FEM-DEM結合解析法による免震構造橋梁に添架された管路の地震時大変形挙動解析

片桐　信[1]・原田尚慶[2]

[1]摂南大学理工学部都市環境工学科准教授
（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17番8号）
E-mail:shin-k@civ.setsunan.ac.jp
[2]摂南大学大学院（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17番8号）

本研究では，既設道路橋が免震化されることを想定し，そこに添架される管路系の対策を検討することを目的に，筆者らの開発したFEM-DEM結合解析法の添架管路・大変形応答解析への適用性について検討した．まず，円環を2次元平面応力状態の矩形断面に近似する方法を検討し，10G場におけて軸直角方向自重を受ける管路の自由振動解析から，その妥当性を検証した．次に，通信用鋼管路を対象として，橋台から橋桁への第１接続部までの間の管路についてモデル化し，ねじ継手等の弱点箇所が無い場合に，橋桁への第１接続部付近に伸縮継手ならびに伸縮屈曲継手を配置することによる管路応答の差について検討した．さらに，橋台近くにねじ継手を有する場合，ねじ継手の分離・再衝突を含めた挙動解析を行い，伸縮継手，離脱防止継手等を配置することによるねじ継手の破損低減効果を検証した．

Key Words : *FEM, DEM, Pipeline, Earthquake response analysis, Seismically isolated bridge*

１．はじめに

近年，既設道路橋の地震対策として，橋脚の補強や落橋防止装置の設置と併せて，免震化や弾性支承による反力分散が行われている．また老巧化した橋梁の架け替えにおいても免震化が進められており，免震橋梁は今後増加すると考えられる．河川を横断する道路橋には，ガス，水道，通信および電力などのライフライン系が添架されているが，道路橋の免震化により，これらライフライン施設には過大な軸方向・軸直角方向変位が作用することになる．すなわち，慣性力の低減により，上部構と下部構の安全性は向上し，添架される構造物にとっても慣性力が低減するため，通常の耐震設計では有利な条件となるが，橋台際や橋脚部では橋梁上部構造と橋台間および橋梁上部構造間の相対変位が大きくなる．しかし，橋梁に添架されるライフライン系は，移動支承部の常時の変位に対する吸収性能もしくは追従性能を有するものの，免震支承による過大な地震時相対変位を見込んでいない．したがって，現時点ではその大変形挙動も明らかではなく，また予想される変位量に追随可能な構造を検討するための手法についても十分に検討されていない．

免震構造物とライフライン系との接続部における大変位吸収機構の研究例としては，免震構造ビルに接続される配管系の対策がある．加藤ら[1)]は，従来から化学プラント，原子力施設等に用いられてきた回転と伸びのできる継手(Universal Expansion Joint)を用いた免震用配管について，大変位追随性，繰返し耐久性，および取り付け部に発生する反力を確認している．

また，新田ら[2)]は，建築物に免震構造を採用する場合，上部構造と下部基礎板間は地震時の地震動による相対変位が生じるため，上部構造と下部基礎版間の渡り配管に，ヒンジ型及びジンバル型伸縮継手を組み合わせた構造を提案し，変位吸収性能の確認を行っている．

免震構造橋梁に添架される管路系の研究として，田中[3)]らは，免震橋梁の強震時の変形特性を明確にし，上部工と下部工の相対運動に追随できる添架管路の条件について検討している．特に，橋台と橋梁上部構造の橋軸直角方向変位を対象として，管路の橋台固定部と上部構造の端部横げた開口部間で，管路の変形性能を向上させ，せん断的変位の吸収性能の改善法を示している．

本研究では，添架管路のうち橋台固定部と橋梁上部構造への第１固定部の間に特に過大な橋軸方向・橋軸直角方向への相対変位が作用するものと考え，その動的大変形・破壊・再接触解析を実施した．解析対象は通信ケーブル保護管として，管に過度の損傷が生じないようにするための伸縮継手，可とう継手および離脱防止継手の配置方法や，それぞれの継手に要求される性能について明確にした．

２．FEM-DEM結合解析法[4] の概要

(1) 解析法の概念

図-1に解析法の概念を示す．３つの個別要素（DE）は１つの３角形定ひずみ有限要素（FE）で結合されている．各個別要素（有限要素の節点）の回転の自由度は考慮されていない．連続体は有限要素によりモデル化されるが，全体剛性マトリックスを構築しない点が従来のFEM動的解析の計算手順とは異なる．質量は，有限要素の節点に集中させており，従来のDEMと同様にそれぞれの質点の運動方程式を独立して差分法により解く．破壊が生じるまでは，連続体は有限要素の集合体としてモデル化される．有限要素が破壊すると，当該要素は消滅し，その節点を中心として個別要素が生成され，破壊面での再接触力を伝達する．

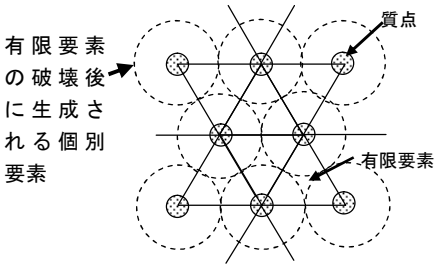

図-1　FEとDEの組み合わせ[4]

(2) 減衰の考え方

減衰は，連続体の動的挙動を求める上で重要な要素である．しかし，DEM は構造物の破壊に至るような大変形を対象としているので，減衰については要素の振動（ノイズ）を防ぐために使われてきた．本研究では，減衰を粘性減衰と構造減衰に分け，以下のように考慮した．

