招待論文

高密度地盤情報データベース 「神戸 JIBANKUN」の構築とその活用事例

DEVELOPMENT AND ITS UTILIZATION OF THE DETAILED GEOTECHNICAL INFORMATION
DATABASE SYSTEM NAMED AS “KOBE JIBANKUN”

沖村 孝¹・鳥居 宣之²

Takashi OKIMURA and Nobuyuki TORII

¹ 正会員 神戸大学教授 自然科学系先端融合研究環 都市安全研究センター
(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: okimura@kobe-u.ac.jp

² 正会員 神戸大学助教 自然科学系先端融合研究環 都市安全研究センター
(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: torii@kobe-u.ac.jp

Key Words : geotechnical information database, the Great Kobe Earthquake,
boring data, GIS

平成 7 (1995) 年の兵庫県南部地震時に、神戸市内に生じた木造家屋被害分布、いわゆる「震災の帯」の発生原因を究明するため、また各種構造物の地震被災原因を究明するため、神戸市が所有するボーリングデータを活用した高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」の構築を行った。この構築に際しては、神戸市のみならず、民間技術者や学術研究者も協力し、産官学の知識を活用した。本報では、「神戸 JIBANKUN」の構築の概要ならびに「神戸 JIBANKUN」を活用した研究事例を紹介した。さらに、地盤情報データベースの維持管理に際しての問題点ならびに今後の課題についても言及した。

1. はじめに

平成 7 (1995) 年 1 月 17 日、明石海峡を震央とする兵庫県南部地震 ($M_j = 7.3$) が発生し、神戸市域を中心とする阪神・淡路地域に甚大な被害をもたらした。この地震は、日本の近代都市において初めて発生した都市直下型地震であったため、6436 人 (関連死を含む) が犠牲となった人的被害、全壊 104906 棟、半壊 144274 棟にも及んだ家屋被害、高速道路の短柱のせん断破壊、橋梁及び地下鉄構造物等の倒壊、交通網・ガス・水道及び電気等のライフラインの寸断、ポートアイランド・六甲アイランドに代表される埋立地等における液状化現象の発生など様々な被害が発生し、被災総額は 10 兆円以上に達するものであった。

このような多種多様な被害の中で、神戸市域における建築構造物被災分布は震度 7 の激震地区に代表されるような带状分布、いわゆる「震災の帯」を呈した。このような特徴的な建築構造物被災分布が生じた原因を究明するため、著者らの所属する神戸大学都市安全研究センター (現、神戸大学自然科学系先端融合環都市安全研究センター) は神戸市が進める高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」の構築に協力してきた。さらに、この地盤情報データベースを運用・活用

するために、産官学よりなる研究会「神戸の地盤研究会 (現、神戸の地盤・減災研究会)」を組織し、地震動研究、液状化研究、神戸の地盤特性研究を遂行してきた¹⁾。本報では、はじめに高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」構築の経緯とその内容を紹介するとともに「神戸 JIBANKUN」を活用した研究事例を紹介する。さらに、地盤情報データベースを維持管理していくうえで明らかになった問題点ならびに今後の課題についても言及する。

2. 神戸市における高密度地盤情報データベースの構築の背景

神戸市における地盤情報の収集は、昭和 46 (1971) 年に「六甲山地とその周辺の地質図」²⁾ (縮尺 1/50000) の発行に始まった。昭和 55 (1980) 年には「神戸の地盤」³⁾ というタイトルで、ボーリングデータ約 5000 本を対象として整理された結果が出版された。昭和 62 (1987) 年には、元神戸市職員の石見義男氏により、「神戸のまちと地盤」⁴⁾ が発行された。ここでは約 5000 本のボーリングデータを活用して、神戸の地盤形成史が論じられており、柱状図も数多く記載されている。しかし、これらの成果はいずれも紙ベースであった。一方、

神戸市では昭和 62 (1987) 年にパーソナルコンピュータを使った「ボーリングデータの検索・グラフィック表示システム」が開発され、デジタルデータの収集が開始された。阪神・淡路大震災直前の平成 6 (1994) 年当時では、約 7000 本のデータが登録されており、このうち、六甲山より南側に位置する市街地内のボーリングデータは約 3000 本であった。

阪神・淡路大震災後、市内で生じた帯状の建築構造物の被災分布の原因を究明するため、「神戸市地盤調査検討委員会」(委員長：田中茂神戸大学名誉教授ほか 7 名の委員) が発足し、そこで最新の IT 技術、特に地理情報システム (Geographic Information System : GIS) を活用した新たな地盤情報データベースの構築が提言された。当時、関西では建設省のデータを中心とし、各府県や公団等の陸域のデータを中心とした「関西地盤調査情報データベース」と、運輸省のデータを中心とした「大阪湾地盤情報データベース」の構築が行われていた。しかし、残念ながら、これらのデータベースの活用はデータの提供者、すなわち官側のみに限られ、わずかに研究用として研究者に解放されていたに過ぎなかった。このため、民間側が活用しようとしていてもそれができないことになっていた。しかし、神戸市では阪神・淡路大震災を受けて、市民の側にも地盤に関する関心が生じていたこと、また被災の究明には大学の研究者のみならず、民間の研究者や技術者と協同して研究を進める必要があるといった背景から、パーソナルコンピュータ環境で、誰もが活用できるシステ

ムを前提とした新たな地盤情報データベースを構築する目的で、神戸市が所有するボーリングデータを中心として、平成 7 (1995) 年から平成 9 (1997) 年にかけて、GIS を活用した新たな高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」が構築されることとなった。構築の基本構想は、上述したように誰でも使えるようにするためパーソナルコンピュータ使用とすること、誰でも活用できるようにするため公開を原則とすることであった。

3. 「神戸 JIBANKUN」の概要

震災の平成 7 (1995) 年当時は、GIS がようやく活用されるようになってきていた時期であったが、三次元表示はまだ一般的ではなく、二次元表示が一般的な時代であった。その頃の GIS は、世界的に数多く使われてきているソフトウェアが主流であったが、データ構造が公開されないため、ユーザーが必要に応じて自由にソフトウェアを設計できない欠点があった。このため、当時は数多くの GIS ソフトウェアが開発・提案されている時期でもあった。その中でも、神戸のベンチャー企業が開発したソフトウェア「ジオベース」は、GIS の基本ツールのみで、後はユーザーが VISUAL BASIC を使って自由に設計や組み立てができる方式で、かつ画面のスクロールが世界でも最も早いものであった。一方、ボーリング柱状図を扱う断面二次元演算・表示システム GDBS は、GIS とはまったく別に、民間コンサルタ

