

都市臨海部における地震被害予測のリアルタイム地震防災への適用について

赤倉 康寛¹・一井 康二²・高橋 宏直³・井合 進⁴

¹正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 計画設計基準部 システム研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所 構造部 地盤振動研究室

³正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所 計画設計基準部 システム研究室長

⁴正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 構造部 地震防災研究室長

震災時における港湾の能力を十分に発揮させるためには、各々の港湾施設の地震被害予測だけでなく、港湾地区から市街地中心部に及ぶ都市臨海部全体の施設が、地震によりどのような被害状況に陥るのかを予測するシステムの構築が必要である。このようなシステムは、震災予防計画の検討において有効であるだけでなく、地震発生直後～緊急対応・復旧期においても、地震被害の概況を把握し、緊急対応を行うために有用なものである。以上の点を考慮し、本論文は、GISを用いた地震による港湾施設と道路の簡易な被害予測を行うシステムについて述べたものである。港湾施設については、地震による岸壁の変形量の簡易予測結果から、被害程度を推定した。道路については、沿道建築物による街路閉塞や地盤の液状化の発生を予測した。

Key Words : water front, port facility, geographical information system, damage estimation, quay wall, deformation, street blockage, liquefaction

1. 序論

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、人口140万人余りの神戸市を中心とした地域に大きな被害をもたらした。この地震により、内陸部において建築物や鉄道施設等に大きな被害が発生したのと同様に、臨海部においても、港湾施設、海岸保全施設、臨港交通施設、荷役施設等に甚大な被害が発生した¹⁾。

兵庫県南部地震発生以前の港湾施設や臨港交通施設の地震防災は、耐震設計との概念で括られる部分が非常に大きかった。すなわち、個々の施設の耐震性の確保に大きな重点が置かれており、実際に地震が発生した際に、個々の施設の総体として機能する港湾全体が、どのような被害状態に陥るのか、どれだけの機能が損なわれるのか、については十分な検討がなされてきたと言いき難いと思われる。この点は、内陸部における社会施設においても、事情はそれほど変わらないであろう。

この状況について、(社)土木学会による「第二次提言」²⁾の解説においては、地震防災性の向上に向けての中で、“地震防災面に優れた都市・地域の

形成のためには、各種基盤施設における個々の耐震性能の強化に加えて、都市・地域計画面での対応が重要”とされ、具体的には、都市・地域としての面的な耐震性の向上や施設の物的被害から生じる二次災害や被害の広がりや軽減及び期間の短縮といった点について述べられている。これは、個々の施設の総体である都市としての被害の低減を図ることを目指したものと考えられる。

さらに、“被災後の救援の遅れや、火災等への対応等災害時の危機管理体制の不十分さが被害の拡大をもたらした”³⁾ことに対し、震災直後の初動体制の意思決定支援ツールとしてリアルタイム地震防災システムの構築が、各機関で行われてきている³⁾。

一方、兵庫県南部地震発生直後においては、港湾施設や臨港交通施設が大きな被害を受けたにもかかわらず、神戸港は、緊急物資の搬入、陸上交通の代替としての人流の海上輸送、海上支援船の係留及び瓦礫等の搬出の大きく4つの役割を果たし⁴⁾、震災時において港湾の果たし得る機能が臨海部の都市にとって大きなものであり得ることを明らかにした。

