

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では堤防内部での液状化が発生した。原因として堤体の平時の圧密沈下と雨水、河川の流入により堤体内部に閉封飽和域（凹部に水が溜まった箇所）が形成されることが原因であると考えられている（図1）。本研究ではこの現象の特定を目的としており、本法はその過程で断面の横断面図と天端の亀裂情報の利用を深層学習によって試みるものである。

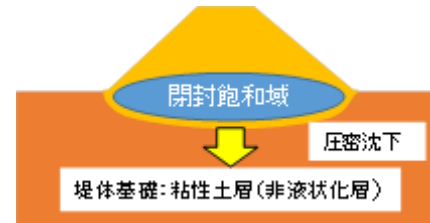


図1 液状化発生フロー

2. 天端縦断亀裂と粘土層の関係

朱ら¹⁾²⁾はこれまでに堤体基礎の支持力不足（圧密沈下）と縦断亀裂の関係から、土質柱状図とストリートビューを用いて、縦断亀裂が確認される場所において数 m 以上の粘土層が存在することを得てきた。しかし、縦断亀裂が生じていない箇所が一部にみられたことから、堤体の横断面における分布状態について調べた。粘土層の非対称を図2に示す5つのパターンに分類分けし、対称断面23箇所中12箇所（52.1%）非対象断面26箇所中22箇所（84.6%）の割合で縦断亀裂が確認できた（図2, 図3）。これより、粘土層が非対称に分布する場合に天端舗装に縦断亀裂が発生しやすいことが推察された。

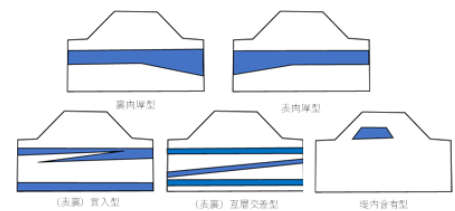


図2 非対称の分類

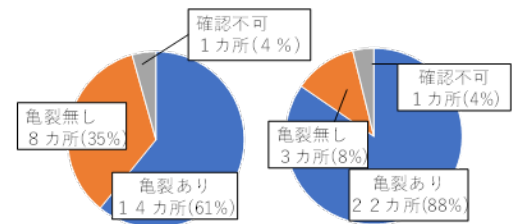


図3 対象断面(左)と非対象断面(右)

3. 深層学習による縦断亀裂と粘土層分布の関係

杉井、浅井ら²⁾は非対称性と区別せずに、粘土層の2次元断面情報抽出し縦断亀裂ありと亀裂なしの教師データで学習させ、堤体横断面図から縦断亀裂の有無を推定するモデルを作ることを試みた。結果、的中率65.4%と的中率が高いとはいえないが深層学習適用の可能性を得ることができた。

4. 研究方法

(1) 深層学習

CNNによって天端の亀裂の有無を検討する。教師データで亀裂の有無の判別モデルを構築し、検証データによってモデルの精度を確認し、構築したモデルを一つの河川（適用データ）に適用する。図また Grad_CAM（一種の感度分析）によりモデルの注目領域（どこを見て判断したか）を求め共通項を人の目で確認し亀裂の発生する要因を分析する。（図4）

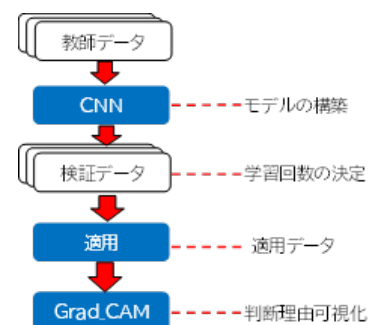


図4 研究の流れのフロー

(2)CNN

Convolutional neural network の略であり画像分析に用いる。畳み込みとプーディングを繰り返し画像が持つ特徴を分析する。(図 5)