図-1 「神戸 JIBANKUN」のシステム概要

図-2 平成 17 (2005) 年当時のボーリング位置図

ントで開発されていた。そこで GIS と GDBS 間を高速データ転送システムを介させ、平面情報と断面情報を瞬時に転送させることにより擬似三次元モデルを構築することにした。このようなシステムが構築できたのは、上述したように、これらのデータ構造が公開されていたことならびに両社の許諾および貢献があったためである。「神戸 JIBANKUN」のシステム概要を図-1 に示す。平面情報を扱う GIS 部の特徴としては、1) 高速地図表示機能が可能で、当時は最速の表示速度で無限スクロールが可能であること、2) 線分、円、ポリライン、ポリゴン等の各種 CAD 機能を有していること、3) 各種市販データベースソフトウェア DBMS (Oracle, Access, Excel 等) の使用が可能であること等である。一方、断面部の GDBS の特徴としては、1) ボーリング柱状図の作成、登録、編集が可能な機能を有していること、2) 柱状図データから液状化を判定する計算機能を有していること、3) 柱状図から断面図を計算し、表示する機能を有していること、4) 粒度分布等、各種データの集積表示機能を有していること、5) 各種の等値線の作成、表示機能を有していること等である。構築当初は、神戸市の六甲山系南麓の表六甲旧市街地を中心とした約 5000 本のボーリングデータであったが、その後、神戸市の全域に拡大するとともに、毎年実施されたデータを追加し、平成 17 (2005) 年度には約 8000

本近くのボーリングデータが収集されている。図-2 は平成 17 (2005) 年当時のボーリング位置図である。

これらのボーリングの位置や電子情報化された地盤情報の位置座標については、神戸市周辺の大縮尺地図の投影座標系として一般に用いられている平面直角座標系 (19 座標系) の第 5 座標系の X 座標, Y 座標で表示し、標高については T.P. 標高 (東京湾平均海面) で表示している。また、「神戸 JIBANKUN」の操作条件は、当初、OS が Windows 95/NT 4.0 以上、CPU が Pentium-166 MHz 以上、RAM が 64 MB 以上のパソコンで操作が可能であるように設計された。

4. 「神戸 JIBANKUN」に入力されている情報

(1) 地形情報

a) 地形図

GIS に用いた地形図には、神戸市都市計画局で作成された縮尺 1/2500 の地形図を用いた。この地形図はデジタル化されており、位置情報は座標表示が可能である。また、等高線情報、家屋建物情報、道路・鉄道情報、区境界線、海岸線、河川情報、地図記号情報、町丁目情報等がレイヤー化されており、個別表示、オーバーレイ表示、検索機能を有している。図-3 に、縮尺 1/2500 のデジタル地形図の一例を示す。

図-3 縮尺 1/2500 のデジタル地形図の一例（神戸大学工学部付近）

図-4 断面図の出力例（東灘区岡本7丁目～魚崎浜町）

b) 20 m 格子間隔の数値標高モデル

前項で紹介した地形図は、標高データについてはデジタル化されていない。そこで、地表面の標高については国土地理院発行の50mメッシュデータ⁵⁾ならびに神戸市建設局下水道河川部が測量した約160000地点

のマンホール天端標高データ、さらに海上部は海図から得られた標高データ等を用いて、神戸市域全体にわたって20m格子間隔の数値標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）を作成した。任意の測線を地形図上に設定し、その測線に沿った地質断面図を作成する場合、

図-5 旧海岸線，旧河道，旧ため池，谷埋め域図（兵庫区，長田区付近）

図-6 東灘区，灘区付近の地表面傾斜区分図

このDEMを用いることで、その測線とメッシュとの交点標高をメッシュ標高の比例配分によって求め、その測線に沿った地表線の作成ができるようになっている。図-4は、この手法により求められたボーリングデータの入った断面図の一例である。

c) 旧海岸線，旧河道，旧ため池，谷埋め域図

明治18(1885)年から20(1887)年にかけて参謀本部陸軍部測量局により作成された縮尺1/20000地形図⁶⁾を用いて、当時の海岸線、河道、ため池の分布図を作成した。また、この地形図と平成7(1995)年当時の地形図を対比することにより、谷埋めの造成が行

われたと考えられる地域を抽出した。これは盛土部では、地震時に液状化被害が生じ易く、被災分布の一要因になると考えられたためである。図-5は兵庫区、長田区付近の旧海岸線、旧河道、旧ため池、谷埋め域図である。

d) 地表面傾斜区分図

b)で述べた数値標高モデルを用いて、一次傾向面⁷⁾により求められる20m格子の地表面傾斜区分図を入力されている。図-6は、東灘区、灘区付近の地表面傾斜区分図である。

図-7 微地形区分図

e) 微地形区分図

地震時の被災分布は地表の微地形や土地利用によって異なることが従来から指摘されてきている⁸⁾。このため、国土地理院では、兵庫県南部地震発生後、被災分布の原因究明をかねて「地震防災土地条件図」の作成を試みている。この作成に際して、田中眞吾神戸大学名誉教授は、より微地形の観点からこの土地条件図を作成する必要があるとして、縮尺 1/10 000 以上の大縮尺空中写真判読を行い、それに基づいて「地震防災土地条件図(微地形)」を作成した⁹⁾。同教授の同意を得て、この微地形区分図が入力されている。図-7 は、この微地形区分図である。

(2) 地盤情報

a) ボーリング柱状図

「神戸 JIBANKUN」に入力されている柱状図の大きな特徴は、調査結果である柱状図をそのままを引用せず、沖積層、段丘相当層、大阪層群上位層、中位層、下位層、基盤である花崗岩の地層に解釈し直したことである。このため、地層の連続性など解釈に整合しないボーリングデータや、あるいはボーリング地点の標高が基図とした地形図と大きく異なっている場合等は、再吟味し、解釈と異なる場合はデータとして採用しないこととした。また、ボーリング深度が浅い場合、近傍で数多くボーリングが行われている場合のデータも使用しないこととした。

