

関東大震災時の江戸川堤防の 変形メカニズムについて

DEFORMATION MECHANISM OF THE EDOGAWA LEVEE AT THE TIME OF GREAT KANTO EARTHQUAKE OF 1923

佐古俊介¹・糊澤義一²・藤井紀之³・中山修⁴

Shunsuke Sako, Yoshikazu Kurumizawa, Noriyuki Fujii and Osamu Nakayama

¹正会員 財団法人国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

²正会員 国土交通省江戸川河川事務所 計画課 (〒278-0005 千葉県野田市宮崎134)

³非会員 応用地質株式会社 エンジニアリング本部 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)

⁴正会員 財団法人国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

The Central Disaster Prevention Council formulated the “Guidelines for Emergency Measure Activities in the event of Tokyo Metropolitan Epicentral Earthquake” in April, 2007. The guidelines does not assume flooding by dike failure, which leads to a concern that the action plans could be greatly affected in the case of flooding by dike failure.

In this study, reproduction analysis was conducted for the Edogawa Levee that was damaged at the time of Great Kanto Earthquake of 1923, to analyze the factors that affect the subsidence of the levee at the time of earthquake. ALID, which is one of the static deformation analysis methods, was used for the analysis. This report examines the importance of setting the initial conditions such as saturated zone for dam body, and the effective seismic countermeasures.

Key Words : Levee, static deformation analysis method, ALID, earthquake

1. はじめに

平成18年4月に中央防災会議により「首都直下地震応急対策活動要領」が策定されているが、これらの防災計画では、河川堤防の被災による浸水は前提としていないため、万一堤防が被災して浸水被害が発生した場合には、行動計画等に大きな影響を及ぼすことが懸念される。

大正12年9月1日に、伊豆大島の北を震源地として発生した関東大震災は海洋プレート型の大地震 (M7.3) であるが、関東地方を中心に甚大な被害を与え、利根川・江戸川、荒川等の河川においても堤体沈下等に伴う浸水被害は発生しなかったものの、堤防の大規模な変形、クラック等は多数発生している。

一方、平成19年3月に国土交通省河川局において策定された「河川構造物の大規模地震に対する耐震性照査指針 (案)・同解説」では、対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動であるレベル2地震動に対する河川構造物の耐震性能の照査について新たに規定するとともに、その解析手法として静的変形解析手法である「ALID」と「東畑モデル」が提案されている。

そこで、本研究においては江戸川堤防を対象として、

大正12年の関東大震災における堤防の被災箇所における再現解析を「ALID」を用いて行うことにより、その適用性を検証すると共に、地震時の堤防の沈下現象に影響を及ぼす要因について分析を行い、堤体内の水分量等の初期条件設定の重要性、及び効果的地震対策について考察を行ったものである。

2. 関東大震災による江戸川における河川構造物

被災の概要

関東大震災における江戸川の被害箇所および堤防の変状状況例を図-1に示す。堤防の沈下等の被害は59箇所、延長約20kmに及び、また、水門・樋管についても18箇所被害が発生した。堤防被害の特徴としては、堤体の沈下や堤防断面に発生した多数のクラックが挙げられるが、特に沈下は多数の箇所でも1mを超えており最大約3.3mに及んだ箇所もあった¹⁾。

