

液状化被害の損失評価法に関する基礎的研究  
—東北地方太平洋沖地震による  
浦安市の液状化地盤の被害に基づく事例研究—

平成 26 年 3 月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程

建築学専攻

太 田 宏

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 既往の研究および文献の概要	4
1.2.1 地震リスク評価に関する文献	
1.2.2 建築物の地震リスク評価に関する既往の研究	
1.2.3 二次部材および建築設備の地震リスク評価に関する既往の研究	
1.2.4 液状化リスクに関する既往の研究	
1.2.5 GISを用いた地震リスク評価に関する既往の研究	
1.3 米国における既往のリスク評価法の概要	12
1.3.1 ATC-13	
1.3.2 HAZUS MR-4	
1.4 本研究の構成および概要	13
第1章の参考文献	18
<b>第2章 液状化判定法の概要</b>	<b>21</b>
2.1 本論文で用いた液状化の程度に関する指標	21
2.2 地表面動的水平変位 $D_{cy}$ と液状化指数 $P_L$ の関係	26
2.3 2011年東北地方太平洋沖地震に対する適用性	27
2.4 本章のまとめ	28
第2章の参考文献	29
<b>第3章 液状化被害における損失評価法の提案</b>	<b>30</b>
3.1 液状化被害の概要	30
3.1.1 2011年東北地方太平洋沖地震による液状化被害の概要	
3.1.2 千葉県浦安市内における公共施設の被害状況	
3.1.3 各施設の外構被害に要した補修費用の検討	
3.2 液状化被害における損失評価法	41
3.2.1 建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の検討	
3.2.2 液状化地盤の損失評価法の提案	
3.3 本章のまとめ	54
第3章の参考文献	55
<b>第4章 液状化被害における損失評価法の適用性の検討</b>	<b>56</b>
4.1 概説	56
4.2 液状化対策工による物的損失の低減に関する適用性の検討	57
4.2.1 千葉県浦安市入船における検討	
4.2.2 東京都江東区辰巳における検討	

4.3 施設群に対する液状化による損失評価法の適用性	65
4.3.1 損失評価の概要	
4.3.2 浦安市内の3地域における液状化に対する損失評価	
4.4 本章のまとめ	69
第4章の参考文献	70
<b>第5章 結論</b>	<b>71</b>

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

日本において地盤の液状化は、1964年新潟地震により生じた液状化による構造物の被害が甚大だったことから注目を浴びるようになった。1987年の千葉県東方沖地震や1995年の兵庫県南部地震、2000年の鳥取県西部地震などの地震においても液状化被害が報告されており、特に兵庫県南部地震では都市部の埋立地において甚大な液状化被害が生じた。これらの液状化被害により、液状化は地盤および基礎関連における耐震設計上の重要な課題の一つとされ、地盤、基礎関連の指針などにより液状化被害に基づいた液状化が発生する危険度の予測法が提案されてきた(例えば、<sup>1.1)</sup>, <sup>1.2)</sup>)。さらに2001年に改定された日本建築学会「建築基礎構造設計指針」では液状化が発生する危険度の予測法のみならず、液状化に伴う地盤変形を簡易に予測する手法<sup>1.3)</sup>も示されている。

液状化が生じた際は躯体被害や設備被害にとどまらず、噴砂などによる建物周辺のアプローチあるいは外構の被害や地盤の沈下による建物と周辺地盤に段差などの被害が予想され、上部構造の補修費用とは別にこれらの被害に対する補修費用が生じる。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、関東地方の埋立地を中心に液状化が生じたが、特に千葉県浦安市では甚大な液状化被害が生じ、浦安市内における被害額は300億円にも上っていると報告されている<sup>1.4)</sup>。また浦安市をはじめとする各公共団体が公開されている液状化マップによると、埋立地以外の緩い砂地盤などにおいても強い地震動が入力されると液状化する可能性があるため、これらの地域においても液状化に伴った被害が懸念されている。そのため、浦安市などの公共施設では液状化の防止、抑制を行うため既に液状化対策工が施工されてきている。

地震による被害を予測する手法の一つとして地震リスク評価法があり、地震リスク評価法で扱われる指標にDF(Damage Factor: 損失率)やPML(Probable Maximum Loss: 予想最大損失)などがある。DFは建物の補修費用と新築費用(再調達価格)の比率であり、地震リスクとして扱う上では地震による建物の損失率を表し、建物を補修もしくは建替えを行う場合の判断材料となる。PMLは建物の耐震性能を表現する指標としても扱われる一方、異なる定義の基で既に実用化

されているが<sup>1.9)</sup>、地震による物的損失の被害額や再調達価格に対する被害額の割合であることが多い。したがって、PMLにより地震リスクを評価するためには、建物の補修費用について検討しておく必要がある。現状の建物の補修費用に関する研究および地震リスク評価法では、振動による建物および建築設備の物的損失を対象とした研究および評価法が多い。たとえば、諏訪・関<sup>1.5)</sup>は、1995年兵庫県南部地震により被災した建物の補修費用について調査を行い、各建物の所在地における最大地表面加速度と建物の躯体被害および設備の被害などを対象に各補修費用の関係について検討した。また、金子・神原<sup>1.6)</sup>は1995年兵庫県南部地震による建築設備の被害についてまとめ、地表面最大速度および震度と被害率の関係について示した。米国では1985年にATC (Applied Technology Council : 応用技術協議会)がカリフォルニア地震による建築・土木構造物の被害をまとめ、建築・土木構造物の種類を詳細に分類し、各構造物の種類ごとにPMLなどの地震による物的損失の算出に用いる損失関数として示している<sup>1.7)</sup>。さらに近年では、FEMA (Federal Emergency Management Agency of the United States : アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁)が地震や津波などの自然災害による被害の軽減、緊急時の対応およびその準備、復旧計画などを行う場合に必要となる災害リスクの評価法 (HAZUS MR-4)<sup>1.8)</sup>を示している。この評価法では、施設の用途、建物規模、敷地条件などを詳細に分類し、施設の機能損失の程度を評価するとともにGIS (Geographic Information System: 地理情報システム)を活用することにより、地域の経済的、社会的損失を評価することが出来る。さらに、1990年代後半の不動産証券化を背景に個々の建物のリスク評価がなされる<sup>1.9), 1.10)</sup>とともに、地震保険や不動産投資信託の分野や企業および地方自治体の防災計画においては複数建物を対象とした地震リスクの評価が重要である<sup>1.11)</sup>。一方、液状化に関するリスク評価においては近年ではGISを用いて250mメッシュによる微地形区分に基づいて過去の液状化履歴から各微地形区分の液状化危険度が示されている(例えば、<sup>1.12), 1.13)</sup>。また、地方自治体によっては液状化危険度の地図上で示し、液状化に対する情報公開および注意喚起を行っている。しかし、既往の文献によると、地液状化および液状化に伴う被害による損失を定量的に評価した研究は少なく<sup>1.9)</sup>、また地盤改良技術を取り入れた被害損失の算定精度は低い<sup>1.14)</sup>とされている。

このような観点から、本研究は液状化による地盤被害の損失評価について検討を行うため、2011年東北地方太平洋沖地震により大規模な液状化被害を受けた千葉県浦安市における公共施設を対象に、各施設の被害状況についての資料を精査し、各公共施設の補修費用などについて浦安市に対してヒアリング調査を行った。各施設の被害状況について液状化の程度との関連について検討を行うとともに、液状化による影響が大きいと思われる外構の補修費用を液状化被害の損失として捉え、液状化の程度ごとに液状化被害の損失を算出する手法を提案するものである。提案した液状化被害の損失の算出法から算出される外構の補修費用と液状化対策工の工費の比較について、実際に液状化対策工が施工された事例を用いてケーススタディを行った。さらに、液状化被害の損失の算出法を用いて浦安市内の3地域を対象とした液状化被害の損失率の比較を行った。

## 1.2 既往の研究および文献の概要

### 1.2.1 地震リスク評価に関する文献

#### 1.2.1.1 地震リスク評価とリスクコミュニケーション<sup>1.9)</sup>

(日本建築学会, 2011. 3)

#### 本書の特徴

1章では、設計者、構造設計者がリスクを踏まえた意思疎通を図るうえで、リスクコミュニケーションを行うに当たって留意すべき点を取りまとめている。さらに現在ある資料の提示方法や他分野の事例を示し、耐震安全性に関するコミュニケーション手法について概説している。

現在、多くの機関がリスク評価を行うようになり、評価費用の削減や期間の短縮化など、評価そのものが簡素化の傾向にあるが、各機関の評価ノウハウは詳細に開示している機関がなく、機関によって結果に差異が生じる可能性がある。そこで本書では、地震リスク評価手法のガイドライン案を2章で示している。

#### 1.2.1.2 不動産投資・取引における

エンジニアリング・レポート作成に関するガイドライン<sup>1.10)</sup>

(公益社団法人ロングライフビル推進協会,

社団法人日本ビルディング協会連合会, 2011. 11)

#### 本ガイドラインの特徴

不動産証券化や売買および資産査定等におけるエンジニアリング・レポート(以下、ER)の作成に関し、業務内容、前提条件、作成者の資質、責任及び倫理並びに業務遂行上の留意点の必要事項について明確に示しており、公正な不動産取引の促進を資することを目的としている。

証券化を含む不動産流動化や一般の不動産販売および資産査定等において適用できるとしている。また、不動産管理においても参考資料として使用されるレベルのものであるとしている。さらに、計画・設計中および施工中の建築物を直接対象としていないが、考え方を参考にできるとしている。

本ガイドラインは、標準的なERの全容を明らかにしたもので、委託者より調査項目の選択や内容の追加または変更を制約するものではない。

工学的な観点から再調達価格、緊急・短期並びに長期の修繕更新費用、地震による予想損失額等の経済的要素についてリスクの定量化を行っている。



## 1.2.2 建築物の地震リスク評価に関する既往の研究

### 1.2.2.1 建築物の地震予測最大損失(PML)分析プログラム<sup>1.15)</sup>

(村地ら, 日本建築学会技術報告集, No. 22, pp. 487-490, 2005. 12)

不動産証券化市場の拡大に伴い、投資対象である建築物の PML 算出に対するニーズが高まり、計算手法および使用データを整理し、評価法を確立することが課題に挙げられている。このような背景のもとで、著者らは PML 算出に必要な地震活動情報、距離減衰、地盤情報、建物被害モデルなど入力データに関して最新の情報を与え、PML 分析プログラムを作成した。本論文では、作成した PML 分析プログラムの構成について示すと共に、本プログラムを用いた評価事例を示している。

### 1.2.2.2 限界耐力計算法を活用した簡易地震 LCC 分析プログラムの開発<sup>1.16)</sup>

(坪田ら, 日本建築学会技術報告集, No. 24, pp. 67-72, 2006. 12)

地震による建物被害を軽減するためには事前に適切な防災対策を施しておく必要があるが、防災対策を施された建物はまだ多くない。この理由の一つとして防災対策によるメリットが明確に示されていないことが考えられ、建物の所有者に対して防災対策に投資する事のメリットをわかりやすく提示する技術の確立、普及が望まれている。本論文では高橋による Capacity Spectrum 法に基づくシナリオ解析を利用した地震リスク評価手法を用いて、建物供用期間中に発生する地震による損傷費用を加えた供用期間中のキャッシュフローである建物の期待地震 LCC を簡便に評価するプログラムの開発を行っている。このプログラムは、時刻歴応答解析を伴わない簡便なシナリオ解析を実行することで、簡便ながらも、地震学、地盤工学、構造工学における最新のシュミレーション・モデルを導入することで、解析結果の合理性を追求している。

### 1.2.2.3 1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能<sup>1.17)</sup>

(林ら, 日本建築学会構造系論文集, No.528, pp.135-142, 2000.2)