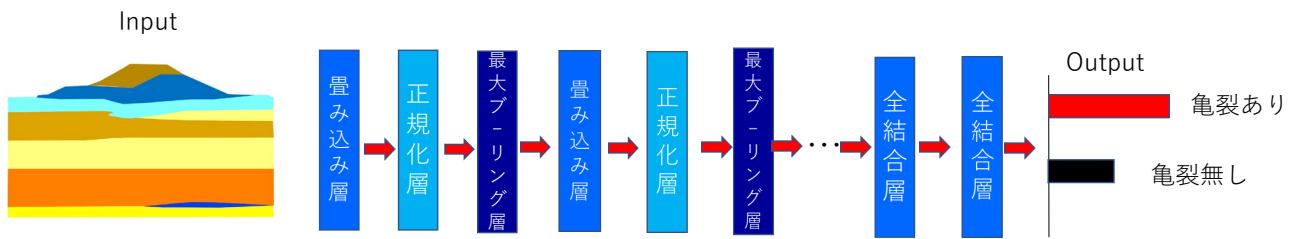


図 5CNN

(3)データの作成

全国河川の詳細調査点結果にある横断面図から解析するのに不要なボーリング図やN値のデータを除いてトレースし、各層ごとにパレットを作り着色する。(図 6)Google ストリートビューによって断面の範囲内で亀裂が発生しているか調査し、データを亀裂の有無に分ける。教師データ(モデルの構築)と検証データ(モデルの評価)に全国の河川、適用データには庄内川のデータを使用した。(表 1) 検証データは教師データの 1 割で設定し、教師データと検証データ、適用データはそれぞれ異なる断面である。

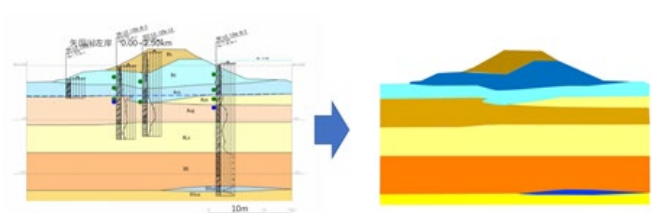


図 6 データトレースの例

表 1 データの内訳

	教師データ+検証データ		適用データ	
	亀裂あり	亀裂なし	亀裂あり	亀裂なし
計	222	222	37	11

(4)モデルの評価

モデルを適用した結果は、正解率、適合率、再現率、F1 によって評価する。解析において正として予測して実際に正だったものを TP 真陽性、実際に負だったものを FP 偽陽性と呼ぶ。また負と予測して実際に負だったものを新陰性、実際に正だったものを偽陰性と呼ぶ。(表 2)

表 2 解析結果の分割

	実際正	実際正
正と予測	TP:真陽性	FP:偽陽性
負と予測	FN:偽陰性	TN:真陰性

正解率(A)は全ての予測に対する正答率(式 1)適合率(P)は正と判断し実際に正であった割合(式 2)、再現率(R)は実際に正の中で正と予測した割合(式 3)、F1 は適合率と再現率の調和平均(式 4)である。

$$A = \frac{TP+FP}{TP+FP+TN+FN} \quad (1) \quad P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2) \quad R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3) \quad F1 = \frac{2PR}{P+R} \quad (4)$$

5. 結果

(1) 構築したモデル

モデルを構築し際に検証データに適用した際の正解率と累積の学習回数の変化を記録したグラフ図 7 を示す。一般的に画像解析では学習回数を上げるごとに精度が上がっていくが、ある回数を境に正解率が発散（一定）する。正解率 95.6% を得た学習回数 15 回バッチ数(データを分ける数)30 のモデルを使用した。

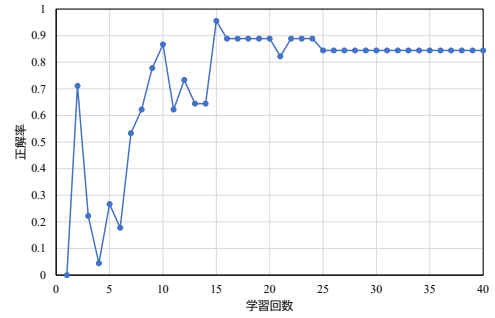


図 7 検証データの正解率の変化

(2) 分析結果

構築したモデルを庄内川に適用した結果を図 8 に示す。「亀裂あり断面」の亀裂あり確率を赤、「亀裂なし断面」の亀裂あり確率を青のグラフで表現している。黒線は確率 50% のラインであり亀裂あり断面ではラインを越えていると正解亀裂なし断面では超えていないと正解となる。「亀裂あり断面」37 断面中 26 断面正解、「亀裂なし断面」11 断面中 9 断面正解で正解率:72.9% 再現率:92.9% 適合率:70.3% F1:0.8 となった。