これらの被害箇所の微地形上の特徴としては、治水地形分類図からの判読によると自然堤防に分類される地形が多く、旧河道等の要注意地形との関係は顕著ではなかった。

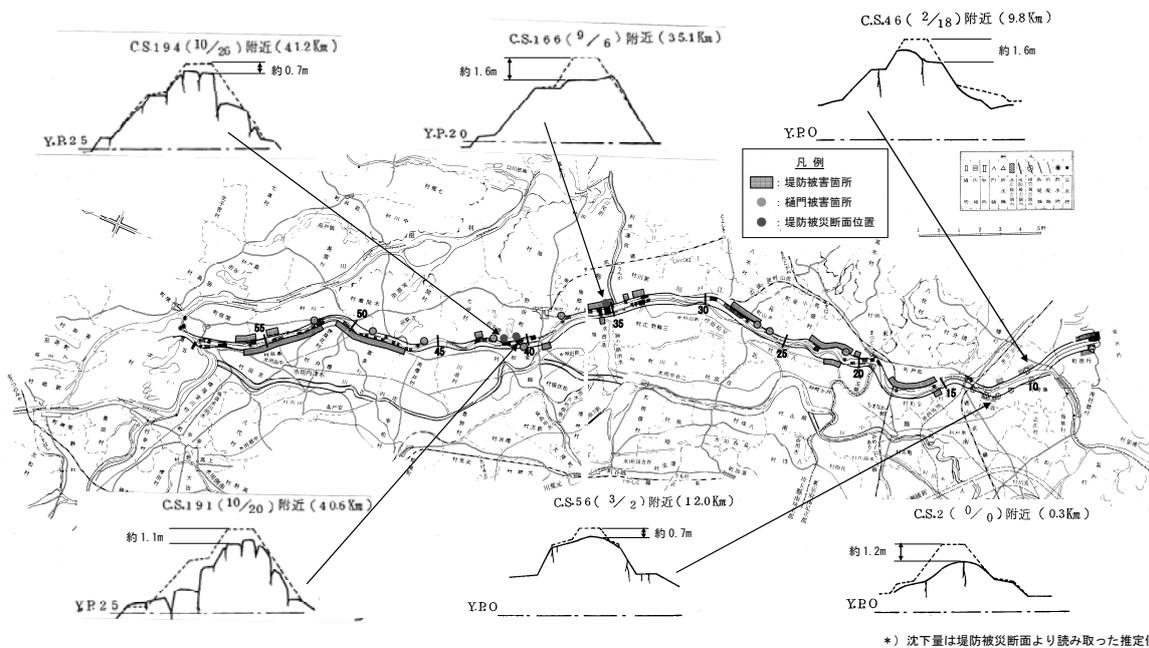


図-1 関東大震災における江戸川の被害箇所 (利根川百年史に一部加筆)

3. 静的変形解析を用いた堤防の沈下量の検証

堤防の被災については、関東大震災被災当時の断面形状がスケッチ¹⁾されていたため、左岸11断面、右岸2断面について、スケールアップにより、被災前堤防天端高と被災後堤防天端高(被災後も被災前の天端幅を確保している位置)の差を沈下量として読み取った(図-2)。

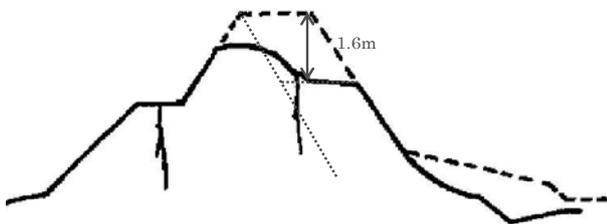


図-2 沈下量の読み取り方法(左岸9.8kの例)

一方、既存ボーリングデータを基に作成した堤防縦断方向の土質構成図より液状化層厚(As1層厚)を読み取り、その関係について図-3に示した。

この結果、液状化層が認められない堤防についても1mを超える堤体沈下が発生している箇所が存在することが明らかになったことから、沈下量が1m以上で、かつ堤防詳細点検におけるボーリングによって堤体や基礎地盤の構造が把握されている、左岸9.8k、左岸35.1k(以上、2断面は液状化層有)、および左岸40.6k(液状化層無)の3断面を対象として、静的変形解析手法「ALID」を用いて、関東大震災における堤防の被災メカニズムについて検証を行った。

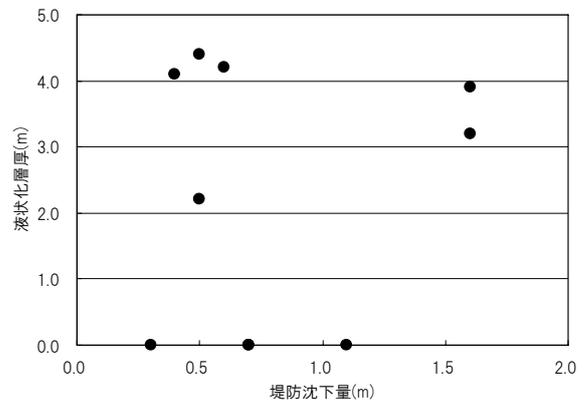


図-3 関東大震災における江戸川堤防の推定沈下量と液状化層の関係

(1) モデルの作成

関東大震災当時の江戸川の堤防断面をモデル化するためにあたっては、まず、震災当時の堤防法線の検証から行った。検証は、明治44年の「迅速図」の堤防法線と、「昭和55年地形図」の現堤防法線を重ね合わせることで実施し、その結果から左岸9.8kと左岸35.1kについては、現況の法線と大震災時の堤防法線は同位置とした。一方、左岸40.6kは引堤区間であることから、大震災時の法線位置は明治時代の法線位置とした。