林らは、地震動強さと建物被害の関係についてシミュレーション解析を行う際に、解析対象における個別の条件を無視することができない以上、建物を群として取り扱い、よりマクロな視点からの検討・考察が必要であるという考えから、兵庫県南部地震において比較的被害が多かった6階建て以上の建物を含むRC造建物被害調査結果と最大地動速度分布の推定結果より、RC造建物の被害と地震動強さの関係および被災建物の耐震性能について検討を行っている。さらに、新耐震設計法による8~12階建て建物の被害率曲線と、仮想建物の応答解析を基に、新耐震設計法による建物群の変形レベルと被害率の統計的な関係を推定している。

### 1.2.2.4 構造物の地震損傷度評価手法の検討<sup>1.18)</sup>

(大井ら, 防災科学技術研究所研究資料, No.273, 2003.2)

本研究では、震災被害予測システムに用いる地震損傷度曲線に関して、信頼性解析技術の最新の知見に基づき、地震被害データを最大限に利用した評価手法の開発を目的としている。検討結果から、現在利用されている建物被害関数は多様であることから地震被害関数を評価する場合は、そこに関わる不確定要因の影響を明確にする必要があるとしている。また、地震損傷度曲線には、地震動推定の不確定性も大きく作用するため、地震動評価を含めた標準的な建物被害推定手法を確立するべきとしている。

### 1.2.2.5 建物耐力と変形性能のばらつきを考慮した被害関数の作成手法<sup>1.19)</sup>

(宮腰ら, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.105-110, 2005.3)

地震被害調査結果を基に、解析により建物の被害関数を推定する手法として、建築物耐力特性分布を加えた変形クライテリアのばらつきも考慮する手法を提案している。兵庫県南部地震の実被害データから鉄筋コンクリート構造物の被害関数を推定し、被害レベルに対応する変形クライテリアを決めている。また木造建築とRC造建築のモデルを作成し、耐力分布は対数正規分布として地震応答解

析を行っており、応答結果から被害関数を作成する際に変形成分のばらつきを考慮すると、既往の被害関数とよい対応となったことを示している。

#### 1.2.2.6 地盤増幅特性を考慮した

##### 建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法<sup>1.11)</sup>

(清水ら, 日本建築学会構造系論文集 Vol. 73, No. 626, pp. 511-518, 2008. 4)

企業のリスク管理や地方自治体の防災計画において、複数の建築物全体(建築物ポートフォリオ)を総合的に扱う地震リスク評価が重要であるが、建築物ポートフォリオの地震リスクを評価する場合、個々の建築物における地震リスク評価の精度に加え、各建築物に作用する入力地震動の相関性などを設定する必要がある。既往の研究では建築物群の地震リスクを評価するにあたり、地点間距離などを考慮することで地震動の空間的な相関性を考慮している研究がみられるが、地震動の空間的な相関性には地盤の増幅特性の空間的な分布も影響すると考えられる。そこで、本論文では地盤増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法を提案するとともに、仙台地域に立地する仮想建物に対するケーススタディを行うことで本提案手法の特徴について示している。本提案手法では、地盤増幅特性の影響が少ない地震基盤において地震動の相関性を与え、深部地盤および浅部地盤の増幅特性を考慮しており、本論文でのケーススタディでは地震動の伝搬経路特性、地盤構造モデル、地盤応答解析、建築物モデル、建築物応答解析および損失評価などについては確定的に評価する事で地盤増幅特性を考慮した入力地震動の関係を考察している。

### 1.2.3 二次部材および建築設備の地震リスク評価に関する既往の研究

#### 1.2.3.1 アンケート調査に基づく

##### 建物の非構造部材被害と地震動強さとの関係<sup>1.20)</sup>

(神原ら, 日本建築学会構造系論文集, No. 578, pp. 155-161, 2004. 4)

地震により建築物に構造的な被害が生じない場合でも、非構造部材や設備に被害が生じることがある。このような被害は、大地震において広域で発生するだけでなく、発生頻度が比較的高い中規模の地震においても生じる可能性がある。そこで筆者らは、構造的被害が少なかったが、非構造部材や設備の被害が広域で発生した2000年鳥取県西部地震と2001年芸予地震における建物被害と地震動強さの関係を調査して、非構造部材や設備に関して、地震動強さと被害の様相の関係について検討している。調査結果より、非構造部材の被害の多くは震度5以上の地域で発生しており、非構造部材の被害率は建設年代が古いほど高く、非構造部材に被害を受けた建物では、被害が複数の部位で発生していたこと、建築設備について大きな被害を受けた建物はなかったことが分かっている。また今後の課題として、機能損害や経済的な被害に関する調査を行うと共に、建物特性や地震動特性による影響について検討する必要があるとしている。

#### 1.2.3.2 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線<sup>1.21)</sup>

(諏訪ら, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, pp. 1935-1941, 2008. 11)

諏訪らは、建物の機能性に着目し、1995年兵庫県南部地震で被災した156棟の建物を対象とした建築設備の地震被害データを用いて、建築設備の耐震性能を被害率曲線に基づきマクロ的に評価している。対象としている設備の種類は、空調設備、衛生設備、電気設備および防災設備としており、建築年代別、構造形式別および建物階数などの被害曲線から検討をおこない考察を行っている。さらに、RC構造物を対象に応答解析を行い、応答値を用いた被害率曲線を再評価している。

## 1.2.4 液状化リスクに関する既往の研究

### 1.2.4.1 モンテカルロ・シミュレーションによる液状化リスク分析手法<sup>1,2)</sup>

(陳ら, 土木学会論文集, No. 792/Ⅲ-71, pp. 61-73, 2005. 6)

地震時に発生する地盤の液状化は、構造物や地盤の変形、破損、倒壊に加え、埋設構造物の浮き上がりなど様々な被害を引き起こす。このような被災事例の研究により各種の液状化予測・対策手法が開発、提案されてきたが、現行の液状化の予測・判定手法は主に確率・統計的な見地で規定された地域や地盤種別ごとの想定地震動に対するものであり、かつ深度ごとに判定される。本論文は、現行の液状化判定では液状化の有無という二者択一的評価となり液状化による構造物などの経済的損失が考慮されていないことから液状化対策の必要性を定量的に判断できないこと、確定的な大きさの外力および地盤特性のみを用いた判定では起こりうる任意の大きさの外力とそれに対応した損失程度や地盤特性などの不確定性が評価されていないことから、リスクの概念を現行基準・指針の液状化予測に導入し、外力や土質条件の不確定性を考慮した液状化危険度評価の手法を提案している。

## 1.2.5 GISを用いた地震リスク評価に関する既往の研究

### 1.2.5.1 GISを活用した地震損害評価システムの構築<sup>1.23)</sup>

(小檜山ら, 日本建築学会技術報告集, No.7, pp.187-191, 1999.2)

著者らは地震による建物の損害評価を行うために、日本全国を対象とした歴史地震および活断層のデータベースから GIS の機能を活用して想定する地震のパラメータを設定できる地震損害評価システムを開発した。当システムでは地震動の評価に加え、液状化危険度の評価を行うことで地震動および液状化による建物被害の評価を行っている。地震動および液状化による建物被害は建物の構造を木造および非木造に分類し、被害レベルを全損、半損、一部損の3種に分類した建物被害率による評価をしている。建物被害率は1995年兵庫県南部地震などの6地震による建物被害データを基に求めた脆弱性曲線を用いることで算出される。なお、当地震損害評価システムは地震動および液状化による建物被害の評価に加え、火災による建物被害の評価も行うことができ、その評価方法についても本論文にて示されている。

### 1.2.5.2 微地形区分データを用いた広域の液状化危険度と

液状化による建物被害率の予測に関する研究<sup>1.24)</sup>

(山本ら, 地域安全学会論文集, No.11, pp.275-285, 2009.11)

地域の地震危険度を総合的に予測しておくことは、地震防災対策計画や災害復興計画を合理的に進める上で重要であると考えられることから、既存手法を整理し、新しい広域の液状化危険度予測手法の考え方について提案している。過去に起きた大きな地震による液状化状況と建物被害を調査し、広域を対象とした微地形区分データを用いた新しい液状化危険度および建物被害率の予測手法の検討・提案を行っている。

### 1.3 米国における既往のリスク評価法の概要

#### 1.3.1 ATC-13<sup>1.7)</sup>

(Applied Technology Council (ATC) :

Earthquake damage evaluation data for California (ATC-13), 1985)

本リスク評価法は、地震により生じたカリフォルニア州における建築・土木構造物の被害データを基にして、地震による構造物の損失を算出する事を目的にした地震リスク評価法である。建築物（40区分）や土木構造物（38区分）を躯体の構造、材料などに基づいて詳細に区分するとともに、施設の用途により区分し、過去に生じた改正メルカリ震度階と各区分における地震動による物的損失および人的被害の関係について検討されている。特に、施設の被害状況を示す指標として(1.1)式のような DF (Damage Factor、損傷率) の概念や PML (Probable Maximum Loss、予想最大損失) を求めるための損失関数が示されており、後発の確率論的地震リスク評価法の貴重な資料となっている。

$$\text{Damage Factor (DF)} = \frac{\text{補修費用}}{\text{再調達価格}} \quad (1.1)$$

#### 1.3.2 HAZUS MR-4<sup>1.8)</sup>

(Federal Emergency Management Agency (FEMA) :

HAZUS Technical Manual MR-4, 2009)

HAZUS は、災害リスクの評価手法として米国の FEMA が体系化したシステムである。リスク評価を行う災害としては地震のみでなく津波や噴火などが含まれている。地震による災害リスクの評価に関する算定フローが示されており、当フローでは直接的な物的被害の確率評価を行うのみでなく、直接的な物的被害による経済的・社会的損失評価や地震により誘発される洪水や火災などによる物的被害の評価なども評価対象となっている。

## 1.4 本研究の構成および概要

現在、日本では地震による物的、人的、経済的被害を軽減するための対策が講じられている。1995年の兵庫県南部地震を契機に、土木施設や建築物の耐震性がより重要視され、構造物の耐震性を判断するための耐震診断などが普及することとなった。一方、適切な地震対策を行うためには地震の発生危険度と地震による構造物の物的損失を関連付けた地震リスクが重要である。地震リスクの指標の一つであるPML (Probable Maximum Loss: 予想最大損失) は、リスク評価を行う機関などにより定義が異なり、文献<sup>1,9)</sup>では現在よく使用されている定義として「50年間での超過確率10%の損失を生じる地震による90%非超過損失」や「50年間での超過確率10%の地震動強さによる90%非超過損失」、あるいは「50年間での超過確率10%の損失」が示され、各々の特徴が示されている。いずれの定義によるPMLにおいてもそれぞれの定義に対応した損失関数を用いて損失を算出している。一般的に用いられている損失関数の概念図を図1.4.1に示す。損失関数は損失を確率変数とした確率分布関数が用いられることが多く、PMLでよく用いられる超過確率10%の損失は累積相対度数が0.9(90%)のときの損失に相当する。地震による損失を算出するには地震動の評価と地震動による建物の応答のみでなく、地震による建物の応答の程度に対応した損失関数を定義する必要がある。地震や地震動の評価や建物および地盤被害の損失に関する既往の研究の一例を図1.4.2に示す。地震による建物や土木構造物の損失関数については、前節