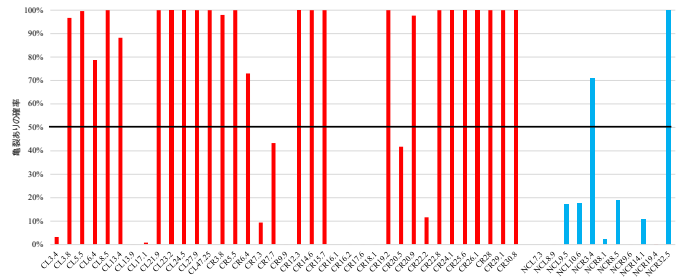


図 8 各々の亀裂ありと判断する確率

モデルの判断根拠を Grad_CAM によって可視化させたものの一部を図 9 図 10 図 11 図 12 に示す粘土層に注目がされており、亀裂あり（正解）では堤体内部や洪積層粘土、粘土層と他の層との境界部分に注目されていた(図 9 図 10)。亀裂なし（正解）では対象（水平）の断面に注目が高くなっており、画像分析からでも対象の断面では縦断亀裂が発生しにくいことが得られた。亀裂あり（亀裂なしと判断）と不正解となった断面では堤内の粘土層に注目が高くなっており、圧密沈下による縦断亀裂の発生に堤内の粘土層が寄与しない可能性がある。(図 11 図 12)

