

Vol.16 2005.11

[Topics]

杭基礎設計プログラム Pile-UK の紹介

[Technical Reports]

2004 年新潟県新潟県中越地震および余 震の観測記録にみられる Hanging-wall 効果

地震リスク・マネジメント技術を活用し た地震対策の効果検証

レーザー計測データを用いた有限要素 法による洪水氾濫解析

自動属性判別法によるレーザ計測データ の有効活用について

Keze

alytical Engineering

ournal of



【巻頭言】

今後の景気回復に向けて

エンジニアリング営業部 部長 横田 健治

バブル崩壊後リストラの嵐が吹きまくっていた一時の重苦しい建設業界にも、一昨年の後半から景気 回復の風を感じるようになって来ました。期せずして失業率も 2002 年をピークに減少傾向を続けてい るようです。

しかしながら新聞紙上でも言われているように、まだまだ大企業を中心とした景気回復であって中小 企業まで行き渡るには更に年月が掛かるようです。未だ厳しい環境におかれている各企業であっても勝 ち組として残るため、この厳しい中でさえ経営的・技術的な施策(投資)を積極的に始め出したのが、 ちょっと前とは違う"ここ数年のトレンド"だと感じております。

公共投資への依存度の高い土木系各社は、公共予算減少を背景に本格的な技術提案型営業あるいは民 間市場への開拓を模索しており、一方、建築系各社はここ数年の住宅やマンションブームで息を繋いで、 そして新商品・新技術の開発や合理化の為の新たな設備投資を序々に始め出しております。

バブル崩壊後長期に亘って控えてきた設備・研究投資の再開と共に、新たなIT導入に関するご相談 や研究開発・新商品開発に係わる業務依頼のお話が増えてまいりました。これらの開発テーマの多くは 安全性やコスト削減に係わるものが中心ですが、今後は快適性に係わる環境テーマも増えてくると予想 しております。

更にここへ来て、地震防災や環境問題が改めてクローズアップされ出しており、それらに関する業務 量も増える傾向になってきています。加えて、不動産投資信託(REIT)や投資ファンドで誘発される ような新たなビジネスも数多く現れてくるなど、市場の変化には目まぐるしいものがあります。

国も"小さな政府"を打ち出し、道路公団の民営化に続き郵政民営化を始め多くの改革を実現し活性 化を図ろうとしている今日、我々も市場の変化にスピーディに対応可能なフットワークの良い組織運営 を心がけ、皆様のご期待に答えるべく努力して行く所存です。

今後とも何卒皆様のご支援の程お願い申し上げます。

解析雜誌 Vol.16 2005.11 目次

【巻頭言】 今後の景気回復に向けて 横田 健治	02
<i>Topic</i> 杭基礎設計プログラム Pile-UK の紹介	05
Technical Report 2004 年新潟県中越地震および余震の観測記録にみられる Hanging-wall 効果 司 宏俊、翠川三郎	11
地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証 (その1.基本概念) 高橋雄司	13
地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証 (その2.対象震源域および地震動) 澤飯明広、司 宏俊、高橋雄司	15
地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証 (その4.制震ダンパーによる工場の改修) 村地由子、樋口真由子	17
レーザー計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析 上野幹夫、小林一郎、山本一浩、安重晃、橋本淳也	19
自動属性判別法によるレーザ計測データの有効活用について 山本一浩、小林一郎、上野幹夫、橋本淳也	25

お問い合わせはこちらへ

解析雑誌バックナンバーは KKE 解析ホームページでご紹介しています。 PDF 形式でダウンロードも可能ですので、是非下記アドレスにお立寄りください。

http://www4.kke.co.jp/kaiseki/

'KKE'は弊社 (株)構造計画研究所の略称です。

35



for Windows



地図情報(bmpファイル)の読み込み可能 2D or 3Dによる確認表示 自動メッシュ分割機能 GUI操作によるメッシュ範囲分割や追加・ 削除が可能 簡単な計算条件設定および出力指定 風環境評価機能による客観的評価が可能



AutoCADをカスタマイズした容易な形状

定義機能

自動メッシュ分割機能

高性能熱流体ソルバの搭載。流れと熱の

連成計算や濃度拡散解析が可能

豊富な可視化機能。ベクトル・コンタ

等値面・マーカ粒子追跡・

ストリームライン表示・

アニメーション表示



水、空気、ガス拡散、地下浸透流・・・ 流体解析コンサルもお任せ下さい

【新商品ご紹介】

杭設計プログラム Pile-UK

杭設計プログラム「Pile-UK」は、Microsoft Windows の環境で使用できる Windows Application です。弊社にて今まで培ってきました杭設計のノウハウをふんだんに盛り込 み、Windows の操作性を利用したスピーディーなデータ作成を実現し、完成度の高い計算 書を Microsoft Word ファイルとして生成することができます。

開発コンセプト

杭設計プログラム「Pile-UK」は杭の設計が

- ・簡単に!
- ・詳細に!
- ・迅速に!
- ・経済的に!

行えるプログラムを開発コンセプトに掲げ開発いたしました。



Pile-UK 入力画面

機能概要

杭設計プログラム「Pile-UK」は主に以下の機能 を提供いたします。

NTT BUILD の結果ファイルのインポート
 BUILD計算結果ファイルよりスパン配置情報、
 支点反力、水平力を取得することができます。



BUILD 結果ファイルのインポート画面

・<u>杭の自動配置</u>

入力された軸力、地盤条件により杭の自動配置 を行います。場所打ち杭の場合は鉛直支持力計 算より杭径を、既製杭の場合は鉛直支持力及び 弾性支承梁による水平力計算結果より杭種・杭 径・杭本数を設定します。



杭の自動配置結果画面

Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11

・多層地盤解析による杭の断面検定

液状化を考慮した地盤、突出杭、軟弱地盤等に 対しても杭の深度方向に詳細にモデル化し、弾性 支承梁モデルよりも精度の高い杭の応力を求め断 面検定を行うことが出来ます。



ボーリング地盤柱状図

 ・
 終局強度断面検討

場所打ち杭については、終局強度の検討が可能 です。終局時の応力を入力または、一次設計時の 係数倍した応力に対して終局断面検討を行います。 度 コピー摩ーストで入力することができます。

・Microsoft WORD ファイルによる計算書作成

計算結果は Microsoft WORD 形式ファイルを 出力します。杭の一連の設計情報が組み込まれて いるので、そのまま設計図書や他の設計図書へ組 み込むことが可能です。



杭配置図(計算書)

・Microsoft Excel 等からのデータコピーペースト 地盤符号タ入カフォームはテキストボックスだけで なく、表形式による入力を用意しています。 深音での軸力、基礎重量、ボーリングデータ や地盤配置、杭配置などを簡単に範囲指定による

3

CAREWORD ACCOUNTS	E 10 10 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	S440			1000
	(m)	(m)	名	値	10
	0.00 1.00	1.00	砂質土	1 2	*1228*
	2.00 3.00	1.00 1.00 1.00	砂質土砂質土	2 2 2	
	4.00	1.00 1.00	砂質土 砂質土	2	4
M-N 相関図	7.00	<u>1.00</u> 1.00ボー	砂質土 リン的質ター表形	<u>4</u> 式入力 3	- 1653
	9.00	1.00 1.00	砂質土 砂質土	2 3	
	10.00 11.00	1.00 1.00	砂質土砂質土	3 2	
	12.00	1.00			

・<u>バージョンアップ項目</u>

場所打ちコンクリート杭の鉄筋選定計算 基礎梁の設計(オプション予定) 杭偏心の考慮 等杭基礎設計のためのツールとして機能拡張を 予定しております。

・ 価格及び実行環境

販売価格:¥330,000.-(税込み価格 ¥346,500.-)

実行環境

対応機種	Intel Pentium 以上(Pentium 4 推奨) 搭載の PC/AT 互換機
対応 0S	Windows2000
	Windows XP Professional
	Windows XP Home Edition
ディスプレイ	解像度 1024 × 768、256 色以上
メモリ	256MB 以上(512MB 以上推奨)
ディスク容量	1GB 以上の空き容量
利用アプリケーション	Microsoft Word2000以上

「Pile-UK」商品のお問い合わせにつきましては、

(㈱ウチダデータ 建設情報システム事業部

03-5634-3581(東京)

06-6920-2430(大阪)

宛てお願いいたします。





Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11



2004 年新潟県中越地震および余震の観測記録にみられる Hanging-wall 効果

司宏俊¹⁾、翠川三郎²⁾

1) 株式会社構造計画研究所

2) 東京工業大学

1.はじめに

2004 年新潟県中越地震において、震源近傍では 水平最大加速度が1Gを越す強震記録が数地点にお いて記録され、これらの値が既往の距離減衰式から の値よりも大きく上回っていることが指摘されて いる。その原因は、観測点が逆断層の上盤にあり Hanging-wall 効果が現れたことが指摘されている が、詳細な検討はなされていない。本研究では、新 潟県中越地震の本震(M_j6.8)と最大余震(M_j6.5) の際に観測された最大加速度、最大速度の距離減衰 特性を検討した上、Hanging-wall 効果の影響を定量 的に分析することを目的とした。

