

ライフラインへの耐震投資の一評価法

熊本大学工学部 正会員 秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 正会員 湊田 邦彦
 熊本大学工学部 正会員 松本 英敏
 熊本大学大学院 学生員 前田 修一
 熊本大学工学部 日野 章

1.はじめに 地震外力に対する施設(ライフラインネットワーク)の耐震レベルを高くするには、多大な建設費用(初期投資)が必要となる。しかし、耐震レベルが高い場合には、被害を受けることも少なく、復旧に要する費用(復旧投資)がわずかで済むことは容易に想像できる。耐震レベルと費用の関係りは、図1のように描けるので、両者の和はある耐震レベルで最小の値をとることになる。そこで、本研究では、ライフラインネットワークをモデル化し、地盤の応答を重複反射理論により求め、数量化理論第一類を用いて導いた予測式を適用することによりシステムの地震時の被害を求め、これよりシステムの信頼性をモンテカルロ法を用いて検討し、各節点間の連結・非連結や節点の断水確率を算定する。このモデルに対して、初期投資として地盤改良、管路改良を考慮して、初期投資、復旧投資、総投資とシステムの信頼性との関連について考察する。

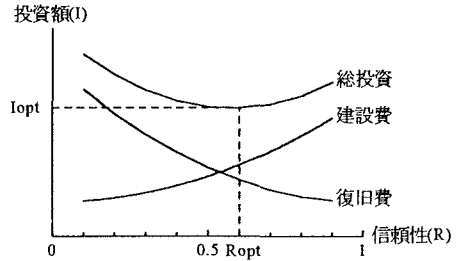


図1 信頼性と費用投資の関係

2.地盤応答解析と地盤改良効果 想定する地盤に、1次元全応力解析プログラムSHAKE²⁾を用いて、表層での応答加速度が、震度V,VI,VIIとなるように、基盤から加速度(神戸NS成分)を入力し、表層の加速度応答、液状化指数PLの算出を行った。また、地盤改良については、パイプラインの被害と液状化発生の有無に密接な関連があることから、サンドコンパクションパイル工法を採用し、その打設締固過程をシミュレートするプログラムWAP3³⁾により、地盤改良効果を算出した。

表1 カテゴリー数量

アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量
震度	V(80~250gal)	0.301
	VI(250~400gal)	2.331
	VII(400gal~)	23.292
地盤種別	1種	1
	2種	12.61
	3種	12.8
液状化	顕著	1
	若干	0.732
	無し	0.137
管種	鋼鉄管	0.517
	ダクタイル鋼鉄管	0.065
	銅管	0.045
	石綿セメント管	0.676
	塩化ビニール管	0.046
管径	50~125mm	1
	150~300mm	0.446
	350~600mm	0.052
	700mm~	0.012

3.被害予測式 数量化理論第I類⁴⁾を用い、過去の地震被害例を基に、地下埋設管の地震被害に影響を与える要因として、地盤の影響(グループ1)、管路の影響(グループ2)に分け、それぞれのグループのアイテムについてカテゴリー数量を求め、最終的にある重みを持って結合し、被害率(箇所/km)を算出した。各アイテムのカテゴリー、カテゴリー数量は、表1に示す。

4.モンテカルロ法によるネットワークシステムの信頼性の評価 モデルの地盤特性を考慮するために、地盤を格子状に分割し、管網をノード i,j とリンク L_{ij} より構成されるシステムにモデル化する。リンクの破壊は、ポアソン過程であると仮定すれば、 $L_{i,j}$ 間で n 個の破壊が生じる確率は、 $f_{ij}(n, e_{ij}) = \exp(-e_{ij}) \cdot e_{ij}^n / n!$ であり、従って L_{ij} が破壊しない確率は $n=0$ とにおいて、 $f_{ij} = \exp(-e_{ij})$ となる。この非破壊確率、 f_{ij} を用いて、ノード l,m 間が破壊していない確率、すなわち連結確率 f_{lm} をモンテカルロ法⁵⁾により算定する。これよりすべての水源地との非連結確率 $f_{plm}(=1-f_{lm})$ の積として、各節点の断水確率が求まる。なお、本研究では、システムの耐震性を表す指標として、その信頼性を $R = 1 - (\text{ネットワーク全ノードの断水確率の平均})$ と定義した。

5.解析モデル 今回解析に用いたネットワークモデルを図2に示す。このモデルは16の地盤メッシュ上に、42個のノードと64のリンク、3個の水源地で構成されており、全地盤における液状化可能性のある地盤面積割合をもって、次のようにモデル分類をしている。(Model1:100%、Model2:75%、Model3:50%、Model4:25%)な