個別要素（質量を集中させた有限要素の節点）の運動方程式は（1）式となる．

$$m_d \cdot \ddot{u}_t + \alpha \cdot m_d \cdot \dot{u}_t = f_t \qquad (1)$$

ここで、$a \cdot m_d$ が粘性減衰であり、f_t には周辺の有限要素の剛性マトリックスと構造減衰マトリクスを通じて与えられる力，隣り合う個別要素との間で作用する再接触力および重力が含まれている．

a) 粘性減衰係数

構造物の減衰定数を h とした時，レイリー形減衰における α は下式となる．f は構造物の固有振動数である．

$$\alpha = 4 \cdot \pi \cdot h \cdot f \qquad (2)$$

b) 構造減衰マトリクス

材料の粘弾性特性を Voigt タイプの減衰モデルで単純化した場合，材料の応力―ひずみ関係は下式で与えられる．

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta_C \cdot \dot{\varepsilon} \qquad (3)$$

$$\eta_C = 2 \cdot \beta \cdot \sqrt{m_d \cdot E} \qquad (4)$$

ここで，σ ：応力，E ：弾性係数，ε ：ひずみ，η_C ：粘性減衰，$\dot{\varepsilon} = (d\varepsilon / dt)$ ：ひずみ速度，β ：構造減衰係数そして m_d ：質量である．したがって，それぞれの三角形有限要素の構造減衰マトリクスは，剛性マトリクスの E を η_C に置き換えることで与えた．レイリー形減衰における β は下式となる．

$$\beta = \frac{h}{\pi \cdot f} \qquad (5)$$

３管路のモデル化と解析条件

(1) 管路のモデル化と精度検証

添架管路は橋梁に沿って全スパン連続しており，一定間隔で支持台を介して橋梁上部構造に固定されている．この時，最も大きな相対変位を受けるのは，橋梁端部の橋台と第１固定部との間の管である．そこで，本解析では図-2 に示すように，この部分を取り出してモデル化を行う．管の支持台への固定部や支持台の強度・剛性については，現状では常時荷重と地震時の慣性力に耐え得る設計がなされていると考えられるが，その設計方法に関してはあまり明確ではなく，種々の構造のものが採用されている．そこで，本研究では支持台と固定部は十分な剛性と強度を有するものと仮定し，支持部の破壊を考慮せずに解析を行った．

管路のモデル化の方法を図-3 に示す．本来は円環であるものを，図の上方から見て２次元平面応力の矩形断面としてモデル化する必要がある．そこで，円断面の直径方向を４分割にし，それぞれの分割幅における円弧の断面積に等しくなるように，矩形断面の厚さを決定した．これにより，断面積と断面２次モーメントが円環と等しい変断面の矩形断面とすることができる．

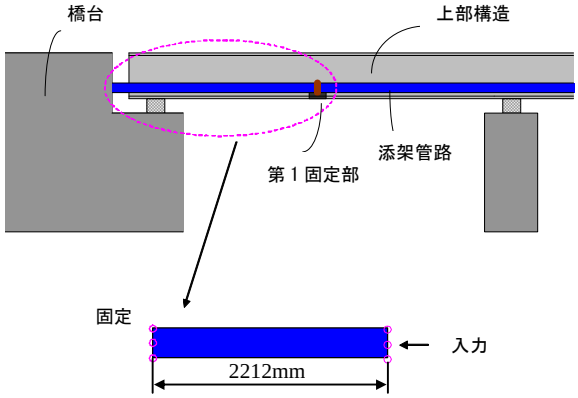

図-2　添架管路のモデル化

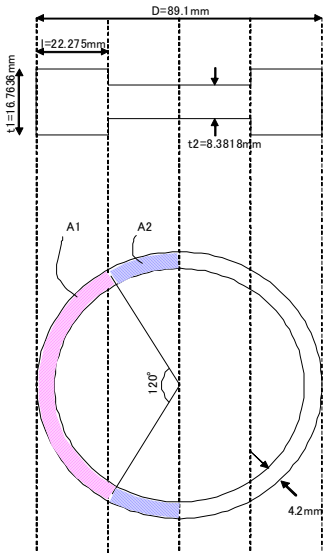

図-3　円環の等価矩形断面へのモデル化

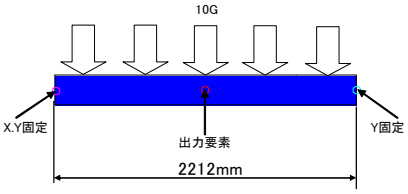

図-4　自重振動解析モデル

表-1　解析対象管路の諸元

外径 (mm)	肉厚 (mm)	弾性係数 (N/mm^2)	ﾎﾟｱｿﾝ比	密度 (g/mm^3)
89.1	4.2	205940	0.3	7.8×10^{-6}

モデル化の妥当性を検討するために，図-4 に示すように単純支持された管と等価な変断面・矩形断面ばりを 10G 場に置いた場合の微小振動解析を行った．対象とした管は，通信用鋼管 80A である．管の諸元を表-1 に示す．

橋梁に添架される管路施設の減衰定数については，明確な設定方向が見あたらない．NTT では，同種の鋼管橋梁について，微小レベルでの h を 0.01 程度として解析している例もある．また，橋梁の上部構造では，一般的に h=0.01～0.05 の範囲とされている．そこで，本研究ではこれらに従って，h=0.03 と設定し，2-(2)節で示した方法から減衰係数 α，β を定めた．本モデルの場合，曲げ振動の固有周期は 0.6378s であり，α=0.591，β＝0.006 となる．

図-5 に，支持スパン中央の出力点の鉛直方向変位量を示す．図中には，比較のため α=5.0 とした場合の変位量を併記している．円環として計算した場合の中央点の変位に関する理論値と解析値は良好な精度で一致している．また，本グラフの横軸目盛りは曲げ振動の固有周期の理論値としているが，これも良好に一致しており，モデル化の妥当性が検証された．

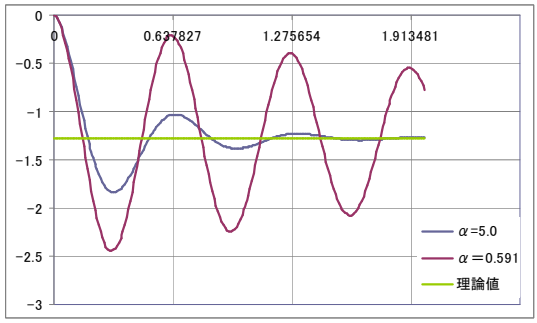

図-5　モデルスパン中央点の鉛直変位

(2) 入力波の設定

入力波，すなわち橋梁上部構造の橋台に対する相対変位については，田中ら [5] による解析結果の波形を採用した．ただし，NTT によると免震化橋梁の設計許容変位量は橋軸方向，橋軸直角方向ともに概ね 250mm である．そこで，田中らの示した上部構造の応答変位の最大値を 250mm に調整し，図-6，図-7 に示す波形を添架管への入力波形として設定し，図-3 に示すモデルの右端（橋梁上部構造への第 1 固定部）へ入力することとした．

