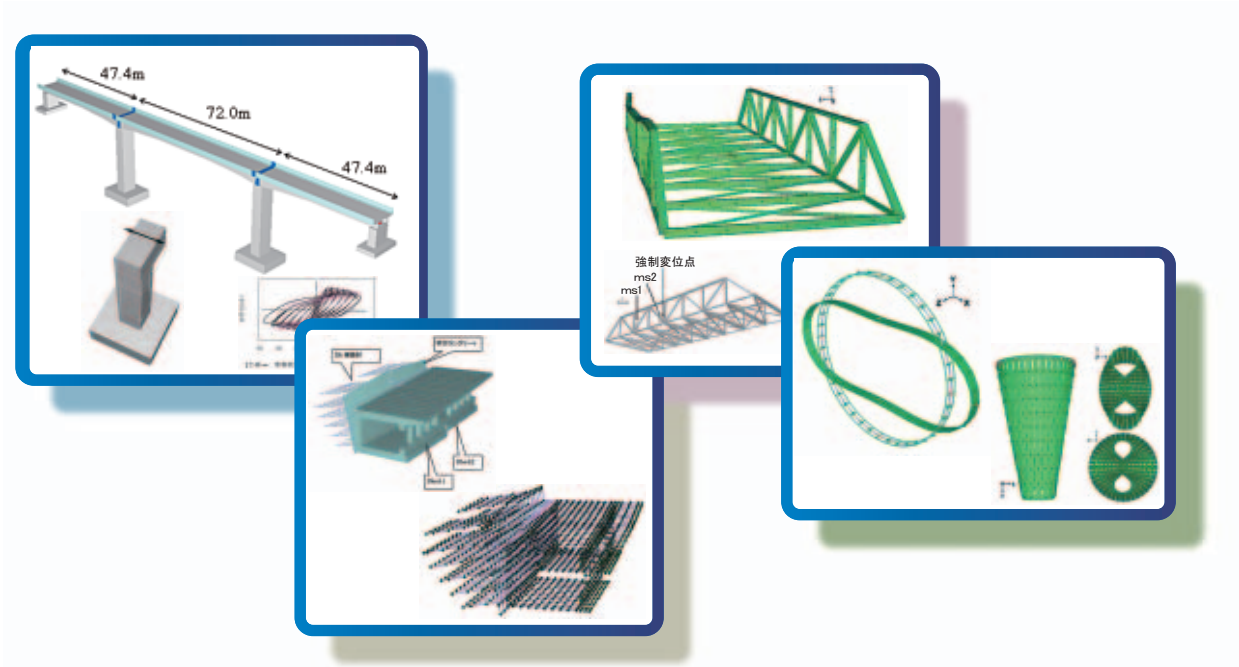
AT

Analysis Technology

No. 1

土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など解析技術適用の事例とその効果



橋梁&都市 PROJECT

1　橋梁の3次元非線形解析手法の特長と適用事例
2　幾何学的非線形解析の概論と簡単な応用としての擬似管の座屈解析
3　トラス橋の座屈解析
4　ロックシェッドの立体モデルへの適用
5　3次元解析による偏心橋脚を有する橋梁の地震時挙動の評価
6　池状構造物の立体モデルへの適用
7　建築構造物の地震時安全性評価への3 次元解析の適用
8　ファイバーモデルを用いた時刻歴応答解析による曲線橋の動的照査例
9　ファイバーモデルによる鉄筋コンクリート柱の解析精度の検証例
10　上路式鋼アーチ橋の補強検討への適用事例

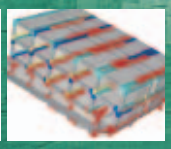
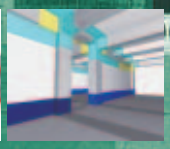
「橋梁＆都市PROJECT」連載　特集vol.1～10掲載

FORUM 8

UC-win/FRAME(3D)

3次元解析、動的解析、非線形解析などの高度解析技術と幅広く設計実務への適用が可能な汎用設計機能を実装したエンジニア必携の先進ツール

●3次元動的非線形解析プログラム

UC-win/FRAME(3D)は、先進のインターフェースにより、構造物の３次元骨組モデルを容易にモデル化でき、静的な立体骨組解析から動的な３次元的挙動も解析可能な汎用解析プログラムです。高度な汎用解析機能を有し、幅広い設計への適用が可能な設計支援ツールです。

解析支援サービス

３次元骨組み静的動的非線形解析用入力データの作成を支援する技術サービス

UC-win/FRAME(3D)