2.データ

検討に用いた断層モデルは、本震について堀川 (2004)、最大余震について纐纈・ほか(2004)によ るものとし、地震のタイプを地殻内、地震規模を示 すモーメントマグニチュード M_wを本震で 6.6、最 大余震で 6.3 とした。

用いた強震記録は、(独)防災科学技術研究所によ る K-NET、KiK-net、気象庁及び新潟県などの自 治体による震度観測ネットワーク、国土交通省、 JR 及び日本道路公団などにより観測・公表されて いるものである。これらのデータのうち、デジタル 記録が公表されている場合、加速度波形に 0.1~ 10Hz のバンドパスフィルターを施し、地表におけ る最大加速度の値を求めた。地盤情報の得られてい る地点について加速度波形を積分して硬質地盤上 の最大速度の値を求めた。デジタル記録が入手され ていない場合、公表されている最大振幅値のうち最 大加速度のみ用いた。

3.解析結果

図1に本震の最大加速度、最大速度と距離の関係 を示す。同図に司・翠川(1999)の距離減衰式による 予測値を200kmまで示されている。図から、最大 加速度、最大速度ともに、観測記録と距離減衰式に よる値とおおむねー致しているが、距離 10km~ 20km において、距離減衰式の+1 よりも大幅に 上回る記録が見られた。同様な傾向が最大余震の記 録にも見られた。

ここで、Abrahamson and Somerville (1996)と同様に、 本震、余震で得られた上盤(Hanging-wall)と下盤 (Foot wall)の記録と距離減衰式の残差を計算し、 残差と距離の関係をそれぞれ図2、図3にプロット してみた。これらの図に、上盤側の記録について正 の距離、下盤の記録について負の距離を用いた。ま た、図には 5km ごとの残差平均値を で示し、そ の標準偏差をエラーバーで示している。図に Abrahamson and Somerville(1996)及び司・翠川(2005) による補正関数を併記している。図2に示す残差平 均値から、上盤側の残差は下盤側より大きく、その 値は、距離が 3km 付近では小さいが、距離ととも に増加し、15km 付近で最大の約3倍の値を示し、 20km 付近から小さくなる。図3に示す最大速度の 残差が同様な傾向を示している。これらの結果は Hanging-wall 効果による影響を強く示唆したもの と思われる。図から、Abrahamson and Somerville (1996)の補正関数はHanging-wall効果を過小評価し ている傾向にあることが分かる。今後、さらに解析 データを増やして、適切な補正関数を作成する必要 があると思われる。

謝辞:使用した強震記録と地盤情報は独立行政法人防災 科学研究所の KiK-net、K-NET、気象庁、新潟県、福島 県、群馬県、埼玉県、長野県による震度観測ネットワーク、国土 交通省、JR、日本道路公団によるものです。関係者各位 に篤くお礼申し上げます。





図2 最大加速度の残差と距離の関係



図3 最大速度の残差と距離の関係

図1 本震地震動距離減衰特性

地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証

(その1.基本概念)

高橋 雄司 1)

1) 独立行政法人建築研究所

1.はじめに

強度/靭性の向上、制振(震)、免震などの優れた地震 対策技術を普及させるためには、それらに投資することの メリットを建物所有者に説明する必要がある。

Takahashi *et al.*は、建物所有者を地震対策に誘導する ことを目的とする、地震リスク・マネジメント手法を提案 した¹⁾。この手法では、地震リスクを算出する際に、関連 研究分野(地震学²⁾、地盤工学、構造工学など)の最新の 知見を最大限に導入できるため、建物所有者に合理的な判 断材料を提供できる。

この地震リスク・マネジメント手法を実用的な技術にす るためには、新築および既存の各種建物を対象として、多 くの事例研究を実施しておく必要がある。特に、地震調査 委員会²⁾により地震危険度が高いと発表されている地域に おいては、建物の地震対策の普及が急務である。このため にも、地震危険度の高い地域において、地震対策の効果を 検証した事例を蓄積しておくことが有効である。

そこで本研究では、新築および既存の各種建物を対象として、先述の地震リスク・マネジメント手法¹⁾の適用事例 を作成する。建物の建設地点は、地震調査委員会・長期評 価部会により発生確率が高いと発表されている宮城県沖 地震(30年以内99%)および南海地震(同40%)を考慮 して、仙台市および高知市と仮定する。各事例においては、 強度/靭性の向上、制振(震)、免震などへの初期投資に よりLCCを低減できるかを検討する。

本稿(その1)では、本研究で用いる地震リスク・マネ ジメント手法を概説する。(その2)では、対象とする宮城 県沖地震および南海地震の震源域、地震活動、地震波につ いて記す。(その3)から(その6)では宮城県沖地震を対 象とする事例研究、(その7)から(その11)では南海地 震を対象とする事例研究を示す。筆者らにより構成される 「地震リスク・マネジメント研究会」は、実用化された地 震リスク・マネジメント技術を活用して、地震対策の普及 を目的とする一般市民向けの防災セミナーを開催した。本 稿の(その12)では、そのセミナーについて報告する。

2. 地震リスク・マネジメント手法の概要 1)

2-1. 定義

地震リスク・マネジメントを、図1のように幾つかの設 計案の中から建物所有者にとって最適な案を選ぶ、意思決 定問題と定義する。各設計案の将来の損失は確定的には予 測できず、図1右のようなリスク(損失の確率密度関数) ³⁾で表わされる。設計案として例えば、基準法通りの設計、 構造体の強度/靭性の向上、制振(震)免震などが挙げ られる。構造設計だけではなく、地震保険保険への加入/ 地震デリバティブの購入、リスクの保有/証券化、事後対 応も設計案としてとらえることが出来る。

地震リスク・マネジメントでは、以上の設計に関わる初 期費用だけに注目するのではなく、建物の供用期間を通し ての総出費(LCC)を地震リスクとし、それに基づいて設 計案を選ぶことが合理的である。考慮すべき LCC は、初 期費用と供用期間中に発生する地震による損傷費用の総 和で表わすことができる。



図1 地震リスク・マネジメントにおける意思決定樹木

2-2.ライフサイクル・コストの定式化

図1右の各設計案のLCCは確定値としては予測できな いが、最小期待損失基準⁴⁾に従うと、LCCの期待値(平均 値)が最小となるものを最適設計案として選ぶことができ る。ある設計案の期待LCCは(1)式のように定式化される¹⁾。

$$E[C_{L}] = C_{I} + \sum_{all \ sources} \sum_{j=1}^{K} E[C_{D}(m_{j})] \int_{t_{0}}^{t_{0}+t_{lyc}} \mathcal{Q}^{t-t_{0}} \sum_{n=1}^{\infty} f_{W_{n}}(t,m_{j}|W_{1} > t_{0}) dt$$
(1) $\overline{\mathbf{rt}}$.

ここで、E[·]は確率変数・の期待値、 C_L はLCC、 C_I は初

期費用、Cp(m)はマグニチュード m_j の地震に対する損傷 費用、 t_0 は建物の開始時間、 t_{life} は建物の供用期間、Q = 1/(1+d)は金利係数、dは利子率、 $f_{Wn}(t,m_j|W_1>t_0)$ はマグニ チュード m_j の地震について、最後の地震から t_0 の間に地 震が起きていないという条件のもとで、n番目の地震発生 時刻の確率密度関数、*all sources* は考慮される全ての震源 域を指す。(2)式は、地震の発生を更新過程のひとつである ポアソン過程とした場合の特殊解である¹⁾。

$$E[C_L] = C_I + \frac{Q^{t_{life}} - 1}{\ln Q} \times \sum_{all \text{ sources } j=1}^{K} \nu(m_j) \cdot E[C_D(m_j)] \quad \text{for } Q \neq 1$$

(2a)式

$$E[C_L] = C_I + t_{life} \times \sum_{all \text{ sources } j=1}^{K} v(m_j) \cdot E[C_D(m_j)] \quad \text{for} \quad Q = 1$$

(2b)式

ここで、v(m)はポアソン・モデルを仮定した際の、マグニ チュード mjの地震の単位時間あたりの発生率である。

(1)式および(2)式中の Cr(m)は、図 2 に示す断層破壊及 び弾性波の伝播、表層地盤の増幅、建物の応答、損傷費用 発生までの全てのプロセスを、関連する研究分野(地震学、 地盤工学、構造工学など)で開発されたモデルを用いてシ ミュレーションすることで算出できる。ただし、図 2 に示 す全ての事象は不確定性を含むので、モンテカルロ・シミ ュレーションにより期待値 E[Cr(m)]を求める。