「神戸 JIBANKUN」の構築に際して、当初、神戸市

で所有していた約 7 000 本のボーリング柱状図を収集した。収集したデータに対して、神戸の地盤構造を参考にして、ボーリング柱状図の土質分類、N 値で代表される工学的性質、貝殻片や腐植物の混入、火山灰・花粉分析などの地質学的分析結果を用いて、上述した地層に区分した。これらの詳細な定義に関しては、報告書¹⁰⁾を参照されたい。このため結果的には、約 2 000 本のボーリングデータを採用せず、約 5 000 本のデータを採用した。

二番目の大きな特徴は、沖積層、段丘相当層の地層区分に対して土質分類として礫層、砂層、粘土層の三層に細分し、それぞれ着色して表示したことである。これにより、各地層の土質区分毎に N 値の平均値が求められる、地層や土質の比較、地域の比較、深度の比較、更には N 値を活用した様々なパラメータの推定にも大きく活用できる。

このように、「神戸 JIBANKUN」の柱状図は、単にデータを集積したものではなく、神戸の地域地盤特性に基づいて解釈された柱状図であることが大きな特徴である。

b) 土質試験結果および現位置試験結果

「神戸 JIBANKUN」に登録済みの土質試験データは、物理試験結果が約 20 000 個、それを含むボーリングが約 1 400 本、一軸圧縮試験結果が約 8 300 個、それを含むボーリングが約 800 本、三軸圧縮試験結果が約 450 個、それを含むボーリングが約 100 本、圧密試験結果が約 2 500 個、それを含むボーリングが約 400 本であ

図-8 旧市街地内の地下水位図

る。一方、現位置試験データは、孔内水平載荷試験は約 520 箇所、それを含むボーリングが約 160 本、PS 検層は約 490 箇所、それを含むボーリングは約 60 本である。

土質試験結果より得られる粒度分布の地域特性、一軸圧縮強度、自然含水比、圧縮・圧密特性等に関しては、すでに報告¹⁰⁾されているので、それを参照されたい。

c) 地下水位

「神戸 JIBANKUN」に入力されているボーリング柱状図で、調査時の地下水位が記載されているボーリングは約 2100 本である。図-8 は旧市街地内の約 1800 本の地下水位を示したものである。図-8 を見ると、海岸線に沿って浅い地下水位が現れているが、それ以外にも住吉川左岸（東灘区）、石屋川と都賀川の間（灘区）兵庫区・長田区・須磨区の一部では、内陸部にまで地表面下 1~2m 程度に地下水が現れていることがわかる。しかしこの地下水位は、ボーリングが無水掘で行われたか、泥水を使ったものかについては不明である。また地下水位は、降雨等により時間的に変化するものであるため、地震発生時のそれかどうかは不明である。また埋立地においては、工事中的様々な段階で測定されたものであるため、その信頼度も不明である。このため、地震被災分布の原因究明に使うより、あくまでも参考データとして取り扱ったほうがよいと思われる。

d) 地質図

神戸市では、平成 8（1996）年度から平成 9（1997）年度にかけて「神戸市地域活断層調査委員会」（委員長岡田篤正京都大学教授ほか 10 名の委員）を立ち上げて、神戸市内の地質状況、および活断層の調査を開

始した。その成果として、「神戸市地域活断層評価図」（縮尺 1/25 000）が刊行され、地質図も最新の情報を用いて作成された¹¹⁾。「神戸 JIBANKUN」に入力する地質情報は、この時に作成された地質図を用いた。図-9 は入力した地質図である。

(3) 被災情報

「神戸 JIBANKUN」構築の主な目的は、兵庫県南部地震による被災分布、特に建築構造物の被災分布の原因を明らかにするためであるので、被災情報は重要であるとともに、この情報は後世へ貴重な記録の保存にもなる。このため、「神戸 JIBANKUN」では、可能な限りの被災情報を入力することとした。

a) 建築構造物被災データ

建築構造物の被災情報に関しては、地震発生直後から踏査が開始され、神戸大学工学部建設学科土木系教室から、縮尺 1/2 500 の都市計画図に全壊、半壊、一部損壊の色分けされた被災分図が、震災後 3 ヶ月を経て発表された¹²⁾。一方、日本都市計画学会関西支部からは、神戸市内に限らず、芦屋、西宮、宝塚市等を含んだ縮尺 1/10 000 の被災分布図が出版された¹³⁾。また行政においても、家屋損壊の判定作業を実施し、見舞金や補助金、倒壊家屋解体にともなうがれき処理の基礎資料とした。このため、行政による資料が最も信頼度が高いと考えられたが、個々の家屋の被災データは個人情報と密接な関係を有しているため、個々の家屋が特定されるようなデータとしては、行政側から提供されないことが明らかになった。また、被災分布の特徴は、個々の家屋を対象としたデータよりも、地域としてのおおよその傾向が明らかになれば、被災分布の

図-9 地質図

図-10 町丁目ごとの建築構造物被災分布図の一例

特徴を把握できると考えられる。そこで、個々の家屋を対象とした神戸市データを、町丁目ごとに集計・平均化した結果を被災分布として採用することとした。図-10は、町丁目ごとの建築構造物被災分布図の一例である。

この図より、昭和45(1970)年以前に建築された木

造家屋被害率被災分布の特徴としては、1) 六甲山麓や海岸線沿いの地域には被災は小さく、これらに挟まれる地域で大きな被災が出現しており、町丁目ごとの被災分布からも、帯状の被災分布が現れている、2) 三宮から元町にいたる地域では、大きな被災度は出現しておらず、この傾向も気象庁が発表した震度7の分布と

図-11 上水道管の被災分布図

図-12 下水道管の被災分布図

矛盾がない，3) 東灘区，兵庫区，長田区で大きな被災が出現しており，当時の被害と矛盾しない等の結果が指摘できる。

b) 上水道管・下水道管の被災分布

ライフラインのひとつである上水道管，下水道管は地中に埋設されている．このため，地震時における地盤変動の影響を直接受けることになり，その結果，多くの場所で被災が生じた．図-11は，上水道管の被災分布図である．