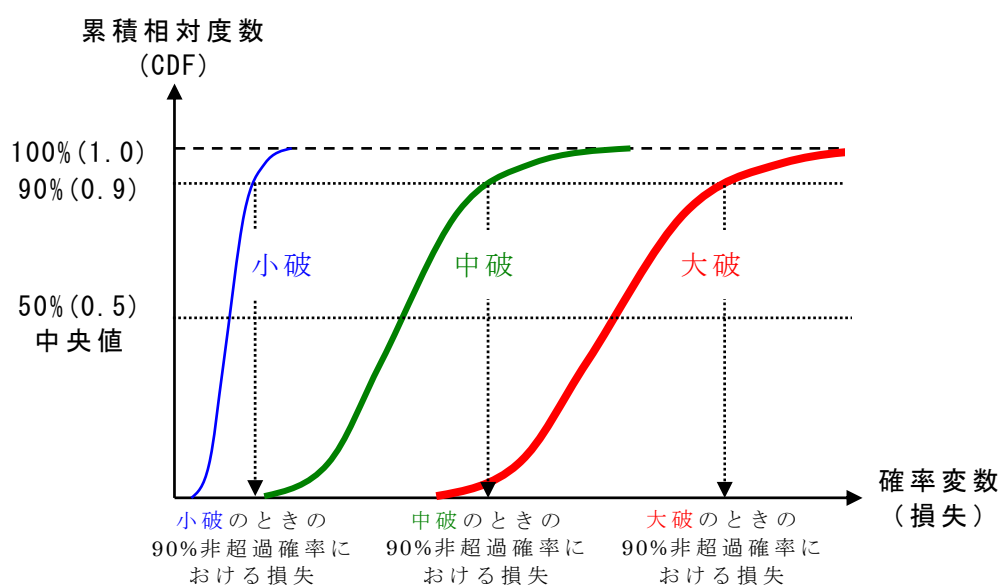


図 1.4.1 損失関数の概念図



までに示した様に既往の研究や損失評価法で示されているものの、日本建築学会から出版されている「地震リスク評価とリスクコミュニケーション」によると、「液状化と建物被害の関係や液状化と建物損失の関係について定量的に評価した文献はほとんどない。」<sup>1.9)</sup>とされていることからわかるように、地盤被害に関する損失関数および損失評価法についてはほとんど文献がないのが現状である。

このような背景をもとに、本研究は液状化による地盤被害の損失評価手法を提案するものである。そのために、2011年東北地方太平洋沖地震により大規模な液状化被害を受けた千葉県浦安市における公共施設を対象に、各施設の被害状況について資料調査およびヒアリング調査を行った。各施設の被害状況と液状化の程度との関連について検討を行うとともに、液状化による影響が大きいと思われる外構の補修費用に関して統計的に検討を行い、地盤被害に関する損失関数を求めた。さらに、図1.4.3に示す様な現行の液状化判定法により得られる液状化程度の推定値である地表面動的水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  が地盤被害の程度をどの程度説明しうるかを検討したうえで、外構の補修費用を評価する手法を提案するとともに、その適用性の検討を行っている。

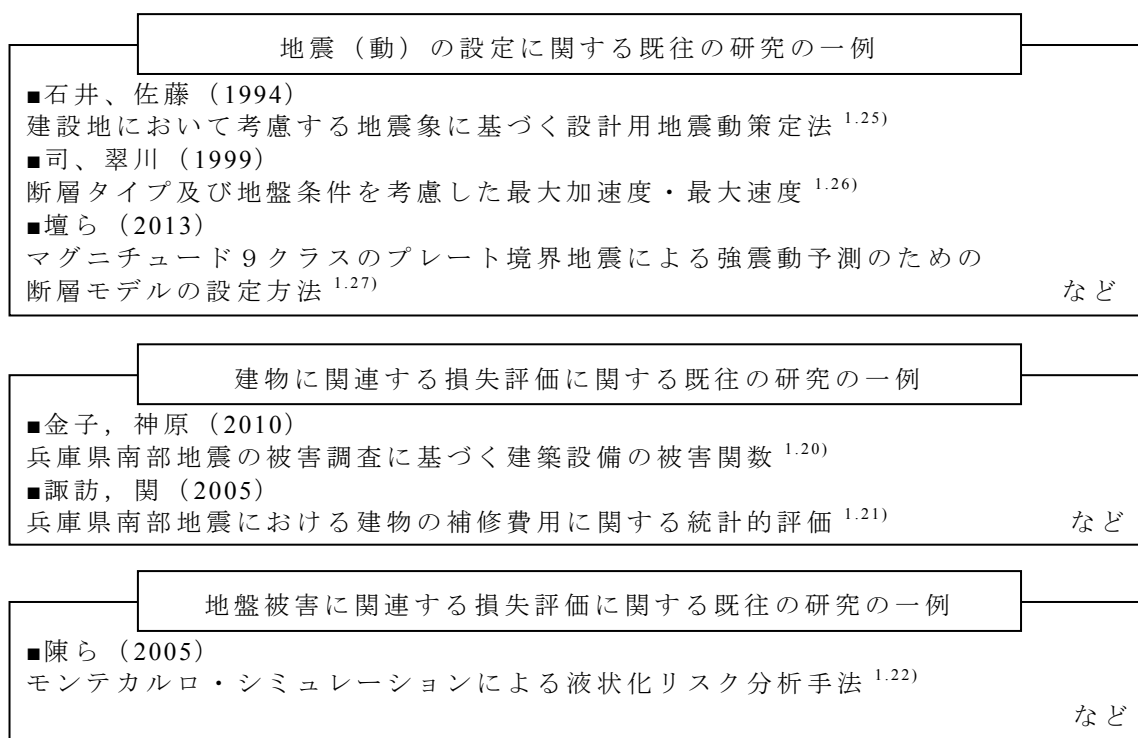


図 1.4.2 地震リスク評価に用いる既往の知見の一例

本論文は全5章で構成されており、本論文の章構成を図1.4.4に示す。

第1章「序論」では、地震損失リスク評価に関する既往の研究および既往の評価手法についてまとめると共に、本研究の概要について示している。

第2章「液状化判定法の概要」では、本論文で提案する液状化被害の損失評価法において液状化の程度の予測に用いる液状化判定について示している。本損失評価法で用いた液状化判定法としては主に建築分野で用いられる日本建築学会「基礎構造設計指針」による方法および、主に土木分野で用いられる日本道路協会「道路橋示方書」による方法であり、本章ではこの2つの方法についてまとめている。さらに、各判定法で得られる液状化による地盤の沈下量の予測値および液状化指数の関係に関する既往の研究についてもまとめるとともに、2011年の東北地方太平洋沖地震の際に生じた液状化被害と各予測法の対応を検討した既往の知見についても示している。

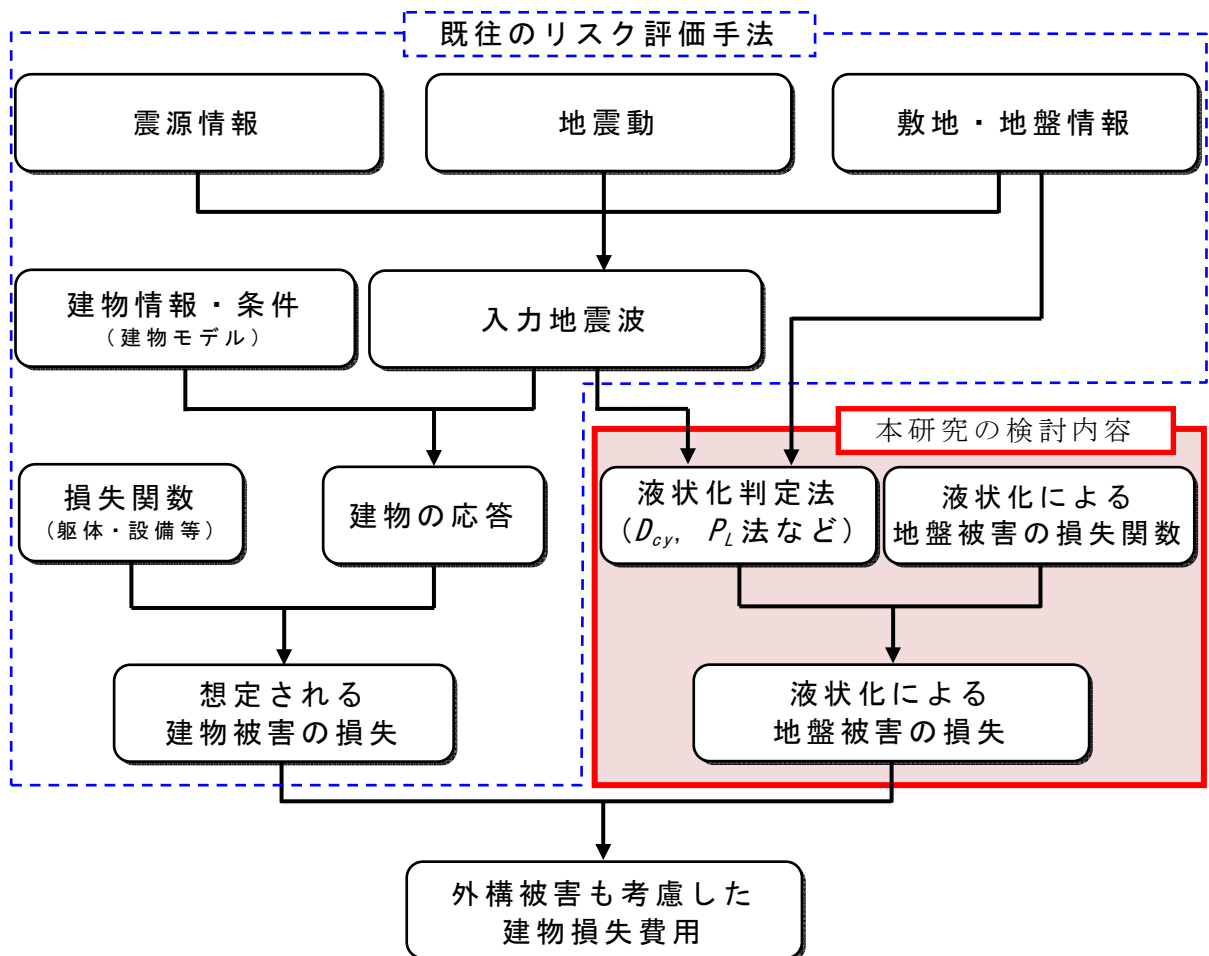


図 1.4.3 既往の地震リスク評価の概念と本研究の位置付け

第 3 章「液状化被害における損失評価法の提案」では、本論文で提案する液状化被害の損失評価法を構成する液状化程度の分類、各液状化程度の分類における損失関数の提案、液状化被害の損失の評価フローを説明している。具体的には、最初に、外構の補修費用について統計的に検討するにあたり、2011 年の東北地方太平洋沖地震による千葉県浦安市の公共施設を対象に行った被害調査の結果について、各施設の総補修費用の約 8 割が外構の補修費用であったこと、液状化程度と建物外周面積当たりにおける外構の補修費用に正の相関がみられたことを示した。つぎに、液状化被害の損失評価法で用いる液状化被害の損失関数を求めるため、日本建築学会建築基礎構造設計指針に示されている地表面動的水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  に基づいて液状化程度を 3 分類とし、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を確率変数とした確率分布モデルを評価した。なお、確率分布モデルとして用いるモデルとしては正の領域にのみ分布することから対数正規分布およびガンマ分布の適用を検討し、液状化程度の各分類における確率分布のパラメータを推定した。推定したパラメータを用いた確率分布モデルと実測沈下量に基づいた液状化程度の分類における累積相対度数分布との比較および検定 (K-S 検定) を行った。最後に、現行の液状化判定法および液状化程度の各分類における確率分布モデルを用いた液状化被害の損失評価法について示している。

第 4 章「液状化被害における損失評価法の適用性の検討」では、第 3 章で提案した液状化被害の損失評価法を用いて、千葉県浦安市入船地区および東京都江東区辰巳地区を対象とした液状化対策の費用対効果の検討および浦安市内の 3 地域を対象とした液状化による損失評価の適用事例について示す。その結果、本損失評価法を用いた液状化対策の費用対効果に関する検討および液状化被害のリスク評価としての有用性を示した。

