

関東大震災時の江戸川堤防の変形メカニズムについて



佐古 俊介

河川政策グループ
上席主任研究員

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。

調査結果

1 関東大震災による江戸川の河川構造物被害の概要

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箇所で被害が発生した。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1mを超えており最大約3.3mに及んだ箇所もあった¹⁾。

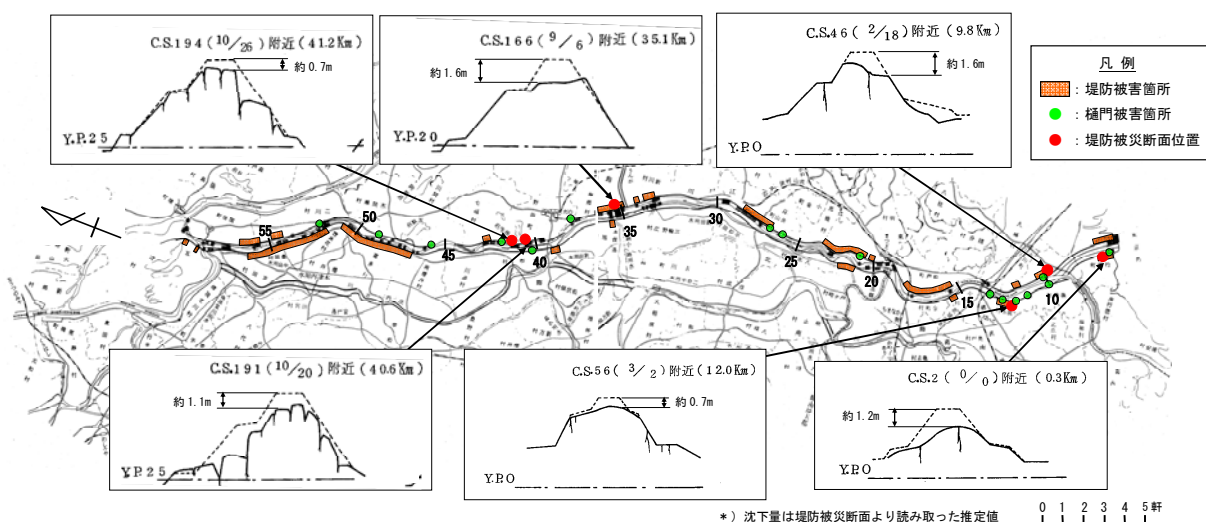


図-1 関東大震災における江戸川の被害箇所（利根川百年史に一部加筆）

これらの被害箇所の特徴としては、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。

2 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)。

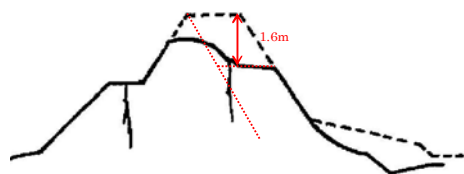


図-2 沈下量の読み取り方法(左岸9.8kの例)

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、上述した沈下量との関係について図-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(液状化層有)と左岸40.6k(液状化層無)の2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。

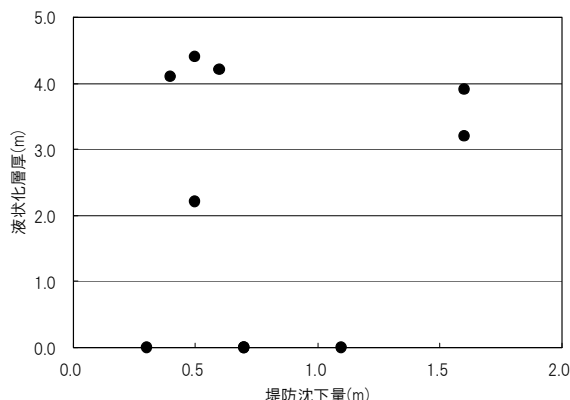


図-3 関東大震災における江戸川堤防の推定沈下量と液状化層の関係

2-1 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は、まず、震災当時の堤防法線の検証から行った。検証しは、関東大震災前直近の地形図である明治44年の「迅速図」の堤防法線と、堤防法線が現況となった「昭和55年地形図」の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については、現況の法線と大震災時の堤防法線は同一位置とした。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堤防断面図の破線)に対して近傍箇所での堤防詳細点検で作成した堤防構造モデルを投影し、被災時の内部構造を仮定した。

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堤防断面図の破線)に対して既往報告書²⁾における地質横断図をもとに、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²⁾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-4に示す。