図2 断層破壊から損傷費用発生までのプロセス

各サンプルの C_D(m_j)を求める際には、理論上、如何 なるモデルでも用いることができる。しかしながら実用上 は、顧客(建物所有者など)の要望に応じたメニューを予 め用意しておくことが現実的である。図3には、現時点で 想定されるメニューの一例を示す。ここに示したメニュー はあくまでも現時点での一例なので、顧客からのニーズや 各分野におけるシミュレーション技術の進歩に応じて、随 時、柔軟に更新されるべきである。



図3 $C_D(m_i)$ を算出するためのシミュレーション・モデルの例

2-3.既往の定式化との違い

LCC の算出式は、Ang & De Leon の(3)式 ⁵⁾で代表され る。PEER (Cornell & Krawinkler)による年期待損失 ⁶⁾ は、(3)式の 以降と同じである。

$$E[C_L] = C_I + \frac{Q^{t_{He}} - 1}{\ln Q} \sum_{j=1}^{K} v(y_j) E[C_D(y_j)]$$

(3)式

(1)式および(2)式では変数が mj(マグニチュード)であ るのに対して、既往(3)式では y(地震動強さ: PGA、PGV、 震度など)となっている。このため既往(3)式では、地震動 強さ以外の情報が消去される。一方で、(1)式および(2)式 の場合、CD(m)を算出する際には、図2に示す断層破壊か ら損傷費用発生までの一連の現象を「順方向」にシミュレ ーションできる。特に、物理現象に基づく最新の地震動作 成手法 2)を直接的に利用できる。

また、建物位置での地震動強さ(PGA、PGV、震度な ど)の発生に関しては、物理的に明快な確率モデルを設定 することが困難である。このため既往(3)式では、便宜的に、 ポアソン過程としている。これに対して(1)式では、断層破 壊発生の確率モデルとして、任意の更新モデル(物理現象 に基づく BPT モデル²⁾など)を導入できる。

【参考文献】

- 1) Takahashi, Y., Der Kiureghian, A. and Ang, A.H-S., *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 33, pp. 859-880, 2004 投稿・査読中
- 2) 地震調査委員会 HP、http://www.jishin.go.jp/main/
- 3) 日本工業標準調査会「JIS Q 2001 リスクマネジメン トシステム構築のための指針」日本規格協会、2001.5
- A. Ang and W. H. Tang (訳:伊藤学・亀田弘行・黒田 勝彦・藤野陽三)「土木・建築のための確率・統計の応 用」丸善、1988.1
- Cornell C.A. and Krawinkler H., "Progress and challenges in seismic performance assessment", *PEER Center News*, Vol. 3, No. 2, pp.1-3, 2000.

地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証

(その2.対象震源域および地震動)

澤飯 明広¹⁾、司 宏俊¹⁾、高橋 雄司²⁾

- 1) 株式会社構造計画研究所
- 2) 独立行政法人建築研究所

1.はじめに

本稿(その2)では、(その3)から(その11)に示す 事例研究で対象とする震源域、その地震活動および地震動 について記す。第2章は宮城県沖地震(*M*7.5前後、30年 以内の発生確率99%)¹⁾、第3章は南海地震(*M*8.4前後、 30年以内の発生確率40%)¹⁾である。

詳細については、文献2)を参照されたい。

2. 宮城県沖地震

2-1. 震源域および地震活動

本稿(その3)から(その6)の事例研究では、建物の 位置を図1中 2(宮城県仙台市)とする。震源域は、宮 城県沖地震を含む M5.5~7.5 程度の地震発生が予想され る区域(図1中の)とする。地震カタログおよび地震調 査委員会長期評価部会の報告書¹⁾を参考に、時間とマグニ チュードの関係を示したものが図2(a)である。図2(b)は、 各マグニチュード($m_1 = 5.5$ 、 $m_2 = 6.5$ 、 $m_3 = 7.5$)の年 発生率を計算したものである。宮城県沖地震($m_3 = 7.5$) の発生を BPT モデル($\mu = 37.1$ 年、 = 0.177、h = 27年)¹⁾とすると、その発生率は図3のようになる。



2-2.地震動

本稿 (その3)から(その6)の事例研究において、(その1)の(1)式中の $E[C_D(m_j)]$ を求める。ここでは、断層破壊から損傷費用発生までの一連の事象を、(その1)の図3 に示した「詳細法」でシミュレーションする。対象震源域における $m_1 = 5.5$ 、 $m_2 = 6.5$ 、 $m_3 = 7.5$ の地震に対して、それぞれ 100 サンプルのモンテカルロ・シミュレーションを行い、各サンプルの損傷費用 $C_D(m_j)$ の期待値として $E[C_D(m_j)]$ を求める。

地震基盤上の地震動波形は統計的グリーン関数法によ

って作成した。断層パラメータや地下構造などは、地震調 査委員会強震動評価部会で用いられたもの¹⁾に基づいて決 めた。震源域内に断層の位置、断層面内に破壊開始点位置、 アスペリティ位置をランダムに設定した。地震基盤から地 表面までの地盤応答解析は、SHAKEによって行った。そ の際、水平成層地盤モデルにおける層厚、密度、S波速度 にばらつきを与えて設定した。



図 4 は、 $m_1 = 5.5$ の地震に対する地表面の地震動波形 100 サンプルのうち PGA が最小および最大となるサンプ ルである。図 5 は、宮城県沖地震($m_3 = 7.5$)に対する結 果である。図 6 は、地震動波形 100 サンプルの加速度応答 スペクトルの統計値である。

以上の図より、m1 = 5.5 の場合、断層面が小さく、建物 位置から断層までの距離が遠い場合もあることから、最 大・最小の地震動波形が大きく異なる。また、地震規模が 小さいため、比較的短周期成分が卓越する。m2 = 7.5 の場 合、断層面が大きく距離の範囲が比較的小さいが、断層破 壊伝播効果などの影響より、この場合でも、最小・最大の 地震動波形に大きな差がみられた。また、地震規模が大き く地盤の非線形挙動が現れることもあるため、周期 0.5 秒 ~1.0 秒程度にも大きな振幅が生じている。

Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11



3. 南海地震

3-1. 震源域および地震活動

本稿(その7)から(その11)の事例研究では、建物の 位置を図7中 2(高知県高知市)とする。震源域は、予 想される南海地震の断層面を含む区域(図7中の)とす る。図8は、震源域の地震活動である。南海地震(m3 = 8.0) の発生を BPT モデル(µ=90.1年、=0.22、 to = 59年) ¹⁾とすると、その発生率は図9のようになる。



図7 建物位置(2)、震源域()および歴史地震()



(a) 時間 - マクニナユート (b) マクニナユート - 年先生4 図 8 対象震源域の地震活動



3-2.地震動

2-2 節の宮城県沖地震の場合と同様に、 $m_1 = 6.0$ 、 $m_2 = 7.0$ 、 $m_3 = 8.0$ の地震に対して、断層面位置、断層面内に アスペリティ、破壊開始点の位置、及び地盤物性値にばら つきを与えて、各 100 サンプルの地震動波形を作成した。 図 10 は、 $m_1 = 6.0$ の断層破壊に対する地表面の地震動 波形 100 サンプルのうち PGA が最小および最大となるも のである。図 11 は、南海地震($m_3 = 8.0$)に対する結果 である。図 12 は、地震動波形 100 サンプルの加速度応答 スペクトルの統計値である。以上の図より、宮城県沖地震 と同様の傾向が確認できる。





【参考文献】

- 6) 地震調查委員会 HP、http://www.jishin.go.jp/main/
- 7) 地震リスク・マネジメント研究会「地震対策の普及を目的とした地震リスク・マネジメント技術の実用化」建築研究資料、独立行政法人建築研究所(準備中)

地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証

(その4.制震ダンパーによる工場の改修)

村地由子1)、樋口真由子1)

1) 株式会社構造計画研究所

1.建物概要

- 規模・用途: 地下2階建て・某製造メーカ工場(図1)
 構造: 鉄骨造 X方向:ラーメン構造、6スパン Y方向:ラーメン構造、2スパン
 延べ床面積:2,856 m²
 新築費用: 2.1億円
 位置: 宮城県仙台市を仮定((その2)図1)
- 制震装置: ODB システム用オイルダンパ
 最大減衰力 25ton タイプ、100ton タイプ
 制震費用: 0.16 億円(建物新築費用の約7.6%)