第 5 章「結論」では、本研究の総括を行っている。

<p>第 1 章</p> <p>序論</p>
<p>第 2 章</p> <p>液状化判定法の概要</p> <p>日本建築学会「建築基礎構造設計指針」・日本道路協会「道路橋示 方書」</p> <p>液状化安全率 <math>F_L</math></p> <p>液状化危険度 <math>P_L</math></p> <p>地表面動的変位 <math>D</math></p>
<p>第 3 章</p> <p>液状化被害における 損失評価法の提案</p> <p>①液状化程度と損失の関係</p> <p>②液状化判定結果による分類に対応した損失関数の提案</p> <p>③液状化による地盤の損失評価法の提案</p>
<p>第 4 章</p> <p>液状化における損失評価法の適用性の検討</p> <p>液状化対策工による物的損失の低減に関する適用 施設群に対する液状化による損失評価法の適用性</p>
<p>第 5 章</p> <p>結論</p>

図 1.4.4 本論文の章構成

－ 第 1 章の参考文献－

- 1.1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針， pp.61-65， 2001.10
- 1.2) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編， pp.136-141， 2012.3
- 1.3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針， pp.66-67， 2001.10
- 1.4) 中山高樹： 3.11 から 1 年、浦安、液状化被害との戦い，UED レポート 2012. 夏号（第 9 号）， pp.36-43， 2012.9
- 1.5) J.Kanda, H.Shah： Engineering role in failure cost evaluation for buildings, Structural Safety, Vol.19, No.1, pp.79-90, 1997.5
- 1.6) 諏訪仁，関松太郎：兵庫県南部地震における建物の補修費用に関する統計的評価，日本建築学会構造工学論文集， Vol.51B, pp.143-148, 2005.3
- 1.7) 諏訪仁，神田順：兵庫県南部地震の被害データを用いた建築設備の被害率曲線，日本建築学会構造系論文集， Vol.73, pp.1935-1941, 2008.11
- 1.8) 金子美香，神原浩：兵庫県南部地震の被害調査に基づく建築設備の被害関数，日本建築学会学術講演梗概集， D-2, pp.1333-1334, 2010.7
- 1.9) Applied Technology Council (ATC)： Earthquake damage evaluation data for California (ATC-13), 1985.
- 1.10) Federal Emergency Management Agency (FEMA)： HAZUS Technical Manual MR-4, 2009.8
- 1.11) 日本建築学会：地震リスク評価とリスクコミュニケーション， p.133, 2011.3
- 1.12) 公益社団法人ロングライフビル推進協会・社団法人日本ビルディング協会連合会：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に関するガイドライン， 2011.11
- 1.13) 清水友香子，石田寛：地震増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法，日本建築学会構造系論文集， Vol.73, No.626, pp.511-518, 2008.4
- 1.14) 松岡昌志，翠川三郎，若松加寿江：国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測，日本建築学会構造系論文報告集， No.452, pp.39-45, 1993.10
- 1.15) 松岡昌志，若松加寿江，橋本光史：地形・地盤分類 250m メッシュマップ

に基づく液状化危険度の推定方法，日本地震工学会論文集，第 11 卷，第 2 号，pp.20-39，2011.5

- 1.16) 地盤工学会関東支部：事業継続を可能とするための既存構造物周囲の地盤改良（補強）工法に関する研究委員会 活動報告書，2009.3
- 1.17) 村地由子，坪田正紀，高橋雄司，浅野美次，安野郷，泉田伸二，谷垣正治，竹内貞光：建築物の予想最大損失(PML)分析のプログラムの開発，日本建築学会技術報告集，No.22，pp.487-490，2005.12
- 1.18) 坪田正紀，村地由子，高橋雄司，浅野美次，安野郷，藤井中，泉田伸二，中川太郎，山岸邦彰，竹内貞光，穴原一範，平松剛，小田聡：限界耐力計算法を活用した簡易地震 LCC 分析プログラムの開発，日本建築学会技術報告集，No.24，pp.67-72，2006.12
- 1.19) 林康裕，宮腰淳一，田才晃，大野義照：1995 年兵庫県南部地震における RC 造建物群の耐震性能，日本建築学会構造論文集，No.528，pp.135-142，2000.2
- 1.20) 大井昌弘，水谷守，諏訪仁，野畑有秀，山田守，藤原広行：構造物の地震損傷度評価手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，No.273，2003.2
- 1.21) 宮腰淳一，神原浩，石井大吾，田村和夫，山口亮，名取晶子，吉村昌宏：建物耐力と変形性能のばらつきを考慮した被害関数の作成手法，構造工学論文集，Vol.51B，pp.105-110，2005.3
- 1.22) 神原浩，林康裕，田村和夫：アンケート調査に基づく建物の非構造部材被害と地震動強さとの関係，日本建築学会構造系論文集，No.578，pp.155-161，2004.4
- 1.23) 陳光齊，善功企，諫山亜依，笠間清伸：モンテカルロ・シミュレーションによる液状化リスク分析手法，土木学会論文集，No.792/III-71，pp.61-73，2005.6
- 1.24) 小檜山雅之，水越薫，石田寛，永田茂，金子弘幸，松本優，矢代晴実，大金義明：GIS を活用した地震損害評価システムの構築，日本建築学会技術報告集，No.7，pp.187-191，1999.2
- 1.25) 山本明夫，小丸安史，吉村昌宏，山口亮：微地形区分データを用いた広域

の液状化危険度と液状化による建物被害率の予測に関する研究，地域安全学会論文集，No.11，pp.275-285，2009.11

- 1.26) 石井透，佐藤俊明：建設地において考慮する地震象に基づく設計用地震動策定法，日本建築学会構造系論文集，No.462，pp.31-42，1994.8
- 1.27) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.63-70，1999.9
- 1.28) 壇一男，石井やよい，宮腰淳一，高橋広人，護雅史，福和伸夫：マグニチュード9クラスのプレート境界地震による強震動予測のための断層モデルの設定方法，日本建築学会構造系論文集，No.692，2013.10

## 第 2 章 液状化判定法の概要

### 2.1 本論文で用いた液状化の程度に関する指標

現行の液状化判定法として、主に建築の分野で用いられている日本建築学会「建築基礎構造設計指針」による方法<sup>2.1)</sup>と土木の分野で用いられている日本道路協会「道路橋示方書」による方法<sup>2.2)</sup>がある。前者の液状化判定法は室内試験と地震応答解析結果を基に時松・吉見<sup>2.3)</sup>によって提案されたもので、任意の深さにある層の液状化安全率  $F_L$  を求める方法が示されている。さらに、液状化による地盤の変形量である地表面動的水平変位  $D_{cy}$  を求める方法も示されている。後者の道路橋示方書による方法は、液状化安全率  $F_L$  を求めることである層の液状化の安全率を求めるとともに、 $F_L$  に基づいた液状化による構造物への被害程度を予測するための手法として液状化指数  $P_L$  をもとめる方法が示されている。本論文では地盤の液状化程度の指標として  $D_{cy}$  および  $P_L$  を用いるために、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」による方法に準じて液状化判定を行い、浦安市内における公共施設の液状化程度を推定している。以下に液状化判定法の概要について示す。

#### a) 液状化安全率 $F_L$

##### a-1) 液状化判定を行う条件

液状化判定を行うにあたり、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」では液状化判定を行う地盤条件が設定されている。当指針で示されている液状化判定を行う地盤条件を表 2.1.1 に示す。

表 2.1.1 液状化判定を行う地盤条件

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>・ 地表面から 20m 程度以浅の沖積層</li><li>・ 細粒分含有率 <math>F_C</math> が 35%以下の土</li><li>・ 粘土分含有率が 10%以下、または塑性指数 <math>IP</math> が 15%以下の埋土あるいは盛土地盤</li><li>・ 細粒土を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫</li></ul> |
|--|

##### a-2) 繰返しせん断応力比 $L$

図 2.1.1 に示すように対象地盤を単位面積当たりの土柱に置換した剛体モデルを想定する。土柱が地表面加速度  $\alpha_{max}$  と同じ加速度で水平方向に剛体運動して



いる場合、土柱の底面に働く最大せん断力  $\tau_{max}$  は次式より与えられる。

$$\begin{aligned}\tau_d &= m \alpha_{max} \\ &= \frac{\gamma z}{g} \alpha_{max}\end{aligned}\quad (2.1.1)$$

ここに、 $m$  は土柱の質量、 $\alpha_{max}$  は地表面最大加速度 ( $m/s^2$ )、 $g$  は重力加速度 ( $9.8m/s^2$ )、 $\gamma$  は土の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )、 $z$  は地表面からの深度 ( $m$ ) である。

実地盤において土柱は必ずしも剛体とはみなせないため、深度  $z$  が深くなるにつれてこの値は減少する。そこで、深度方向に補正係数  $r_d$  を導入すると次式が与えられる。

$$\begin{aligned}\tau_d &= r_d \frac{\gamma z}{g} \alpha_{max} \\ &= r_d \frac{\alpha_{max}}{g} \sigma_z\end{aligned}\quad (2.1.2)$$

ここに、 $\sigma_z$  は上載圧 ( $kN/m^2$ )、地盤が剛性でないことによる低減係数  $r_d$  は次式から与えられる。

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (2.1.3)$$

また、地震動の等価な繰り返し回数に関する補正係数として  $r_n$  が次式から与えられる。

$$r_n = 0.1(M - 1) \quad (2.1.4)$$

ここに、 $M$  はマグニチュードである。

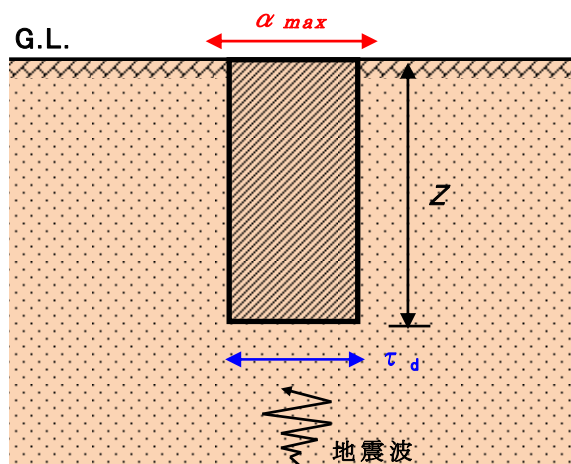


図 2.1.1 剛体モデル

よって、液状化判定に用いる外力として繰返しせん断応力比  $L$  は次式で与えられる。

$$L = r_n \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma'_z} r_d \quad (2.1.5)$$

ここに、 $\sigma'_z$  は有効上載圧(kN/m<sup>2</sup>)である。

### a-3) 液状化抵抗比 $R$

対応する深度の補正  $N$  値  $N_a$  を次式から求める。

$$N_1 = C_N \cdot N \quad (2.1.6)$$

$$C_N = \sqrt{98/\sigma'_z} \quad (2.1.7)$$

$$N_a = N_1 + \Delta N_f \quad (2.1.8)$$

ここに、 $N_1$  は換算  $N$  値、 $C_N$  は拘束圧に関する補正係数、 $\Delta N_f$  は細粒含有率に応じた補正  $N$  値増分で建築基礎構造設計指針では図 2.1.2 が示されている。 $N$  値は標準貫入試験(SPT 試験)等で得られる実測  $N$  値である。

(2.1.8)式で求められる補正  $N$  値  $N_a$  を用いて、図 2.1.3 のせん断ひずみ振幅 5% 曲線から補正  $N$  値  $N_a$  に対応する飽和土層の液状化抵抗比  $R$  を求める。