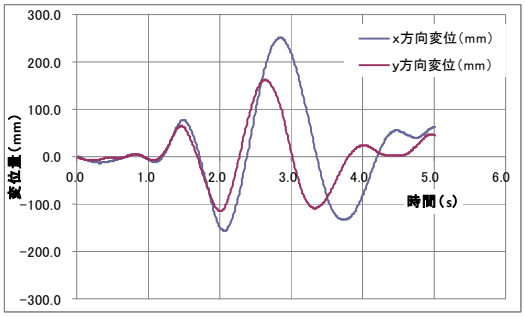

図-6　入力波形の時刻暦

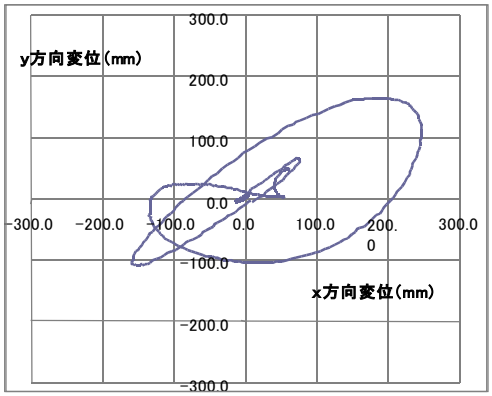

図-7　入力波形の x-y 表示

3．種々の構造を有する添架管路の応答解析

本章では，継手を有さない一体構造管路と脆弱なねじ継ぎ手を有する継手構造管路に分類し，それぞれ無対策の場合の挙動を把握するとともに，伸縮継手，可とう継手および離脱防止継手を配置することによる対策案について検討する．

(1) 一体構造管路の挙動とその対策

a) 解析モデル

橋台固定部と橋梁上部構造への第 1 固定部の間に継手を有さない無継手管路を対象として，挙動解析を行った．**図-6**，**図-7** に示す入力波形では，橋軸方向への入力が過大であり，継手を有さない構造の場合には座屈が生じると考えられる．そこで，橋梁上部構造への第 1 固定部に管軸方法への伸縮継手ならびに可とう継手を付与した構造を対策案として，管路の構造による応答値の比較を行った．

解析ケースを**表-2** に示す．ケース 1 は左端固定で右端は回転拘束状態で変位入力を行っている．これに対して，ケース 2～ケース 5 は，右端に伸縮継手を配置している．この伸縮継手は，引張り方向には十分な伸び出し余裕を有し，押込み方向には表中の図に示す L だけの余裕を有するものである．したがって，右端への入力波形は，それぞれ**図-8** に例示するように，伸縮継手による管軸方向（x 方向）入力の低減効果を考慮したものへと変換している．

ケース 6，7 はケース 5 の伸縮継手に加えて，屈曲可とう継手を配置したモデルである．屈曲可とう継手は，完全なヒンジとして機能するものと仮定し，ケース 6 では右端の中央節点のみに変位を与えている．これにより，右端に伸縮・可とう継手を配置した入力条件を与えている．

表-2　一体構造管路とその対策管路の解析ケース

構造	No.	構造図（全長 2212mm）
一体構造	ケース 1	xy固定，xy入力
伸縮継手構造	ケース 2	L=75mm，xy固定，xy入力
	ケース 3	L=100mm，xy固定，xy入力
	ケース 4	L=150mm，xy固定，xy入力
	ケース 5	L=250mm以上，xy固定，xy入力
伸縮屈曲継手構造	ケース 6	L=250mm以上，xy固定，ヒンジ，xy 入力
	ケース 7	L=250mm以上，ヒンジ，xy固定，ヒンジ，xy 入力

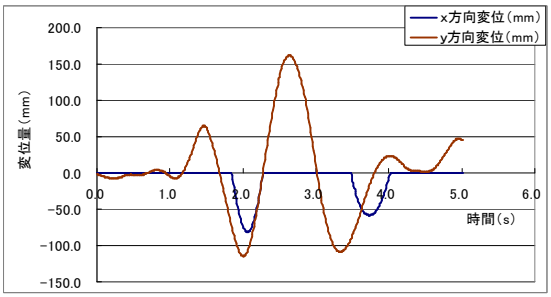

図-8　75mm 伸縮継手を模擬した入力波形

ケース 7 では，これに加えて左端（橋台への固定部）にも可とう継手を配置することを模擬するために，左端の中央節点のみを拘束し，ヒンジ状の拘束条件を与えている．

なお，今回の解析では鋼管材料の弾塑性挙動は考慮されておらず，**表-1** に示す諸元を持つ線形材料としてモデル化を行っている．

b) 解析結果

応答値は，**図-9** に示す管中心軸に沿った 5 点（RES1～RES5 の赤○位置）の x 方向・y 方向変位量と PRES1～PRES5 と記す各断面（黄色の断面）での軸ひずみおよび曲げひずみの時刻暦を調べた．