全体として旧市街地に多く被災箇所が出現しているが，灘区から中央区の北部山麓沿いでは被害は少ない

が，長田区北部の丘陵地では数多くの被害が現れていることがわかる．第一突堤から摩耶埠頭にかけても被害が出現していること，ポートアイランドでは被害が多いが，六甲アイランドでは被害が少ないことが特徴的である．これら被災の箇所には，材質，管径，継ぎ手形式，被災状況，復旧日等が入力されている．

一方，図-12は下水道管の被災分布図である．全体的には，図-11の上水道管の被災分布とよく似ているが，埋立地では被害が少ないことがわかる．下水道管の被災の属性情報としては被災状況，被災の程度，使用材料が入力されている．

図-13 擁壁の被災分布図

c) 擁壁の被災位置図

宅地の宅盤および擁壁の被災に関しては、平成 16 (2004) 年の中越地震による高町団地の被災が有名であるが、それより 9 年前の兵庫県南部地震でも谷埋め盛土や腹付け盛土の被災が数多く生じていた。神戸市建設局では宅地の被害調査を実施し、その分布が明らかになっている。図-13 は擁壁の被災分布を示したものである。この図より、山麓付近が圧倒的に多いことがわかる。これは山麓の谷を盛土で埋め、その末端に擁壁を建設したためであろう。神戸市内で「宅地造成等規制法」に基づいて、擁壁の安全確保の勧告が行われた箇所は、1707 箇所にも達している¹⁴⁾。特に、浅い谷埋め盛土で変状被害が、わが国では初めて出現したことが特徴的である。

d) 噴砂分布図

神戸市街地で液状化による噴砂が確認された位置に関するの情報としては、「阪神大震災被害調査報告書」¹⁵⁾、「平成 7 年兵庫県南部地震災害現況図」¹⁶⁾、「1995 年兵庫県南部地震液状化・地盤変位及び地盤条件」¹⁷⁾ などがあつた。これらのうち、「阪神大震災被害調査報告書」¹⁵⁾ は現地踏査によるものであるが、対象が沿岸埋立地および人工島であり、市街地での調査をほとんど行っていない。一方、「平成 7 年兵庫県南部地震災害現況図」¹⁶⁾ および「1995 年兵庫県南部地震液状化・地盤変位及び地盤条件」¹⁷⁾ は、空中写真判読から求められた結果を図化したものである。このため「神戸 JIBANKUN」に入力する情報としては、沿岸部および人工島においては「阪神大震災被害調査報告書」¹⁵⁾ のデータを採用し、それ以外の地域に関しては「平成 7 年兵庫県南部

地震災害現況図」¹⁶⁾ および「1995 年兵庫県南部地震液状化・地盤変位及び地盤条件」¹⁷⁾ のデータを活用した。上述したように、これらの原典の情報は一致していないため、すべてのデータを採用し、同じ場所でのデータに関しては、多く噴砂位置が表示されている方を採用することとした。この結果を図-14 に示す。この図より、数箇所内陸部で噴砂が見られるものの、ほとんどは沿岸部および埋立地で発生していることがわかる。

e) 地盤変位データ

兵庫県南部地震により、地盤の表層部が変位していることが認められた。この地盤変位に関しては、地震前と地震発生後の空中写真測量結果を比較することにより求めることができる。そこで、地震予知総合研究振興会によって作成された地盤変位ベクトル図¹⁷⁾ をデジタイザによって読み取り、地盤変位データを作成した。このデータは海岸地域と人工島地域が中心である。一方、内陸部は防災科学技術研究所によって地盤変位データ¹⁸⁾ が作成されている。このデータは、基準点が GPS によって把握されており、防災科学技術研究所から直接テキストデータを提供していただいた。

f) ガス管被害データ

ガス管被害のデータは、大阪ガス株式会社によりとりまとめられた結果を提供していただいた。ガス管の被災分布は、上・下水道管の被災分布とよく似た傾向を示しており、ポートアイランドや六甲アイランドの埋立地では、被害はほとんど生じなかったことが大きな特徴である。

g) その他

神戸市では地震のみならず、豪雨によっても過去に

図-14 噴砂分布図

図-15 昭和42（1967）年の浸水区域（実績）図

大きな被災を受けている。特に、昭和42（1967）年の集中豪雨では、六甲山系から崩壊した土砂が市街地に流入したり、河川が氾濫することによって浸水被害を生じている。「神戸 JIBANKUN」には、昭和42（1967）年の浸水区域（実績）図も入力した（図-15 参照）。これは、この地盤情報データベースが広く市民にも公開されているため、過去の災害実績を公開することによって、災害に対する備えの必要性を市民が知ることを目的としたものである。

5. 「神戸 JIBANKUN」を活用した研究事例

(1) オーバーレイによる被災原因の究明

上述したように、「神戸 JIBANKUN」には様々なデータが入力されており、4章（1）、（2）節の地形情報、地盤情報と4章（3）節の被災分布情報とを重ね合わせることによって、被災の分布がどのような地形条件、地盤条件で発生していたのかを見ることができる。これに関しては、すでに別の報告¹⁰⁾で詳しく述べられているので、参照されたい。図-16に、一例として、地質図と建物被害分布を重ね合わせた結果を示す。図-16よ

図-16 地質と建物被災の関係

図-17 設定した三測線の位置図

り、顕著な被害は沖積層の分布域に集中しているが、同じ沖積層内でも被害の軽微な箇所も見られる。このような重ね合わせ結果から言えることは、地震による被災原因を説明するためには、当然のことながら背景としての地形条件や地盤条件のみでは解決できず、地震という動的な外力を評価しなければならないということである。

(2) 木造建築構造物の被災危険度評価

筆者ら^{19),20)}は、神戸市街地を東部地区（灘区，東灘区を含む地域で、帯状の被災分布が顕著な地域）、中部地区（中央区と兵庫区の一部東側を含む地域で、被災の程度がそれほど顕著ではなく、震度7の帯が一度