日本語版/英語版
中国語版/韓国語版
Windows NT/2000/XP対応

■プログラム価格：Lite：¥315,000
Standard：¥504,000
Advanced：¥714,000

●3次元動的非線形解析プログラム

任意形立体骨組み構造を対象とした、3次元解析プログラム。静的・動的荷重による線形および非線形解析が行え、幾何学的非線形性も扱うことができます。断面力の算出から、道路橋示方書による応力度・耐力照査ならびに土木学会コンクリート標準示方書による限界状態設計計算までを一括で実施でき、高度な構造解析と部材設計機能を両立しています。3次元モデルは3DSファイルにエクスポートでき、UC-win/Roadなどで利用出来ます。

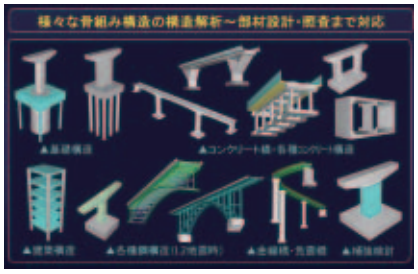
●プログラム概要

■解析

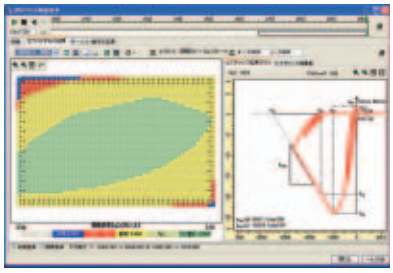
材料特性	・線形／非線形
荷重	・静的・・・節点・部材荷重、組合せ・抽出(線形)
	・動的・・・加速度波形(基盤加振)
	・活荷重・・・影響線解析(1本梁モデル)
幾何学的特性	・微小変位／大変位
計算手法	・動的解析・・・時刻歴直接積分法(Newmark β(1/4))
	・固有値解析・・・サブスペース法
要素	・梁要素・・・線形、非線形(ファイバー要素、M－φ要素)
	・ばね要素・・・線形、非線形(バイリニア型、トリリニア型)
	・剛体要素・・・集中質量、剛域
	・分布ばね・・・線形(弾性床上の梁理論を適用)
質量	・分布質量(回転慣性項を含む)、集中質量(並進・回転)
粘性減衰	・レーリー型(初期剛性、瞬間剛性)
	・要素別剛性比例型(初期剛性、瞬間剛性)

■断面計算・照査　・応力度・耐力照査(道示Ⅲ・Ⅳ・Ⅴ)、限界状態設計計算

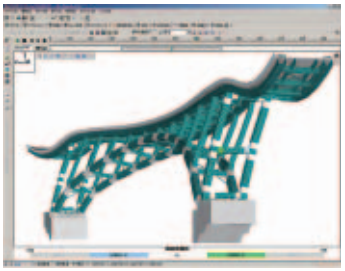
▼適用可能な構造物の例



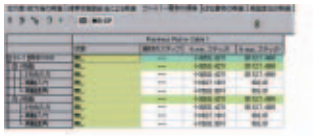
▼応答ひずみによる損傷判定



▼変形図と損傷判定



▼照査結果一覧（PC鋼材の損傷とひずみ）



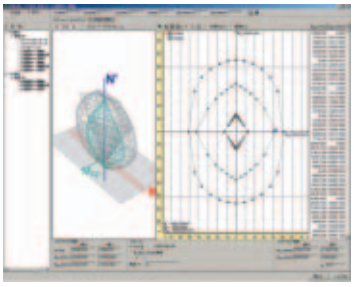
UC-win/Section

日本語版/英語版
プログラム価格：¥84,000

二軸曲げを考慮した任意形RC・SRC断面計算プログラム

様々な断面形状を持つ鉄筋コンクリート・鉄骨鉄筋コンクリート断面の応力度計算（曲げ、せん断）、耐力計算（曲げ、せん断）、M-φ計算（Mc,My0, Mu）を行うプログラム。抵抗モーメントや最小鉄筋量の計算も行います。

※UC-win/FRAME(3D)Advancedには、標準実装しています。

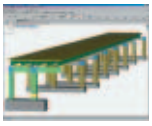


UC-win/FRAME(3D) 解析支援サービス

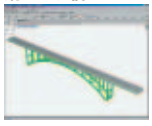
3次元骨組の静的動的非線形解析用入力データの作成支援サービス

非線形解析、3次元解析などによる構造物のモデル化、入力支援を行う技術サービス。動的解析では、「道路橋示方書　耐震設計編」（平成14年3月）における動的照査法により設計する初期モデル作成などをサポート。設計会社の技術提携により「報告書オプション」も提供しています。