本論文は、以上状況を踏まえ、開発中の都市臨海部の施設の地震被害予測を行うシステムについて述

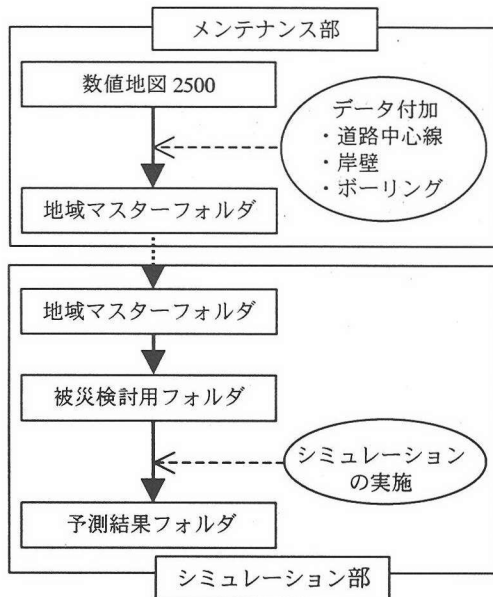


図-1 システムの構成

べたものである。

2. 都市臨海部地震被害予測システム

(1) 開発の目的

本システム開発の目的は、地震により港湾を中心とした都市臨海部がどのような被害を受けるのか、を推定し、これにより震災時に港湾が果たすべき機能をどの程度発揮できるのか、を予測することである。このシステムの開発により、港湾計画や震災予防計画の策定時に、震災対応についての具体的な検討が可能となり、耐震強化岸壁の整備や橋梁の耐震補強といった施設整備の検討、緊急物資輸送搬入経路の確認や海上支援船、ミニフロートの係留場所などの震災対応の検討等を行うものである。

本システムは、GIS（地理情報システム）を用いてパソコン上で稼働し、国土地理院刊行の数値地図2500を使用している。数値地図2500にないデータである岸壁、道路中心線等は、別にデータを作成してGIS上で取り扱っている。なお、岸壁及びボーリングデータは、容易に追加、修正が可能なるよう、.csvファイルで管理している。道路中心線については、交差点と交差点を結ぶリンクを新たに数値地図2500に追加するプログラムを作成している。

(2) システムの構成

本システムの構成は、図-1のとおりである。大きくは、メンテナンス部とシミュレーション部に分け

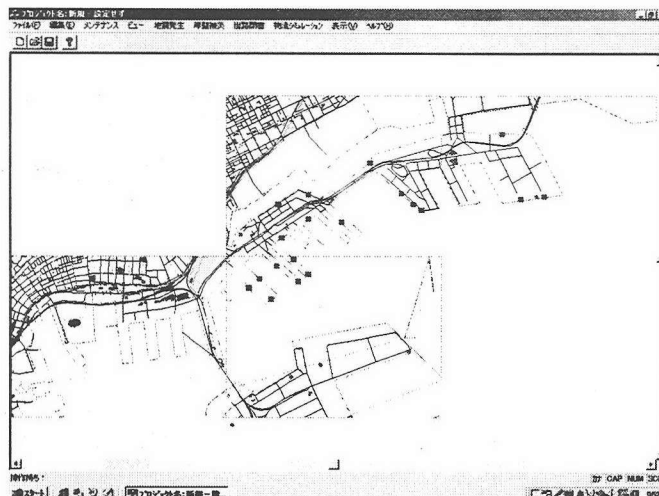


図-2 地域マスターフォルダ内の数値地図

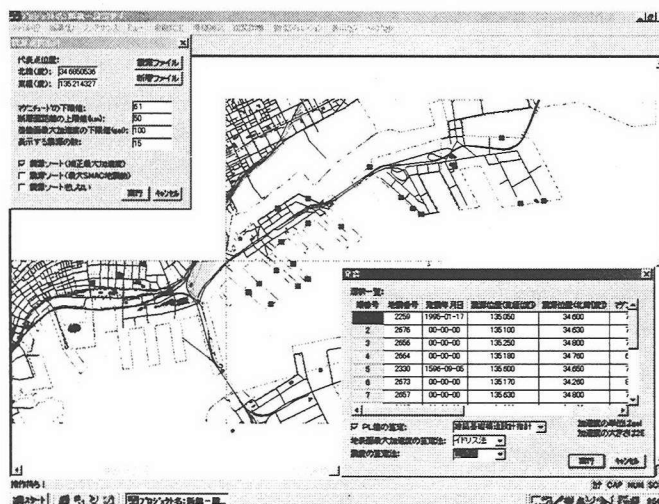


図-3 地震の選択画面

られる。メンテナンス部では、地震被害予測に必要なデータを数値地図2500に加えた地域マスターフォルダを作成し、これを管理する。フォルダの中には、それぞれの区郭に応じたファイルが格納されている。シミュレーション部では、地域マスターフォルダから、データ修正可能な被災検討用フォルダを作成し、これに対して地震被害予測のシミュレーションを実施して、被害予測結果フォルダを作成する。