震災当時と現堤防の法線が一致した左岸9.8kと左岸35.1kの堤体・基礎地盤構造については、利根川百年史に示されている関東大震災被災当時の形状(図-1の破線)に対して近傍箇所での堤防詳細点検で作成した堤体構造モデルを投影し、被災時の内部構造を仮定した。基礎地盤構造は、左岸9.8kと左岸35.1kは近傍の詳細点検結果を用いた。

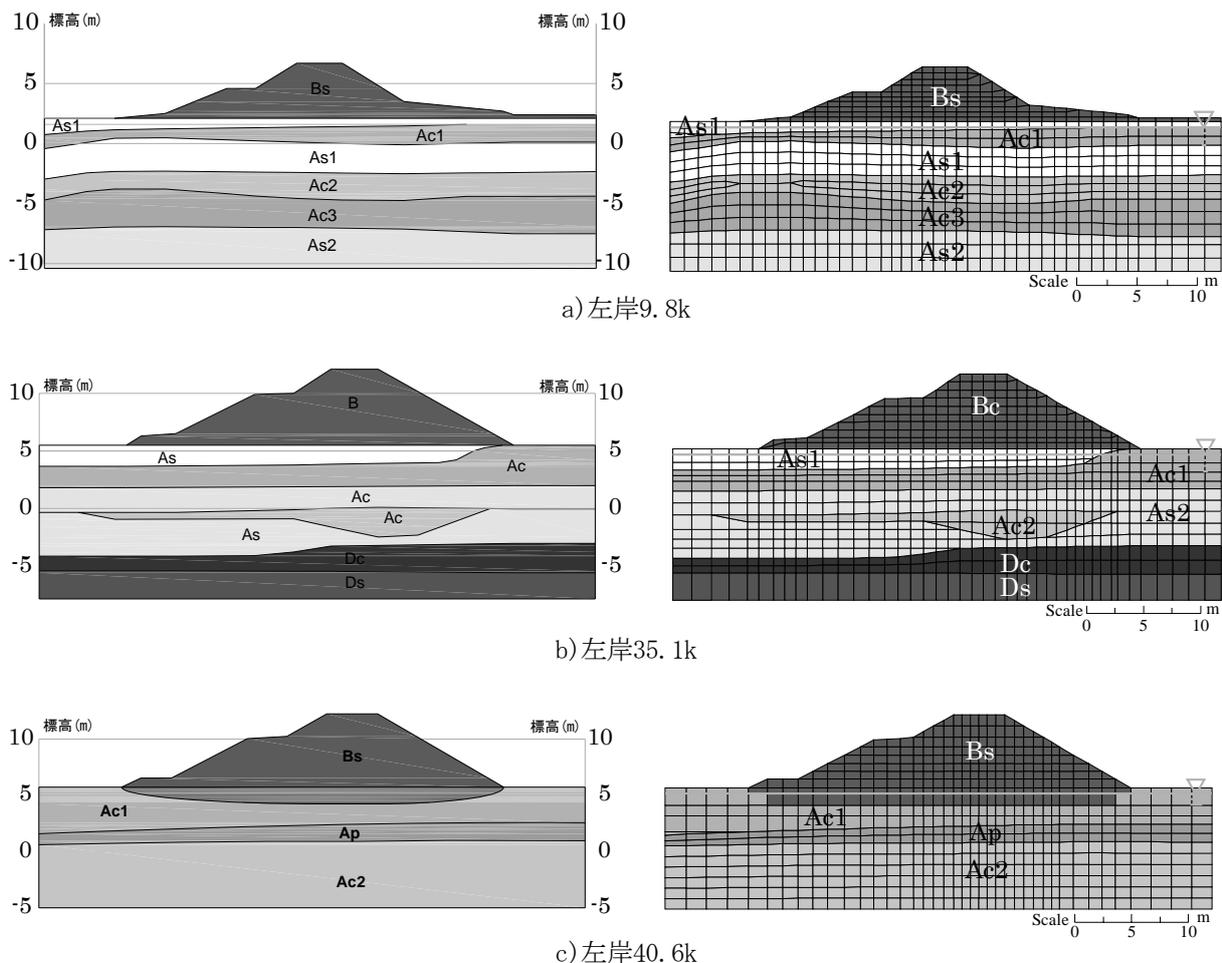


図-3 3断面で設定した土質断面図および解析メッシュ図(堤体部拡大)

また、震災当時と現堤防の法線が一致しない左岸40.6kの堤体・基礎地盤構造については、近傍に詳細点検結果が存在しないため、利根川百年史に示されている関東大震災被災当時の形状(図-1の破線)に対して既往報告書³⁾における地質横断面図をもとに、堤体と基礎地盤構造を仮定した。なお、既往ボーリング調査³⁾では築堤荷重による沈下によって現況堤体土が基礎地盤にめり込むように堆積している状況が示されていたことから、関東大震災時においても、同様の状況であったと仮定しモデル化を行った。高水敷幅については、迅速図から把握した。

作成した地盤モデル(堤体部拡大)を図-3に示す。

(2) 解析条件の設定

a) 土質定数

静的変形解析において必要な堤体土の物性値としては、単位体積重量と地震前せん断弾性係数があるが、単位体積重量については、一律 19kN/m^3 とした。地震前せん断弾性係数は、各地点の盛土の平均N値(左岸9.8kは $N=4$ 、左岸35.1kは $N=2$ 、左岸40.6kは $N=3$)を基に 2800N から求めた。

