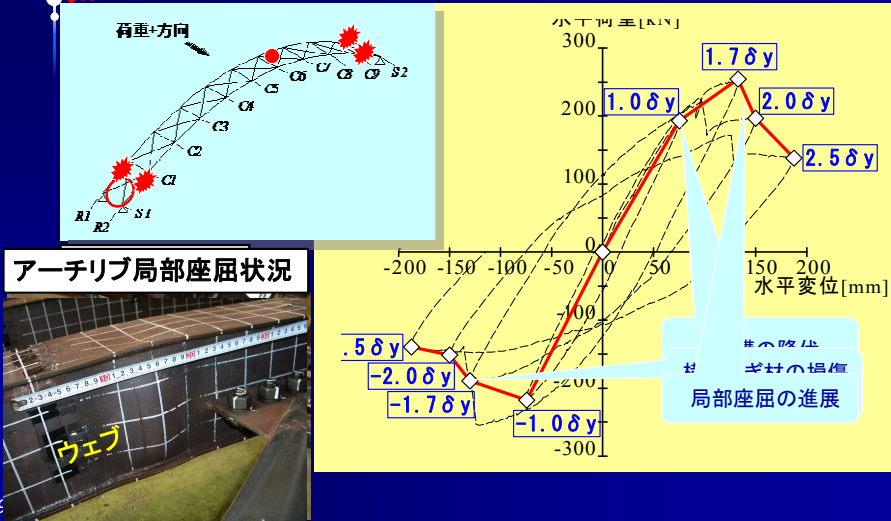
実験結果 (Case1)



38

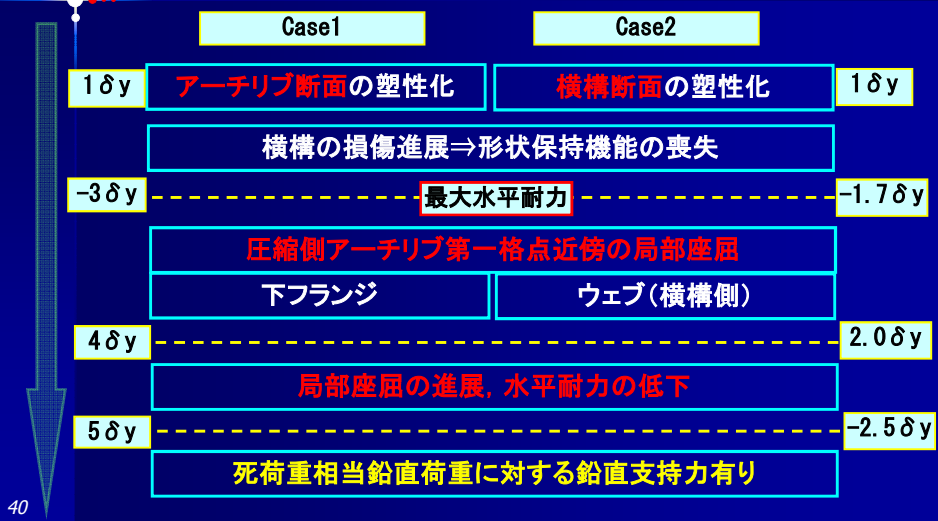
4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

実験結果 (Case2)



4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

実験結果 (損傷メカニズム)

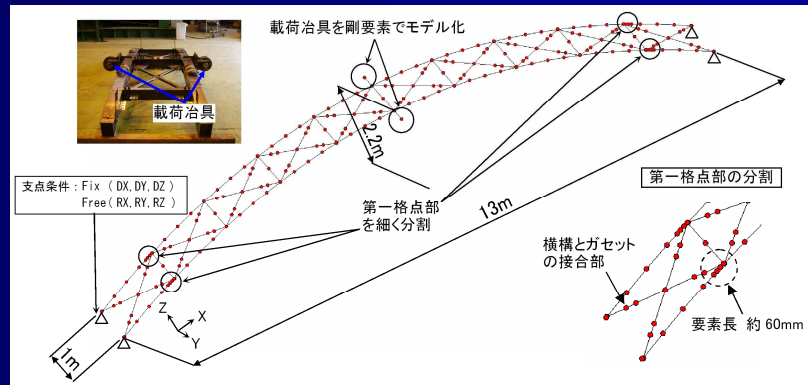


4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

ファイバーモデルによる実験供試体解析モデル

鋼材: バイリニア (移動硬化則)