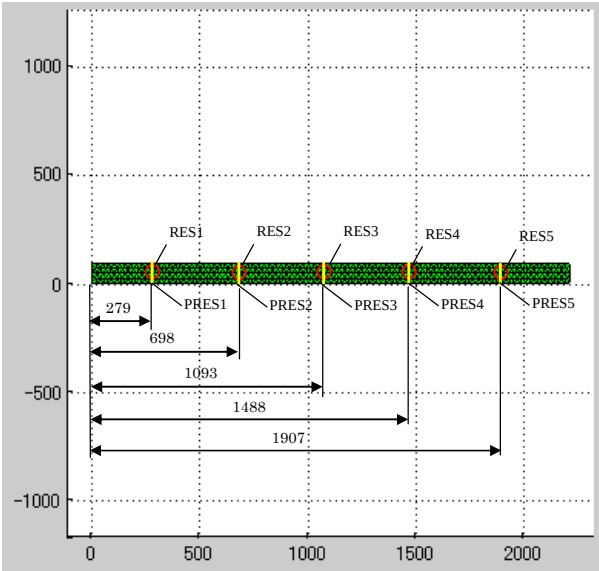

図-9　応答値を求めた断面

①ケース 1 の解析結果：

0.5s ごとの変形を**図-10** に示す．図中の緑が元の管路で，青が変形状況を示している．図から明らかなように，過大な軸方向変位入力によるはらみ出しが生じ，時刻 2.7sec で発散してモデル全体の変位が無限大となった．DEM 解析において発散が生じるのは，計算のタイムステップが粗い場合であるが，本研究では Hassani[5] の推奨によるクリティカルタイムステップの 0.5 倍としており，10^{-7}sec 程度と十分に細分化されている．また，通常の DEM の発散現象では個々の要素が分離して飛散するが，本解析ではモデル全体が消失している．したがって，これは管軸方向への過大な強制変位入力による運動エネルギー，弾性ひずみエネルギーの蓄積によるモデルの飛散であると考えられる．このことは，最大の軸ひずみが 70%にも達しており，2.0sec で大きな曲げ変形が生じていることからも推察される．

このように，無体策で鋼管に過大な軸変位が入力されると，座屈モードでの変形が生じ，実際には固定部が損傷して管路が落下するか，塑性変形が生じると予測される．兵庫県南部地震時には，実際に添架ライフラインが落下した事例もあり，管軸方向および管軸直角方向への変位吸収性能を付与することが重要であることが示唆される．

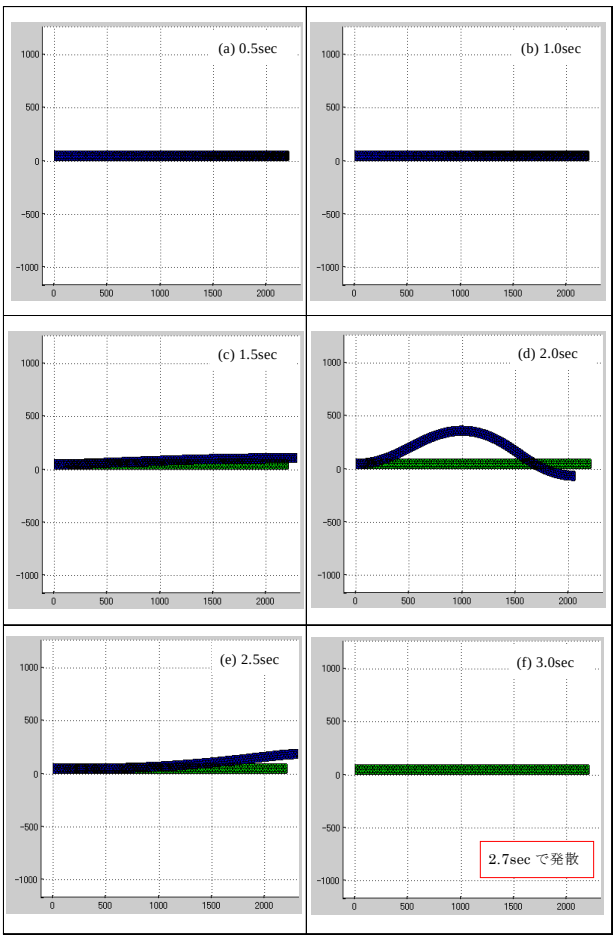

図-10　ケース1（一体構造）管路の変形

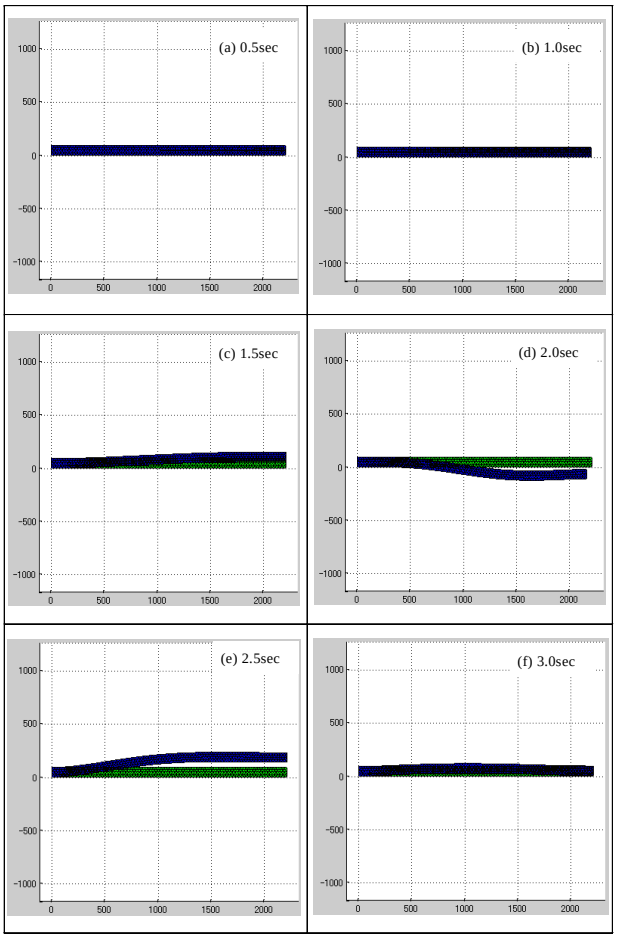

図-11　ケース3(L=100mm)管路の変形

②ケース 2～5 の解析結果：

伸縮継手の伸び出し方向には，十分な余裕がある構造として，継手部で離脱が生じないようにする必要がある．しかし，経済性と施工性を勘案すると伸縮継手の全長は短いほうが有利である．そこで，押込み方向の余裕長として 75mm，100mm，150mm および 250mm 以上（完全伸縮）の 4 種類を想定して，ケース 2～ケース 5 の解析を行い，各々の応答値を比較することとした．