また、基礎地盤の物性値としては、単位体積重量と地震前せん断弾性係数および液状化強度があるが、単位体積重量については、砂質土は 18kN/m^3 、粘性土は 17kN/m^3 とした。地震前せん断弾性係数は、各地点の平均N値を基に $2,800\text{N}$ から求めた。液状化強度は、既存の調査結果から得られた値の平均値とした(左岸9.8k : 0.20 左岸35.1k : 0.22)。一方、左岸40.6kで液状化層とした堤体土の基礎地盤へのめり込み部分については、盛土平均N値を参考に 0.14 とした。

b) 非液状化層の剛性低下

表層非液状化層については、地表最大加速度 500Gal とした際に液状化層直上の非液状化層に引張り応力が発生していないことを確認した上で、左岸9.8kおよび左岸35.1kについては $0.025(1/40)$ 、左岸40.6kについては $0.1(1/10)$ とした。なお、液状化層中の粘性土の剛性低下は見込まなかった。

c) 境界条件

解析領域は法尻から川表、川裏ともに 100m の範囲とし、境界条件は、側方X固定(水平固定)、底面XY固定(水平、鉛直固定)とした。

また、初期水位条件は近傍の地下水観測結果等の記録が残っていないことから堤内地盤高 -0.5m と設定した。

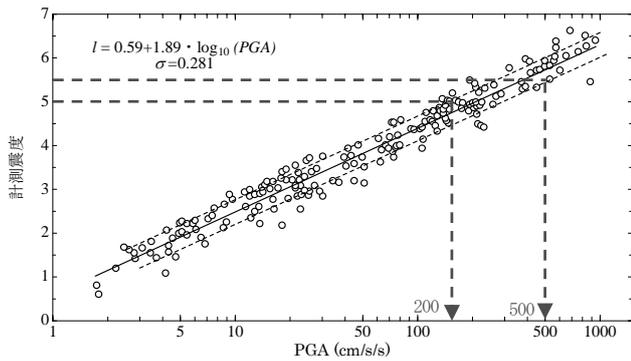


図-5 PGA(地表最大加速度)と計測震度の関係(童・山崎の関係式³⁾)

(3) 外力の設定

地震外力(地表最大加速度)は、関東大震災における震度分布より、当該地点が震度5強であったことから、図-5に示したように、童・山崎の関係式³⁾を基に200～500Galで幅を持たせて設定した。

