

(136) ライフライン地震工学のための鉄道システムのモデル化

㈱中央復建コンサルタンツ 沢野嘉延
京都大学防災研究所 亀田弘行
京都大学大学院 能島暢呂

1 はじめに

大都市圏における人々の生活は、各種ライフラインシステムに大きく支えられている。ライフラインとは、電力、ガス、上下水道、道路、鉄道、通信などの施設のことであり、それらに共通する要素としては、①都市基盤施設である。②輸送伝達手段である。③ネットワークを形成している。が挙げられる。

一方、このようなライフラインの地震被害については、1971年のサンフェルナント地震以来、注目され始め、ライフラインを構成する個々の要素の耐震性に関する研究と、ライフラインのシステムとしての信頼性に関する研究という二つの側面からの研究が進められ、ライフライン地震工学として発達してきた。

我が国においても、都市の耐震安全性が向上するに従い、都市基盤施設の耐震信頼度に対する要求水準が高まり、特に、1978年の宮城県沖地震を契機として、ライフライン地震工学の発展が見られた。

こうした状況下で、都市ライフラインとして重要な役割を担っている鉄道システムについて、ライフライン地震工学の観点に立つ研究は、他の諸施設と比較して、少ないのが現状であり、都市総体の耐震性向上の観点から、十分な取り組みが行われるべきであると考えられる。

そのための第一歩として、本研究では、鉄道システムの地震時信頼度を総合的に評価するためのシステムモデルの同定を行った。また、このシステムモデルを用いて、ISM (Interpretive Structural Modeling) の手法で地震時の被害波及の様相を分析し、さらに、地震時の被害発生における因果関係の連鎖構造をFT (Fault Tree)によって分析した。

2 過去の鉄道地震被害

過去の地震により鉄道が受けた被害については、盛土（路盤）の被害が最も多く生じており、この被害は、地震動や地盤条件だけではなく、地震発生時までの降水状況とも大きく関係している。特に、橋台裏の盛土の被害が多く生じているのは、コンクリート構造物である橋台と地盤上に築かれた盛土との相対的な沈下が原因である。また、橋梁やトンネルの被害は、設計基準が明確であること等により、件数としては少ないが、一旦ある程度以上の被害が生じれば、その復旧には長期間を要する。さらに、復旧に長期間を要する被害ではないが、架線金具が外れたり、線条類が断線するといった電気施設の被害も多く生じている。また、保守作業省力化や乗り心地の向上などのために近年進められているレールのロングレール化は、軌道の座屈などが生じる原因の1つになっている。

過去の地震被害において、以上のような事実を理解することは、システムモデルを同定する際やそのシステムモデルを用いて信頼度評価を行う際において、さらに、施設の耐震性向上の施策を行う際においても、必要不可欠である。

3 鉄道システムのモデル化

鉄道システムのモデル化に際しては、典型的な都市系郊外型鉄道を例にとり、その構成要素が表-1に示すような列車走行システム、CTCシステム(centralized traffic control)、信号情報システム、き電システム、CSCシステム(centralized substitution control)、配電システムの6つのサブシステムからなる場合を考えた。その結果、鉄道システム全体は、図-1のようなモデルで考えることができ、各サブシステムは、互いに独立ではなく、ノードやリンクによって、互いに密接に結び付いていることが分かる。

また、CTCシステム、信号情報システム、CSCシステムは列車走行システムやき電システムが安全または効率的に機能するためのサポーティングシステムと考えることができ、列車の高速・高密度運転が安全に行われるためには、不可欠であると考えられる。

表-1 各サブシステムの内容

列車走行システム	列車とその走行を直接支える構造物とを合わせた最も基本的なシステム
CTCシステム	中央制御所が広範囲の区間のポイントを、ケーブルを通して遠隔制御するシステム
信号情報システム	列車自体が信号機に、レールやケーブルを通してその存在を伝えるシステム
き電システム	変電所から列車に、き電線を通じて電力を送るシステム
CSCシステム	中央制御所が変電所を、ケーブルを通して集中管理するシステム
配電システム	変電所から電力を必要とする施設や装置に、配電線を通じて電力を供給するシステム