ラーメン橋脚



鋼アーチ橋



FORUM 8　Training Seminar

UC-win/UC-1 有償セミナー

UC-win/FRAME(3D)・動的解析セミナー
「動的非線形解析と耐震設計への適用に関する解析セミナー」

UC-win/FRAME(3D) Lite 活用セミナー
「UC-win/FRAME(3D)Lite　静的線形解析への活用セミナー」

土木構造物における３次元解析、動的解析、非線形解析など
解析技術適用の事例とその効果

橋梁の３次元非線形解析手法の特長と適用事例

(株)フォーラムエイト　大阪支社　支社長　青戸 拡起
東京本社　技術サポート Gr 長　中川 信男

1. はじめに

道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計、土木学会コンクリート標準示方書［耐震性能照査編］など、土木構造物を対象とした耐震設計基準が、動的照査を推奨する設計体系になって久しい。従来型設計手法は2次元的な挙動、すなわち部材には1方向からしか荷重が作用しないことを仮定した計算方法である。そのため、立体構造物など3次元的な挙動が予想される構造物の設計には、従来型設計手法の適用範囲を超えることが多々ある。そのような中、期待されているのが性能照査型設計体系であるといえる。技術者の高度な技術と知識により、従来型設計手法の適用が困難な構造物でも、様々な解析技術を利用して構造物の設計・照査を行うことができる。例えば、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編では、構造物に要求される性能を明示した上で、性能の確認（＝照査）方法に自由度が与えられた。すなわち、技術者の判断のもと、構造物の形式に応じ静的照査方法か動的照査方法を選択できるようになった。さらに、動的照査方法では細かな仕様を明示せず、先進技術を積極的に利用できるような体系となっている。

このように、性能照査型の設計体系が浸透しつつある現在、3次元解析、非線形動的・静的解析を活用した橋梁の設計が積極的に実施されている。連載1回目の今回は橋梁の耐震設計における動的照査の現状を整理した上で、その利用事例を紹介する。

2. 3次元非線形解析の現状

1)橋梁の動的照査の現状

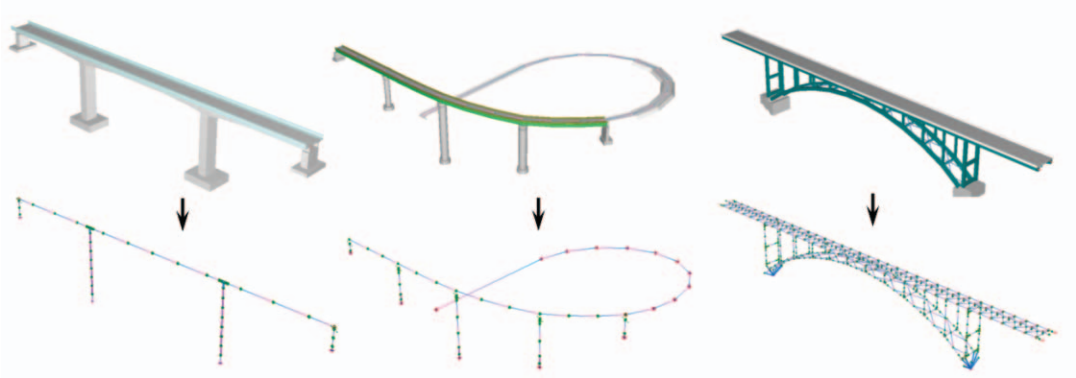
実際、地震時には様々な方向から地震力を受けるため、直線橋であっても橋脚は様々な方向に揺れることになる。しかし、現在主流の動的照査は、橋軸方向、橋軸直角方向、それぞれ別々に地震動を入力して解析した結果に基づき照査している。つまり、直線橋あるいは直線橋と見なせる橋梁を想定した照査方法となっており、橋脚が橋軸方向および橋軸直角方向に同時に大きく揺れることは想定されていない。

さらに、立体的な曲線橋の橋脚や偏心橋脚においては、橋軸方向のみに加震しても、橋軸方向および橋軸直角方向に同時に大きな揺れが発生しうる。そのため、この場合は部材が様々な方向に揺れることを想定しなければならない。

このように、3次元的な非線形挙動が想定される場合は、本来、それを表現できる解析手法が利用されるのが望ましいが、十分に利用されていないのが現状である。

2)非線形解析に用いる要素モデル

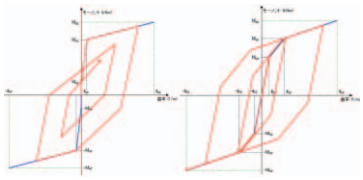
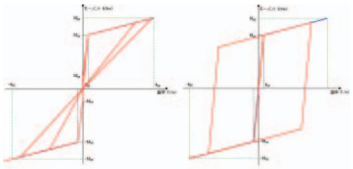
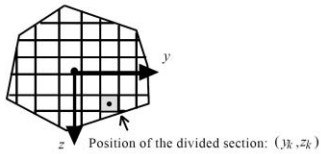
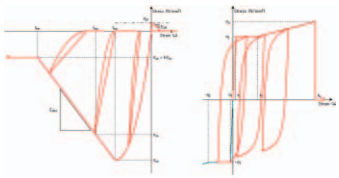
コンピュータによる数値解析を利用する際には、構造物のモデル化において要素モデルの選択が重要となる。橋梁を対象とした場合、骨組みモデル（図