以上より求めた繰返しせん断応力比  $L$  と液状化抵抗比  $R$  から各深さにおける液状化安全率  $F_L$  が次式により与えられる。

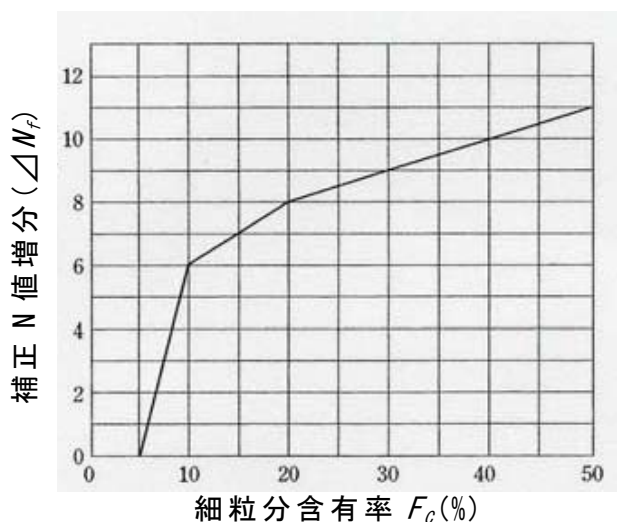


図 2.1.2 細粒分含有率  $F_c$  と  $N$  値の補正係数<sup>2.4)</sup>

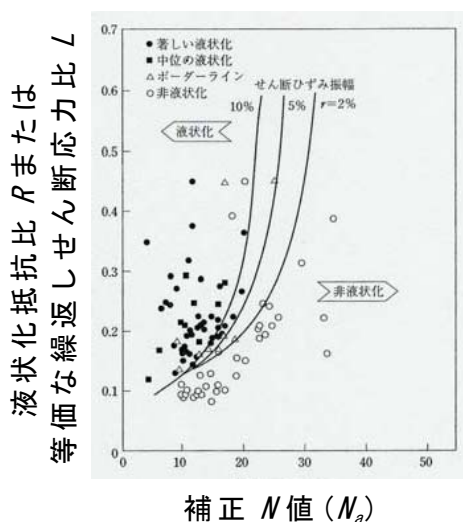


図 2.1.3 補正  $N$  値と液状化抵抗比および動的せん断ひずみの関係<sup>2.4)</sup>

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (2.1.9)$$

(2.1.9)式において、各層に対して  $F_L < 1$  であれば、その土層は液状化する可能性があるかと判定される。逆に、 $F_L > 1$  であればその土層は液状化しないと判定される。また、 $F_L$  の値が小さくなるほど液状化の発生危険度が高く、 $F_L$  の値が 1 を切る土層が厚くなるほど、危険度が高くなると判断される。

#### b) 液状化指数 $P_L$

液状化指数  $P_L$  は液状化による構造物への被害程度を予測する手法として提案されたもので、道路橋示方書では、側方流動力の補正係数として用いられている。 $P_L$  は  $F_L < 1$  の土層における  $F_L$  と対応する深度に対する重み係数を乗じた次式から与えられる。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5z) dz \quad (2.2.1)$$

ここに、 $z$  は地表面からの検討深さ(m)である。

(2.2.1)式から得られた  $P_L$  を用いて、岩崎ら<sup>2.5)</sup>により示された表 2.1.2 の  $P_L$  と液状化の危険度の関係から対象地盤における液状化の危険度を求めることができる。

表 2.1.2 液状化指数  $P_L$  と液状化の危険度の関係<sup>2.5)</sup>

液状化指数 $P_L$	液状化の危険度
$P_L = 0$	かなり低い
$0 < P_L \leq 5$	低い
$5 < P_L \leq 15$	高い
$15 < P_L$	極めて高い

#### c) 地表面動的変位 $D_{cy}$

日本建築学会「築基礎構造設計指針」<sup>2.1)</sup>では、液状化の程度およびその被害程度は土の密度により大きくことなり、緩い砂では強度や剛性が小さいまま変形が進行することにより甚大な被害につながり、密な砂では変形がある程度生じる

と強度が回復するため被害も比較的軽微となること、さらに液状化の程度は液状化層厚の厚さによって異なると考え、液状化の程度の違いを評価する指標として、液状化層のせん断変形により生じる地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  を用いている。 $D_{cy}$  は、繰返しせん断応力比  $L$  と補正  $N$  値  $N_a$  の関係から、図 2.1.4 に示すように各層の繰返しせん断ひずみ  $\gamma_{cyi}$  を推定し、 $\gamma_{cy}$  が同一方向に発生すると仮定し、これを各層の層厚に乗じたものを鉛直方向に積分して算出される(図 2.1.5)。また、 $D_{cy}$  は液状化による地盤の沈下量  $S$  に相当するとされている。液状化の程度は  $D_{cy}$  の値により、表 2.1.3 のように評価する。

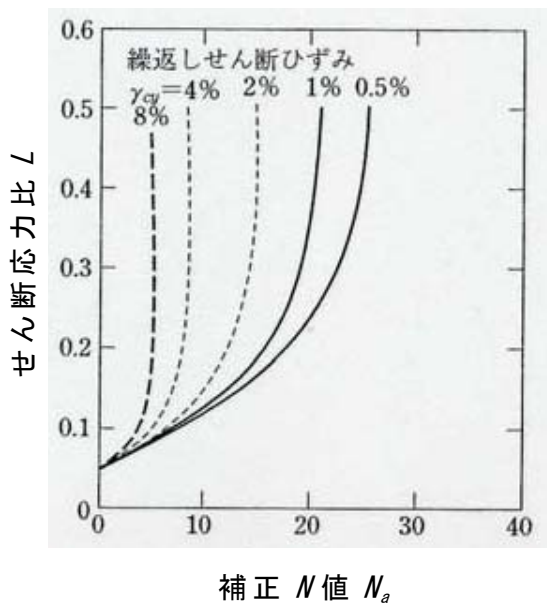


図 2.1.4 補正  $N$  値  $N_a$  および繰返しせん断ひずみの関係<sup>2.6)</sup>

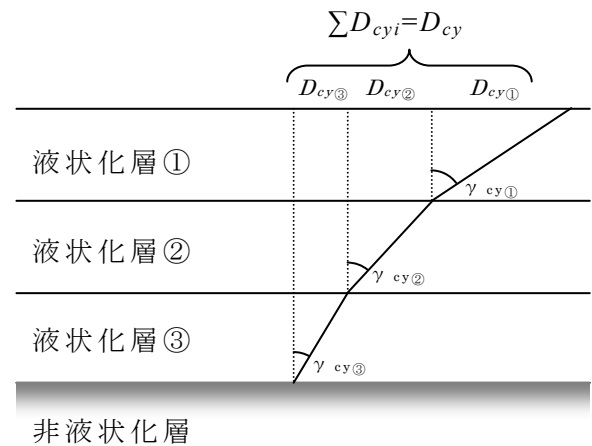


図 2.1.5 地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  の概念図

表 2.1.3 地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  と液状化程度の関係<sup>2.1)</sup>

地表面動的な水平変位 $D_{cy}$	液状化の程度
$D_{cy} = 0$	無し
$0 < D_{cy} \leq 5$	軽微
$5 < D_{cy} \leq 10$	小
$10 < D_{cy} \leq 20$	中
$20 < D_{cy} \leq 40$	大
$40 < D_{cy}$	甚大

## 2.2 地表面動的水平変位 $D_{cy}$ と液状化指数 $P_L$ の関係

前節において液状化程度の指標として地表面動的水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  の概略を示した。両指標の関係については既往の論文により示されており、本節では該当する論文の概要を示す。

### a) 液状化の程度を表す判定指標に関する考察<sup>2.7)</sup>

本報では、液状化対策として適用した締固め改良地盤を液状化判定する上で、若干の液状化を許容する事が合理的であると考えられている。一方、液状化の程度を表す判定指標に応じた適切な限界値の評価が重要であるという観点から日本建築学会「建築基礎設計指針」で採用されている地表面動的水平変位  $D_{cy}$  と土木分野で用いられている液状化指数  $P_L$  の相互関係を示し、既往の地震被害の調査結果に基づき考察を行い、判定指標に応じた限界値の目安を提案している。 $D_{cy}$  と  $P_L$  の関係については、損傷限界状態と終局限界状態で傾向が異なり、終局限界状態では  $D_{cy}=5\sim 10\text{cm}$  に対して  $P_L$  は概ね  $10\sim 15$  が対応するとしていた。

### b) 液状化可能性評価における $D_{cy}$ と $P_L$ の比較<sup>2.8)</sup>

2007年版建築物の構造関係技術基準解説書では、地表面動的水平変位  $D_{cy}$  と液状化指数  $P_L$  を併記して扱っていることから、本論文ではモデル地盤を対象として  $D_{cy}$  と  $P_L$  を算出して両者の値を比較するとともに、構造基準での取り扱いの留意点や既往の知見と比較を行っている。その結果、 $D_{cy}$  は  $P_L$  より全体的に大きめの評価を与えることが分かっている。また、 $N$  値や地表面最大加速度によって  $D_{cy}$  と  $P_L$  の評価には差があり、大小関係は一義的でないこと示している。

## 2.3 2011年東北地方太平洋沖地震に対する適用性

### a) 日本建築学会「建築基礎構造設計指針」<sup>2.1)</sup>における液状化判定法

現行の液状化判定では液状化安全率  $F_L$  を求める際に各層に入力される外力として繰返しせん断応力比  $L$  を算出する(2.1節 2.1.5式参照)。繰返しせん断応力比  $L$  の算出においては地震のマグニチュード  $M$  に基づいた等価な繰返し回数  $N$  に関する補正係数  $r_n$  が用いられる。日本建築学会「建築基礎構造設計指針」における  $r_n$  は  $M=5.5\sim 8.5$  における傾向が示されている。一方、新井<sup>2.9)</sup>は2011年東北地方太平洋沖地震を含む3地震の強震記録を対象に1次元有効応力解析を行い、地震動の繰返し回数  $N_{eq}$  とマグニチュード  $M$  の関係を検討した結果、既往の提案式を  $M=9.0$  の場合でも外挿して液状化判定を行ってよい可能性を示唆している。

### b) 日本道路協会「道路橋示方書」<sup>2.2)</sup>における液状化判定法

道路橋仕方書で示されている液状化判定法で得られる液状化指数  $P_L$  については、2011年東北地方太平洋沖地震による研究成果を反映させた2012年版の道路橋示方書において、改善の余地があるものの、現行の液状化判定法においてもマグニチュード  $M$  が大きい地震に対して適用できるとされている。

## 2.4 本章のまとめ

本章では、既往の液状化判定法についてまとめるとともに、既往の液状化判定法の 2011 年東北地方太平洋沖地震に対する適用性についての既往の知見をまとめた。

－ 第 2 章の参考文献－

- 2.1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.61-68，2001.10
- 2.2) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編，pp.136-141，2012.3
- 2.3) Kohji Tokimatsu, Yoshiaki Yoshimi：Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56～74, 1983.12
- 2.4) 時松孝次：耐震設計と N 値（建築），基礎工，Vol.25, No.12, pp.61-66, 1997.12
- 2.5) 岩崎敏雄，龍岡文夫，常田賢一，安田進：地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.4
- 2.6) 時松孝次，鈴木康嗣：液状化の判定方法と実際の減少，基礎工，Vol.24, No.11, pp.36-41, 1996.11
- 2.7) 吉富宏紀，安達俊夫，真島正人，伊勢本昇昭，船原英樹：液状化の程度を表す判定指標に関する考察，日本建築学会大会学術梗概集（近畿），2005.9
- 2.8) 内田明彦，田地陽一，田部井哲夫，山田雅一，畑中宗憲：液状化可能性評価における Dcy と PL の比較，日本建築学会大会学術梗概集（北陸），2010.9
- 2.9) 新井洋：2011 年東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の液状化に関する等価繰返し回数，第 47 回地盤工学研究発表会梗概集，pp.1559-1560, 2012.7



### 第3章 液状化被害における損失評価法の提案

#### 3.1 液状化被害の概要

##### 3.1.1 2011年東北地方太平洋沖地震による液状化被害の概要

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の本震および約30分後に発生した余震により、東京湾東部沿岸および利根川沿岸の首都圏で広範囲にわたり液状化被害をもたらし、大量の噴砂、建物の沈下、外構の被害およびライフラインの寸断など甚大な被害が生じた。本地震により生じた千葉県浦安市内の液状化による地盤被害については、日本建築学会による災害報告書<sup>3.1)</sup>や浦安市液状化対策技術検討調査委員会による液状化に関する報告書<sup>3.2)</sup>などのように種々の学会や機関などによりまとめられている。以下に、本地震による液状化被害の特徴を示す。