途切れる地域）、西部地区（兵庫区の西部と長田区，須磨区の地域で、帯状の顕著な被災分布を示すとともに、大きな火災があった地域）に大別し、それぞれの地区の特徴を示す測線（図-17 参照）を設定し、この測線に沿って木造建築構造物の被災危険度評価を行ってきた。以下に、「神戸 JIBANKUN」に入力されているデータを用いた動的解析結果による木造建築構造物被災危険度の評価事例を紹介する。

a) 深層地盤モデルならびに地震応答解析

三測線上の算定点（測線上に 100 m 毎に設けた解析結果を算出する点）における応答地震動を算定するため、地盤構造を深層地盤（大阪層群上部亜層群～花崗岩）と浅層地盤（地表面～大阪層群上部亜層群表面）に

図-18 「神戸 JIBANKUN」から求めた三測線における浅層地盤構造

分けて地震応答解析を行った。深層地盤については、地震動の伝播経路特性を考慮するため、震源から発生する地震波をシミュレートできるモデルが必要となる。松島・川瀬²¹⁾は、神戸市域で実施された反射法地震探査結果を基に、できる限り現実的な深い三次元盆地構造をモデル化し、さらに神戸海洋気象台の観測記録の断層直交成分 (N33°W) の速度波形を説明できるような震源モデルを推定し、これら二つのモデルを組み合わせ、大阪層群上部亜層群上面における応答地震動を算出している。そこで、この松島・川瀬によるモデルを用いて、各算定点における浅層地盤での地震応答解析に用いる入力地震動を算定することとした。

b) 浅層地盤モデルならびに地震応答解析

浅層地盤については、「神戸 JIBANKUN」を活用することにより、それぞれの測線断面で詳細な浅層地盤構造が求められるとともに、地震応答解析に必要な入力物性値を求めた。図-18は、「神戸 JIBANKUN」から求めた三測線における浅層地盤構造である。

図-18 (a) より、東部測線では、沖積層は地表面傾斜変換点付近 (E-12) から断面南側にかけて砂層が厚く分布していることが確認できる。沖積粘土層は、E-08～15 付近の陸域で分布が確認されることより、後背湿地性の粘土と考えられる。また、沖積海成粘性土である Ma13 は E-20～30 にかけて 10～15 m 前後の厚さで堆積している。一方、沖積層の下位には段丘相当層が分布しており、断面の北側から南側にかけて砂層が卓越している。砂層の下位には、洪積海成粘性土である Ma12 が確認され、Ma12 は E-14 付近から断面南側にいくに従い厚く堆積している。

図-18 (b) より、中部測線では、沖積層は断面内陸部では礫層が主体であるが、C-05 付近より北側及び C-13 付近より南側では砂層が厚く分布していることが確認できる。これらの堆積物は生田川によって形成された河川性堆積物であると考えられる。沖積粘土層は、C-12 付近で地表面に現れている以外はほとんど確認できない。段丘相当層は、C-15 付近より北側では礫層が、C-15

図-18 「神戸 JIBANKUN」から求めた三測線における浅層地盤構造 (つづき)

付近より南側では砂層が主体となっている。Ma12 は、C-17 から断面南側にいくに従い厚く堆積している。

図-18 (c) より、西部測線では、断面北部は断層の影響により大阪層群が分布しており、断層付近 (W-09 付近) での地層の連続性は見られない。また、W-10 までは、浅層地盤の層厚は約 2 m 程度である。全体的にみて、沖積層は砂層で占められており、旧湊川の河川作用によって形成された堆積物に相当すると考えられる。W-11~20 付近では沖積粘土層が確認される。段丘相当層に着目すると、砂層や礫層が混在している。Ma12 は、W-25 から断面南側にいくに従い厚く堆積している。

浅層地盤での地震応答解析は、図-18 に示した浅層地盤構造から、各算定点における一次元地盤モデルを作成し、一次元地震応答解析を行った。一次元地震応答解析手法としては、いくつかの方法が提案されているが、東部測線 (E-00~18)、中部測線 (C-00~15) 及び西部測線の W-00~25 では、等価線形化手法に基づく一次元地盤の地震応答解析プログラムである DYNEQ²²⁾ を用いた。DYNEQ では、同様の等価線形化手法である SHAKE²³⁾ が有する欠点の改善が図られている。また、有効ひずみを求める際、SHAKE の方法²³⁾、吉田・末富の方法²²⁾、杉戸ら²⁴⁾ の方法などが選択でき、本研究では、有効ひずみは周波数に依存する杉戸ら²⁴⁾ の方法を採用した。一方、西部測線の算定点 W-26~31 では FL 値 (液化化に対する抵抗率) が 5 以上を示し、液化化現象を考慮するため、一次元有効応力解析である YUSAYUSA-2²⁵⁾ を用いた。

c) 地震応答解析結果

深層地盤ならびに浅層地盤での地震応答解析で得られた大阪層群上部重層群上面における応答地震動 (以

図-19 $PV(Ou)$ の算定結果

図-20 PGV の算定結果

下、 $PV(Ou)$ と称す)、地表面の最大応答速度 (以下、PGV と称す) の分布を図-19、図-20 に示す。

図-19 より、各測線における $PV(Ou)$ のピーク値は、東部測線では 126 kine、中部測線では 105 kine、西部測線では 102 kine であった。また、 $PV(Ou)$ の分布傾向は、東部測線では E-07~16 付近で、中部測線では C-03~07 付近で、西部測線では W-11~17 付近でピークを示していることが分かる。また、中部測線では C-08 から海側にいくに従い $PV(Ou)$ が大きくなる傾向にあるこ

とが分かる。図-20より、各測線における PGV のピーク値は、東部測線で 173 kine、中部測線で 146 kine、西部測線で 178 kine であり、図-18と比較すると、浅層地盤の影響を受けて PGV が $PV(Ou)$ に比して増幅していることが分かる。また、 PGV の分布傾向は、東部測線では算定点 E-06~17 で、西部測線では算定点 W-07~22 で PGV が顕著なピークを示していることが分かる。

d) 建築年代を考慮した木造構造物被害推定曲線の算定

木造構造物の被災は、木造構造物の建築年の影響を受けることが多いといわれている。そこで、谷口・飯田の研究²⁶⁾に従い、 PGV と木造構造物の被災率（中破以上）のデータより、成長曲線の一種であるロジスティック曲線を用いて木造構造物被害推定式を作成した。なお、用いた木造構造物の被災率は、村上らの神戸市東灘区の西部地域での被害状況の全数調査^{27),28)}結果を用いている。