容易に想像できるように，第1固定部に設置する伸縮継手の押し込み余裕を長くするほど，上記のような座屈状の変形が解消される．**図-11**はケース3（L=100mm）の場合の0.5sごとの変形を示しているが，管路の変形は両端固定ばりの曲げ変形に近付いている．

図-12～図-15は，PRES3位置での軸ひずみと曲げひずみの時刻歴を示している．押し込み余裕が少ない場合，押し込み変位が入力される際に軸ひずみが増大するが，同時に曲げひずみも増大しており座屈モードでの変形が生じていることが分かる．また，押し込み変位入力を低減することで，管体に生じるひずみ値も低下している．したがって，右端の第1固定部には十分な伸縮余裕を有する伸縮継手を配置することで，適切な対策管路が構築出来ると考えられる．

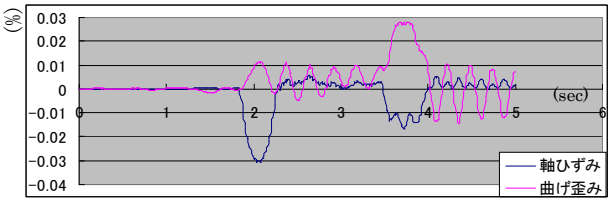

図-12　ケース2管路のPRES3位置でのひずみ応答

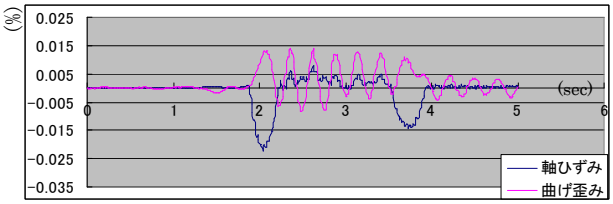

図-13　ケース3管路のPRES3位置でのひずみ応答

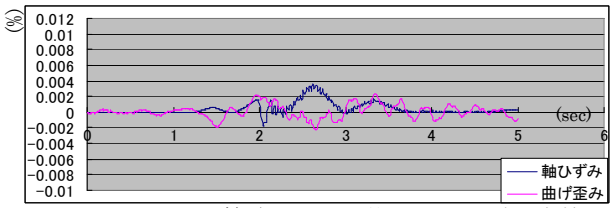

図-14　ケース4管路のPRES3位置でのひずみ応答

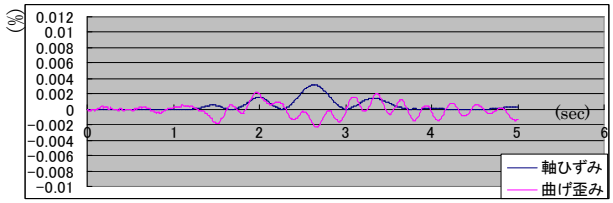

図-15　ケース5管路のPRES3位置でのひずみ応答

③ケース 6，7 の解析結果：

前節の検討の結果，橋梁添架管路の当該部分については，第 1 固定部に伸縮継手を配置することで座屈モードでの変形が抑止され，管体ひずみの低減効果が得られることが明らかとなった．一方，免震構造ビルに接続される配管系では，1 章で述べたように可とう継手を配置して，曲げ変形性能の向上が図られている．

そこで，本節では伸縮継手に加えて曲げ可とう性のある継手を配置した場合の効果について検討した．可とう継手の効果は，**表-2**中の図に示したように，その位置をヒンジ状の固定条件とすることでモデル化した．

図-16，**図-17**および**図-18**はそれぞれケース5，ケース6およびケース7のRES3位置での変位応答を，**図-19**，**図-20**および**図-21**はPRES3位置でのひずみ応答を示している．

右端の伸縮継手部にのみ可とう継手を配置したケース6の場合，伸縮継手のみを配置しているケース5と殆ど変らない変位応答，ひずみ応答を示している．変位の応答を見ると，y方向入力変位に対応した挙動を示しており，管路固有の震動は低減されている．

一方，ケース 7 の変位応答は，ケース 5，ケース 6 と比較すると，応答周波数はケース 5，ケース 6 と同様に y 方向入力変位の周波数に対応した挙動を示しているが，やや異なる波形を示している．ひずみの応答についても，ケース 5，ケース 6 管路と比較すると，管体中央部である PRES3 位置で曲げひずみが逆に増大している．したがって，両端をヒンジとした場合には，曲げ方向への変形拘束が少なくなるため，管路の固有の震動が生じやすくなり，逆に管路中央部での変位が増大することが考えられる．このことは，当該管路部分に可とう性を付与する場合に，十分な注意が必要であることを示唆している．