- ①関東南部では、埋立地を含む人口造成地盤において、大規模な液状化が生じた。特に千葉県・東京都・神奈川県・埼玉県では、液状化の被害は埋立地に多くみられ、自然堆積地盤では液状化がみられなかった。
- ②液状化により大量の噴砂が発生した。特に浦安市では市域の約3/4で液状化が発生し、処分された噴砂の量は80,000m<sup>3</sup>にのぼった。また、千葉県美浜区でも全域で液状化が発生し、噴砂の量が10,000m<sup>3</sup>にのぼった。
- ③大規模な液状化が発生した地域であっても、液状化の程度にはバラつきがみられた。

### 3.1.2 千葉県浦安市内における公共施設の被害状況

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震で生じた液状化により、甚大な被害を受けた千葉県浦安市の公共施設を対象に調査を行った。また、本地震による浦安市内の震度は浦安猫実で震度5強が観測されている<sup>3.1)</sup>。



図 3.1.1 調査地点と地形<sup>3.3)</sup>

図 3.1.1 に、土地条件図で示されている千葉県浦安市の地形の性質を示す。調査を行った浦安市の公共施設は、高い盛土地、盛土地・埋立地、自然堤防に位置している。東北地方太平洋沖地震後、建築学会をはじめとする関連学会により、盛土地・埋立地などの人工造成地盤で液状化現象などの地盤被害が報告されている。

#### ①調査項目

本研究を行うあたり、千葉県浦安市における液状化被害の状況を調査するために、浦安市液状化対策技術検討調査委員会から公開されている報告書<sup>3.4),3.5)</sup>および千葉県環境研究センターから公開されている調査結果<sup>3.6)</sup>を基に資料調査を行った。次いで、資料調査結果から得られた情報を基に、浦安市に各公共施設の損傷度および補修費用についてヒアリング調査を行った。

## ②資料調査

資料調査では、浦安市の各公共施設について、2011年東北地方太平洋沖地震により各公共施設の敷地内に生じた液状化による沈下量などとともに建物情報として基礎形式などを得ている。

## ③ヒアリング調査

ヒアリング調査では、資料調査結果の情報を基に、各公共施設における建物の損傷度および補修費用について調査を行った。補修費用の内訳として施設の「躯体」、二次部材などの「仕上げ」、空調機器などの「設備」、敷地内のグラウンドの噴砂あるいは舗装など「外構」に生じた補修費用の計4項目について回答を得ている。調査期間は地震後約10カ月から1年の2012年1月から3月である。また、各施設の復旧は原状復旧を基本としており、地震前の状態に戻すことが前提になっている。

## ④建築面積および敷地面積の算定

各公共施設の位置情報を基に、Mapion<sup>3.7)</sup>より各施設の建築面積および敷地面積を算出している。図3.1.2に調査対象とした各施設の建築面積と敷地面積の割合を示す。

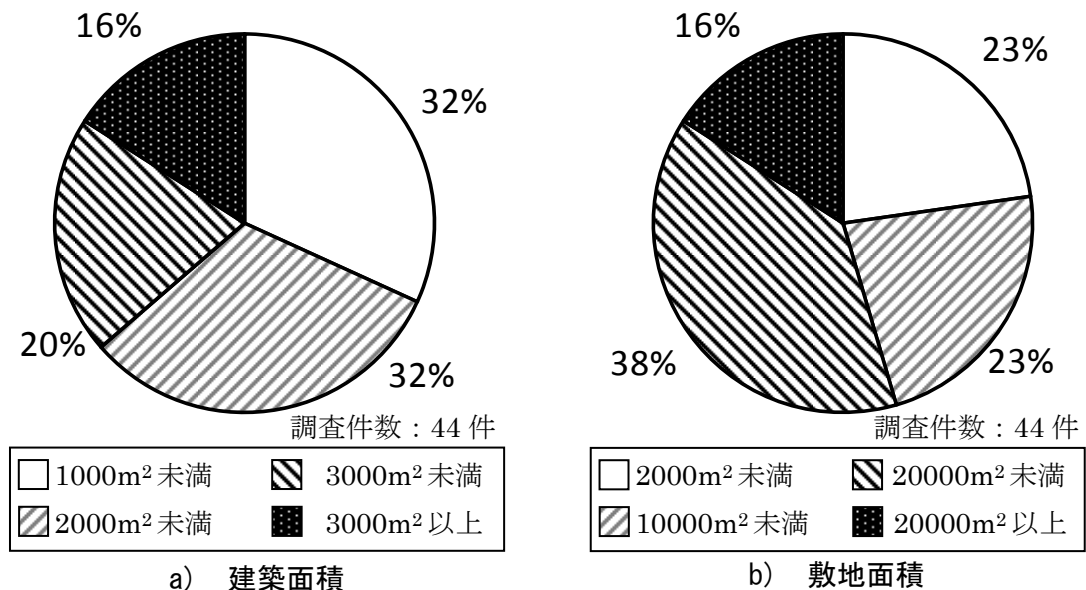


図 3.1.2 調査した各公共施設の建築面積および敷地面積の割合

## ⑤調査結果

資料調査およびヒアリング調査から得られた調査結果を表 3.1.1 に示す。同表中で外構の種類と被害状況についてはヒアリング調査からは大半が犬走り、アプローチ、側構等の被害事象のみの回答であり、一部を除き具体的な沈下量、浮上り量等の定量的な数値は得られなかった。そのため表中には被害事象のみを記載している。また、同表中の地表面動的水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  については、前述の 2 章で示した方法により算出された液状化程度の推定値である。

図 3.1.3 に資料調査およびヒアリング調査における調査結果として得られた千葉県浦安市内の公共施設について、その用途種別の割合を示す。調査総件数は 44 件であり、施設の用途としては幼稚園、小学校、中学校などの教育施設が約 9 割を占めていた。

図 3.1.4 に文献 3.4)~3.6) から得られた各施設の液状化による実測沈下量から分類した液状化の程度の割合を示す。なお、同図中における液状化程度の分類は日本建築学会「建築基礎構造設計指針」<sup>3.8)</sup> に液状化による地盤の沈下量に相当するとされている地表面動的水平変位  $D_{cy}$  による液状化の程度を考慮して分類している。同図より、調査した施設の約 7 割において『軽微』以上の液状化の程度であったことが分かる。特に、液状化の程度が『大』以上の施設は 3 割以上みられた。

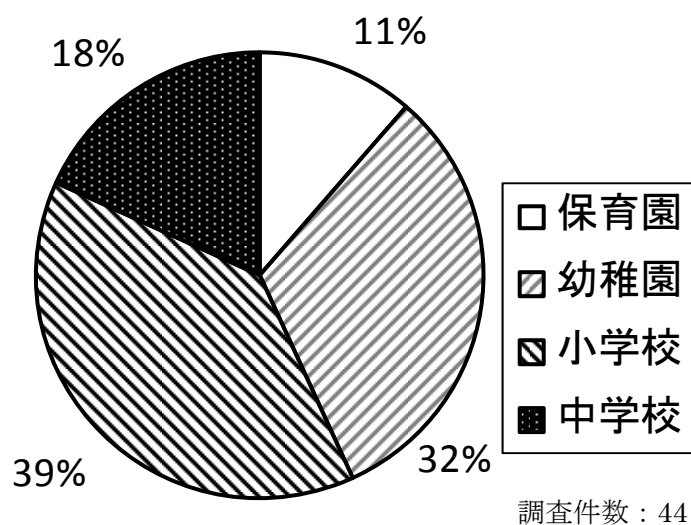


図 3.1.3 ヒアリング調査を行った施設の用途種別の割合

表 3.1.1 資料調査およびヒアリング調査における調査結果

調査番号	敷地面積 (m <sup>2</sup> )	建築面積 (m <sup>2</sup> )	建築物の被害状況	建築物の被災度	外構の種類と被害状況		敷地面積 当たりにおける 外構の補修費用 (円/m <sup>2</sup> )	建物外周面積 当たりにおける 外構の補修費用 (円/m <sup>2</sup> )	基礎形式	実測沈下量 (mm)	地表面動的 水平変位 D <sub>vy</sub> (mm)	液状化 指数 Pl値
					アプローチ・犬走り・舗装等の 被害、沈下	マス類の被害						
1	1926	677	無し	無被害	無し	無し	0	0	摩擦杭	0	9	3.3
2	1572	436	無し	無被害	無し	無し	0	0	摩擦杭	0	10	0.68
3	1686	588	無し	無被害	無し	無し	12	19	摩擦杭	0	43	4.52
4	1893	1038	無し	一部損壊	舗装沈下	舗装沈下	203	450	摩擦杭	0	21	4.34
5	2164	984	無し	一部損壊	玄関前床クランク、屋外階段部分損壊	雨水枡一箇所損壊	0	0	支持杭	0	-	-
6	2036	924	外壁仕上破損等	一部損壊	無し	雨水枡一箇所損壊	5109	9351	摩擦杭	300	-	-
7	1588	655	無し	無被害	無し	昇降口舗装沈下	0	0	摩擦杭	0	17	2.25
8	2136	902	外壁仕上破損等	一部損壊	犬走り下地盤沈下	犬走り下地盤沈下	1177	2038	摩擦杭	80	-	-
9	2023	815	無し	一部損壊	建物周囲隙間、雑音溜り台クランク、舗装沈下	舗装沈下	7031	11773	摩擦杭	280	-	-
10	1360	600	無し	一部損壊	犬走り傾き、玄関すりつき損壊、段差、舗装沈下等	無し	18387	32903	摩擦杭	300	-	-
11	1576	644	無し	一部損壊	犬走りの沈下、舗装損壊、沈下	無し	1336	2258	摩擦杭	100	-	-
12	1783	1018	外壁仕上破損等	一部損壊	コンクリート舗装段差	無し	484	1130	摩擦杭	20	-	-
13	3232	1127	外壁仕上破損等	一部損壊	舗装、渡り廊下等破損、玄関床タイル等損壊	雨水枡浮上	10991	16880	摩擦杭	300	225	26.93
14	4903	736	外部建具不具合等 EXP不具合等	一部損壊	犬走り、屋外階段等損壊	汚水雨水管破損	3645	4289	摩擦杭	250	-	-
15	8624	1727	無し	一部損壊	アプローチ損壊、土間沈下	無し	6	8	支持杭	0	46	6.9
16	16181	1641	無し	無被害	無し	無し	0	0	支持杭	0	-	-
17	12282	2134	無し	一部損壊	アプローチ破損	アプローチ破損	315	381	支持杭	0	32	3.81
18	17406	1806	外壁仕上破損等	一部損壊	周辺犬走り、出口階段等損壊、沈下、アプローチ破損	量水器隆起等	18001	20084	支持杭	450	-	-
19	18087	4907	無し	一部損壊	周辺舗装損壊、沈下	無し	8781	12047	支持杭	250	124	16.52
20	17074	2133	外壁仕上破損等	一部損壊	建物周囲沈下、周辺舗装損壊、沈下	無し	14002	16002	支持杭	280	97	9
21	15677	1945	無し	一部損壊	建物周囲沈下、側溝損壊、舗装沈下	無し	14183	16191	支持杭	180	-	-
22	18228	2468	無し	一部損壊	アプローチ破損	無し	3	3	支持杭	0	49	3.77
23	15893	1769	無し	一部損壊	アプローチ破損、周辺犬走り段差、舗装沈下等	無し	19559	22008	支持杭	350	197.5	30.76
24	16168	1647	無し	一部損壊	無し	無し	5008	5507	支持杭	70	107	11.9
25	17158	2839	仮設校舎・EV棟傾斜	一部損壊	アプローチ破損、外部階段	無し	8946	10720	支持杭	300	225	26.9
26	15385	2448	EXP不具合等	一部損壊	スロープ破損、外部階段、犬走り、舗装等損壊、沈下	無し	9772	11620	支持杭	300	145	14.1
27	17497	5647	外壁仕上破損等	一部損壊	校舎周りに沈下、周辺犬走り段差、舗装沈下等	無し	7086	10462	支持杭	350	54	6.6
28	16149	2480	無し	一部損壊	周辺犬走り沈下	無し	200	236	支持杭	50	-	-
29	16489	3348	外壁仕上破損等	一部損壊	周辺犬走りクランク舗装隆起等	無し	427	535	支持杭	30	135	15.41
30	16508	3570	外壁仕上破損等	一部損壊	周辺犬走り段差、舗装沈下等	無し	5192	6625	支持杭	350	205	26.66
31	20909	3692	無し	一部損壊	周辺舗装等沈下、出階段損壊	無し	6002	7289	支持杭	100	88	11.99
32	17480	3024	無し	一部損壊	周辺犬走り隙間	無し	3127	3781	支持杭	50	248	15.68
33	17491	3125	無し	一部損壊	昇降口ボーチ等沈下	無し	104	127	支持杭	0	27	2.9
34	22848	2490	外壁仕上破損等	一部損壊	渡り廊下土間破損等、校舎周りに周辺犬走りに大幅な段差	無し	15728	17652	支持杭	450	280	15.54
35	21384	1923	無し	一部損壊	昇降口階段スロープ等沈下、校舎周りに周辺犬走り沈下	無し	17434	19157	支持杭	350	202.7	27.35
36	25173	1364	無し	一部損壊	舗装、側溝損壊、沈下等	無し	1845	1951	支持杭	20	185	21.75
37	22440	2057	無し	一部損壊	舗装、側溝損壊、沈下等	無し	7447	8199	支持杭	50	159	20.57
38	25296	1812	EV棟傾き	一部損壊	野外土間破損、舗装、沈下等	無し	8495	9151	支持杭	200	182	21.55
39	23100	2751	無し	一部損壊	犬走り、道路損壊、舗装、沈下等	無し	281	318	支持杭	30	97	9.08
40	1593	739	EXP不具合等	一部損壊	沈下有、敷地全面液状化、アプローチ破損	マス類浮上等	82	153	摩擦杭	0	148	19.66
41	1494	777	無し	一部損壊	アプローチ破損、沈下0.1m	無し	44	92	摩擦杭	0	74	6.29
42	2086	1053	基礎下土砂流出	一部損壊	沈下有、敷地一部液状化、アプローチ破損	マス類浮上等	78	158	摩擦杭	150	86.2	13.46
43	2322	1077	EXP不具合等	一部損壊	アプローチ破損、沈下0.2m	マス類浮上等	59	110	摩擦杭	150	47	4.1
44	2113	686	外壁仕上破損等	一部損壊	アプローチ破損、噴砂、補浮上(+300)等	マス類浮上等	65	96	直接基礎	90	-	-