なお、「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説、平成19年3月。」に準拠した場合、江戸川流域で想定される地震のうち、被害規模が大きく切迫性のある東京湾北部地震(M=7.3)では、350Gal(レベル2-1地震動、水平震度の標準値0.35、地域別補正係数1.0)となる。

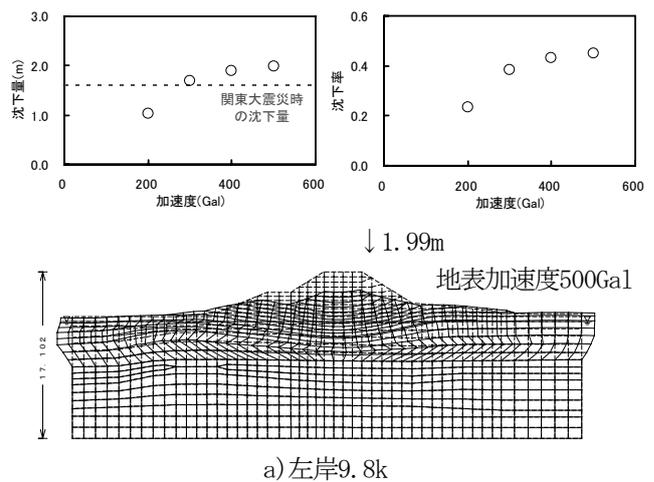
(4) 解析結果

上記の条件の下、地震外力200, 300, 400, 500Galに対する堤防沈下量をALIDにより推定した。天端沈下量は、天端両のり肩、中央の3点の平均値とした。また、沈下率とは堤高(堤外側の堤高と堤内側の堤高の平均値)に対する沈下量を示している。

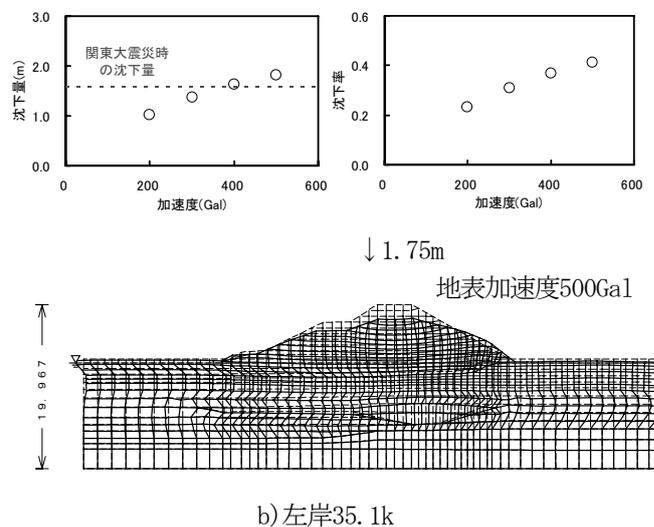
最大加速度と沈下量、沈下率の関係および残留変形図(地表加速度500Galのケース)を図-6に示した。以下に、検証結果を列記する。

①左岸35.1kおよび左岸9.8kの基礎地盤には液状化層が堆積している。また、ALIDによる沈下量は、地表最大加速度による幅があるものの、概ね被災量を再現できた。そのため、当該断面の関東大震災における被害要因は、基礎地盤の液状化であったことが推察される

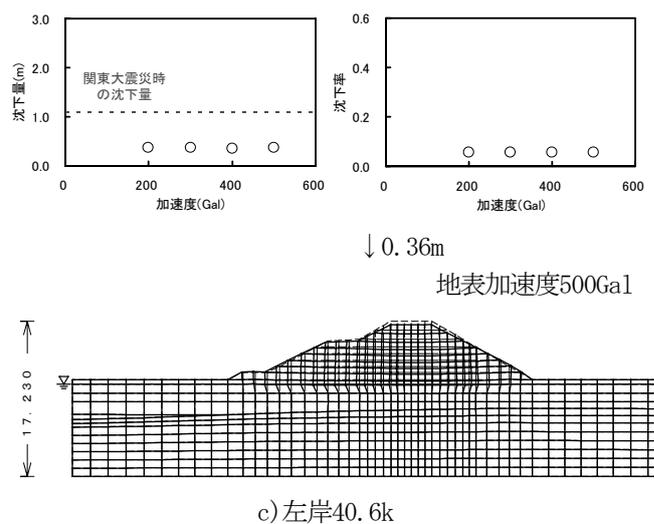
②左岸40.6kは基礎地盤に液状化層が堆積しておらず、堤体土のめり込み部の地下水以深を液状化層として取り扱った。その結果、地表加速度の大きさにかかわらず沈下量はほぼ一定となった。また、沈下量も0.36mとなり、関東大震災時の沈下量の1/3程度であった。