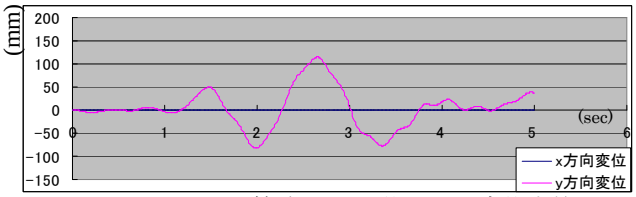

図-16　ケース5管路のRES3位置での変位応答

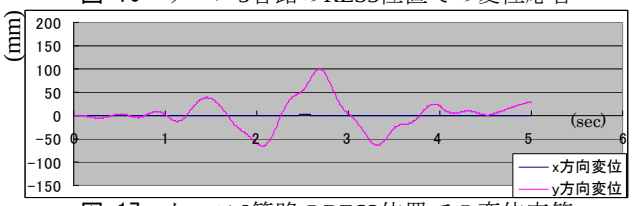

図-17　ケース6管路のRES3位置での変位応答

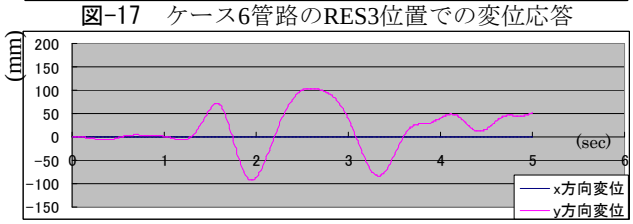

図-18　ケース7管路のRES3位置での変位応答

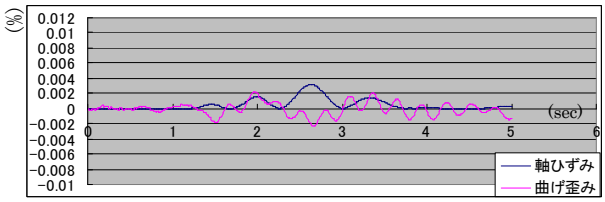

図-19　ケース5管路のPRES3位置でのひずみ応答

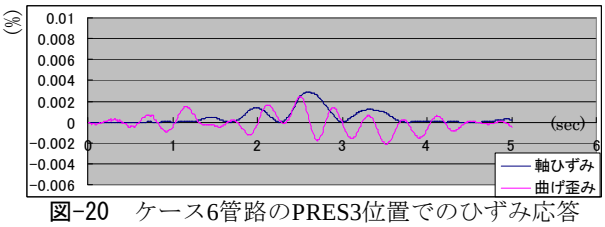

図-20　ケース6管路のPRES3位置でのひずみ応答

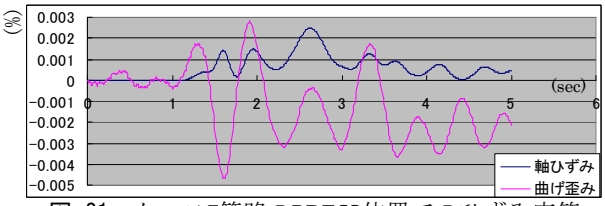

図-21　ケース7管路のPRES3位置でのひずみ応答

(2) 継手構造管路の挙動とその対策

a) ねじ継手の被災事例と解析の目的

写真-1は地上配管された通信用ねじ継手管路のねじ部破損事例である．このように，ねじ継手部は鋼管本体よりも変形性が高く，脆弱であり破損しやすい．この事例では，内部のケーブルには損傷はないが，ねじ部が破損・分離した状態で過大な変位入力を受けると内部のケーブルが破損することが予測される．したがって，当該継手部では，たとえねじ部が損傷した場合であっても，分離が生じないような離脱防止機構を付与する必要があると考えられる．本節では，ねじ継手部の強度や変形特性を表すための有限要素のプロパティを設定し，その破壊挙動を把握する．また，ねじ部に付与する離脱防止機構に求められる強度について，解析により明らかにする．

写真-1　空中配管でのねじ継手部の破損事例

b) ねじ継手のモデル化

通信用鋼管のねじ部特性値としては，管軸方向引張り・圧縮時の破壊荷重約 201000N と，約 20cm の供試体を用いた場合の破壊時変位約 1.1 mmという情報しか得られていない．そこで，**図-22** に示すモデルを用いて，下記の手順でねじ部 FE の等価弾性

係数 E'と破壊ひずみ ε_{cri} を算定した．

まず，適当な 3 つの条件の E'と ε_{cri} を与え，モデルに軸方向引張り変位を作用させ，破壊時荷重（左端反力：F）と破壊時変位（右端変位：δ）を計算する．得られた結果は**図-23** 中の 1～3 プロットである．

次に解析結果により得られた E', ε_{cri} と F,δ の関係を線形回帰し，次善の E'と ε_{cri} を設定し再解析を行う．再解析により新たに得られたデータを加えて再度線形回帰し，次善の E'と ε_{cri} を設定する．この作業を繰り返すことで，**図-23** に示す実強度特性を表す E'と ε_{cri} の組み合わせを算出した．得られたねじ部の等価弾性係数は E'=4221.5N/mm^2，破壊時ひずみは ε_{cri} =3.66%である．

図-24 は，本条件を**図-22** のモデルに適用し，右端に軸方向引張り・圧縮変位を作用させた場合の右端変位（入力変位）と左端反力の関係を示している．

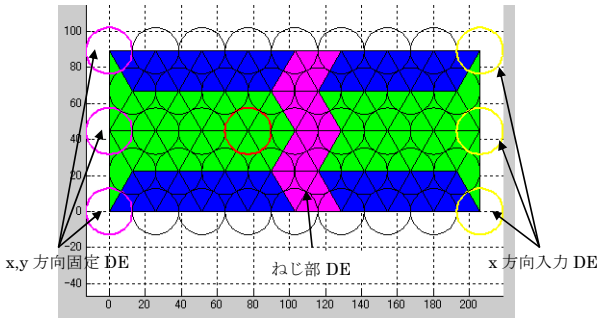

図-22　ねじ継手部のみの解析モデル

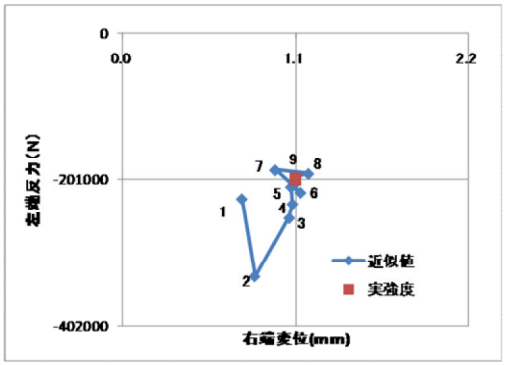

図-23　左端反力と右端破壊時変位の関係

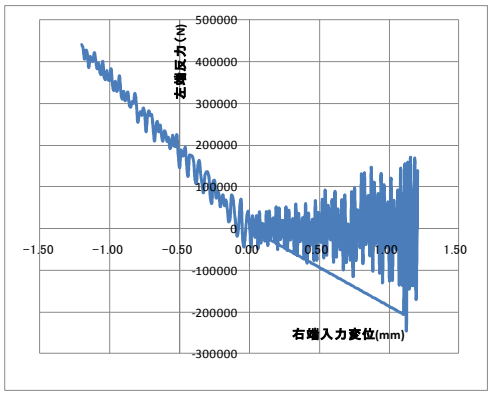

図-24　ねじ部引張破壊解析結果

右端を引張ると，反力は一定の勾配で上昇し，設定どおりに左端反力(201000N)，右端入力変位(1.1mm)で破壊が生じる．その後，圧縮変位が入力されている間，分離した管体部分の振動の影響で，左端反力がゼロを中心として大きく振動している．右端入力変位が 0mm となると，破壊した個別要素の再接触が生じるため左端反力が一定の勾配でマイナス方向に増加している．圧縮・再接触後の変化勾配が最初の引張り時の勾配よりも高いのは，柔らかいねじ部 FE が破壊によって消失するためである．