（a）直線橋　　（b）曲線橋　　（c）アーチ橋

図－１　骨組みモデルの例

表－１　骨組みの非線形部材に利用される要素モデル

	部材非線形モデル	材料非線形モデル
特長	材料非線形を無視した剛性マトリクスを流用。よって、2軸間の曲げ変形・軸方向変形は独立と仮定している。土木構造物では曲げ（＝棒部材）の非線形性を表すことに着目される。 $\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & 0 & 0 \\ & EI_{yy} & 0 \\ sym. & & EI_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix}$	材料非線形を考慮した厳密な剛性マトリクスを利用。よって、2軸間の曲げ変形・軸方向変形の挙動が関連している。一般にファイバー要素といわれる。 $\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_k E_k A_k & \sum_k E_k A_k z & \sum_k E_k A_k y \\ & \sum_k E_k A_k z^2 & \sum_k E_k A_k yz \\ sym. & & \sum_k E_k A_k y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix}$
非線形性の考慮方法	曲げ剛性の非線形性（＝M－φ or M－θ） 軸剛性の非線形性（＝N－ε） せん断剛性の非線形性（＝V－γ）  （RC 部材用）　（鋼部材用）  （PC 部材用）（コンクリート充填部材用） **曲げ剛性の非線形性を表す履歴モデルの例**	部材を構成する各材料の非線形性（σ～ε） ※断面をメッシュ状に離散化し各メッシュの材料に応じたσ～εを適用する。   （コンクリート）　（鉄筋） **履歴モデルの例**
適用	2次元解析	2次元および3次元解析

ー1）による解析がよく用いられるが、この時材料非線形を考慮した骨組み部材のモデル化は大きく2種類に分けられる（**表－1**）。

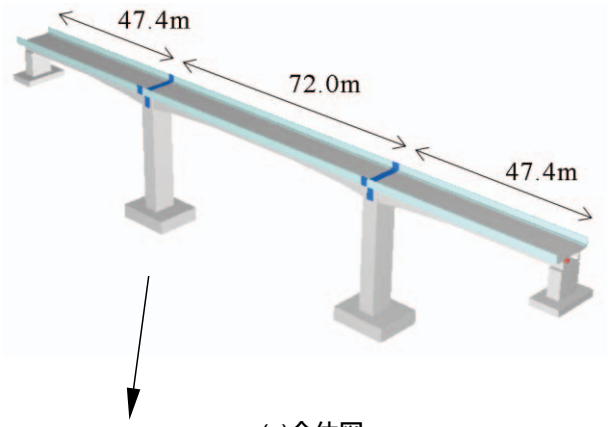
従来の動的照査では橋軸方向、橋軸直角方向別々に地震動を入力して解析した結果に基づき照査するため、直線橋などは2次元的な挙動となり部材非線形モデルが適用できた。しかし、曲線橋や偏心橋脚、さらには実際の地震時の挙動の多くは3次元的な挙動になるため、このような対象には材料非線形モデル（＝ファイバー要素）の利用が必要である。近年、実務にも同モデルが利用されている[1)2)]。

また、様々な研究機関で、鉄筋コンクリート柱部材を対象にした2方向同時載荷による静的・動的実験が実施されており、ファイバー要素による解析はこれをよく再現できると報告されている[3)4)5)]。よって、今後、材料非線形モデルのより一層の活用が期待される。

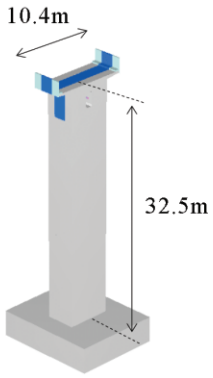
3. 3次元非線形解析の適用事例

1)水平2方向入力によるラーメン橋の3次元非線形動的解析[6)]

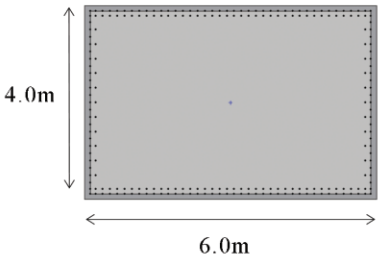
直線橋ではあっても、地震時には3方向から地震が作用し3次元的な挙動を示す。ここでは、ラーメン橋（**図－2**）を例に、1方向入力（＝現在主流の動的照査方法）による動的解析と、水平2方向同時入力（＝実際の地震動の揺れに近い）による動的解析の結果を紹介する。