※各施設の敷地面積および建物面積については Ma/ton を用いた推定値である。

図 3.1.5 に調査対象の建物の被災度の割合を示す。また、図 3.1.6 には総補修費用の割合を示す。なお、本地震により損傷した箇所の補修については、原状復旧を基本として補修工事がなされている。両図より、調査した施設の多くが一部損壊程度であったにも関わらず、補修費用としては 10 万円程度から 1 億円以上と幅広くみられた。さらに、施設の補修に 1000 万円以上の費用を要した施設が約 6 割近くあった。

図 3.1.7 には外構被害が生じた施設の割合を実測沈下量  $S$  に基づいた液状化程度の分類ごと

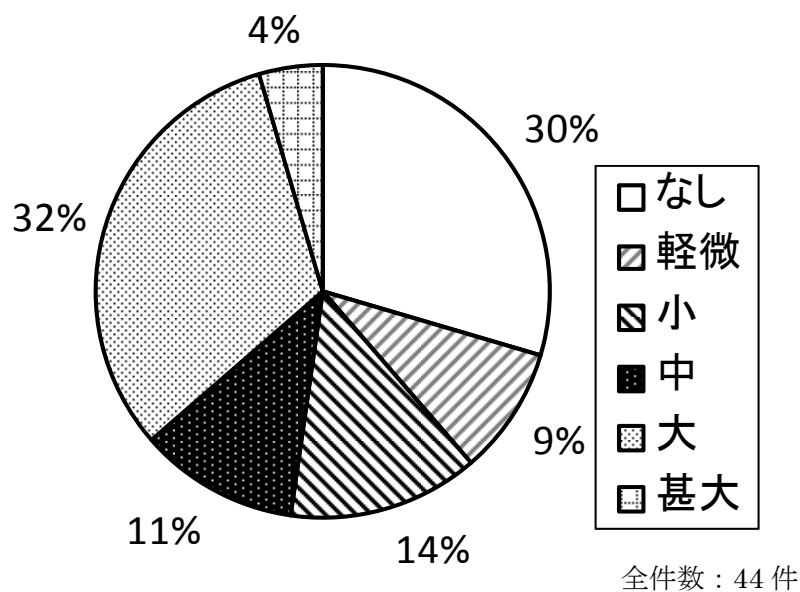


図 3.1.4 ヒアリング調査を行った施設の液状化程度の割合

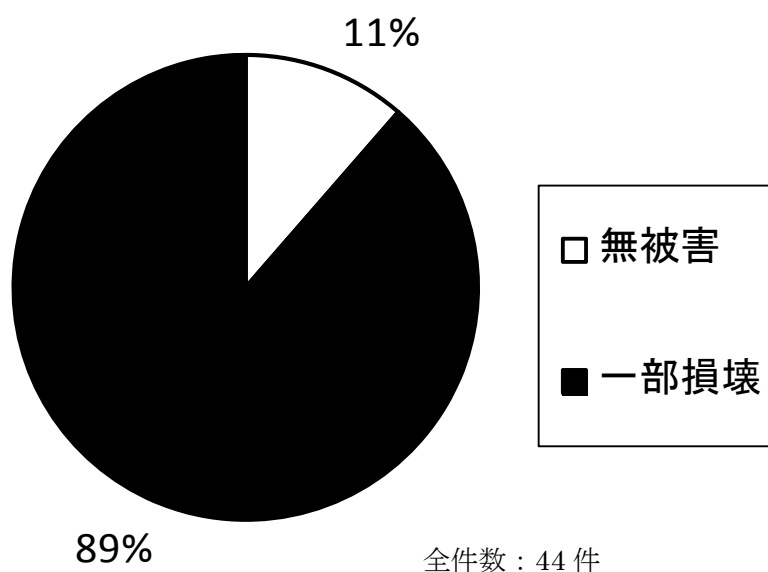


図 3.1.5 建物の被災度の割合

に示している。同図の液状化程度の分類を表 3.1.2 に示す。同表の液状化程度の閾値については、 $D_{cy}$  の分類を参考に設定している。同図より、各分類においてアプローチ・犬走り・舗装等の被害が約 7 割程度を占めていることが分かる。また、外構の補修内容、補修個所と補修費用の関係を明確にするため、外構の補修費用の内訳に関して調査したところ、外構の補修費用のうちダスト舗装<sup>\*</sup>を含めた舗装の補修費用が約半分を占めていた。また、階段・スロープ・犬走りの補修、植栽・砂場・遊具の補修、側構の補修に要した各費用は外構の補修費用の約 1 割程度であった。

ダスト舗装<sup>\*</sup>…公道などで用いられているアスファルト舗装とは異なり、碎石や石灰などを敷き均し、転圧を行う舗装のこと。一般的な小学校や中学校の校庭の舗装。

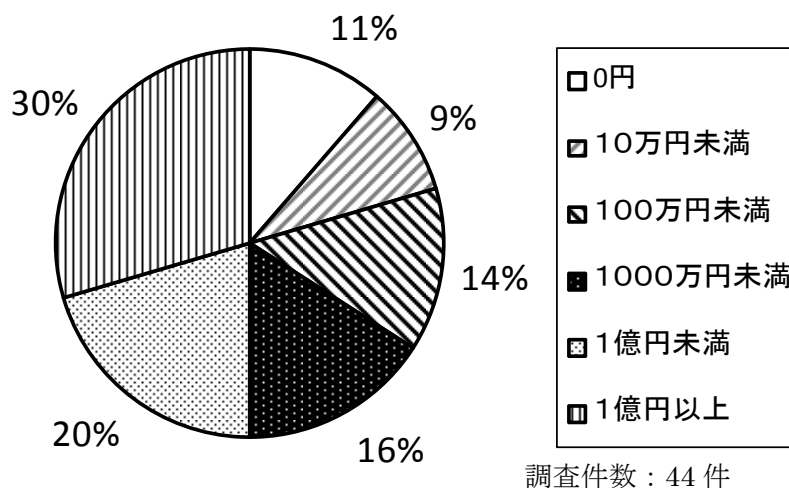


図 3.1.6 総補修費用の割合

表 3.1.2 本論文における液状化程度の分類と実測沈下量 S の関係

本論文における液状化程度の分類	分類1	分類2	分類3
実測沈下量(cm)	0～5	5～20	20～

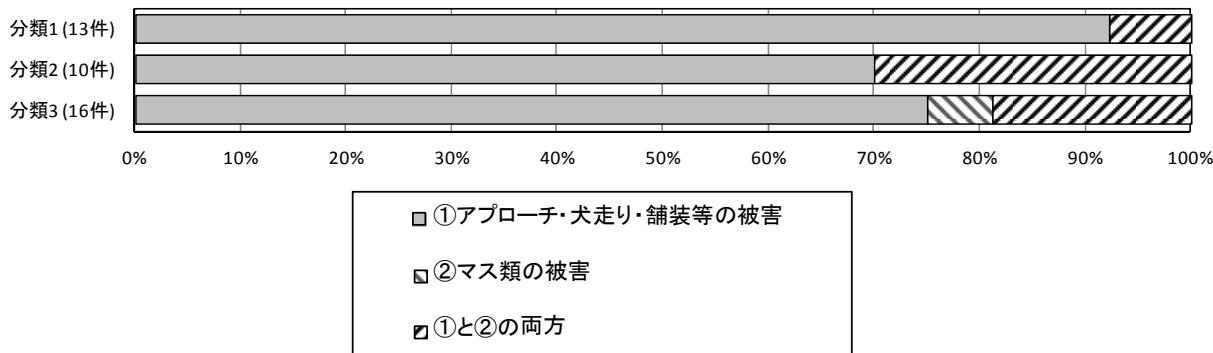


図 3.1.7 液状化程度の分類における外構被害が生じた施設の割合

### 3.1.3 各施設の外構被害に要した補修費用の検討

図 3.1.8 には各施設の敷地面積当たりの総補修費用と各施設の敷地面積当たりの液状化による外構の補修費用の関係を示す。同図において、液状化による実測沈下量に基づいた液状化の程度によりプロットの種類を変えている。また、全プロットに対して最小 2 乗法により切片が 0 の近似直線を回帰したところ、 $y=0.82x$  という直線が得られた。この結果に基づき、敷地面積当たりにおける総補修費用に対して外構の補修費用の占める割合が 8 割程度とその占める割合が大きいことが読み取れる。この理由の一つに、各施設における建築物の杭および基礎を含めた構造躯体に被害が無かったこと<sup>3.5)</sup>が挙げられる。一方、同図から液状化の程度が大きくなると敷地面積当たりの外構の補修費用が大きくなることが分かる。

図 3.1.9 には各施設の敷地面積に対する建築面積の比率と敷地面積当たりの液状化による外構の補修費用の関係を示す。同図において全調査結果に対して近似直線を最小 2 乗法により回帰したところ、負の相関が見られたが、その相関係数は低くバラツキが大きいことが分かった。さらに、敷地面積にかわり敷地面積から建築面積を除いた建物外周面積当たりの液状化による外構の補修費用による検討を行ったが、図 3.1.9 と同様に近似直線を回帰したところ負の相関が見られたものの相関係数は低くバラツキが大きかった。したがって各施設の建物規模と敷地規模の比が外構の補修費用に与える影響は小さいと思われる。