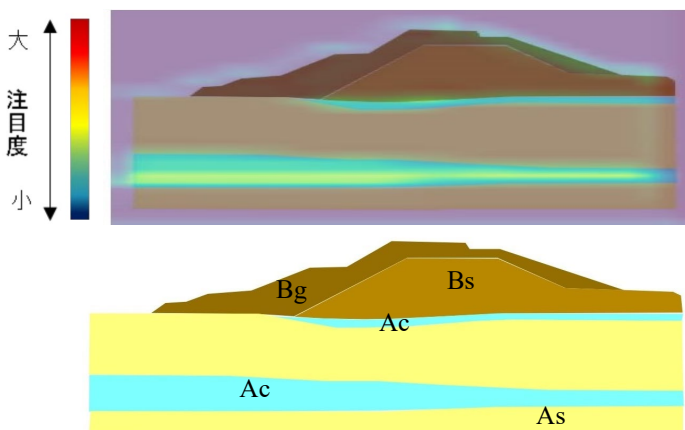


図 9 貫入に注目されていた例

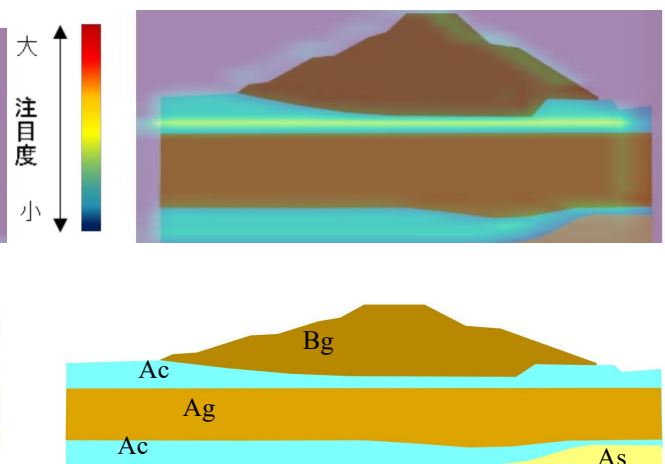


図 10 境界部注目されていた例

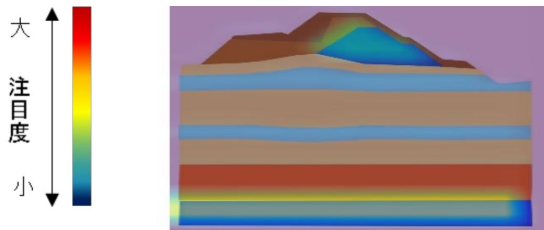


図 11 堤内の粘土層に注目されている例

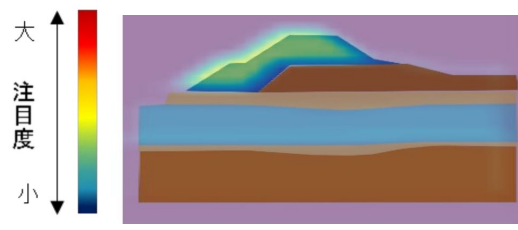


図 12 天端が粘土層だった例

河口からの距離と判別一致の累積断面数をプロットした (図 11)。10km 地点までは正解を重ねているが、10km を超えると一部停滞している部分が見られる。濃尾平野の概念図⁴⁾によると 10km 地点からは一宮氾濫平野とよばれる地層になっており、断面図を見ると深層に締め固まった粘土層が存在する場合としない場合で亀裂の表れ方が違うため精度に影響が出た可能性が考えられる。また右岸 31 断面中 20 断面(65%)正解、左岸 17 断面中 14 断面(82.4%)正解と右岸と左岸とで正解率に差があった。これは左岸の方は右岸より粘土地盤がせり出しておりそこでも亀裂の現れ方に差が生じたと考えられる。

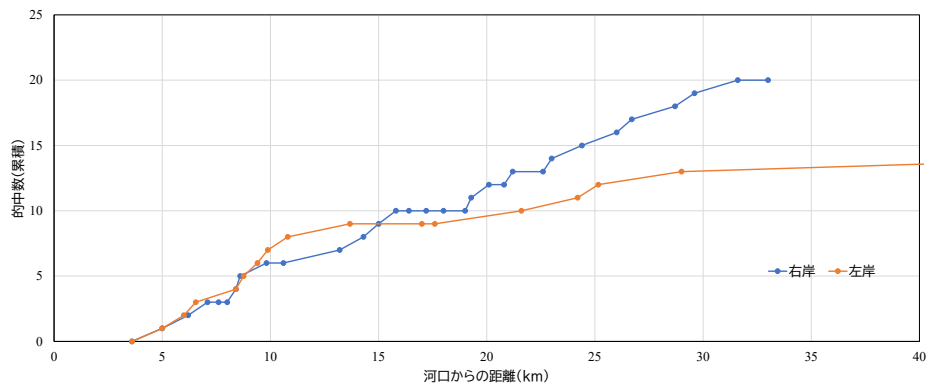


図 13 河口からの距離と判別一致の関係

6.堤防・土質の形状及び堤高の数値を対象とした解析

(1)解析方法

4 章での堤防の形状に加え堤防の規模も解析の対象とした。画像データの格納ファイルはデータの種類を分けず、テキストデータによって分類する。堤防の規模(label)は天端の高さから堤体の川面側の高さを基準とし数値を一番規模の大きい数値で補正し 0~1 の間に収めた。このデータと亀裂の有無(亀裂ありデータを 1 亀裂なしをデータを 0 としてラベル付けする)、データ名を教師、検証、適用データでテキストデータとして解析に用いた。

(2) loss

損失関数の一種であり正解値と、モデルによる出力された予測値とのズレの大きさを表した値である。この損失の値の最小化から学習モデルを決定する。自動的 loss が最も小さい値を取ったモデルを選択するようプログラミングしている。

(3)ROC 曲線と AUC

解析モデルの評価をグラフによって表す。縦軸に真陽性率(TPR)横軸に偽陽性をとる。一つのモデルに対して閾値(正解の基準にする確率)にするかを変えプロットする。この曲線を描いたときにグラフ下部の面積を AUC と呼びこの値が高いほど精度の良いモデルといえる指標となる。

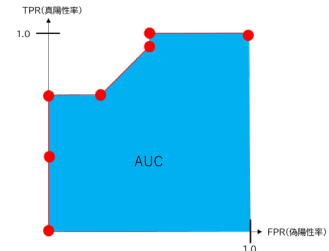


図 14 ROC 曲線と AUC

6 結果

(1) ROC 曲線と AUC

分析によって描かれた ROC 曲線を図 15 に示す AUC: と良いモデルとはいえないが庄内川に適用した。また 5(2) で得られた結果から ROC 曲線を作った結果 AUC=0.739 となりいいモデルで解析が行われていることを確認した。