お、管路については、鑄鉄管で、管径を 400mm とした。

6.投資曲線 図 1 において、建設費は初期投資曲線となり、液状化対策としての地盤改良の費用とする。復旧費としては、被害箇所を修復する費用である復旧投資曲線と、システムダウンによる損失曲線とから成るとする。企業活動停止による損失をシステムダウンによる損失とし、(企業生産活動費/日)×(断水確率)×(復旧日数)により定義する。このとき、復旧日数に関する回帰式は図 3 に示すが、これは阪神淡路大震災のデータも含む、計 5 個の地震被害より抽出したものである。なお、総投資曲線は上記三つの曲線の和でもって表される。

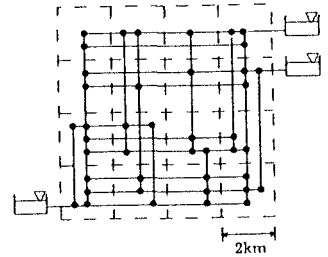


図 2 解析モデル

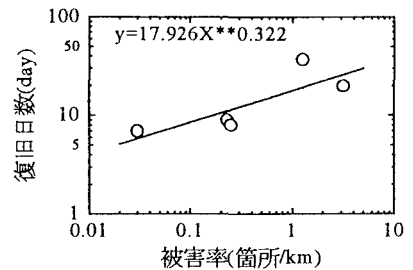


図 3 被害率と復旧日数

7.解析結果 Model2 に関する解析結果を図 4 に示す。地盤改良の効果による液状化の低減により、震度 V、VI については、信頼性の飛躍的向上が確認できるが、震度 VII については、それほど信頼性の向上につながらない。これは地盤の液状化は地盤改良によって防止できるが、あるレベル以上の地震力に対しては、液状化以外の要因が大きく作用すると考えられる。そこで地盤改良と平行して、慣性力を低減する工法や管路自体も改良する必要があると考えられる。しかし震度 VII においても、地盤改良に伴う信頼性の向上とともに総投資額は減少していることがわかり、経済投資的にみて、地盤改良が有効であることが理解できる。今回の解析で、総投資曲線について、震度 V でなだらかな

右上がり、震度 VI ではほぼ水平、震度 VII では急激な右下がりの傾向がみられた。次に震度 VII について、各モデルでの最適総投資額(総投資額が最小)をプロットしたものを図 5 に示す。これより液状化地盤の割合が、最適投資額と密接な関連があることが分かる。

8.まとめ 本研究では、ライフラインネットワークへの地震の影響を、地震応答解析とモンテカルロ法を用いたネットワーク信頼性解析により、経済投資という観点よりアプローチしたものであり、地盤改良(初期投資)が、ネットワークシステムの信頼性向上と総投資額の抑制に、非常に有効であることを示した。また、震度 V、VI については、液状化防止、震度 VII については、そのほかの要因の影響を低減することが必要であることを示した。なお、管路改良等の効果については講演時に発表する予定である。

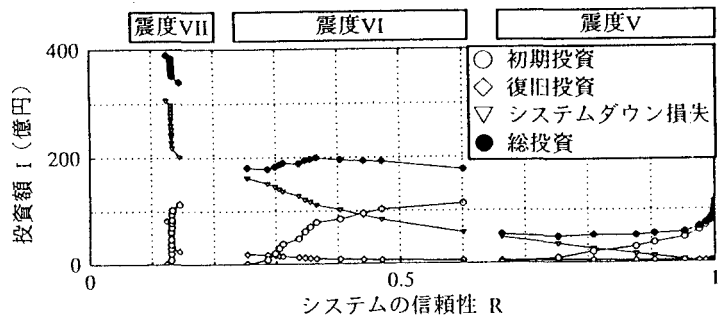


図 4 投資曲線(Model2)

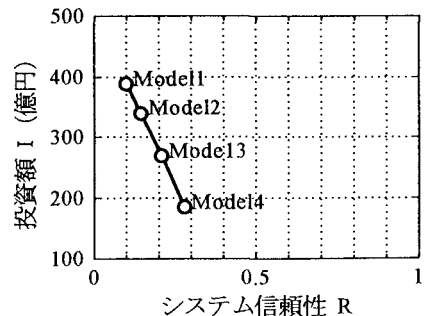


図 5 最適投資 (震度 VII)

参考文献
 1)高田至郎：ライフライン地震工学、共立出版、pp.183～pp.187、1991
 2)Schnable,P.B.,Lysmer,J.&Seed,H.B.,"SHAKE.A COMPUTER PROGRAM FOR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF HORIZONTALLY LAYERED SITES",*EEERC report, No.EERC-72-12*,1972.
 3)Akiyoshi.T. et al,*Proc.9JEEES*,pp.949-954,1994
 4)河口至商：多変量解析入門 I、森北出版、pp.95-105,1991
 5)田村重四郎・川上英二：モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法、土木学会論文報告集、第 311 号、pp.37-48,1981