図1 対象建物の外観

図2 制震ダンパー

2.建物の地震応答

2-1.解析モデル

X 方向、Y 方向とも図 3 に示す 2 質点直列せん断系モデル を用い、弾塑性・時刻歴地震応答解析を行う。



- ・ 各層の復元力特性:標準型トリリニアモデル
- ・ 減衰:2%(瞬間剛性比例型の粘性減衰)
- ・ 力学特性のばらつき(COV): 重量 12%、剛性 30%、耐力 25%、減衰 65%¹⁾(全層で同じ正規乱数)

2-2.解析結果

2-1 節の解析モデルに対し、(その2)の2-2 節に示した地震 波を入力とする地震応答解析を行った。建物モデルの力学特性 にばらつきを与えて、各マグニチュード($m_1 = 5.5$, $m_2 = 6.5$, $m_3 = 7.5$)に対して、100 サンプルのモンテカルロ・シミュレ ーションを行った。図4に、全サンプルの最大層間変形角を 示す。



3.損傷費用の発生

3-1.損傷費用モデル

Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11

2-2 節の地震応答解析結果から、各サンプルの損傷費用 Cp(m)を算定する。損傷費用 Cp(m)は、工場の管理者が負担 する費用として、建物および収容物の修理/再調達費用、収 益損失、解体撤去費の合計とする。

建物の修理/再調達費用を求めるためには、建物を構造部 材、非構造変形依存部材、非構造加速度依存部材に分類し、 それぞれ層間変形角、層間変形角、床加速度を横軸とするフ ラジリティ曲線を用いて、損傷費用を計算する。構造部材お よび非構造部材のフラジリティ曲線は、それぞれ、文献 1)を 参考に設定した。

収容物の修理/再調達費用は、床加速度を横軸とするフラ ジリティ曲線¹⁾によって、各階ごとに計算する。

収益損失は、一日あたりの収益と機能損失日数の積として 計算する。復旧日数および機能損失日数は、同じく文献 1)の モデルによって計算する。

3-2.解析結果

3-1 節の損傷費用モデルを用いて計算された、全サンプル の損傷費用を図5に示す。図5.(a)は、地震規模が小さいため 損傷費用はダンパーの有無に関わらず0であるが、図5.(b) および(c)では、それぞれダンパーを設置することで損傷費用 を軽減できることが確認できる。これは、図4で示したとお り、制震補強することで上部構造の変形を軽減できることか ら、その結果として損傷費用が軽減されたものである。この 結果から、マグニチュード毎に、100サンプルの損傷費用の 期待値として *E*[*Cp*(*m*,*i*]]を算出した(図6)。





図6 各マグニチュードに対する損傷費用の期待値

4. ライフサイクル・コスト評価

地震の発生確率について、 すべての地震の発生をポアソ ン・モデルとした場合、 宮城県沖地震(m₃ = 7.5)の発生の みを BPT モデルとした場合の 2 ケース設定し、(その 2)の図 2(b)および図 3 の発生率を(1)式に代入する。さらに、図 6 の *E*[*C*_D(*m*₂)]を代入し、既存モデルおよび改修モデルの期待 LCC を算出した。

図7からは、既存および改修モデルの期待 LCC は、ポアソン・モデルの場合 12.9 年間で、BPT モデルを用いた場合 7.6 年間で交差することがわかる。本工場の供用期間を残り約20 年間と想定すると、ダンパーの設置により、その投資に充分見 合った効果が得られることが検証できた。

本事例研究の詳細については、文献 2)を参照されたい。

期待値ライフサイクル・コスト E[C_] (億円)



【参考文献】

- 8) Federal Emergency Management Agency, *HAZUS99* technical manual, 1999.
- 9) 地震リスク・マネジメント研究会「地震対策の普及を目的 とした地震リスク・マネジメント技術の実用化」建築研究 資料、独立行政法人建築研究所(準備中)

レーザー計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析

Flood Analysis by Finite Elemental Method using Laser Measurement Data

- 1) 株式会社構造計画研究所
- 2) 熊本大学工学部環境システム工学科
- 3) 国土交通省 福井河川国道事務所
- 4) 八代工業高等専門学校土木建築工学科

抄録:本研究では,レーザー計測データと建物形状データを自動加工し,都市部の洪水氾濫解析モデルを作成した. この手法で解析モデル作成がどの程度軽減されるかを検討した.解析モデルは建物平面形状を表現できる三角形メッシュとし,解析計算は有限要素法を採用した.

さらに 2004 年 7 月に起きた福井県足羽川の洪水氾濫の実測値と解析結果の比較を行うことで解析および解析モデル の有効性を考察した.

1.序論

近年多発する大規模な災害に対し,国や地方自治体は八 ザードマップの整備や防災対策関連の施策を盛んに進め ている.河川においては氾濫状況や浸水規模を示す河川八 ザードマップが行政機関から出されており,今後,その整 備対象は中小河川まで広げられる方針である.国交省にお いても「豪雨災害緊急対策アクションプラン」に沿った施 策を進めており,これに対してより精度の高い災害関連情 報の数値を早急にまとめる必要があると考えられ,今後ま すます洪水氾濫解析は重要になると予測される.

従来の洪水氾濫解析においては,格子状に要素を分割し, 建物等の分布状況から粗度係数を要素に割り当てて計算 していたため,建物形状を正確に考慮できなかった.しか しながら,氾濫解析の対象となる都市部の多くは,平地で あり,建物などの地物が多いため,氾濫流に大きく影響す る.そのため近年では,三角形要素(非構造格子モデル) で氾濫解析を行った研究もされており,建物形状を考慮し たモデルで洪水氾濫解析を行うことも可能となってきた¹⁾ ⁻³.しかし,平面図(紙・図面データ)から解析用の三角 形要素を作成するには手間が掛かることと,それを作成す るための測量結果の収集も容易ではないこと,三角形要素 が作成されても三角形の形状によっては解析結果が安定 せず,良好な結果が得られないことが問題視されてきた⁴⁾

そこで,本研究では,航空レーザー計測の計測密度や計 測精度が向上したことに着目した.レーザー計測によって 得られる3次元座標データを用い,氾濫解析で使用するモ デル(地形・地物データ)を作成することで,上述の問題 を解決できるのではないかと考えた.高密度・広範囲の計 測ポイントから容易に三角形要素を作成し,安定した解析 結果を得ることが可能であると考えた.

本稿では、レーザー計測データの自動加工により氾濫解

析モデルを作成する方法について述べる.さらに,この解 析モデルを用いて,2004年7月に起きた福井県足羽川の洪 水氾濫災害を対象に実測値と解析結果の比較を行い,レー ザー計測データから得られた洪水氾濫解析モデルの有用 性について検討した.

2. レーザー計測データ

航空レーザー計測は,航空機に搭載したレーザースキャ ナによって位置情報を取得するもので,広範囲にわたって, 緯度,経度,標高をデジタルデータとして取得することが 可能である.

このレーザー計測データは計測点数が多く,そのまま洪 水氾濫解析モデルに適用することは計算負荷の増大の原 因となる.そのため,計測点を選別する必要がある.また, 洪水氾濫解析では,建物の平面形状の把握と建物の内側点 を除去する必要があるため,計測点が地面か建物か区別し なければならない.

計測点を地面と地物を分離する方法には,著者らが考案 した自動属性判別法を用いた⁶⁾.これにより地面標高を記 した XYZ の点群データ(csv 形式)と地面と建物の境界を 記した建物平面形状線データ(dxf 形式)を作成した.点 群データは,各メッシュに含まれる計測点の平均座標で表 し,これを加工点群データという.メッシュ間隔によって 計算負荷を変更できる.建物形状データは,閉領域のポリ ゴンデータになっている.

メッシュ間隔 5m の時の加工点群データと建物形状デー タを表示したものを図 1に示す.

3.解析モデル作成

ここでは構造物を考慮した有限要素法による洪水氾濫 解析を行うため,加工点群データと建物形状データから三 角形要素を作成する.

三角形要素を作成する前処理として,点群データの加除, =7.5m,10m モデル=15.0m). 建物形状点の高さ設定を自動処理できるプログラムを開 発した.三角形要素作成は市販ソフトの LandDesktop3 (autodesk 社,以下 LDT3)を活用することで解析モデ ルの作成時間短縮を図った.採用の理由を以下に示す.

・点群データから自動で三角形を作成する機能がある

・dxfファイルの読み込みが可能である

・境界線内部に三角形を作成しない機能がある

LandXML 出力が可能である

(LandXML のフォーマット形式が,解析モデルの節 点・要素のフォーマットと同一)

・プログラム開発環境が充実し,開発実績がある

(1)点群データの加除

一般に有限要素解析では正方形や正三角形など要素辺

の長さが均等であるほど,精度・安定性ともに優れた計 算結果が得られるが,極端に偏平率の高い(細長い)要素 が存在すると,解析の不安定性や精度の悪化を招く.その ため,細長い要素を作成しないよう,以下 a)~c)の処理を 施した.