木造構造物被害率を Y 、 PGV を V とすると、ロジスティック曲線は以下の式 (1)²⁶⁾ で示される。この曲線の特性から、 m は木造構造物の耐震力に、 a は対象地域における木造構造物の耐震性の一様性を示す指標に相当すると考えられる。

$$Y = K / \{1 + m \cdot \exp(-a \cdot V)\} \quad (1)$$

ここで、 K は漸近の上限値 (= 1.0)、 m 、 a は定数

また、建築年代は建築基準法施行令が昭和 46 (1971) 年に改正されたことを参考に、「昭和 49 (1974) 年以前」と「昭和 49 (1974) 年以後」の二種類に区分した。得られた木造構造物被害推定曲線を図-21 に示す。

図-21より、昭和 49 (1974) 年以前のロジスティック曲線は、30 kine 付近から立ち上がっているのに比して、昭和 49 (1974) 年以後のロジスティック曲線は、60 kine 付近から立ちあがっていることが分かる。このことから、木造構造物が中破以上の被害になりはじめる PGV は、建築年代によって異なり、新しい建築物は被災の限界値が大きいことが分かる。また、中破以上の木造

図-21 建築年代毎の木造構造物被害推定曲線

構造物被災率が 0.5 に達する地震動強さを平均的な耐震強さとする、昭和 49 (1974) 年以前の木造構造物の平均的な耐震強さは 104 kine、昭和 49 (1974) 年以後の木造構造物の平均的な耐震強さは 145 kine であると評価でき、古い建物ほど耐震性が劣る結果となった。

e) 建築年代を考慮した木造構造物地震危険度評価

「震災の帯」の出現原因としては、地表面の地震動特性だけでなく、地表に存在する建築構造物の分布にも影響を受けたと考えられる。そこで、両者を考慮できる指標として、建築年代別木造構造物被災ポテンシャル P_{wagi} を以下の式 (2) で定義した。

$$P_{wagi} = Y_1 \cdot w_1 + Y_2 \cdot w_2 \quad (2a)$$

$$Y_1 = 1 / \{1 + m_1 \cdot \exp(-a_1 \cdot V_i)\} \quad (2b)$$

$$Y_2 = 1 / \{1 + m_2 \cdot \exp(-a_2 \cdot V_i)\} \quad (2c)$$

$$w_1 = \frac{W_{H1i}}{\sum W_i} \quad (2d)$$

$$w_2 = \frac{W_{H2i}}{\sum W_i} \quad (2e)$$

ここで、 P_{wagi} : 算定点 i における建築年代別木造構造物被災ポテンシャル、 V_i : 算定点 i における PGV 、 W_{H1i} : サイト i における昭和 49 (1974) 年以前に建築された木造構造物数、 W_{H2i} : サイト i における昭和 49 (1974) 年以降に建築された木造構造物数、 $\sum W_i$: 全サイトにおける木造構造物数（サイトとは、算定点を中心としたある面積をもつ領域を指す）

一方、測線上の被災の程度を表す指標として、木造構造物被災度 D_{wi} を以下の式 (3) で定義した。

$$D_{wi} = \frac{W_{Di}}{\sum W_i} \quad (3)$$

ここで、 D_{wi} : 算定点 i における木造構造物被災度、 W_i : i サイトにおける木造構造物数、 W_{Di} : i サイトにおける半壊以上の被災木造構造物数

建築年代別木造構造物被災ポテンシャル P_{wagi} ならびに木造構造物被災度 D_{wi} の値は、サイトの定義の仕方によって当然のことながら異なってくる。木造構造物被災度 D_{wi} を示すサイトの大きさに関して、100 m の半径の円、100 m メッシュ、200 m メッシュで比較・検討した結果²⁹⁾によると、半径 100 m の円が妥当であることが判明している。よって、サイトとしては、建築年代別木造構造物被災ポテンシャル P_{wagi} ならびに木造構造物被災度 D_{wi} のいずれも、100 m の半径の円を用いることとした。また、これらの指標は、分母の定義が測線内の全サイトの木造構造物数の和となっているため、対象とするサイト数が異なってくればその値も変わることとなる。よって、本研究ではこれらの指標の絶対値が被災の程度を表しているとは考えておらず、測線内の他の算定点の値と比較することにより、

図-22 測線毎の木造構造物被災ポテンシャル (P_{wagi}) と木造構造物被災度 (D_{wi})

算定点間の相対的な被災の大小を示す指標として用いている。

図-22 に、測線毎に求めた建築年代別木造構造物被災ポテンシャル P_{wagi} ならびに木造構造物被災度 D_{wi} の算定結果を示す。

図-22 より、各測線内において木造構造物被災度 D_{wi} が大きな値を示している算定点は、震度7の分布域である「震災の帯」に入っていることがわかる。また、建築年代別木造構造物被災ポテンシャル P_{wagi} も同様に「震災の帯」を再現しており、木造構造物被災度 D_{wi} の値とほぼ等しいことから、被害をほぼ再現できることが明らかになった。特に、東部測線や中部測線では、再現結果が良好な結果を示している。しかし、西部測線では、算定点 W-11～15 ならびに W-20～22 での P_{wagi}

は D_{wi} とは異なる結果となっている。これに関しては建物の大きさ等の観点から再考を要するといえる。

7. 地盤情報データベース構築の問題点と今後の課題

地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」を構築するに際して、いくつかの問題点や障害が存在した。以下では、データの収集、データの質・解釈、データの表現方法ならびにデータの活用および維持管理に整理して、問題点と今後の課題に関して述べる。

(1) データの収集

一般にボーリング調査は、行政によって得られる場合が多い。これは構造物の施工に関した地盤調査の一環として行われるためである。しかし、行政ではデータの保存期間が定められており、この保存期間が経過すると廃棄されてきた。このため、行政におけるボーリングデータは、行政機関が必要として意識して保存しない限りは、