(a)全体図

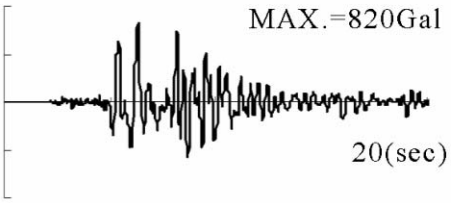


(b)P1 橋脚拡大

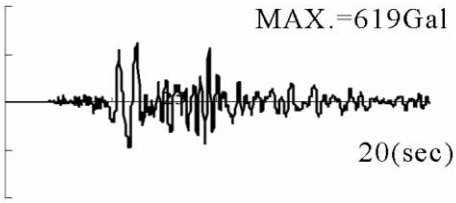


(c)主鉄筋の配筋

図－２　解析対象

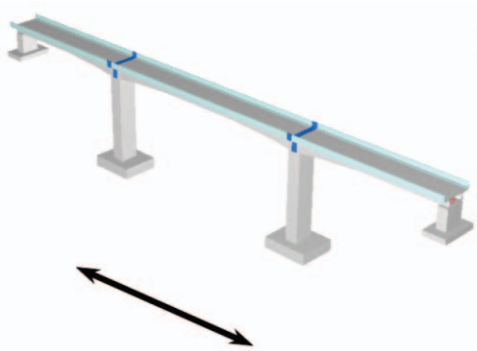


(a)NS 成分

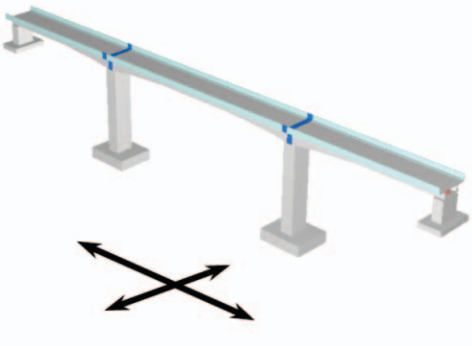


(b)EW 成分

図－３　兵庫県南部地震で観測された加速度波形



(a)1 方向入力



(b)2 方向同時入力

図－４　地震動の入力方向

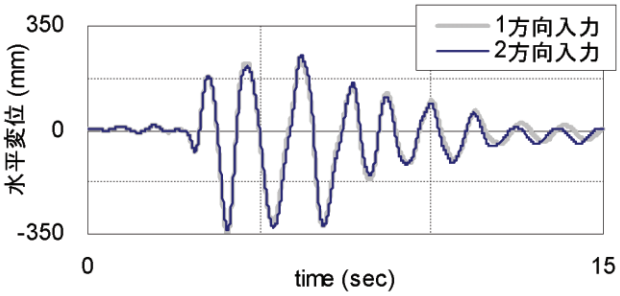
a. 解析方法

上部構造は初期剛性を有する線形部材、柱部分はファイバー要素でモデル化した。フーチング底面（直接基礎）に基礎ばねを設けている。

地震動には観測波形（**図－３**）を用いて、解析を実施する（**図－４**）。

b. 解析結果

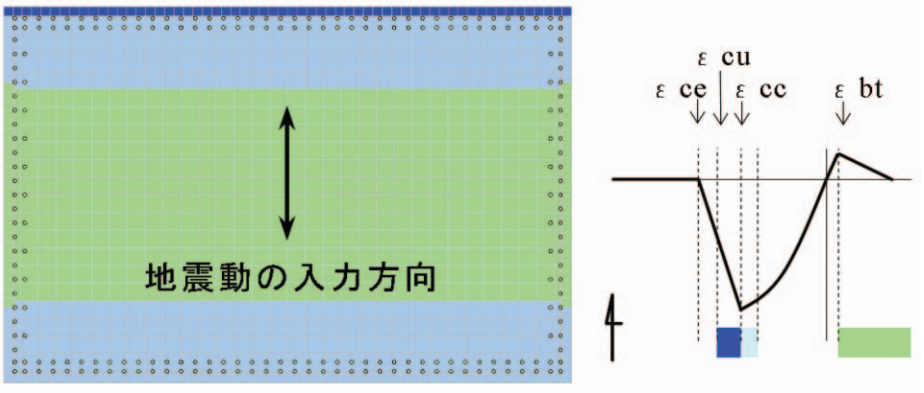
NS 成分を入力した 1 方向入力による解析と、橋軸方向に NS 成分・橋軸直角方向に EW 成分を入力した 2 方向同時入力による 3 次元解析の結果を比較する。