2-2 解析条件の設定

(1) 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。単位体積重量については、室内土質試験結果をもとに一律19kN/m³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40.6kはN=3)を基に2,800N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、室内土質試験結果をもとに、砂質土は18kN/m³、粘性土は17kN/m³とした。

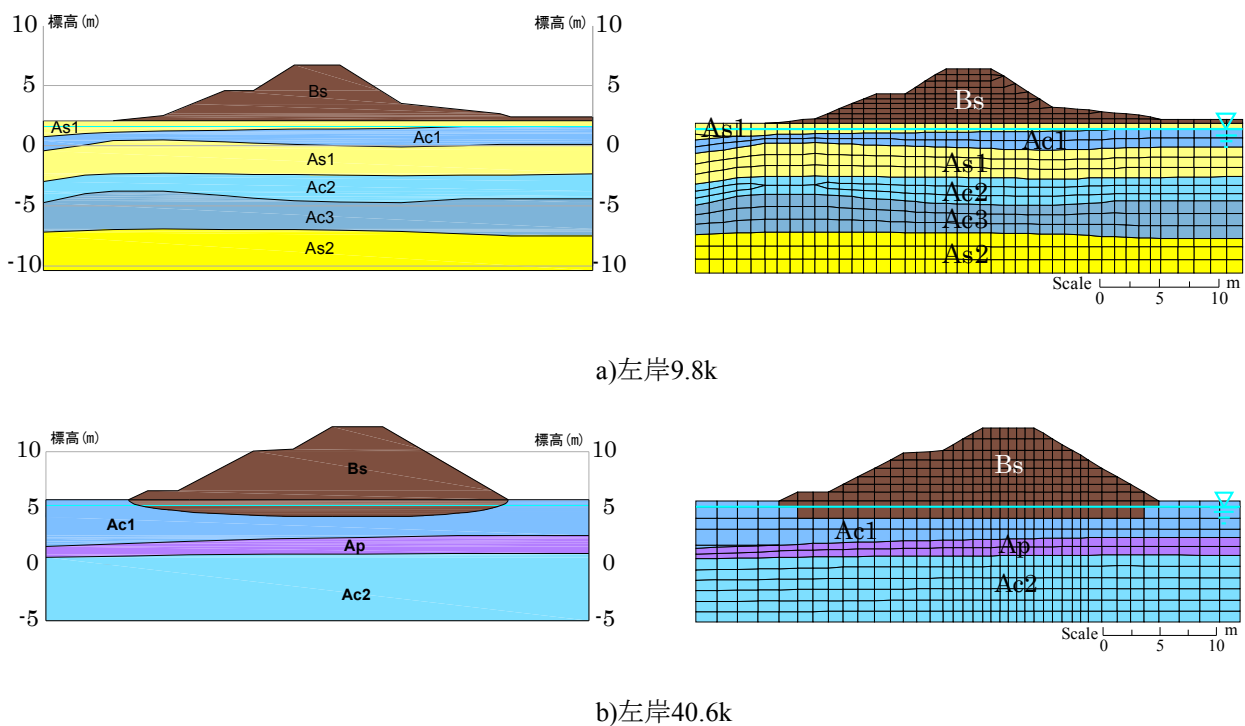


図-4 2断面で設定した土質断面図および解析メッシュ図(堤体部拡大)

地震前せん断弾性係数は、各地点の平均N値を基に2,800Nから求めた。なお液状化強度は、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)。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。

(2) 非液状化層の剛性低下

地下水位より上部にある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。

(3) 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。

2-3 地震外力の設定

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(図-6)より、当該地点が震度5弱～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。

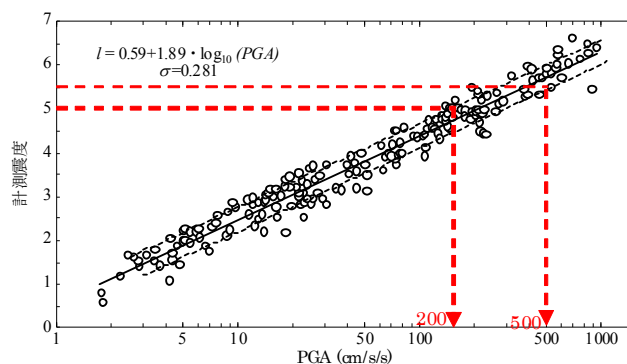


図-5 PGA(地表最大加速度)と計測震度の関係
(童・山崎の関係式³⁾)