a) 左岸9.8k



b) 左岸35.1k



c) 左岸40.6k

図-6 最大加速度と沈下量、沈下率の関係および残留変形図

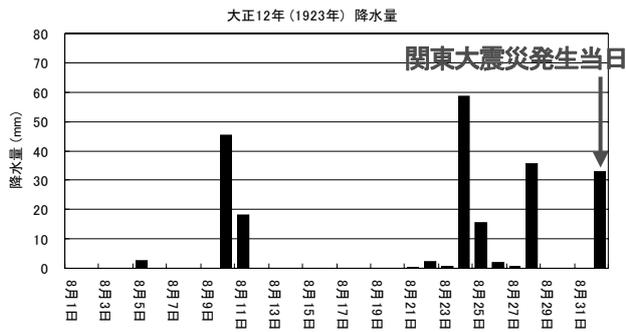


図-7 熊谷測候所における関東大震災前後の降雨量

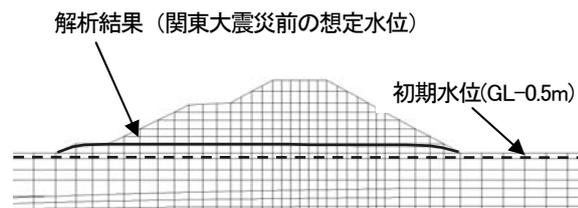


図-8 関東大震災前1ヶ月の降雨を考慮した浸透流解析結果

4. 左岸40.6k断面の検証

左岸40.6kにおける基礎地盤は軟弱粘性土であり、液状化層とはなり得ないことから、平成5年の釧路沖地震での十勝川や釧路川堤防の被災⁴⁾に見られたように、圧密沈下により砂質の堤体土が軟弱地盤内にめり込んだ結果、液状化層と同様の働きをして沈下した可能性が高いと考え、前章ではその考え方に基づいた計算を実施したが、関東震災時と異なる傾向の解析結果が得られた。

一方、「関東大震災当日、関東地方は、前夜来の風雨もしいに収まり、朝には所々にわか雨が残る程度になっていた。」と記されている文献⁶⁾もあることから、震災前の降雨が堤体内に残留し、堤体内水位が高い状態に保たれた可能性を考慮し、関東大震災の発生する1ヶ月前からの降雨を考慮した浸透流解析を実施して地下水位(堤体内水位)を再現し、その水位の状態からALIDによる解析を行った。

(1) 初期地下水位の推定

大正12年8月、9月の降雨の記録が残っている観測所の中で、最も江戸川に近い観測所のデータが記録された文献⁶⁾より、熊谷測候所における日降雨量データをもとに関東大震災前の降雨量を示した(図-7参照)。その結果、1ヶ月の降雨量は総雨量で180mmが降っており、震災発生当日も午前0時から明け方にかけて30mm程度の降雨があったことが分かった。さらに、この降雨記録を用いて飽和-不飽和浸透流解析によって初期地下水位について