一般に多く蓄積されていないのが実状であった。しかし、神戸市では1970年代後半より、ボーリングデータの蓄積が進んでいた。これに関する経緯は、2章で詳しく説明した通りである。このため、構築当初の段階で、約5000本のボーリングデータから出発することができた。

もう一つの障害としては、当初ボーリングデータは本来の目的以外、換言すれば構造物の設計のために使われる以外に活用されることが目的外使用として禁止されていたようで、ボーリングデータをデータベースとして活用することが進まなかった。

次に問題となったのは、データの著作権の問題であった。当初は、行政側が所有する著作権であるため、これを民間に開放することには大きな抵抗があった。しかし、神戸市が著作権を所有するボーリングデータは公開しても可とする神戸市当局の英断により、誰でも使えるように市民への公開を前提としたデータベースを構築することができた。しかし、神戸市以外の他行政機関からは民間への公開は時期早尚として、当初はデータの提供を受けることができなかった。

当時は、行政機関同士がボーリングデータを共有する協議会がすでに発足し、行政機関同士ではデータの活用ができるシステムが出来上がっていたが、民間へのデータ公開には至っていなかった。しかし、2001年「行政機関の保有する情報の公開に関する法律」が施行されて以降、徐々にデータの公開が始まっている。このような背景から、「神戸 JIBANKUN」でも他行政機関からのデータの提供を受けることができた。しかし、

建築確認等の民間のボーリングデータに関しては、「神戸 JIBANKUN」では収集していない。ボーリングデータの著作権その他に関しては、その後地盤工学会九州支部が地盤情報データベースの構築に際して検討を行い、数多くの検討がなされている³⁰⁾が、「神戸 JIBANKUN」では、全てが神戸市のデータであったため、著作権の問題は生じなかった。このような地盤情報データベースの構築に関しては、その後社会的なニーズも高まり、現在、科学技術振興調整費により、防災科学技術研究所を中心として「統合化地下構造データベースの構築」のプロジェクトが進行している。このプロジェクトでは、250m メッシュの地盤情報データベースを全国展開で構築しようとしている。この場合問題となるのは、ボーリングという点のデータを活用して面の情報を獲得する空間補間の技術である。数学的な手法のみならず、従来得られている地質・地形の知見を活用することも信頼性のある品質を確保するための技術が必要であろう。今後の展開が期待される。

その他の問題点としては、データベースの構築に際し、一般に多くの費用を要することである。この費用を何処が負担するかが大きな問題となるが、「神戸 JIBANKUN」では、阪神・淡路大震災の被災原因の究明のための活用ということもあり、神戸市側からの負担を仰ぐとともに、経費の節減のため多くのボランティア活動により後述するデータの解釈がなされた。

(2) データの解釈

ボーリング調査は、各調査会社によってなされ、コアの判読も技術者によってなされるため、多くのボーリングデータを収集した場合には、ボーリングデータ判読結果のバラツキが見られる。「神戸 JIBANKUN」では、神戸の地質、地盤特性に関する過去の成果を活用して、地盤調査技術者により地表から沖積層、段丘相当層に区分し、それぞれを砂層、礫層、粘土層の三層に区分した。沖積層、段丘相当層以外は沖積粘土層である Ma13 や第四紀堆積物である大阪層群の最上位層である粘土層 Ma12 を識別した。これにより、地層の解釈を容易にするとともに、動的解析の際の工学的性質もこの地層、土質ごとに定義した。このように解釈されたボーリングデータベースは、わが国では初めてのものであった。解釈には個人の主観が入ることは避けられないが、「神戸 JIBANKUN」では複数の技術者が担当することにより、この主観を排除することに努めた。

地盤データベースの統合化が、近年学会等で行われているが、単にデータを集積することのみならず、品質を確保するとともに、集積によって得られる広域情報を活用して、地盤形成プロセスが理解できるように

時間的な解釈を与えた地層の同定など、付加価値の高いデータを構築することも統合化に際しては必要な条件となろう。このような解釈は、地域において得られている知見が重要であるため、地域的な視点で解釈が行われる必要があり、統合化の地域的な範囲も学会の支部単位程度が妥当であると思われる。

(3) データの表現方法

「神戸 JIBANKUN」では、3章で述べたように GIS を活用した。このシステムの導入によりデータの活用は大いに容易となった。本来は、地盤構造は三次元で表示されるほうが理解しやすいが、平成 7 (1995) 年当時は GIS の三次元表示はまだ一般的ではなく、平面二次元と断面二次元の併用により擬似三次元化した。また、当時は GIS の Web 化は、まだ考えられなかった。しかし、近年では、千葉県³¹⁾や島根県³²⁾等でインターネットを活用したデータの公開が進んでおり、今後の方向性を示すものとして注目される。

(4) データの活用および維持管理

データベースの構築は、どの場合でも一般に構築には多くの力が注がれるが、一度出来上がるとデータの維持管理や更新が行われにくく、データの信頼性が薄れていくことが多い。通常は行政機関や学会、協議会等が維持管理を行うことが多いが、「神戸 JIBANKUN」では、平成 10 (1998) 年度には、この地盤データベースの利用と更新、および今後の地盤に関する研究を行うために、産官学よりなる「神戸の地盤研究会」を発足させた。そこでは、調査研究委員会を立ち上げ、データを活用した被災原因の究明や将来の地震に対する被災予測に向けた研究が行われ、その成果が発表されてきた^{1),33)}。一方、データの維持管理や追加に関しては、この研究会に維持管理部会を設けて、そこで維持管理を行うとともに、毎年追加されるデータに対しては、新たな CD-ROM を作成して、年会費を負担した会員に配布してきた。この研究会は、その後、2004 年に名称を「神戸の地盤・減災研究会」に変更し、地盤を考慮した住宅耐震化促進等も視野に入れることとした。また、研究会活動は会費制で継続するとともに、維持管理に関しては「こうべまちづくりセンター」に移管して、維持管理費を会員から負担してもらっている。このように、何らかの財政的な負担は利用者が負担する仕組みをとっている。地盤情報データベースは、地域のみならず国土の貴重なデータであるため、将来的には、社会的な合意形成ができれば公的な機関による維持管理が必要であると考えられる。