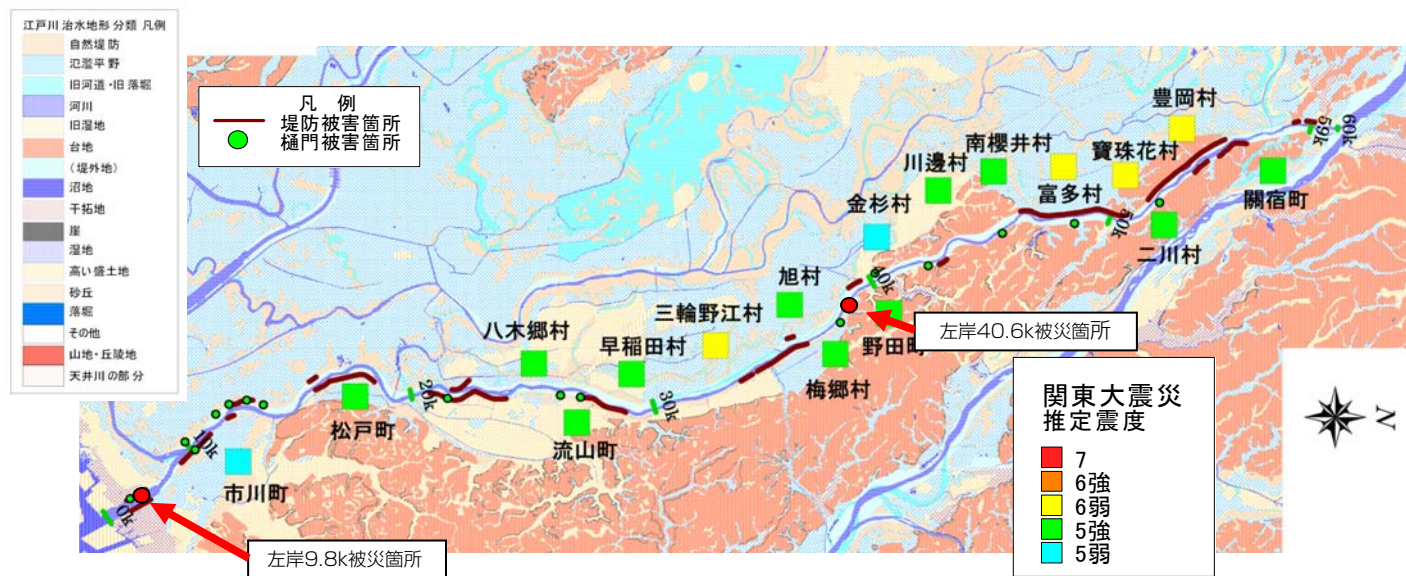


図-6 江戸川沿いの関東大震災における推定震度と被害箇所 1) 4)

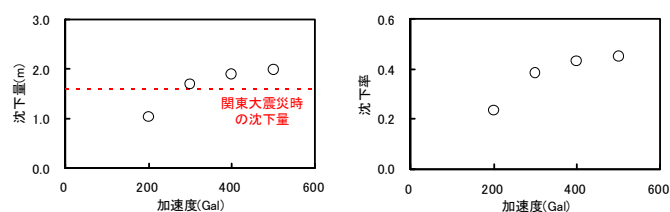
なお、「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説、平成19年3月」に準拠した場合、江戸川流域で想定される地震のうち、被害規模が大きく切迫性のある東京湾北部地震(M=7.3)に相当する海洋プレート型地震では、350Gal(レベル2-1地震動、水平震度の標準値0.35、地域別補正係数1.0)となる。

2-4 解析結果

上記の条件の下、地震外力200、300、400、500Galに対する堤防の静的変形解析をALIDにより行った。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。

作用させた地震外力と沈下量、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-7に示した。以下に、検証結果を列記する。

左岸9.8kの基礎地盤には比較的緩い砂層であるAs層が堆積しており、その部分を液状化層として取り扱った。当該箇所の関東大震災推定震度(図-6)が5弱であることから考えると、ALIDによる推定沈下量はやや小さいものの、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。