(3) システムの操作手順

ここでは、地震被害予測シミュレーションの操作手順を述べる。なお、ここで用いている画面は神戸港のものであるが、データは実際のものを用いていない。あくまで操作手順の例を示しているものである。

図-2は、神戸港及びその周辺地区について、数値地図2500に、道路中心線、岸壁及びボーリングデータを付加した数値地図である。これが地域マスター

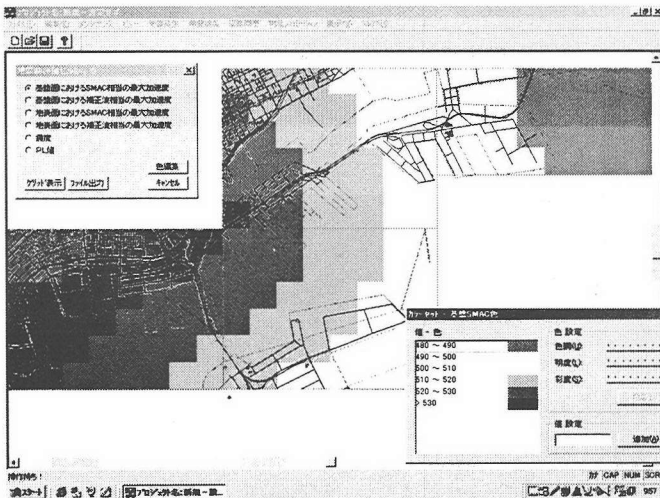


図-4 基盤面での最大加速度分布

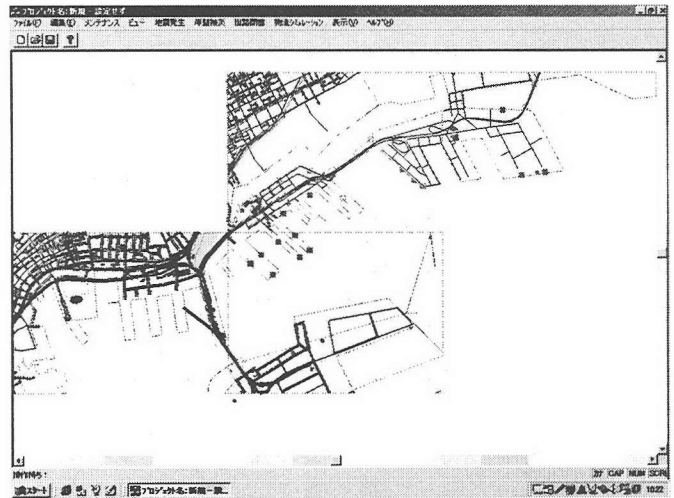


図-6 道路の被害状況

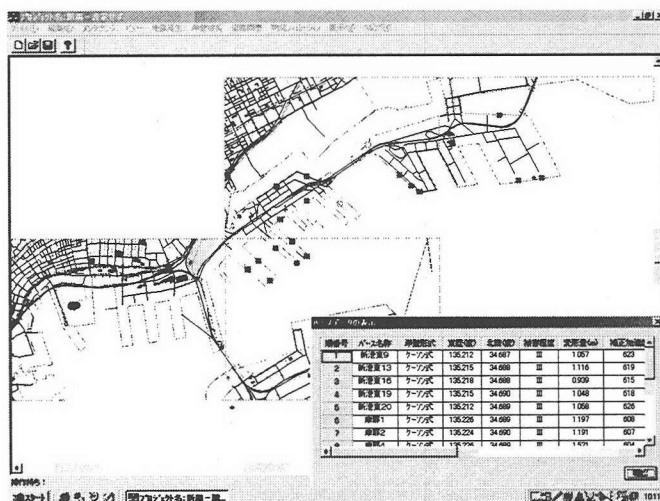


図-5 港湾施設の地震被害状況

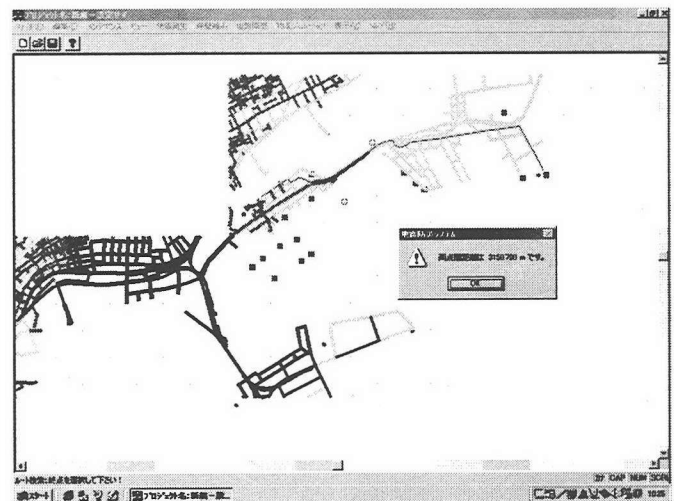


図-7 ルート検索画面

フォルダ内に格納されており、地震被害予測の元データとなる。

地震被害予測のシミュレーションにおいては、まず想定地震の選定を行う。この選択画面が図-3である。本システムには、文献5)に掲載されている、カタログ地震（1885年以降発生地震、宇津カタログ及び気象庁地震月報による）、歴史地震（1884年以前発生地震、宇佐見カタログ）及び活断層地震（活断層マップから今後発生する可能性のある地震）についてのデータが整理されており、地図上の任意の地点を選択すれば、当該地点の基盤面での最大加速度により降順に地震データがリストアップされる。この中から、地震被害予測に使用する想定地震を選択する。

想定地震の選定により、基盤面での最大加速度、地表面での最大加速度、気象庁震度階、 P_L 値が算定される。基盤面での最大加速度分布を示したのが図-4である。