図-1 5m 加工点群データと建物形状データ

a)建物形状の微小距離点削除

図-2に示すような微小距離点が存在すると細長い三角 形が作成される.この場合,設定値距離以下の微小点を削 除することで辺長が均等な三角形が作成される.設定値は, メッシュ間隔の 10% で行った(5m モデル=0.5m,10m モ デル=1.0m).

b) 建物形状線に

点追加

図 - 3 に示すような建物形状の構成点間隔が長い場合も 細長い三角形が作成される.この場合,建物形状線上に等 間隔の点を追加することにより辺長が均等な三角形が作 成される .点追加の計算方法は ,等間隔設定値 D を設定し , 建物形状線の2点間距離Lを除算し切り上げた整数を分割 数とし,2点間を等分割した.等間隔設定値は,メッシュ 間隔の 150%以下になるように等分割した .(5m モデル

c)建物付近の点削除

図-4に示すような建物付近に点データが存在すると,





図 - 3 b)建物形状線に点追加



細長い三角形が作成される.この場合は,建物形状線を外 側にオフセットし、その内点を削除することで辺長が均等 な三角形が作成される.オフセット値は,メッシュ間隔の 50%で行った(5m モデル=2.5m, 10m モデル=5.0m).

(2) 建物形状点の高さ設定

建物形状点とは建物形状線上にある点である.洪水氾濫 解析で必要とする建物形状点の高さはレーザー計測デー タからは直接得ることは出来ない.なぜなら氾濫解析で必 要な高さとは地面と地物の境界,すなわち地表面の高さで あり,レーザー計測データから得られる高さは建物の屋 上・屋根の高さだからである.したがって,三角形要素の 作成に用いるための高さを設定する必要が生じる.

図 - 5を例に高さの設定方法を説明する.点 ABCD は加 工された点群データで,これらの点から建物形状点Xの高 さを求めるものとする.点 ABC は,ほぼ同一の地表点で あり,点D は建物の屋上点であり地表からかなり高い標高 の点になる.

図 - 5の左図は,三角形 ADC で点 X の高さを計算する ことになるため,計算結果は点 D の影響を受け,地表より 高い標高値となる.したがって,建物形状線内の加工点群 は削除して,建物形状点の高さを設定した.右図のように 建物形状内に点が無い場合は,三角形 ABC から点 X の高 さを計算するため,計算結果は地表点と判断できる.

なお, TIN モデル(Triangle Information Network)か ら点 X の Z 標高値を算出する機能は,LDT3に搭載されて おり,建物形状に標高値を与える作業の時間短縮にも貢献 した.

(3)三角形要素自動作成

(1),(2)の前処理を終えたところで,LDT3のTINモデル
 作成機能を使って三角形要素の自動作成を行う.

点群データと高さが定義された建物形状線の点情報 (XYZ)を抽出

建物形状線を境界線とし,建物内部に作成される三 角形要素を除去

三角形要素自動作成

TIN 情報を LandXML 形式に出力し, 解析用の節 点・要素データにフォーマット変換

図-6に一連のデータ処理フローを示す.



建物形状内点がある場合 建物形状内点が無い場合 図-5 建物形状点の高さ計算

4.氾濫解析

今回,2004年7月の福井県足羽川の氾濫を事例として 解析モデルの作成と氾濫解析を行い,実測値との比較を行った.解析対象領域は破堤地点を含む横500m×縦260m とし,図-7に示す.

前章に述べた方法により解析モデルを作成した.自動属 性判別法で加工された点群データは,メッシュ間隔5mと 10mの2種類を作成し,モデル作成の手間や氾濫解析の精 度を比較する.各モデルの節点数と要素数を表-1に示す.

また,10mの解析モデルを図-8に示す.図-8の丸部 分は,鉄道をアンダーパスする標高の低い道路が存在して いる.このような箇所でレーザー計測データは取得されな いため,別途手動で道路の標高を与えた.図-9は図-8 に示した三角形要素を三次元的に表したものである.アン ダーパス部分が鉄道の標高ではなく,実際に水の流れる道





500m

図-7 解析対象領域

路の標高に修正された様子がわかる.

本論文は解析データの作成の有用性について考察する ことを主旨としているため,氾濫解析手法の詳細説明は割 愛する.なお,氾濫解析で用いた基礎方程式や有限要素法, 氾濫解析手法については文献を参考にした⁷⁾⁻¹⁰⁾.

氾濫解析に用いた洪水条件は,破堤範囲 50m,洪水流 量 100m³/s とした.解析対象時間は破堤直後から 10 分間 とする.また,外周境界条件については**図 - 10**に示され る対象領域の標高から,図の矢印方向へ氾濫流が進んでい くと考え,解析モデルの上側および右側に流出無という条 件を設定した.参考までに,本解析にかかった計算時間を 表 - 1 に示している.利用したパソコンの環境は, OS:Windows2000, CPU:Pentium 1GHz,メモリ:512MB である.

表 - 1	節点・	要素数と計算時間	
1	ED CC -	安奈奴に可弁所問	

モデル	節点数	要素数	計算時間
5m	4484	7014	31 min. 56 s.
10m	2316	3227	16 min. 10 s.

Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11



図-8 解析対象三角形要素(点群データ10m)



図-9 解析モデルの標高形状図



図-10 解析モデルの標高コンター図

5.考察

(1)解析モデル作成

表 - 2に手修正時間を含んだモデル作成時間を示す.【】 内は図 - 8中の丸部分で示されるアンダーパスを手修正した時間であり,節点数・要素数を参考として記載した.

今回の解析モデルの作成作業を自動プログラムなしで 行うと 50 時間かかった .10m モデル作成時間の 6 時間と, 三角形要素作成のための前処理プログラム作成時間の 8 時間を含めても,モデル作成時間は 14 時間で済んだ.つ まり,モデル作成に要する 50 時間の作業が 6+8=14 時間 となり,作業時間を約 1/3 に抑えることができた.

今回,10m モデルは微小点削除および建物形状線に点を 追加する設定値を試行錯誤しながら決定した.しかし,5m モデルの作成は,設定値を試行錯誤することなくモデル作 成ができ,10m モデル作成よりもさらに短時間で行うことができた.

(2)氾濫解析結果

a) 氾濫シミュレーション

図 - 11(P.23)に,破堤から2分ごとの流速ベクトル 図を示す.これより建物形状を考慮した有限要素解析を 実施することにより,破堤箇所から洪水流量が流れ込み, 建物や道路の配置に沿って氾濫が進んでいく過程を時 系列に確認することができた.また,図-10の標高図か ら予想されたとおり,矢印方向へと流れていることが確 認された.

実際の現象では,洪水が鉄道を越えて西側まで達して いたので,その現象が解析で再現できたかが重要なポイ ントとなる.解析結果では,破堤直後に大きな流速が発生 し,解析領域の中心を東西に走る道路にいち早く流れ込み, 西に向かって流れていることが確認できた.

また,破堤後6分で鉄道に到達し,その後アンダーパス 部を通って西側まで流れていく現象も再現できた.

表-2 解析モデル作成時間

モデル	作成時間(hour)	節点数	要素数
5m	3.0【1.0】	4484	7014
10m	6.0【1.0】	2316	3227

b)実測値との比較

今回は解析領域内にある4点について氾濫解析より得 られた計算値と実測値とを比較し,作成モデルの有用性に ついて検証を行った.ここでの実測値とは,災害直後に福 井大学教育地域科学部山本博文助教授の研究室メンバー が氾濫痕跡を基に近辺の道路等の標高から求めた浸水の 達した標高である.計算値との比較に当たっては,この標 高を災害時の洪水水位として扱うこととする.

図 - 12(P.23)に破堤から2分ごとの洪水水位を示す.

図 - 13(P.24)に比較地点,表 - 3に実測値と計算値 (10分後の洪水水位)の比較を示す.図-13の 印で示 される4点について計算値と比較した.

表-3 洪水水位の実測値と計算値の比較

観測	実測値	計算値(m)		誤差	率(%)
地点	(m)	5m モデル	10m モデル	5m モデル	10m モデル
A地点	8.6	8.7	8.3	1.16	-3.4
B地点	9.8	10.1	10.1	3.06	3.0
C地点	9.5	9.7	9.6	2.11	1.0
D地点	8.6	8.2	8.0	-4.65	-6.9

10m モデル,5m モデルともに誤差率は小さく良好な結 果が得られた.特に5m モデルでは,誤差率5%以下に収 まっている.また,10m モデルと5m モデルを比較すると, 5m モデルの計算結果のほうが実測値に近い結果となった. これは,モデルをより細かくしたためモデルの精度が良く なったことが要因と考えられる.さらに細かなモデルを作 成すれば,精度も向上すると考えられる.