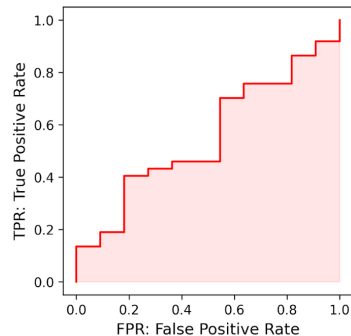


図 15 ROC 曲線

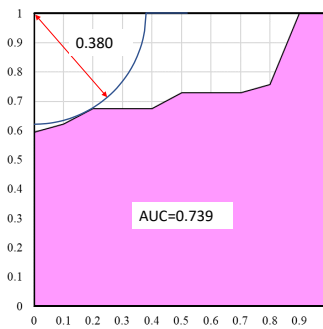


図 16 5(2)から得られた ROC 曲線

(2)庄内川に適用した結果

構築したモデルを庄内川に適用した結果を図 16 に示す。4 章と同様に「亀裂あり断面」の亀裂あり確率を赤、「亀裂なし断面」の亀裂あり確率を青のグラフで表現している。黒線は確率 50%のラインであり亀裂あり断面ではラインを越えていると正解亀裂なし断面では超えていないと正解となる。「亀裂あり断面」37 断面 34 断面正解、「亀裂なし断面」11 断面中 0 断面正解で正解率:70.8% 再現率:75.6% 適合率:91.9% F1:0.83 となったが推定する確率が全ての断面において 50%に近い値を出しており AI が判断に迷っていることが推定される。教師データの堤防規模平均をとったところ、亀裂あり断面が 0.437、亀裂なし断面が 0.408 と差が 0.029 しか無かったため堤防の規模を解析に使用したのが良くなかったと考えられる。

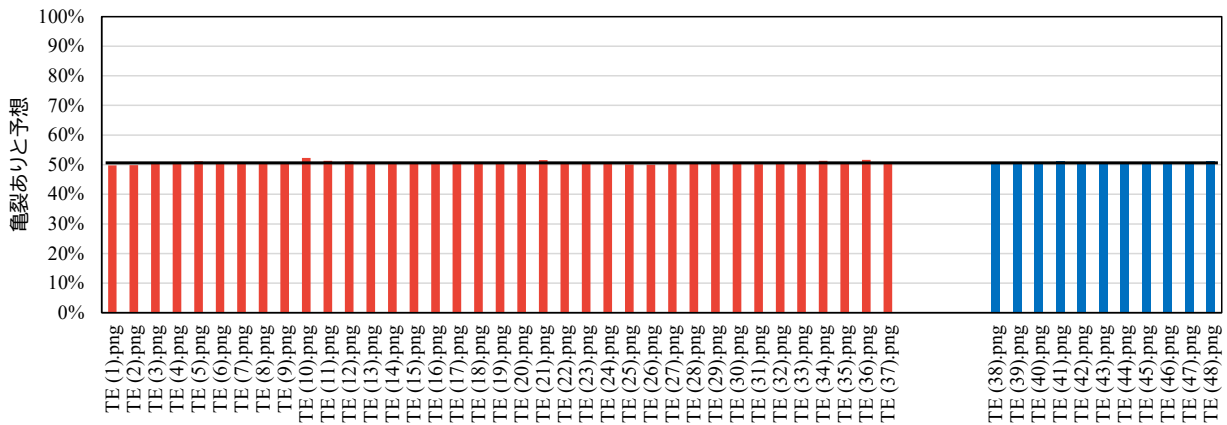


図 16 各々の亀裂発生率

7. 結論

堤防天端の亀裂と地盤状況の関係性の解明において、深層学習による画像解析を取り入れて研究を試みた結果、以下の結果を得ることができた。

1. 合計 444 断面の教師データで解析を行った結果 72.9%の的中率を得た。
2. 粘土層の貫入と傾斜境界部の非対称性が縦断亀裂の発生に寄与することが Grad_CAM の結果から得られた。
3. 堤内の粘土層が圧密沈下による縦断亀裂に寄与しない可能性を得た。

8. 参考文献

- 1) 朱 發瑜, 平野浩之, 山田雄大, 杉井俊夫: 堤体基礎沈下箇所と天端縦断亀裂の関係, <https://jgs-chubu.org/wp-content/uploads/2020/07/29-9.pdf>, 2020
- 2) 高田 堤体基礎の層構造と天端舗装亀裂の関係について中部大学卒業論文 2020
- 3) 浅井駿輝, 杉井俊夫, 深層学習による堤防天端の縦断亀裂を伴う粘性土分布の分析, 令和3年度土木学会中部支部研究発表会, III-19, 2022
- 4) 坂本他(1984), 濃尾平野の地形・地質概要 <https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Aichi6C/2-1-1.htm>