次に、港湾施設の被害状況が算定される。被災度の判定は、供用可能な場合青、供用制限は黄、供用不可は赤で示され、さらに全ての岸壁の被災判定、残留変形量、最大加速度が表形式で示される。この場合の供用とは、岸壁への船舶の接岸が可能であることを示す。図-5はこの被害状況を示したものである。

港湾施設の被害判定の次は、道路の被害判定である。現時点の本システムは、街路閉塞現象の発生可能性と、地盤液状化の発生可能性との二つの被害判定を行っている。街路閉塞現象とは、沿道建築物やポール類の損壊により街路の通行が出来なくなる現象であり、兵庫県南部地震においては狭隘な街路において多発している。判定結果は、この街路閉塞現象の発生可能性が一定値以上である場合を街路閉塞による通行不可の道路、 P_L 値がある一定値以上である場合を地盤液状化による通行不可の道路と想定し、街路閉塞のみによる通行不可の道路が赤、地盤液状

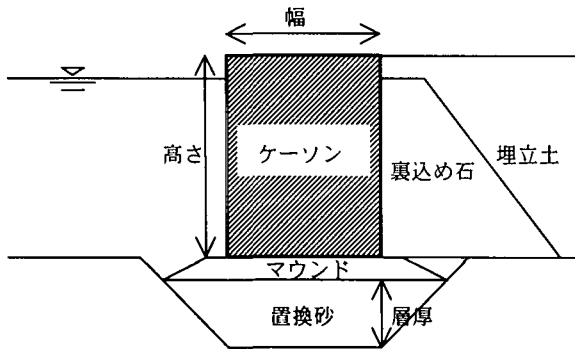


図-8 重力式岸壁の断面図

化のみによる通行不可の道路が青，両方の被害のある道路が茶，どちらの被害もない道路が緑で示される（図-6）。

港湾施設と道路の被害判定結果の上で，GISの機能を用いてルート検索を行うことが出来る。ルート検索においては，街路閉塞，地盤液状化による被害道路を通行不可とする場合に加え，どちらかの条件のみは通行可であるとして検索を行うことも可能である。このルート検索は，港湾施設と緊急物資輸送拠点等との間の交通施設の状況の把握を想定したものである。図-7は，図-6に示した道路の被害状況において，背後の地図情報を取り除いて道路ネットワークのみにした上で，ルート検索を行った結果である。