8. おわりに

本報では、わが国では初めてといえる多くの特徴 (デ

デジタル化されたデータ、デジタル地形図の活用、汎用性のあるシステム、解釈されたデータの活用、市民への公開、GISの活用、一部システムの無償提供、勉強会による活用、会員制による維持管理等）を有する高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」の概要を紹介するとともに、「神戸 JIBANKUN」を活用した研究事例を紹介した。

対象とする地域の大きさに応じてデータベースの内容は異なってくるものと考えられるが、神戸市の面積（約 550 km²）と扱うボーリングの本数（約 5000 本）、データベースの構築の目的によっても異なるが、使いやすい地盤情報データベースの構築ができたものと考えている。しかし、IT 化の進歩は著しく、10 年前のシステムは陳腐化しつつあるのが現状である。今後は、GIS 三次元システムの導入、Web 化によるデータ更新作業の簡便化等の改良を行い、誰もが活用しやすいシステムにしていく必要があるといえる。

謝辞：本報の作成に関しては、「神戸の地盤・減災研究会」の会員各位に多大のご支援をいただいた。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 神戸の地盤研究会：研究成果報告書，神戸の地盤研究会研究成果報告会，2004.
- 藤田和夫，笠間太郎：六甲山地とその周辺の地質図，神戸市および隣接地域地質図（1/50,000）及び説明書，神戸市企画局，58p.，1971.
- 神戸市企画局総合調査課：神戸の地盤，神戸市都市整備公社，254p.，1980.
- 石見義男：神戸のまちと地盤，神戸新聞出版センター，192p.，1987.
- 建設省国土地理院：数値地図 50 m メッシュ（標高），日本— III，建設省国土地理院，1997.
- 清水靖夫編：明治前期・昭和前期 神戸都市地図，柏書房，1995.
- 沖村孝，市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，No.358/III-3，pp.69-75，1985.
- 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング，第 22 回地盤震動シンポジウム資料集，pp.23-34，1994.
- 建設省国土地理院：1/10,000 地震防災土地条件図（微地形），「芦屋」，「六甲アイランド」，「三宮」，「長田」，建設省国土地理院，1996.
- 神戸市，建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の地盤—神戸 JIBANKUN の構築ならびに地盤と被災の分析—，建設工学研究所，178p.，1999.
- 神戸市，建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の活断層，建設工学研究所，55p.，1999.
- 神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書，301p.，1995.
- 日本都市計画学会関西支部，日本建築学会近畿支部：阪神・淡路大震災被害実態緊急調査 被災度別建物分布状況図集，15p.，1995.
- 沖村孝，二木幹夫，岡本敦，南部光広：兵庫県南部地震による宅地擁壁被害の特徴と原因，土木学会論文集，No.637/IV-45，pp.63-77，1999.
- 建設工学研究所：阪神大震災被害状況調査報告書（概要版），176p.，1995.
- 国土地理院：平成 7 年兵庫県南部地震災害現況図，1995.
- 濱田政則，磯山龍二，若松加寿江：1995 年兵庫県南部地震液状化・地盤変位及び地盤条件，地震予知総合研究振興会，194p.，1995.
- 田中耕平：1995 年兵庫県南部地震による地表面変位量図，防災科学技術研究所，53p.，1996.
- 沖村孝，鳥居宣之，吉田晋陽，藤井紀之：「神戸 JIBANKUN」を用いた地震時木造構造物被災分布発生原因に関する研究，都市安全研究センター研究報告，No.11，pp.207-226，2007.
- 沖村孝，鳥居宣之，藤井紀之，毛利篤：建築年代を考慮した地震時木造構造物被災ポテンシャル評価手法の提案，都市安全研究センター研究報告，No.11，pp.227-240，2007.
- 松島信一，川瀬博：1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No.534，pp.33-40，2000.
- 吉田望，末富岩雄：DYNEQ：等価線形解析に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業株式会社技術研究所報，No.22，pp.61-70，1996.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 杉戸真太，会田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994.
- 吉田望，東畑郁生：YUSAYUSA-2 理論と使用法，佐藤工業株式会社中央技術研究所，45p.，1995.
- 谷口仁士，飯田汲事：地震時住宅被害予測法定式化への試み—主として，地盤液状化に起因する被害を中心に—，日本建築学会構造系論文集，No.365，pp.108-118，1986.
- 村上雅英：東灘西部地区全数調査，平成 7 年阪神・淡路大震災木造住宅等震災調査報告，木造住宅震災調査委員会，pp.116-126，1995.
- 村上雅英，田原賢，藤田宣紀，三澤文子：阪神・淡路大震災にみる在来木造都市型住宅の問題点，日本建築学会構造系論文集，No.481，pp.71-80，1996.
- 藤井紀之：地震動増幅特性および構造物分布を考慮した神戸市域における建築構造物地震危険度評価に関する研究，神戸大学大学院自然科学研究科修士論文，54p.，2002.
- 善功企，神田尚樹，安福規之，橋村賢次：九州地盤情報データベース構築における課題と対応，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.23-24，2005.
- 千葉県環境生活部水質保全課地質環境対策室：千葉県地質環境インフォメーションバンク，<http://www.pref.chiba.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>，2007（2007/7/6 閲覧）.
- 協同組合 島根県土質技術研究センター：しまね地盤情報配信サービス，<http://www.shimane.geonavi.net/shimane/top.jsp>，2007（2007/7/6 閲覧）.
- 神戸の地盤減災研究会：研究成果報告書—中間とりまとめ—，神戸の地盤研究会研究成果報告会，2002.

(2007. 7. 10 受付)

The Great Kobe Earthquake ($M_j = 7.3$) struck the southern part of Hyogo Prefecture on January 17, 1995. Distribution of damaged houses due to this earthquake was like a belt. In order to understand this mechanism, the detailed geotechnical information database system was constructed by Kobe Local Government, in corporate with many kind of geotechnical engineers and researchers. This database was named as “Kobe JIBANKUN”. In this paper, we described the outline of this database and study cases that uses it. In addition, the problems and difficulties on maintenance were mentioned and some future problems were pointed out.