図-11 流速ベクトル図 (上から破堤後2,4,6,8,10分後)

Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11



C地点 D地点 図-13 洪水水位の実測結果

6.結論

本研究で,レーザー計測データを自動加工することで解 析モデル作成の大幅な省力化が確認できた.都市部は建物 などの人工構造物が多く,形状はますます複雑化していく ものと思われる.また,構造物を新規に建設するなどの3 次元空間変化も激しいことから,レーザー計測データを有 効活用し,精度の高いモデル作成は重要な技術になってく る.今後は都市部以外の山岳部モデル作成にも取り組んで いきたい.

モデル作成の課題としては、レーザー計測で立体交差等 の構造物が重なった場合、標高の高い構造物が表現される、 今回,鉄道部分は、一部手作業で行った、今後は、その部 分を自動調整する機能が必要となる、また、解析モデル偏 平要素の自動検索と自動修正機能や、建物形状の直線化精 度向上も必要であることが判り、今後その機能開発に取り 組んでいくことを考えている.

今回,プログラム開発では,3次元 CAD ソフトである LDT3 が持つ機能を活用した.3次元 CAD は20年前から 大型汎用機・ワークステーションといった超高スペックで しか運用されなかったが,最近ではノートパソコンでも十 分運用稼動できるものに進化した.しかしながら,その3 次元 CAD を技術者が上手く使いこなせないために,まだ 実務で普及しきれてないのが現状であり,今後3次元 CAD を普及させていくことが課題となる3次元 CAD は元来, 道路・造成の設計および施工で多く利用されてきたが,C A Dの持つ機能が数値解析モデル作成でも十分に威力を 発揮することがわかった.

洪水氾濫解析も良好な結果が確認できた.解析シミュレ ーションもハードスペックの問題から,2次元モデルに置 き換えて解析を行っていた.自然現象は3次元の事象であ り,換算された2次元では正確に問題解決できない.近年 は世界的にみても自然災害が多く,今後も異常気象が続き 今まで想定していた規模を越える自然災害が発生する恐 れがある.このため,環境予測・防災・危機管理の分野が 注目され,その問題を解決するために,情報処理・計算力 学の技術が果たす役割は大きいと思われる.今後は氾濫解 析以外の幅広い分野でレーザー計測データを利活用する ことを筆者らは考えている.

謝辞

研究の遂行において,福井大学山本博文助教授には災害時の貴重な調査結果と現場での状況等,災害現場でしかわからない情報の助言を賜った.ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 舘健一郎: 非構造格子モデルによる氾濫解析, 土木学会第58回年 次学術講演会, pp. 133-134, 2003年9月.
- 2) 岡田岳ほか:有限要素法による都市域の洪水氾濫解析,土木学会第59回年次学術講演会,pp.53-54,2004年9月.
- 3) 竹谷謙一:洪水氾濫解析のための自動要素分割法,第22回関東支 部技術研究発表会講演概要集,土木学会,pp.124-125,1995年 3月.
- 4) 川本一樹ほか:レーザースキャナーを活用した河道モデル作成手法に関する研究,土木学会第57回年次学術講演会,pp.393-394,2002年9月.
- 5) 谷口健男: FEM のための要素自動分割, 森北出版, 1992年9月.
- 6) 山本一浩ほか:自動属性判別法によるレーザ計測データの有効活用について.第30回情報利用技術シンポジウム論文(投稿中)
- 7) 松本純一,梅津剛,川原睦人:準陽的有限要素法による浅水長波 流れと河床変動解析,計算工学講演会論文集 Vol .2 ,pp .249-252, 1997年5月.
- 8) Umetsu : A Boundary Condition of Moving Boundary Simulation for Broken DamProblem by Three-Step Explicit Finete Element Method, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol II, China, pp394-399, 1995.
- 9) 松本,梅津:気泡関数を用いた陽的有限要素法解析の検討,第8回 数値流体力学シンポジウム, pp635-638,1994.
- Kawahara, Umetsu: Two Step Explicit Finite Element Method for Sediment Transport, 3rd Sympo. River Sedimentation, Jacson USA, pp1487-1495, 1986.

自動属性判別法によるレーザ計測データの有効活用について

About effective use of the laser measurement data by the automatic attribute distinction method

山本一浩¹) · 小林一郎²) · 上野幹夫³ · 橋本淳也⁴)

- 1) 国土交通省 福井河川国道事務所
- 2) 熊本大学工学部環境システム工学科
- 3) 株式会社構造計画研究所
- 4) 八代工業高等専門学校土木建築工学科

抄録:近年,航空機にレーザスキャナを搭載し広範囲に標高データを取得する,航空レーザ計測が実用 化され,3次元空間情報を容易に得られるようになった.航空レーザ計測で得られたデータは,様々な分 野での利用が期待されている.本論文は,レーザ計測データを分析し,各分野において使用されるべき最 適なデータ加工の手法の提案として,レーザ計測データのみによる自動属性判別法を提案する.また,提 案した解析手法を用い適用事例によりその有効性について考察する.

1. 序論

近年,航空機にレーザスキャナを搭載し広範囲に標高デー タを取得する,航空レーザ計測が実用化され,3次元空間情 報を容易に得られるようになった¹⁾²⁾航空レーザ計測とは, 航空機にスキャン式レーザ測距儀,GPS 及び IMU(Inertial Measurement System)を搭載し,レーザ照射の位置や姿勢を 制御しながら,照射したレーザ光が地表面に反射して戻って くるまでの時間を計測し,位置情報(緯度,経度,標高)を取 得する計測方法である(図-1).このようにして得られたデ ータの利用は,航空写真画像と組み合わせ,都市三次元モデ ルを自動構築し高品質の都市三次元モデル生成に成功してい



図-1 航空レーザ計測イメージ 1)

る事例^{3),4)}が報告されるなど,都市計画,GIS,防災 などの様々な分野での利用が期待されている.特に,近 年の台風・集中豪雨・地震など大きな災害が多発し,防 災に関する意識が高まっている中で,このレーザ計測デ ータの有効利用の研究は,避難勧告(指示)や自主避難等 に対する支援といった,ソフト対策に寄与するものと考 えられる.

本論文は,レーザ計測データを分析し,防災や各分野 において使用されるべき最適なデータへの加工の手法 として,レーザ計測データのみによる自動属性判別法を 提案し,その可能性について研究したものをとりまとめ たものである.なお,本研究で使用するレーザ計測デー タの計測仕様を**表-1**に示す.

表-1 レーザ計測データの計測仕様

項目	仕様
運用高度	175 ~ 3000 m
パルス周波数	25/33kHz
高さ精度(1)	15cm(対地高度1000mにおいて)
水平精度(1)	1/2000×対地高度
スキャン角	0°~±20°(可変)

2. レーザ計測データの特徴

ここでは,レーザ計測によって得られた座標データの 自動属性判別に先立ち,地形や土地利用との間にどのような特徴や関連が見られるかを考察した.



1)地域別によるデータの特徴

地形や土地利用状況により地域の種類を次の a~e の 5つに大別する.a都市部,b宅地部,c都市郊外部,d 田畑部,e山地部の各地域からそれぞれ任意に1ヶ所ず つ解析エリアを選定し,そのレーザ計測データを分析す ることで,地域別にどのような特徴があるか考察した.

地域ごとに標高の分布状況をグラフ化したものを図 -2に示す.横軸は標高,縦軸は計測点数の相対度数を 表しており,これを標高別ポイント占有率と定義してい る.

a都市部及びb宅地部では,ある一定の標高範囲でデ ータが分布している.このことから,データ内に低標高 部などに代表される道路や中標高部などの建物のデー タが存在していることがわかる.なお,都市部と宅地部 の違いとして,標高範囲の差で比較することができる. つまり,都市部では比較的高いビル等が存在し、宅地部 では住宅と比較的低い建物等が存在していると言うこ とである.また,一部の標高部分で占有率が突出してい るが,これは,道路や公園等の地表面部であると判断で きる.この地表面部の突出度合いにより,データ内にお ける建物等の有無の度合いがわかる.突出度合いが小さ い場合はこの建物の存在率が高く,逆に大きい場合は存 在率が低いと思われる.

c都市郊外部では,宅地部と同じような状況となって いるが,標高範囲は若干狭くなっている.また,このデ ータにおいても,一部の標高で占有率が突出しており, 道路や田畑の部分であると判断できる.

d田畑部では,標高範囲がより狭くなっており,平地 部で標高差が小さい地域であることがわかる.

e山地部では,低標高部から高標高部にかけた広い標 高範囲でデータが分布しており,他のデータで見られる ような占有率が突出した標高部分は見られない.