3. 地震被害予測手法

(1) 概要

本システムにおいては，先に述べたとおり，港湾施設の被害予測，街路閉塞の発生及び地盤の液状化の予測を行っている。この予測手法について，以下に述べる。

(2) 最大加速度及び気象庁震度階の算定

当該地点の地震動強度を示すパラメータとしては，最大加速度と気象庁震度階を用いている。

基盤面の最大加速度は，想定地震のマグニチュードと断層面から当該地点までの断層面距離より，野津らの式⁹⁾を用いて算定している。地表面の最大加速度は，当該地点の地盤条件と Idriss の式⁶⁾を用いて，基盤面から地表面への地震動の増幅を求めることにより算定している。

気象庁震度階は，山崎・SHABESTARI の式⁷⁾を用いている。

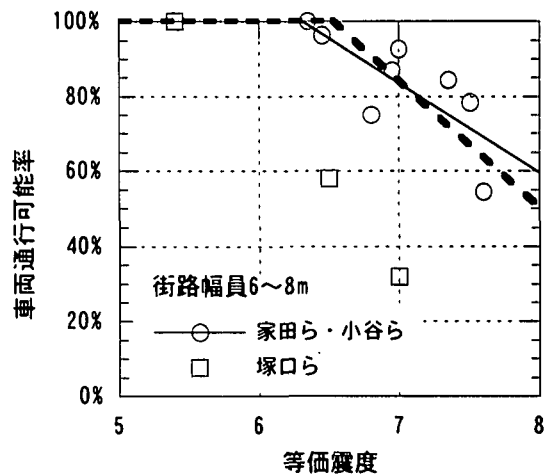


図-9 街路閉塞発生予測モデル

(3) 港湾施設の被害予測

港湾施設の耐震設計には有効応力法による有限要素解析プログラム（例えば，FLIP[®]）が用いられることが多い。しかし，このようなプログラムは必要とするデータが多く，さらに解析に要する時間が非常に長い。そのため，個別の施設の耐震設計には不可欠であっても，このような全体的な被害状況を把握するシステムには向かない。

本システムでは，多少精度が低下しても，短時間で容易に算定できる方法として，一井ら¹⁰⁾による簡易算定法を用いている。この算定法は，重力式岸壁を対象としたもので，最大加速度，ケーソン幅，高さ，置き換え砂層厚，置き換え砂層及び埋立土の液状化強度から，天端の水平変位量を算定するものである（重力式岸壁の断面諸元は，図-8参照）。算定結果は，地震後の残留変形量であり，この変形量により被災程度が判断される。具体的には，重力式岸壁の場合，水深-7.5m以上深い岸壁については，残留変形量が30cm以下で供用可，100cm以下で供用制限，100cmを超える場合供用不可，水深が-7.5mより浅い岸壁については，残留変形量が20cm以下で供用可，50cm以下で供用制限，100cmを超える場合供用不可と判定される¹⁰⁾。

(4) 街路閉塞の発生予測

街路閉塞現象の発生可能性の評価は，赤倉ら¹¹⁾のモデルによった。このモデルは，各街路の幅員と，その地点の気象庁震度階から車両通行可能性を導くものである。他に，このように簡易に街路閉塞現象の発生を予測したモデルは見あたらない。

赤倉ら¹¹⁾のモデルでは，幅員は，～4m，4～6m，6～8m，8～10m，10～12m，12～18m及び18m～の7分類としている。そのそれぞれの幅員について，図