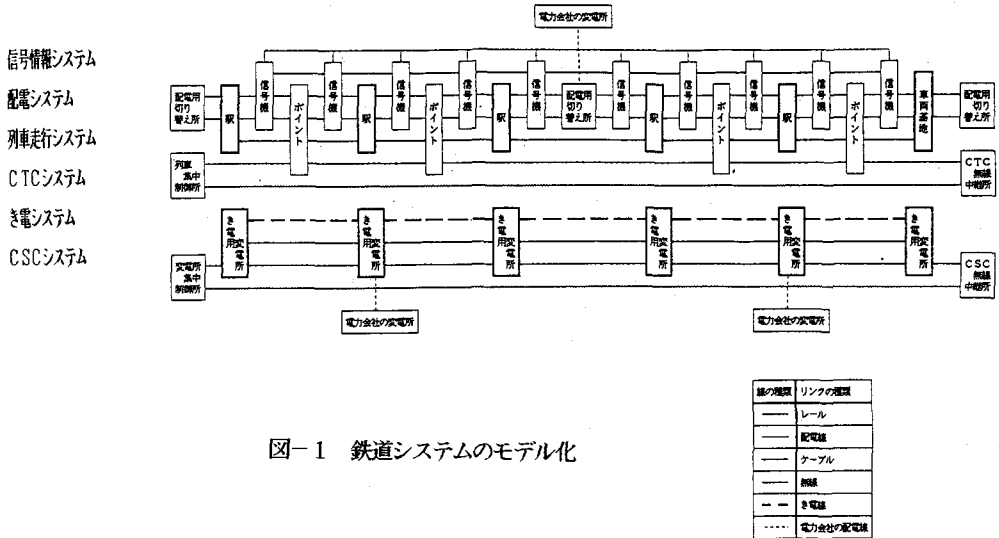


図-1 鉄道システムのモデル化

4 ISMによる地震被害波及の解析

過去の鉄道地震被害を詳しく調査することにより、表-2に示すように、被害に関係のある項目を初期条件、物理的な被害、機能的な被害、人的な被害に分けて抽出した。また、ここでの分類は、以下のような考えのもとで行った。

1) 初期条件 : 鉄道システムの構成要素以外で、被害に関係するもの。

- 2) 物理的な被害：鉄道システムを構成する施設が、損傷、倒壊などの物理的な損失を受けること。
- 3) 機能的な被害：鉄道システムを構成する施設が、その施設が持つ本来の機能を発揮できなくなること。

例えば、ある施設に物理的な被害が生じなくても、他の施設やシステムの機能被害によって、その施設が持つ本来の機能が発揮できなくなることを行い、逆に、ある施設に物理的な被害が生じても、その被害が軽微であったり、バックアップ機能などを備えておれば、その施設自体やその施設を含むシステムには、機能被害が生じないことも考えられる。

- 4) 人的な被害：鉄道システムに含まれる人間が、危害を受けること。

その後、各項目ごとに、その項目が被害を受けた時に、影響を及ぼす、すなわち被害波及する可能性のある項目（影響項目）を設定し、ISM解析を行った。

その結果、図-2に示すように、これらの項目を階層構造で表すことによって、鉄道システムにおける地震時の被害波及形態の全体像を明確にした。例えば、被害が広範囲に拡大する可能性のあるものとしては、路盤(6)や路盤支持構造物(5)の被害を、また、被害の拡大を促進する可能性のあるものとしては、軌道(7)やトラフ(26)や支持物(17)の被害を挙げることができる。さらに、配電システム(48)の機能被害は、他のすべてのサブシステムの機能被害に波及する可能性のある。

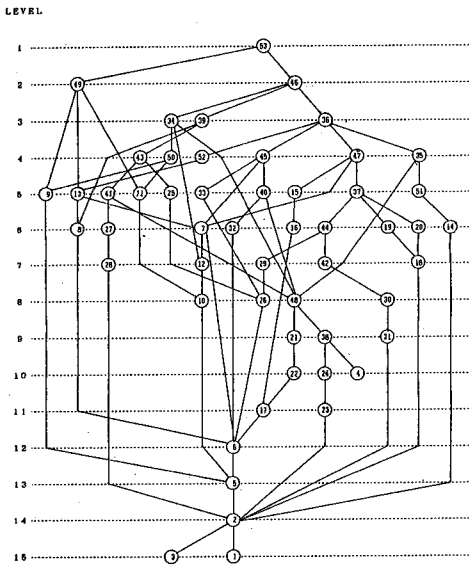


図-2 ISM解析結果(多階層有向グラフ)