このように,標高別ポイント占有率から,地形や土地 利用を大まかな判断ができるものと思われる.また,地 域によって分布状況が異なっているということは,この 特徴を考慮した上で,その地形に応じたデータ処理方法 を考える必要があるといえる.

(2)都市部におけるデータの特徴

前項では地域別の特徴を標高の分布から考察した.本 項では,都市部に焦点を当てさらにその特徴を見る.

レーザ計測による座標データの取得状況を,真上(平面)からと,側面(正面)から確認した.

真上(平面)から見た場合,全体的に計測点が配置され,対象区域でまんべんなくデータが取得されていることがわかる(図-3a).なお,この図の中央部の 濃く表現されている部分はデータ取得時の重複部である.

側面(正面)から見た場合,データが集中して取得さ

れている部分と逆に取得データが少ない部分とに分かれている(図 - 3b).

これは,レーザ計測が上空からの計測であり,航空写真の ように上空から見える部分が計測されるためである.したが って,図-3bで見られるような,データが集中している部分 とは,上空から目視できる道路やビルの屋上といった部分で ある.特に都市部のような,ビルが多く存在する場所では, 道路部分も含めてフラットな場所が多いということも容易に 判断できる.

図-3cは,図-3bの地表面部と思われる部分の一部を拡大し標高を記したものである.そして,それぞれの標高値よりも低い部分の点群データをそれぞれ抽出し航空写真と重ね



b 側面(正面) 図-3 取得データの分布状況



航空写真



b 境界ライン 9.50m の場合

図-4 Ground Dataの抽出

c 境界

a 境界ライン 9.00m の場合

ライン 10.00m の場合

部データとの境界が,9.50m~10.00m の間にあると推 測される.**図-2a** に示される地表面部データと建物部 データとの境界となるラインを,データの分布状況等か ら解析し自動的に境界ラインを検出することで,瞬時に 地表面部データと建物部データを分離することが可能 と考えられる.なお,本論文では,地表面部データを 「Ground Data」,建物部データを「Top Data」と呼ぶ こととする.

このように,レーザ計測データの特徴を利用した, Ground Data と Top Data との分離は,自動属性判別の 第一歩となるものである.以降に,自動属性判別法の詳 細について述べることとする.

3. 自動属性判別法について

ある任意のポイントの属性を判別するには,周辺の点 群データの位置や標高との関連性をチェックすること が重要となる.しかし,全てのポイント毎に周辺の点群 データとの関連性を把握しようとすると,元となる点群 データがランダムデータであることからデータ解析が 困難となる.

そこで,本研究ではあらかじめメッシュサイズを任意 に決め,メッシュ毎に標高を分割し,分布状況をチェッ クしながら走査していく手法を採用した.具体的には, メッシュ内にある全ての標高を平均し,その平均値を基 準として解析するものである.したがって,この手法を メッシュ平均法と呼ぶ.

解析用パラメータとして, ×方向のメッシュサイズを Si, y方向のメッシュサイズをSj, フラット形状の条件 としてのメッシュ内データ基準値をm,レーザ計測時の



Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11

高さ方向の精度を とした(図-5,6). つまり,この基準値 内mにおけるデータの占有率が100%の場合に,そのメッシ ュはフラットな形状であるということである(図-7).また, 解析を行う際のメッシュサイズは,解析の元となる点群デー タの特性により,×・y方向を様々に変更させることが望まし いが,今回の解析では×・y方向全てを同じとし,Si=Sj=S とした.また,フラットと見なせる勾配の限度は、道路の一 般的な横断勾配が2%程度であることから,本稿では図-6に 示すように2%とした.よって,フラット形状と見なすメッシ ュの基準値mは,メッシュサイズS,計測精度δを用い,次 式で表される.

$$m = 0.02S + 2\delta$$
 (1)

(1)点群データの平滑解析

本項では,提案したメッシュ平均法を使用し,実際のデー タによるフラット形状メッシュの抽出を試みる.使用するデ ータ範囲は図-3と同じ都市部のデータとし,メッシュ内デ ータの基準値内占有率が 100%となるメッシュ,つまりフラ ット形状メッシュを抽出する.その結果を図-3bと同様に









図-9 グループ分割方法

表示したものが図 - 8である 図 - 3 b では明確でなかった同じ平均標高をもつ集合体が明確に確認できた.

このデータの集合体をグループ化し,それぞれのグル ープの標高,データ数,地物の種別等を調べることで, レーザ計測データの特性が詳細に見えてくると思われ る.

グループの区別方法を図-9で説明する.グループと 思われる各集合体間の標高の間隔が,基準値k以上となった場合,お互いは別グループと判断する.なお,図-9における用語の定義を以下に示す.

基準値 k: グループ1の最大値とグループ2の最小 値の間隔を k と比較(間隔が k よりも大きい場合に グループを区別化)

境界ライン:基準値 k によりグループを区別化した 際の各グループ間隔の中間ライン

オブジェクト標高: 各グループの標高の平均値

また,この方法がフラット形状メッシュを抽出し,そ の分布状況により点群データの解析を行うことから,こ の解析方法を平滑解析と呼ぶこととする.

以上,提案したメッシュ平均法及び平滑解析を用いて, グループ分割を行った.その設定値と結果を以下に示す (表 - 2,図 - 10).

- S = 5.00m
- $\delta = \pm 0.15 \text{m}$
- $m = 0.02 \times S + 2 \times \sigma = 0.40 m$
- k = 0.50m

表 - 2からわかるように,メッシュ数が一番多いグル ープG02と次のグループであるG03との境界ライン値 が,9.919mとなった.これは,第2章の航空画像との 比較により推測したものと同じような結果である.また, 図-10からもわかるように,グループG02以下のデー タは道路などの地表面部,いわゆる建物以外のデータで あると判断できる.このことは,標高がグループG02 よりも低い部分はGround Dataであり,逆にそれ以外 のグループはTop Dataであると言える.この9.919m を境界ライン値として点群データをGround Dataと Top Dataに分割すると図-11のようになる.この Ground Dataの空白部分を利用することで,建物の輪郭 を抽出することが可能であると考えられる.この輪郭(直 線)の抽出について,次の項で詳細を述べる.

(2)属性境界解析

前項で得られた Ground Data も,元の点群データを 境界ラインで上下に分割しただけであり,データ形式は ランダムである.このランダムの状態から輪郭(直線)抽 出をすることは,より現実に近いデータを得ることがで きるものと思われる(図-12).本研究でも以上のことを 踏まえつつ,複雑な処理とならない手法を考察すること とした.

考えられる手法としては,平滑解析と同じように任意 のメッシュサイズで分割し,データの存在するメッシュ と存在しないメッシュの境界を探りながら,追跡して行 くという手法である.その手順を以下に説明する(**図-1**

表 - 2 グループ分析結果

グループNo.	間隔	メッシュ数	境界ライン	オブジェクト標高
G01	0.000	4	7.346	6.577
G02	1.538	224	9.919	8.115
G03	1.626	2	11.509	10.732
G04	1.246	2	14.030	12.132
G05	3.121	2	16.797	15.591
G06	1.470	9	17.935	17.532
G07	0.612	1	18.714	18.241
G08	0.945	3	20.387	19.186
G09	1.108	2	21.395	20.941
G10	0.744	4	22.219	21.767
G1 1	0.766	2	25.041	22.602
G12	4.828	1	29.776	27.455
G1 3	4.642	2	34.960	32.097
G14	5.630	1	38.624	37.775
G15	1.697	8	-	39.472



図 - 10 Ground Data と航空画像

3).

任意のメッシュサイズに分割(メッシュサイズ:s) 各メッシュにデータの有無で属性値を与える

・ データの存在するメッシュ=「1」

データの存在しないメッシュ=「0」
 属性が「1」のメッシュ,つまりデータが存在するメッシュについては,x,yの平均値を算出し,そのメッシュの代表ポイントの座標とする.

で与えたメッシュの属性値の配置状況から,該当するメッシュの代表ポイントの座標から,図-13のように直線を抽出して行く.

なお,図-13では右上方向の場合の直線抽出方法を1つの 例として示しているが,図-14に示すとおり,右方向 [(a)Level,(h)Below],左方向[(d)Up,(e)Level,(f)Below], 垂直[(c)Up,(g)Below]の全部で8方向において行う.ちなみ に図-13での例は,右方向[(b)Up]である.以上の方法でメッ シュサイズ sを2.0mとして,実際に輪郭(直線)の抽出を行 った(図-15a,b).なお,輪郭(直線)抽出はグループG02以



図-11 境界ラインによるデータ分割



図-12 輪郭(直線)抽出のイメージ



図-13 メッシュ分割による輪郭(直線)抽出



Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11

下のみでなく,表-2の全てのグループに対して行い,抽出 された輪郭(直線)をオブジェクト標高に配置した.その結果 を図-15cに示す.これにより,建物が三次元形状で表され る.なお,この解析により抽出された輪郭(直線)は,建物の 境界や高さといった属性を持っていることから,この解析方 法を属性境界解析と呼ぶこととする.