-9の様子に震度階に対応する車両通行可能性を算定している。なお、横軸の等価震度とは、兵庫県南部地震での震度7の区域内において、木造建築物の倒壊率が50%以上でかつRC建築物の倒壊も目立つ区域を超震度7とした石川ら¹²⁾の定義を用い、これを震度8と置き換えたものである。山崎・SHABESTARIの式⁷⁾において、計測震度7.5以上を等価震度8としている。

(5) 地盤液状化の発生予測

地盤の液状化については、液状化指数 P_L 値によって判断した。 P_L 値は、ある地点の液状化の可能性を示すもので、その地点の各土層の性質と地表面からの深さにより算定される。 P_L 値を用いたのは、液状化するか、しないかの判定ではなく、街路閉塞の発生予測と同様に、液状化する可能性の度合いを算定することを考えたためである。東京都による地震被害想定¹³⁾においては、 P_L 値を、0、0~5、5~15及び15~に分類し、それぞれの液状化判定ランクをD~Aとしている。

(6) 拡張予定の項目

本システムは現在開発中であり、今後地震被害予測について、次の三点を追加することを考えている。

一つ目は、港湾施設について、重力式岸壁以外の岸壁への対応である。岸壁は大きくは、重力式、矢板式及び栈橋に分けられる。これらがどのような比率で建設されているのかは港によって異なっている。本システムは、まず兵庫県南部地震において被災した神戸港に多かった重力式を対象としたが、他の港への適用を考える場合、矢板式や栈橋の被害推定も必要である。

二点目は、重力式岸壁の地震被害予測において、岸壁法線方向と断層面方向の関係による補正を行うことである。図-8のように岸壁の横断面は、片側が海、片側が埋立土となっており、この断面横断方向の揺れが強い場合には岸壁が変形しやすい。このことは、兵庫県南部地震の被害においても確認されている。しかし、一井ら⁹⁾の簡易算定法においてはこの点を考慮できないため、簡易算定法の算定結果を補正することを考えている。

三点目は、橋梁の被害予測の追加である。港湾施設、背後の道路、都市内陸部の街路が被害を受けなくとも、臨海部と内陸部との結節点である橋梁が通行不可能になってしまえば、結局震災後において港湾の機能を十分に活用することは出来なくなる。そのため、橋梁の被害予測を次なる追加項目として考えている。

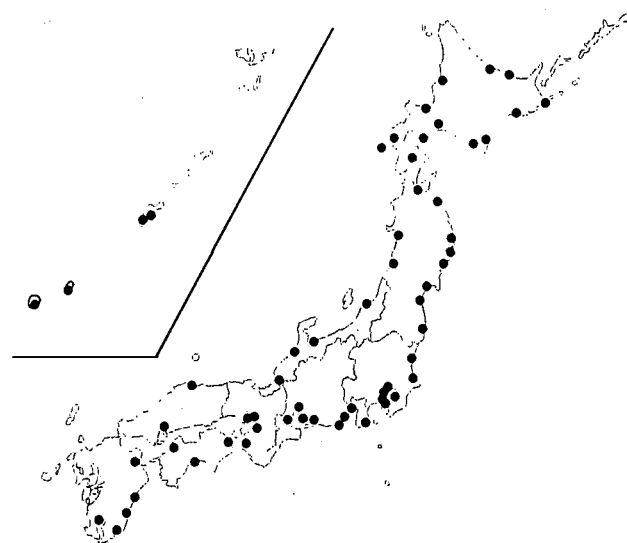


図-10 港湾地域強震観測網

4. 被害予測システムのリアルタイム地震防災への適用

(1) リアルタイムの処理について

リアルタイムとはどこまでを指すのか、については、第1回のシンポジウムでも議論があったように、研究者間で完全に一致した認識はまだ形成されていないように思われる。リアルタイムを即時、同時との意味合いで考えるならば、本システムは現時点ではリアルタイムの処理を全く行っていない。