ガセット剛性、支点条件を変えて解析を実施

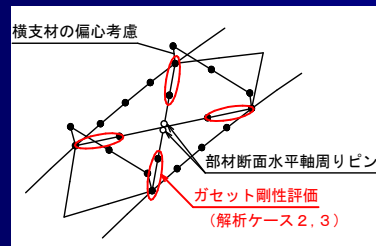


41

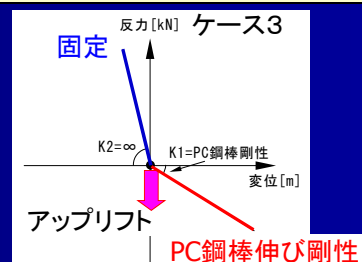
4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

解析ケース

解析ケース1	横構部材全長に一定の断面積を付与 (通常モデル)
解析ケース2	局所的な弾性変形により横構伸び剛性が低下する影響をガセット部に考慮
解析ケース3	解析ケース2にアップリフト作用時の支点条件の変化を考慮



剛性の低下をガセット部で考慮



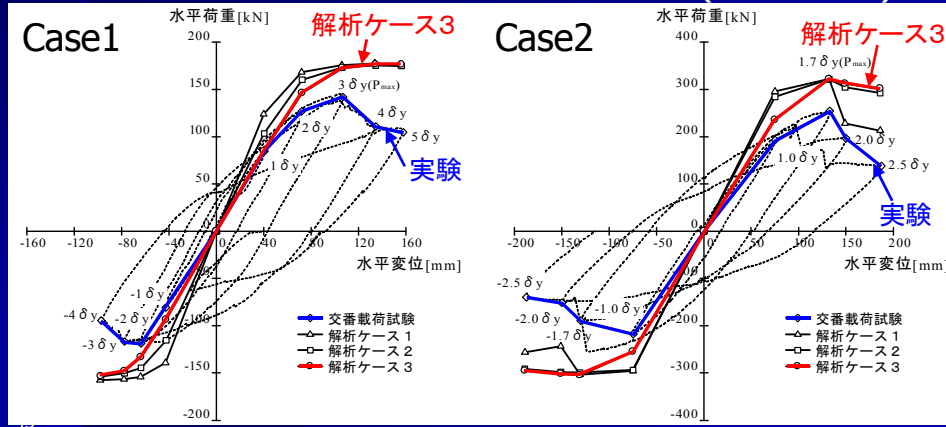
支点条件

42

4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

解析結果

1 δy まではケース3が実験結果との整合性が良い
解析結果は水平耐力を大きく評価する(座屈・破断)



4 鋼上路式アーチ橋の実験と解析事例

実験と解析で得られた知見

1. 橋軸直角方向荷重時の損傷メカニズムは、横構が損傷し形状保持機能を失うと、アーチリブに局部座屈が生じ水平耐力が低下する流れとなる。
2. ファイバーモデルによる解析では、ガセットを含めた横構伸び剛性とアップリフト作用時の支点条件の変化が、初期剛性に影響を与える。

おわりに

ま と め

鋼上路式アーチ橋の耐震設計において、ファイバーモデルでモデル化し動的解析が行われることが多いが、モデル化の方法により解析誤差が大きくなり、非線形解析では特に顕著となる。

よって、より実挙動に即した解析モデルの構築が必要であり、設計者は誤差が生じやすいことを理解して慎重に設計を行うことが大切である。

45

おわり

以上で発表を終わります。
ご清聴いただき、どうもありがとうございました。

46