以上のように, 平滑解析と属性境界解析により都市部の形 状が,レーザ計測データのみで自動抽出することが可能とな った.これまでの作業の流れを図-16に整理した.

4. 適用事例

前章まで説明してきた自動属性判別法の適用事例として、 三次元都市モデル生成と 氾濫解析のための非構造格子モ デル生成の2つについてモデル生成を行った.そして適用事 例の対象として 福井県庁のある福井市中心部を, 200 4年7月18日の福井豪雨で堤防破堤により浸水被害のあっ た地域をそれぞれ対象とし,レーザ計測データの加工を試み た.なお,後者の浸水被害のあった地域では,加工データの 有効性を確認するため,氾濫解析も含めて行っている⁵⁾.

(1)三次元都市モデル生成

三次元都市モデル生成の適用範囲としては,福井県庁を中 心とした, x 方向 750m, y 方向 750mの範囲において, 平滑 解析により得られた全てのグループに対し,属性境界解析を 行い,建物等の輪郭(直線)を抽出し,高さ方向に対する情報を 付加した(図-17).

この三次元都市モデル生成における解析設定値を以下に示 す.なお,解析メッシュサイズSを決定するに当たり,今回



a 抽出結果





図-15 属性境界解析結果



図-16 自動属性判別法のフロー図



図-17 グループ全体の境界属性判別結果

の適用事例では,解析メッシュ内点群データ数が30ポイント 以上となるよう考慮した.

【解析用の設定値】

S=5.00m (メッシュ内平均ポイント数 : 34.5>30)

 $\delta = \pm 0.15 \text{m}$

m = $0.02 \times S + 2 \times \sigma = 0.40 m$

k = 0.50m

次の段階として, CAD の機能である押し出しを使用し,建 物等を3次元化,そして,Ground Data を合成し都市空間の 3次元モデルを生成した(図 - 18).また,三次元都市モデル がどこまで再現できているのかを,実際の斜め写真と比較し た(図 - 19).なお,この CG 画像作成にはレーザ計測データ



図-18 建物データと地形データの結合



図-19 斜め写真との比較

取得時に同時に撮影された航空画像をテクスチャとし て適用している.この図からもわかるように,ビルたけ でなく屋上にある付属施設等も再現されている.なお, 煙突のように見える部分は鉄塔であり,棒状の地物の再 現はできていない.しかし,この問題点について,グル ープを区別する際に使用するSやkといった解析用の設 定値を変更することで可能であると考えられる.

(2)氾濫解析のための非構造格子モデル生成

昨年(2004 年 7 月 18 日)の福井豪雨は,足羽川流域を中 心として大きな被害をもたらした.その中でも福井市内 における足羽川左岸の堤防破堤による被害は,床上・床 下浸水など広範囲におよぶものであった.

この適用事例では,氾濫解析結果と実際の氾濫現象と の違いを把握することを目的として,堤防破堤地点を含 む x 方向 500m,y 方向 250mの範囲を選択した.この 適用事例では,平滑解析で得られたグループの中から, フラット形状メッシュ数の一番多いグループ,つまり Ground Data のみを使用し,有限要素法による氾濫解析 用の非構造格子モデルを生成した⁵⁰.**図 - 20**は前述した Ground Data と,このデータから一辺が約 10m となる 非構造格子モデルを生成した結果である.

なお,この適用事例も都市部と同じ考え方で解析設定 値を決めている.

【解析用の設定値】

S=5.00m (メッシュ内平均ポイント数 : 34.9>30) δ=±0.15m

 $m = 0.02 \times S + 2 \times \sigma = 0.40m$

k = 0.50m

生成したモデルを使用し有限要素解析により計算した氾濫開始から10分後の流速分布図を図-21に示した. 図中の矢印は流速の方向と速さの大きさを表している.



Kozo Keikaku Engineering, Inc. 2005.11



図-21 有限要素解析による氾濫解析結果

また,2分間隔の氾濫区域ライン及び,破堤地点から氾濫域 の一番遠い地点までの距離も併記した.氾濫実績が時間経過 で把握できていないため,この結果の定量的な評価,検証は できないが,氾濫状況を見ていた市民の方々からは,概ねこ のような状況であったとの意見を頂いている.

5. 結論

本論文では,航空レーザ計測データの利用方法について, 自動属性判別法による点群データを任意のメッシュで分割し ながらデータを走査していく平滑解析と自動輪郭(直線)抽出 を提案し,その適用事例として三次元都市モデル生成と氾濫 解析のための非構造格子モデル生成を試みた.

非構造格子モデル生成では,生成されたモデルを使用した 有限要素解析による氾濫計算を行い,時間経過での氾濫域の 変化をシミュレートした.この結果から,堤防破堤後わずか 6分で,破堤地点から約 350m まで氾濫流が達することが明 らかとなった.このように時間経過での氾濫流の挙動を把握 できたことは,時系列によるハザードマップの整備,避難勧 告(指示)や自主避難といった避難体制の迅速化に寄与するも のと考える.

また,今回の研究では三次元都市モデルを使用した解析等 は行わなかったが,風解析やヒートアイランド現象など,都市 部での現象の解析にも使用できるものと思われる.

以上の解析では,一部 CAD を使用した手作業があったも のの殆どを自動でモデル生成を可能とした.なお,それぞれ のモデル生成に要した時間を表-3にまとめた.この結果か ら言えることは,作業に要した時間のうち,手作業である CAD での作業時間が大きく占めており,この部分の自動化が 今後の課題と言える.しかし,これまで解析用のモデル生成

表	-	3	モデル生成までの作業時間
---	---	---	--------------

	三次元都市モデル	氾濫解析用モデル
平滑解析	約2分	約1分
属性境界解析	約17分	約1分
調整作業(CAD)	約5時間	約2時間
合計	約5時間19分	約2時間2分

コンピュータスペック Pentium4 3.20GHz 2.0GB RAM 氾濫解析用モデルの属性境界解析は Ground Data のみ

に数日間要していたことを考慮すると,大きく時間短縮 を可能にしたものと思われる.

本研究で提案した自動属性判別法が都市部において は一定の成果を得ることができたが,都市部以外の地域 でも同じような結果が得られるとは限らない.今後は平 滑解析だけでなくスロープやエッジといった,その他の 形状情報も自動判別する解析手法を検討し,都市部以外 での可能性についても研究していきたい.

参考文献

- アジア航測(株)ホームページ: <u>http://www.ajiko.co.jp/</u> service/space/03_raser_bird.html, 2005年5月現在.
- 2) 政春尋志:航空レーザースキャナー, P21, 全測連 2001 年 新年号
- 3) 織田和夫ほか:フュージョンによる都市モデルの自動構築, 日本写真測量学会年次学術講演会, pp.135-138, 2003 年 6月
- 川本一樹ほか:レーザースキャナーを活用した河道モデル 作成手法に関する研究,土木学会第57回年次学術講演会, pp.393-394,2002年9月
- 5) 上野幹夫ほか:レーザ計測データを用いた有限要素法によ る洪水氾濫解析.第30回情報利用技術シンポジウム論文







お問い合わせはこちらへ

本誌あるいは弊社の解析サービス・解析ソフトに関してのお問い合わせは下記までお願いいたします。

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部

〒164-0011 中野区中央4丁目5番3号

TEL 03 - 5342 - 1136 FAX 03 - 5342 - 1236

 $E \times - \mathcal{W}$: kaiseki@kke.co.jp

西日本営業所 06-6243-4500 中部営業所 052-222-8461

また、本誌と連携して情報発信を行っております、構造計画研究所 解析関連部門のホームページにも是非お立 寄りください。

http://www4.kke.co.jp/kaiseki/

尚、構造計画研究所全社の URL は http://www.kke.co.jp/ です。



お客様が当社に提供された氏名・年齢・住所・電話番号等の個人情報は、当社の製品・ソリュ ーションなどの情報提供や営業などの目的で使用することがあります。あらかじめご了承くだ さい。お客様がご自身の個人情報の内容について照会または変更することをご希望される場合 には、あるいは当社による個人情報の利用の中止をご希望される場合には、上記宛てにご連絡 ください。可能な限り対処させていただきます。

解析 想起 Journal of Analytical Engineering Vol.16 2005.11

(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部 編集・発行

本誌は非売品です。本誌掲載記事・広告の無断転載を禁じます。

Windows は米国 Microsoft 社の登録商標です。

Journal of Analytical Engineering, Vol.16, 2005.11 Kozo Keikaka Engineering, Inc.