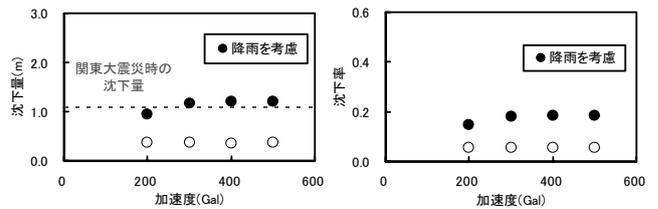


図-9 左岸40.6k断面における降雨を考慮した最大加速度と沈下量および沈下率の関係

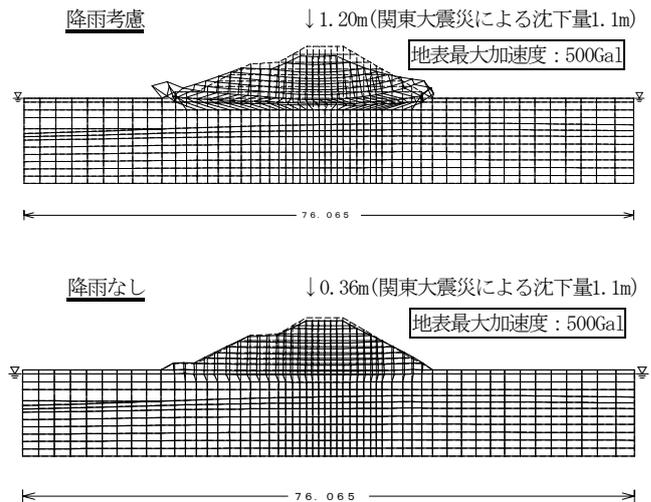


図-10 関東大震災前の降雨を考慮した場合のALIDによる解析結果(上段)と降雨を考慮しない場合のALIDによる解析結果(下段)の一例

解析を実施すると、基礎地盤-0.5mよりも1.5m高い初期水位になっていたと推定された。図-8に降雨量を考慮した浸透流解析結果を示した。

(2) 震災前降雨を考慮した変形解析

震災前降雨による堤体内水位上昇を考慮した状態で、ALIDによる変形量解析を行った結果を(●)で図-9に、解析結果の図を図-10に示す。この結果、沈下量は1.0m~1.2m程度となり、関東大震災による沈下量1.1mを再現できた。

以上より、基礎地盤に液状化層が存在しないとしても、砂質の堤体内に水が残留した場合には、地下水位以深の堤体が液状化することで被害が生じる可能性があることが分かった。

また、耐震対策の観点からは、浸透対策の基本的考え方である、堤体内の降雨および河川水の浸透防止と堤体内への浸透水の速やかな排除、といった堤体内に浸透水が残留しない対策工の有効性を示唆しているものと考えられる。

以上より、ALIDを用いた検証結果は、関東大震災時の沈下量をおおむね再現する結果となった。

5. 結論

本研究における結論を以下にまとめる。

- ①関東大震災で被災のあった江戸川堤防の多くは、基礎地盤表層に緩い砂層が分布しているが、軟弱な粘性土地盤の堤防でも被災があった。
- ②基礎地盤に緩い砂層が堆積している被災断面においてALIDによる沈下量を算定した結果、おおむね被災量を再現できた。当該断面の震災における被害要因は、基礎地盤の液状化であったことが推察されることから、このような断面において耐震対策工を実施する場合には、基礎地盤の液状化対策を主体として考える必要がある。
- ③基礎地盤に砂層が堆積していない被災断面においては、圧密沈下により砂質の堤体土が軟弱地盤内にめり込んだ地下水以深の部分を液状化層として取り扱い検証を実施したが、沈下量は関東大震災時の沈下量の1/3程度となった。

- ④震災前には多量の降雨があったことから、関東大震災が発生する1ヶ月前からの降雨を考慮した浸透流解析を実施して「地下水位」を想定し、その水位を用いてALIDによる変形解析を行った。その結果、関東大震災による被災量を、ほぼ再現できた。
- ⑤このため、液状化層が存在しないとしても、堤体内に水が残留した場合には地下水位以深の堤体が液状化することで被害が生じる可能性があることが分かった。また、耐震対策の観点から堤体内に水が残留しない対策を実施することが必要であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 建設省関東地方整備局：利根川百年史，昭和62年11月。
- 2) 堤台・座生地区動態観測業務報告書，平成13年3月。
- 3) 童華南，山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究48巻11号，1996
- 4) 佐々木康：泥炭地盤上の盛土の液状化，JICE Report 第16号（財）国土技術研究センター，2009年12月。
- 5) 武村雅之：「関東大震災 大東京圏の揺れを知る」，2003。
- 6) 埼玉縣熊谷測候所：熊谷気象参拾年報（其一）埼玉縣熊谷観測所，調査報告第十七号。

(2010. 4. 8受付)