事前防災を主眼に開発している本システムは、現時点では、即時・同時的な処理ではなく、地震発生後に緊急対応を行う上での情報提供を行う、との意味でのリアルタイム地震防災を考えている。地震被害がどの程度であったのか、特にどの区域の被害が大きい可能性が高いのか、といった情報を、現場で確認する前に持っておき、確認されるまでの判断材料とするものである。活断層特定後数分で予測結果が示される本システムは、この意味におけるリアルタイム地震防災には使用し得るものと言える。

太田¹⁴⁾は、地震防災の枠組みとして、事前防災、即時防災及び事後防災を、時間の流れの中で出来る限り継ぎ目のないものとするを提案している。このような考え方に従えば、事前予測に使用する地震防災情報システムは、即時防災、さらには事後防災においても使用可能なようにしていくべきであり、その逆もまたしかりであろう。本システムの今後の拡張においては、この点を考慮していくものである。

(2) 同時・即時処理への対応

本来の意味でのリアルタイム処理、すなわち同時・即時の処理を行うためには、地震発生を地震被

害予測のトリガーとすることが必要となる。運輸省においては、全国60港91強震計において強震観測を行っており¹⁹⁾ (平成11年3月末現在、図-10参照)、この観測網と本システムとを連携させることにより、地震の揺れが終了した後、数分で被害予測を算定するシステムを構築することが、技術的には可能であると考えられる。

現在、地震発生直後に各港の強震計からデータの完全自動送信が可能になるよう、強震観測網のオンライン化を模索している。このオンライン化が完成し、本システムをオンライン情報に対応できるように修正すれば、同時・即時処理を行うことが出来るようになる。

5. 結論

本論文は、現在開発中である、都市臨海部の施設の地震被害予測システムについて述べたものである。このシステムは、地震による港湾を中心とした都市臨海部の被害状況を推定するものであり、その開発によって、事前の震災計画や震災対応を効果的に行うことが出来るようにすることを目的としている。そのため、いわゆる即時・同時のリアルタイム処理には現時点では対応していないが、地震発生後に緊急対応を行う上での情報提供が可能であり、広義のリアルタイム地震防災の範疇に入るものと考えられる。今後、地震被害予測について拡張に加え、即時・同時処理をも視野に入れて、開発を行うものである。

参考文献

- 1) 稲富隆昌ら：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料，No.857，1997。
- 2) (社)土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，1996。
- 3) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.1-16，1997。
- 4) 高橋宏直，中本隆，吉村藤謙：兵庫県南部地震直後における海上輸送モードの対応状況に関する分析，港湾技研資料，No.861，1997。
- 5) 野津厚，上部達生，佐藤幸博，篠澤巧：距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係，港湾技研資料，No.893，1997。
- 6) The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, The International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering : Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, *The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1993.
- 7) Khosrow T. SHABESTARI, Fumio YAMAZAKI : Attenuation of JMA Intensity Based on JMA-87-type Accelerometer Records : 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.153-156, 1997.
- 8) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 9) 一井康二，佐藤幸博，井合進，劉漢龍：重力式岸壁の地震時残留変形量の簡易評価，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp.973-976，1999。
- 10) 小泉哲也，山本修司，春日井康夫：1995年兵庫県南部地震以降の港湾施設の耐震設計法及び基準の変遷，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.3137-3142，1998。
- 11) 赤倉康寛，高橋宏直，中本隆：大規模地震による街路閉塞予測シミュレーションの構築，土木学会論文集，No.632/IV-45，pp.77-92，1999。
- 12) 石川浩次，溝口昭二，小野諭：神戸市街地における構造物被害と地盤挙動，第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.187-194，1996。
- 13) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書（被害想定手法編），1997。
- 14) 太田裕：スタティック地震防災からダイナミック地震防災へ，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp.63-69，1999。
- 15) Koji ICHII, Yukihiko SATO, Yuko HOSHINO, Yoko SATO, Susumu IAI : Site Characteristics of Strong - Motion Earthquake Stations in Ports and Harbours in Japan (Part VI), *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.935, 1999.