地表加速度500Gal

↓ 1.99m

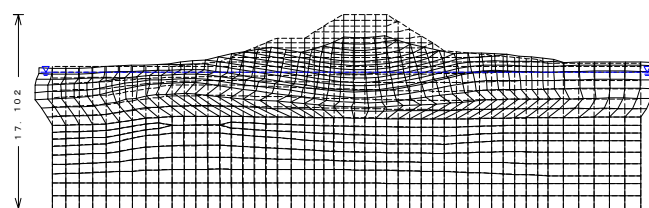


図-7 左岸9.8kにおける最大加速度と沈下量、沈下率の関係および残留変形図

一方、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。

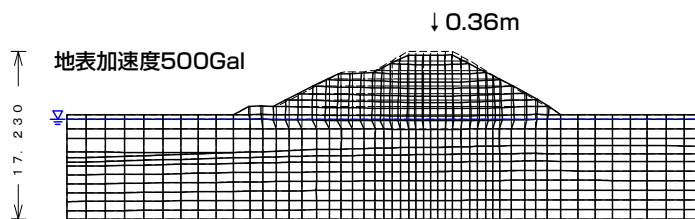
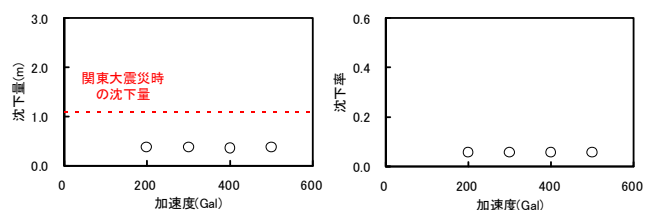


図-8 左岸40.6kにおける最大加速度と沈下量、沈下率の関係
および残留変形図

3 地震発生当日までの降雨を考慮した再検証

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⁵⁾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、地下水以深の堤体土が液状化層と同様の動きをして堤体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、前夜来の風雨もしだいに収まり、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た。つまり、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。

3-1 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⁷⁾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-8参照)。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-9に降雨量を考慮した浸透流解析結果を示した。

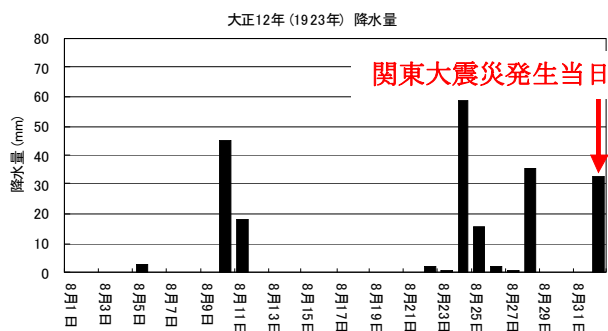


図-9 熊谷測候所における関東大震災前後の降雨量

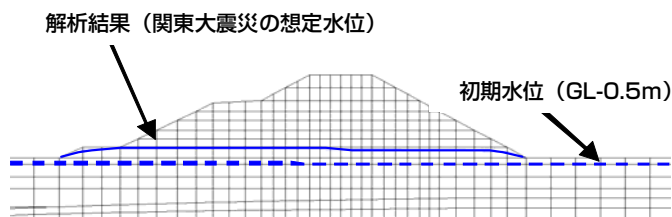


図-10 関東大震災前1ヶ月の降雨を考慮した浸透流解析結果
(40.6kの事例)

3-2 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による変形解析により得られた沈下量を(●)で、震災前降雨を考慮しない状態で解析を行った結果を(○)で図-11に示し、解析結果図を図-12に示す。

当該箇所は関東大震災の推定震度が5強(図-6参照)であり、相当する加速度が400gal～500galである(図-5参照)ことを考えると、沈下量は左岸40.6kで1.2m程度と、関東大震災による沈下量1.1mをほぼ再現でき、降雨を考慮しない場合よりも関東大震災時の被災量の再現性が向上していることが分かる。

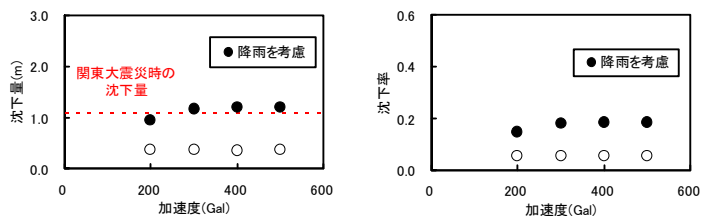


図-11 降雨を考慮した最大加速度と沈下量および沈下率の関係
(左岸40.6k)

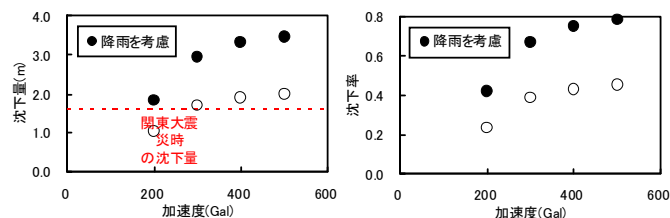


図-13 降雨を考慮した最大加速度と沈下量および沈下率の関係
(左岸9.8k)