c）無対策ねじ継手管路の挙動解析

解析は，**図-25** に示すように，前節での無継手管路のモデルの内，黄色の FE をねじ特性を有する要素としたものとした．右端は前節で述べたケース 5 の伸縮継手が付与されているものとして，右端には y 方向（管軸直角方向）にのみ**図-6** に示す変位を入力した．

0.5sec 間隔での変形状況を**図-26** に示す．本図から明らかなように，時刻 1.5sec でねじ継手部が破壊し，その後左端の管が分離して大きな相対変位が生じている，通常の DEM の発散現象では個々の要素が分離して飛散するが，本解析ではねじ部のみが破壊しており，発散は生じていない．

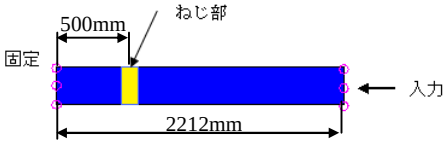

図-25　ねじ継手を有する管路のモデル

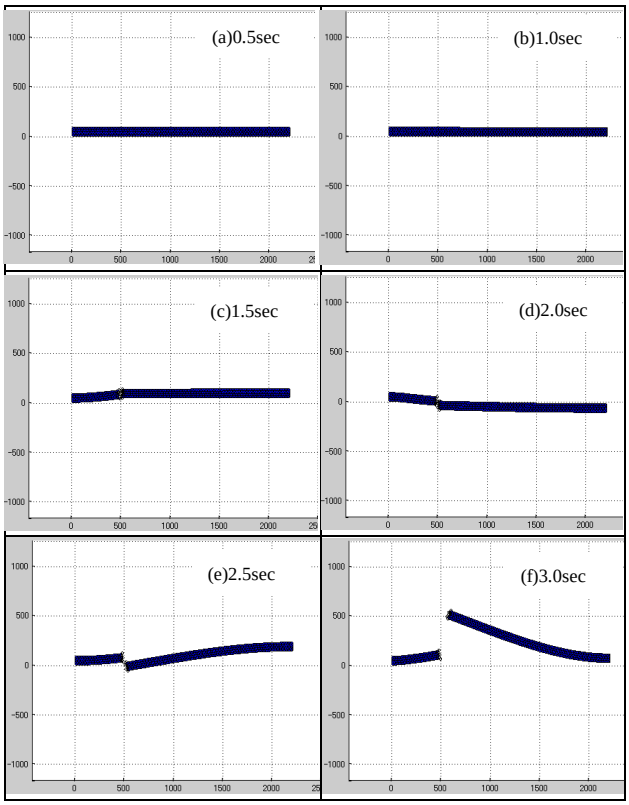

図-26　ねじ継手管路の破壊挙動（右端伸縮継手）

このように，ねじ継手部に対策を施さないと，管路の橋梁上部構造への第１接続部（解析モデルの右端）に十分な伸縮継手を配置しても，ねじ部で破壊が生じ，実際にはケーブルが損傷して通信機能が損なわれると予測される．

d）ねじ継手部・離脱防止管路の挙動解析

通信ケーブルの破断を防ぐためには，上部構造への第1固定部に250mm以上の伸縮を与え，さらにねじ継手部には破損しても分離しないような離脱防止構造を付与する必要がある．離脱防止装置の構造案を**図-27**に示す．またその解析モデルを**図-28**に示す．図中の紫の要素は，ねじ部剛性を有する要素であり，青色の個別要素は左右をつなぐ結節点であり，これが**図-27**に示す離脱防止装置を表している．**図-25**に示したモデルのねじ部をこのような構造に変更し，ねじ固定部に作用するx方向，y方向力の時刻暦を調べた．

結節点に作用するx方向力，y方向力の時刻暦を**図-29**に，0.5s間隔での管路の変形挙動を**図-30**に示す．結節点に作用する最大力は，x方向（離脱防止構造の軸方向）で5000N未満，y方向（離脱防止構造のせん断方向）で最大8200Nである．材質を鋼（許容引張り応力度=140N/mm^2，許容せん断応力度=80 N/mm^2）とし，丸棒であると考えた場合に必要な直径はφ11.5mmとなるため，十分に実用的な構造であると考えられる．