5 機能被害に関するFTの作成

ISM解析結果を参考にし、ある特定の被害形態に注目して、FTを作成することによって、地震時における種々の被害発生因果関係の連鎖構造を分析することができる。

ここでは、その例として、車両の機能被害とCT

表-2 被害に関係のある項目とその影響項目

項目	影響項目	
初期条件	1 地震動	2 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 28 31 32
	2 地盤破壊	5 9 10 12 14 18 23 28 31
	3 気象条件	2 5 6
	4 電力会社による配電	37 38
物理的な被害	5 路盤支持構造物	6 9 10 12
	6 路盤	7 8 17 26 32
	7 軌道	13 45 46 47
	8 ボイント	13 39
	9 信号機	34 43 50
	10 プラットホーム	1 11 12 14 45 50
	11 プラットホーム上屋	34 43 50
	12 降電線	7 34 49
	13 風河	36 49 52
	14 車両基地構造物	35 51
	15 駅 駅舎	47
	16 駅 加圧金具	15
	17 支持物(柱・土)	15 16 21 22
	18 1線 変電所構造物	19 20 37
	19 1線 変圧器	37
	20 1線 整流器	37
	21 配電線	48
	22 2線 整流金具	71
	23 2線 変電所構造物	24 38
	24 2線 変圧器	38
	25 CTケーブル	43
	26 トラフ	25 28 33
	27 列車集中制御装置	41
28 列車集中制御所	27	
29 CTケーブル	44	
30 列車集中制御装置	42	
31 列車集中制御所	30	
32 信号機	40	
33 制御ケーブル	45	
機能的な被害	34 駅	46
	35 車両基地	36
	36 風河	46
	37 1線 変電所	47
	38 2線 変電所	48
	39 ボイント	46
	40 信号機	45
	41 列車集中制御所	41
	42 列車集中制御所	44
	43 CTシステム	39
44 CSCシステム	37	
45 列車集中制御システム	36	
46 列車集中制御システム	53	
47 電線システム	36	
48 配電(路盤)システム	34 35 39 40 41 42	
人的な被害	49 乗客	53
	50 駅員	34
	51 車両基地従業員	35
	52 列車乗務員	36
機能的な被害	53 配電システム	

Cシステムの機能被害を頂上事象とするFTを作成した結果を、図-3、4に示す。この結果から、次のような考察が行える。

- 1) FT上に被害の程度を表す抑制ゲートが多く表れる。すなわち、地震被害波及を食い止めるには、個々の鉄道施設をどの程度、耐震的に強化すべきかといった相対的判断の重要性を示している。
- 2) 地震被害発生の原因には、地震動以外に地震時の人的要素（操作、判断など）が省略事象として挙げられる。すなわち、地震時を想定したトレーニングなどの行動科学的側面を含む総合的な分析が必要である。
- 3) FT上にANDゲートが、幾つか表れる。すなわち、地震時の被害波及を食い止めるには、個々の施設の強化以外に、冗長性を持ったネットワーク形態にするなどのシステム全体の信頼性を考慮した対策の有効性を示している。

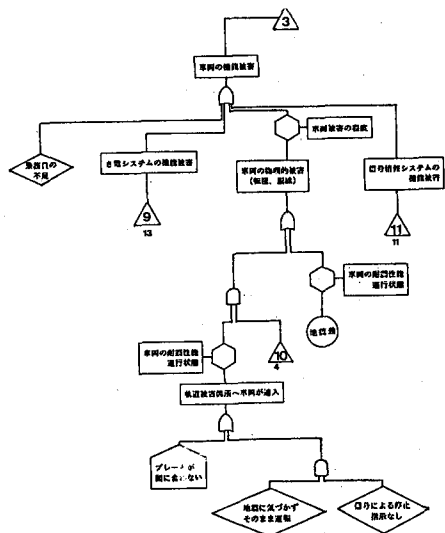


図-3 車両の機能被害を頂上事象とするFT

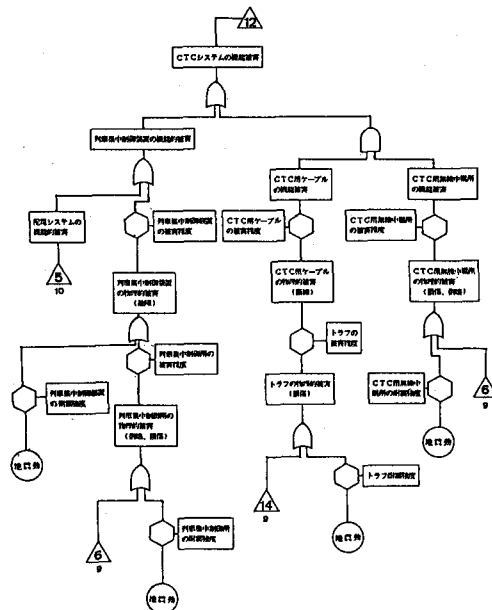


図-4 CTCシステムの機能被害を頂上事象とするFT

6 おわりに

今回は、鉄道システムにおける地震時の被害波及の基礎的分析を行った。今後は、まず、今回の鉄道システムモデルの検証と被害発生波及モデル（Event Tree などによる）の同定とその定量的評価を試み、さらに、上記の行動科学的分析を加えた地震危険度評価モデルを開発していく方針である。また、将来的には、このモデルを利用して、都市鉄道において、設備強化すべき構造物はどれか、また、どの程度設備強化すべきか、そして、設備強化していく優先順位はどうか、といった問題の解決に役立てたいと考えている。

謝辞：本研究の実施に当たり、西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部の技術者の方々から、多くの御教示を頂いた。記して、深謝の意を表す次第である。

- 主な参考文献：1) 能島暢呂・亀田弘行・岩井哲・北原昭男：都市震害のシステム分析モデルに関する基礎的研究、京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告 別冊第1号、1988-4
 2) 吉川和弘：新体系土木工学5 2 土木計画のシステム分析、技報堂、PP. 29~55
 3) 井上威恭：FTA安全工学、日刊工業新聞社