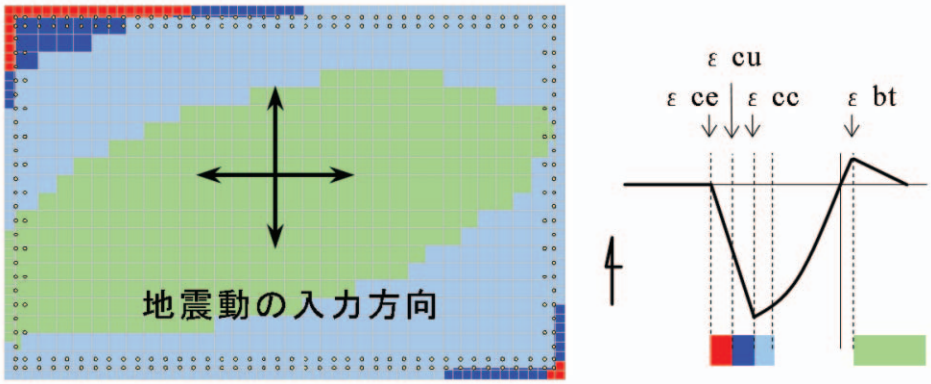
図－５　P1 橋脚天端の応答変位（橋軸方向）

図－５に、橋軸方向の応答変位波形を示す。1 方向入力の結果と 2 方向同時入力の結果は、このモデルでは大きな差は生じていない。

図－６に、断面の各所に生じた最大ひずみの分布を示す。ここでは、最大ひずみの大きさに応じ、6 段階に色分けして示している。1 方向入力の結果は、かぶりコンクリートに最大圧縮応力を超えるが終局点には達しない程度のひずみが発生しており、外観上は曲げひび割れ程度の損傷と予想される。一方、2 方向同時入力の結果、かぶりコンクリートに終局点を超えるひずみが発生しており、外観上はかぶりコンクリートの剥離などが予想される。しかし、コアコンクリートは終局点に達しておらず、断面全体の剛性は大きく劣化しなかったと考えられ、応答変位



(a)1 方向入力（橋軸方向）



(b)2 方向同時入力

図－6　P1 橋脚基部断面の損傷状況

にはほとんど影響を与えなかったと見られる。

2 方向入力を受けると、1 方向入力に比べて大きなひずみを受ける領域が広くなり、また断面内部まで損傷が進行している。すなわち、現在主流の動的照査方法では、実際よりも損傷の程度をやや過小評価する可能性がある。

このように、ファイバー要素を用いた解析では、詳細な損傷状況を把握できるだけでなく、3次元解析に基づき実際の地震時挙動をより詳細に評価することもできる。

2)多径間ラーメン橋への適用

a. 解析対象

解析対象は、7 径間連続非合成ラーメン鋼桁橋で、橋台以外の全ての鉄筋コンクリート橋脚と上部工主桁が剛結されている構造である（図－7）。

本橋梁の解析目的は、鋼製の上部工と鉄筋コンクリート橋脚の剛結部が橋脚も含めて複雑に挙動すると予測されることから、その挙動をシミュレーションするものである。

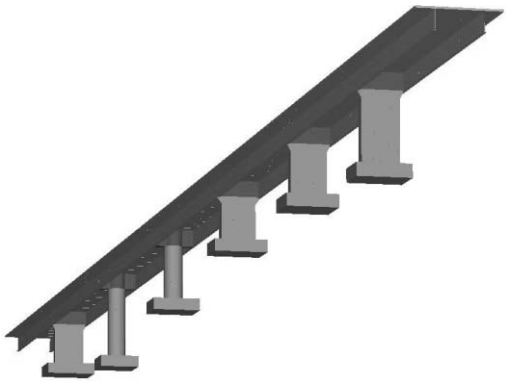
剛結部の形式は、図－8に示すように矩形橋脚と円柱橋脚で異なる構造となっている。特に、円柱橋脚は主桁間より小さい径の構造になっているため、橋脚と主桁を接合するための横梁が必要となり、さらに複雑な挙動を示すと予想される。

以上のような挙動を予測するためには、3 次元の動的解析を実施する必要があり、本橋梁では解析コードに UC-win/FRAME(3D)を用いてシミュレーションすることにした。