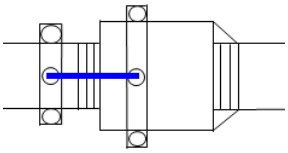

図-27　ねじ部離脱防止装置の構造案

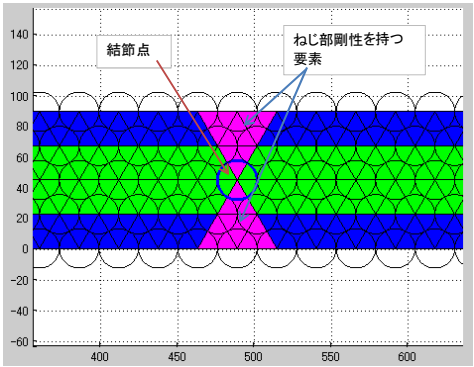

図-28　離脱防止構造を有するねじ継手部の解析モデル

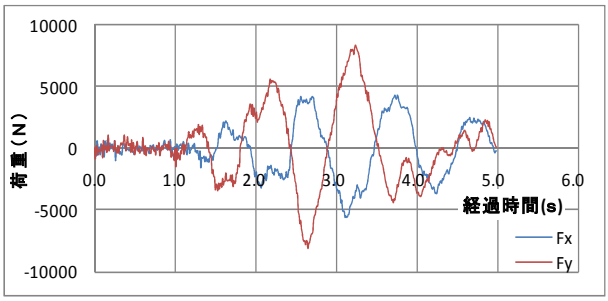

図-29　離脱防止構造に作用する力の時刻暦

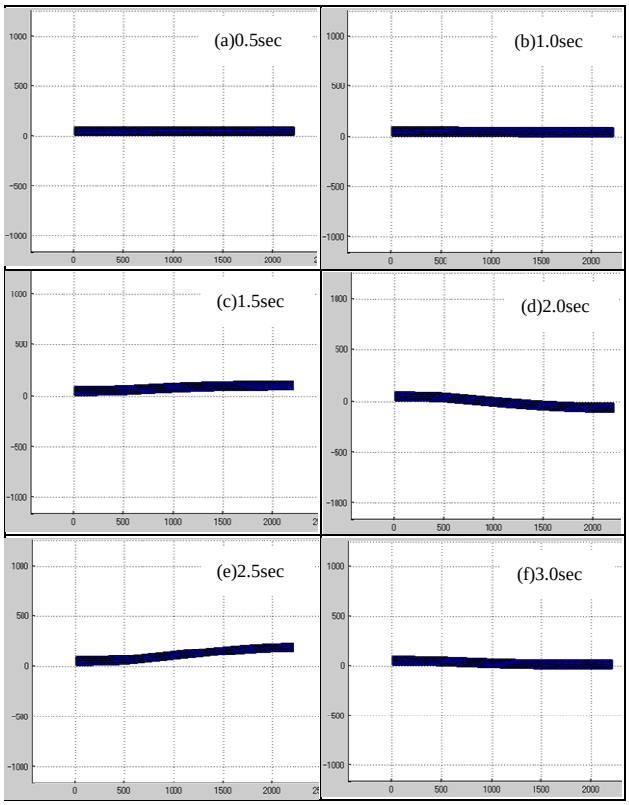

図-30　離脱防止付ねじ継手管路の挙動
（右端伸縮継手）

４．まとめ

河川横断橋梁の免震化に伴い，そこに添架されるライフライン系には過度の管軸方向・管軸直角方向変位が作用すると考えられる．本研究では，通信ケーブル保護管（鋼管）を対象として，免震化橋梁で予測される橋台と橋梁上部構造間での過大な相対変位に耐えうる管路構造を提案すべく，FEM-DEM結合解析により管路の大変形・破壊挙動を調べた．得られた結果と今後の課題を以下に要約する．

① 最も大きな相対変位が作用すると考えられる橋台と橋梁上部構造への第1固定部間の管路では，第１固定部に十分な伸縮余裕を持つ伸縮継手を配置することで，管路の軸力が低減されるため，管体のひずみは耐震設計上の許容ひずみ以下に抑えることが可能である．

② 当該管路部に，脆弱なねじ継手が存在する場合の挙動を明らかにするために，ねじ部FEに与えるべき等価弾性係数E'と破壊ひずみε_{cri}を算定した．その結果，ねじ部の破壊強度と破壊時伸びを実験値に整合させることが出来た．

③ 上記ねじ継手を有する管路を対象とした応答解析を行ったところ，橋梁への第１固定部に伸縮継手を配置しても，ねじ部が破損・分離し，管路ないのケーブルが損傷するとの結果を得た．

④ そこで，ねじ部の分離を防止する離脱防止構造を考え，その機構をFEM-DEM結合解析で表現

するためのモデル化を行った．その結果，離脱防止構造に作用する軸力は5000N未満，せん断力は最大で8200Nであり，離脱防止構造として十分に設計可能な荷重であることが明らかとなった．

⑤ 本研究で行った種々の継手特性のモデル化は，現状の解析方法を活用するための簡易的な方法であり，継手特性の非線形性などを考慮することは出来ない．今後は，中間継手を表現するための要素を開発し，同種の問題に対するFEM-DEM結合解析法の適用拡大を進める所存である．

謝辞：本研究の推進にあたっては，（財）近畿建設協会様からの研究助成を受けた．NTTインフラネット（株）の田中宏氏からは，免震構造橋梁の応答変位データを頂いた．ここに記して御礼申し上げる．

参考文献

1) 加藤忠司， 水野吉章， 佐々木一博：免震建物に用いる設備配管の性能確認実験，日本建築学会学術講演梗概集(東北)， pp.759-760，2000.
2) 新田康男， 須原淳二， 花村正樹：免震用渡り配管の変形能力試験，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，1996.
3) 田中宏司， 鈴木崇伸， 岩田克司， 山崎泰司：通信管路の免震橋梁への添加方法に関する研究，第30会土木学会地震工学研究発表会論文集pp.1，2009.
4) 片桐　信，高田至郎：連続体破壊解析のためのFEM-DEM結合解析法の提案，土木学会論文集　No.780/Ⅰ-70,pp.15-25,2005.
5) Hassani, N.: A Study on Development of Distinct Element Algorithm for Fracture Analysis and Failure Monitoring of Structural Media under Dynamic Loads, Dissertation for Ph.D, Kobe University, 1997.

LARGE-SCALE SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF A PIPELINE HANGING ON A BASE-ISOLATED BRIDGE USING THE FEM-DEM COMBINED METHOD

Shin KATAGIRI, Takanori HARADA

The present paper examines the applicability of the FEM-DEM combined method for the large-scale seismic response analysis of a pipeline hanging on a base-isolated bridge. In particular, the seismic response analysis of a steel pipeline used as a telecommunication cable conduit was conducted and its dynamic large deformation and fracture behavior was determined. From the analysis results, an effective countermeasure is proposed, which involves the use of an expansion joint and a separation preventer at the screw joint of the steel pipeline.