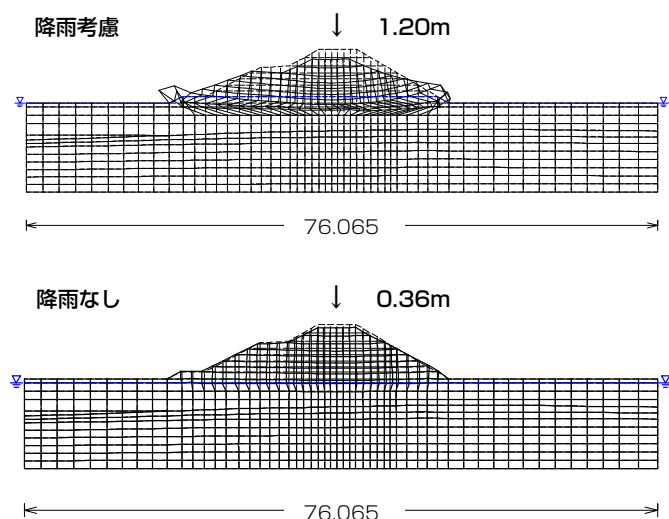


図-12 関東大震災前の降雨を考慮した場合のALIDによる解析結果(上段)と降雨を考慮しない場合のALIDによる解析結果(下段)
(左岸40.6k)

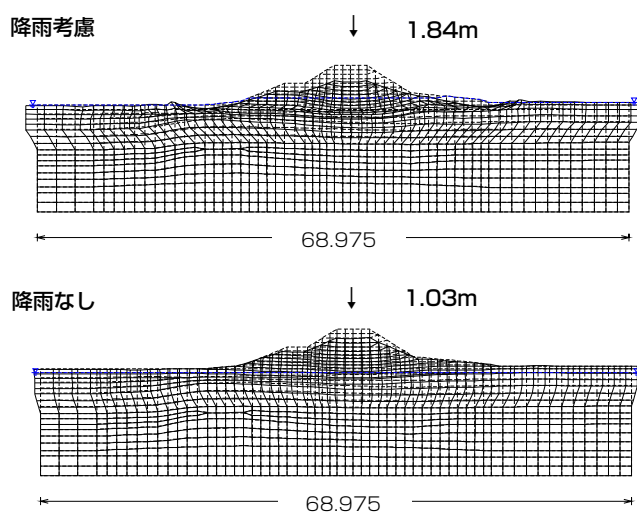


図-14 関東大震災前の降雨を考慮した場合のALIDによる解析結果(上段)と降雨を考慮しない場合のALIDによる解析結果(下段)
(左岸9.8k)

また、左岸9.8kについても、同様に震災前降雨による堤体内水位上昇を考慮した状態で、ALIDによる変形解析により得られた沈下量を(●)で、震災前降雨を考慮しない状態で解析を行った結果を(○)で図-13に示し、解析結果図を図-14に示す。

当該箇所の関東大震災推定震度5弱(図-6参照)に相当する加速度が200gal~300galである(図-5参照)ことを考えると、沈下量は左岸9.8kで2.0mと、降雨を考慮しない場合よりも関東大震災時の被災量の再現性が向上していることが分かる。

4 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おり、それが液状化することによって堤防の沈下が発生したと考えられるが、一方、液状化を生じる可能性のない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、やや沈下量が少ないものの、概ね被災時沈下量を再現できた。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、築堤による基礎地盤（粘性土層）の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状態を想定した。つまり、めり込んだ地下水以深の堤体土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、基礎地盤に緩い砂層（液状化層）が堆積している被災断面、堆積していない断面の両方で関東大震災による被災量を、ほぼ再現できた。

- ⑤ 以上より、堤防の地震時変形解析にあたっては、地下水位の設定が変形量、及び変形形態に与える影響が大きいことから、地下水位等、初期条件の適切な設定が重要であることが明らかとなった。
- ⑥ また、堤防の耐震対策にあたっては、基礎地盤の液状化層の対策と併せて浸透対策で実施しているような、堤体に水を入れない、入った浸透水は速やかに排水する対策が有効である可能性が示唆された。

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) 武村雅之他：「地質調査所データに基づく1923関東地震の詳細震度分布その1、その2」、日本地震工学会論文
- 5) 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。
- 6) 武村雅之：「関東大震災 大東京圏の揺れを知る」、2003。
- 7) 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。