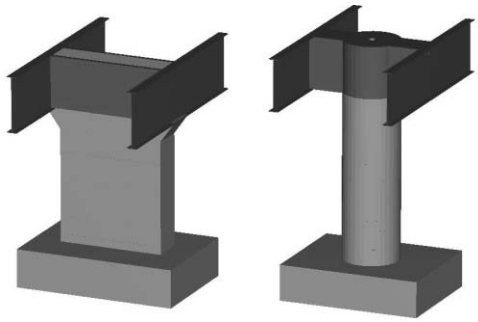
b. 解析モデル

本橋梁では、上部工と橋脚の剛結部の挙動と橋脚の挙動をシミュレーションすることを解析目的として、基本的に以下のようなモデル化を実施した。

上部工：主桁および床版の各々を線形梁要素でモデル化
上部工の面外挙動



図－7　橋梁全体図



(a)矩形橋脚　　(b)円形橋脚

図－8　剛結部の形式

は床版剛性を評価したモデルでモデル化

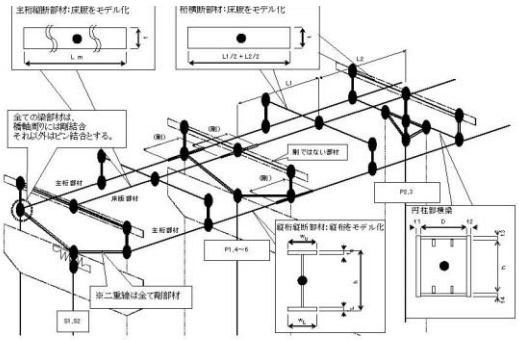
橋　脚：非線形梁要素（剛性低下型武田モデル）および塑性ヒンジ回転バネでモデル化

基　礎：地盤バネ（地盤の変形の影響を考慮）

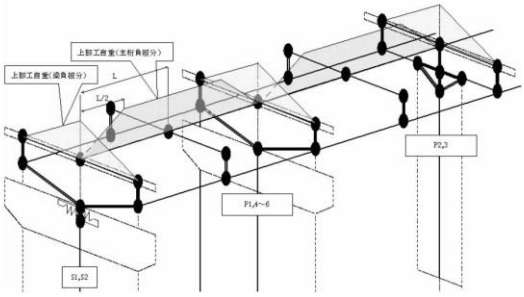
上部構造に関しては、上部工重量の慣性力作用位置を床版重心位置で作用させたかったため、主桁とは別に床版をモデル化した。その結果、床版と主桁をつなぐ部材が必要となり、つなぎ部材の結合条件は主桁に発生する断面力に影響しないよう橋軸回り以外の主桁結合部をピン結合としモデル化した（**図－9**）。また、上部工重量のうち、橋脚結合部付近の重量は上部工本体ではなく橋脚部が直接分担すると考え、上部工重量は**図－10**に示すような荷重分布とした。

橋脚に関しては、要素長さは原則橋軸方向、橋軸直角方向それぞれに対応する断面高さおよび橋脚基部から上部構造の慣性力作用位置までの距離（ラーメン構造の場合は1/2の値）に対して算出した塑性ヒンジ長とし、地震動レベル2を作用させた際に塑性化させる部位としては、橋梁全体が橋軸方向にラーメン構造であるため、橋軸方向加震モデルでは橋脚の上端と下端に設定、橋軸直角方向加震モデルでは単柱式構造になるため、橋脚下端のみ、塑性ヒンジ回転バネでモデル化した（**図－11**）。

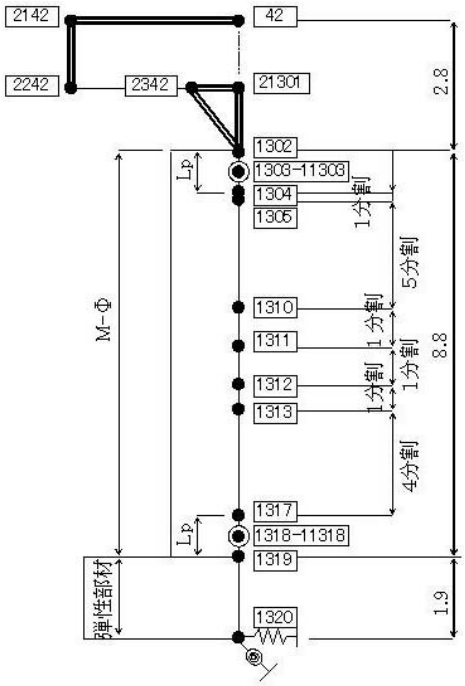
剛結部のモデル化に際しては、矩形橋脚部は主桁間以上の幅があるため、橋脚と上部工の結合は**図－9**および**図－11**に示すように剛部材で橋脚と主桁間をつないだ。円柱橋脚部は前述しているように主桁間より小さい径の構造になっているため、橋脚と主桁を接合するための横梁が必要となり、横梁重心位置で横梁をモデル化し、橋脚との接合部では橋脚の直径の8割の長さを剛部材でモデル化した（**図－9**、**図－11**）。



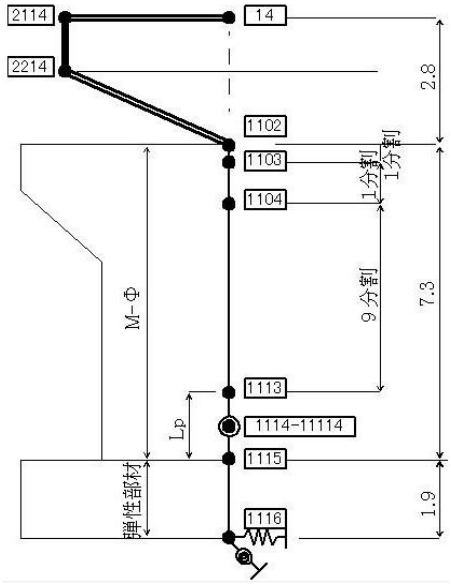
図－9　上部工および下部工結合モデル図



図－10　上部工重量分担図



(a)円柱橋脚橋軸方向モデル図



(b)矩形橋脚橋軸直角方向モデル図

図－11　橋脚モデル図

表－2　円柱橋脚における断面力一覧表

部材			応答値							
			軸力	せん断力		ねじりモーメント	曲げモーメント		曲率	
部位	番号	端	N	Syp	Szp	T	Myp	Mzp	φyp	φzp
			(kN)	(kN)	(kN)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(1/m)	(1/m)
天端横梁	12228	I端	632	3973	1910	20749	0	1998		
		J端	632	3973	1910	20749	3552	5391		
	13228	I端	632	3973	1910	20749	0	1998		
		J端	632	3973	1910	20749	3552	5391		
主桁	2225	I端	1409	2153	0	0	0	13497		
		J端	1409	2153	0	0	0	22770		
	2229	I端	686	1986	0	0	0	20188		
		J端	686	1986	0	0	0	11776		
	3225	I端	1409	2153	0	0	0	13497		
		J端	1409	2153	0	0	0	22770		
	3229	I端	686	1986	0	0	0	20188		
		J端	686	1986	0	0	0	11776		
脚部材(上部剛域)	1202		8546	4489	0	0	0	36396		
	11203		8648	4611	0	0	0	33821		
脚部材(一般部)	1204		8750	4040	0	0	0	28832	0.0000000	0.0012174
	1205		8752	4153	0	0	0	29690	0.0000000	0.0010766
	1206		8840	4301	0	0	0	28498	0.0000000	0.0009043
	1207		8927	4352	0	0	0	26387	0.0000000	0.0008069
	1208		9014	4403	0	0	0	24276	0.0000000	0.0007084
	1209		9102	4453	0	0	0	22141	0.0000000	0.0006103
	1210		9189	4502	0	0	0	19985	0.0000000	0.0005104
	1211		9276	4551	0	0	0	17811	0.0000000	0.0004077
	1212		9363	4603	0	0	0	15627	0.0000000	0.0003010
	1213		9458	4720	0	0	0	13277	0.0000000	0.0001452
	1214		9633	4818	0	0	0	9084	0.0000000	0.0000729
	1215		9807	4875	0	0	0	6354	0.0000000	0.0000510
	1216		9896	4911	0	0	0	5542	0.0000000	0.0000445
	1217		9983	4945	0	0	0	5198	0.0000000	0.0000417
	1218		10070	4977	0	0	0	5762	0.0000000	0.0000463
	1219		10158	5008	0	0	0	7482	0.0000000	0.0000601
	1220		10245	5023	0	0	0	9582	0.0000000	0.0000952
	1221		10332	5042	0	0	0	11843	0.0000000	0.0001788
脚下端部材(ヒンジ)	11223		10522	5640	0	0	0	17684		

上記のようなモデル化を行った上で、要素別剛性比例減衰を用いて、地震動タイプ2Ⅲ種地盤の3波を用いて解析を実行した。

c. 解析結果

本解析における照査項目は、上部工剛結部の断面力の抽出と橋脚断面の照査である。**表－2**に結果の一例を示す。

このように、複雑な構造形式に対しても自由度の高い3次元解析コードを用いることで解析することが可能となる。

4. まとめ

性能照査型設計が進み、高度解析技術を利用した設計・照査が盛んになった。その結果、従来型の設計手法の適用範囲を超えるような形式の橋の設計が可能になり、従来の形式にとらわれない新しい形式・構造、あるいは思想を持つ橋の登場が期待される。この時、2次元解析に限定されるなど、適用範囲が限定される解析ツールでは技術者の要求に応えられない。どのような構造でも手軽に適用できる3次元非線形解析ツールの開発と普及に、今後も力を注ぎたいと考えている。

参考文献

1)名古屋高速道路公社：名古屋高速道路非線形動的解析実施要領平成13年5月、名古屋高速道路公社工務部、2001.5

2)福岡北九州高速道路公社第502工区Mt新設設計部会：福岡高速5号線　第502工区Mt新設工事（その3）～（その12）動的解析要領(案)、平成15年2月

3)早川涼二、川島一彦、渡邊学歩：水平2方向地震力を受ける単柱式ＲＣ 橋脚の耐震性、土木学会論文集、No.759/I-67、pp.79-98、2004.4

4)運上茂樹、西田秀明、長屋和宏：正方形断面を有する鉄筋コンクリート柱の水平二方向加振振動台実験、土木研究所資料3871、2002.07

5)西田秀明、運上茂樹：水平二方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の応答挙動に対するファイバーモデル解析の適用性、第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2005.2

6)高梨和光、青戸拡起：3次元動的解析法を用いた耐震性能照査方法に関する考察、第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2005.2