図 3.1.10 に液状化による実測沈下量  $S$  と建物外周面積当たりの外構の補修費用の関係を示す。同図において、摩擦杭と支持杭の調査結果に対して切片が 0 の近似直線を回帰したところ、正の相関が見られたが両者の間に明確な差は見られなかった。この理由の一つとして、図 3.1.8 と同様に各施設における建築物の杭および基礎を含めた構造躯体に被害が無かったこと<sup>3.5)</sup>が考えられる。また、各近似直線の相関係数は図 3.1.9 において回帰した近似直線の相関係数より大きいことから、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用については敷地面積に対する建物面積の比率に比べ、敷地周辺の実測沈下量の影響が大きいことが分かる。

以上の結果により、本調査結果において①総補修費用の約 8 割が外構の補修費用であったこと、②敷地面積当たりにおける外構の補修費用と敷地面積に対する建物面積の比率の関係



は負の相関があったものの相関係数が低いこと、③建物外周面積当たりにおける外構の補修費用に杭基礎の種別による明確な差異が見られなかったこと、④液状化による実測沈下量と建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の関係は正の相関が見られ②における相関係数より高い値を示したことから、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を液状化の程度から推定する事を念頭に統計的検討を行った。

外構の補修に関し、補修箇所と補修費用の関係を明確にするため、追加調査を行い、外構の補修費用に関する内訳について詳細な調査を行った。図 3.1.11 に追加調査で得られた外構の補修費用に関する内訳について示す。外構の補修費用に関する内訳として、約 5 割が舗装などの補修に要していることが分かる。なお、各項目の詳細な内訳としては、『舗装・ダスト舗装の補修』では、舗装面に生じた亀裂などの修復がなされていた。『階段・スロープ・犬走り』については、液状化により建物と周辺地盤の間に生じた段差などの補修が含まれていた。また、『植栽・砂場・道具の補修』には、液状化による沈下した遊具の撤去、新設などが含まれている。

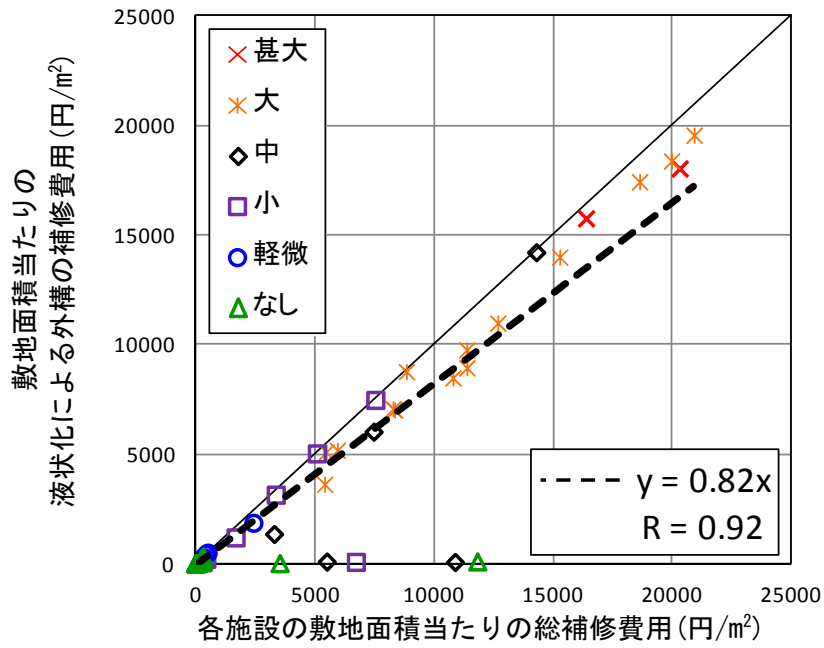


図 3.1.8 敷地面積当たりの液状化による外構の補修費用と総補修費用の関係

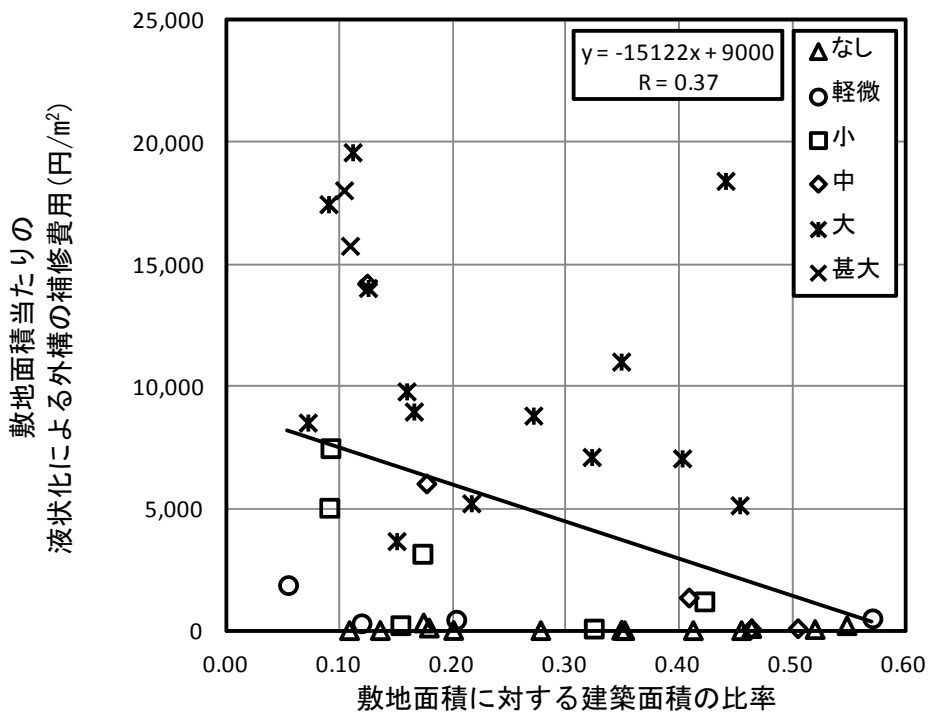


図 3.1.9 敷地面積当たりの液状化による外構の補修費用と敷地面積に対する建築面積の比率の関係

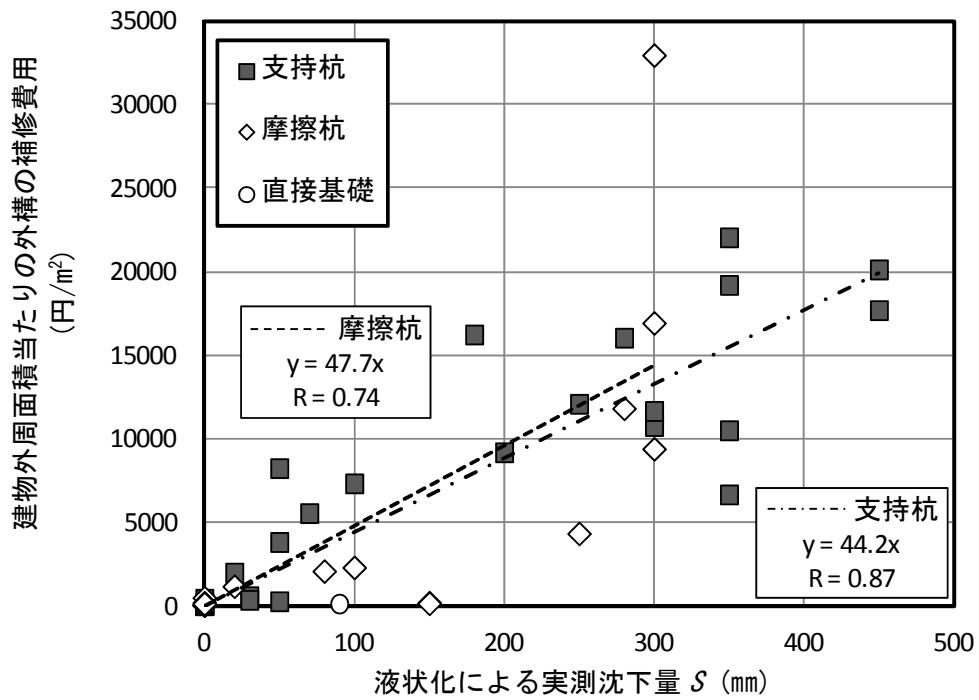


図 3.1.10 液状化による実測沈下量  $S$  と建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の関係

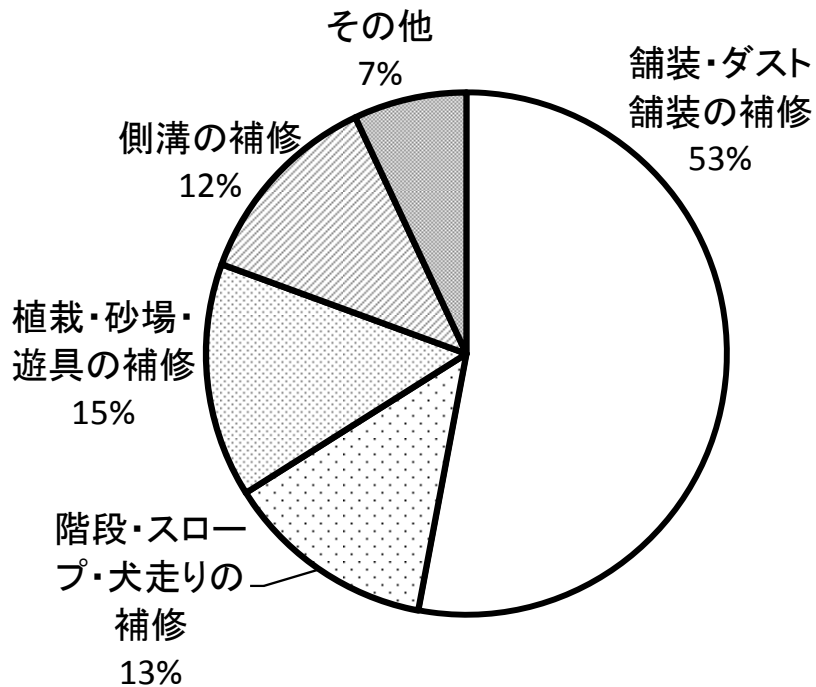


図 3.1.11 外構の補修費用に関する内訳

## 3.2 液状化被害における損失評価法

### 3.2.1 建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の検討

液状化による地盤の実測沈下量  $S$  と関係が見られた外構の補修費用について統計的に検討するため、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を確率変数とした確率分布モデルを評価した。一般に、確率分布モデルの評価方法として積率法および最尤法があるが、文献 3.8) を参考に、ここでは最尤法を用いた。なお、確率分布モデルとしては、正の領域にのみ分布する対数正規分布モデルおよびガンマ分布モデルを用いる。図 3.2.1 に本検討の全体的な概念図を示す。最初に、本検討では液状化により生じた実測沈下量  $S$  を基に分類した液状化程度ごとに求めた確率分布モデルを提示する (3.2.1 節 a))。次に、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」に示されている地表面動的的水平変位  $D_{ey}$  (表 3.2.1) および液状化指数  $P_L$  (表 3.2.2) に基づいた液状化程度の分類ごとにおける建物外周面積当たりの外構の補修費用の累積相対度数と実測沈下量に基づいた液状化程度の分類の比較を行った。さらに、 $D_{ey}$  および  $P_L$  に基づいた液状化程度の分類ごとにおける確率分布モデルを示す (3.2.1 節 b))。最後に、現行の液状化判定法および 4.2 節で示した確率分布モデルを用いた建物外周面積当たりの液状化による外構の補修費用の算出法について示す (3.2.2 節)。

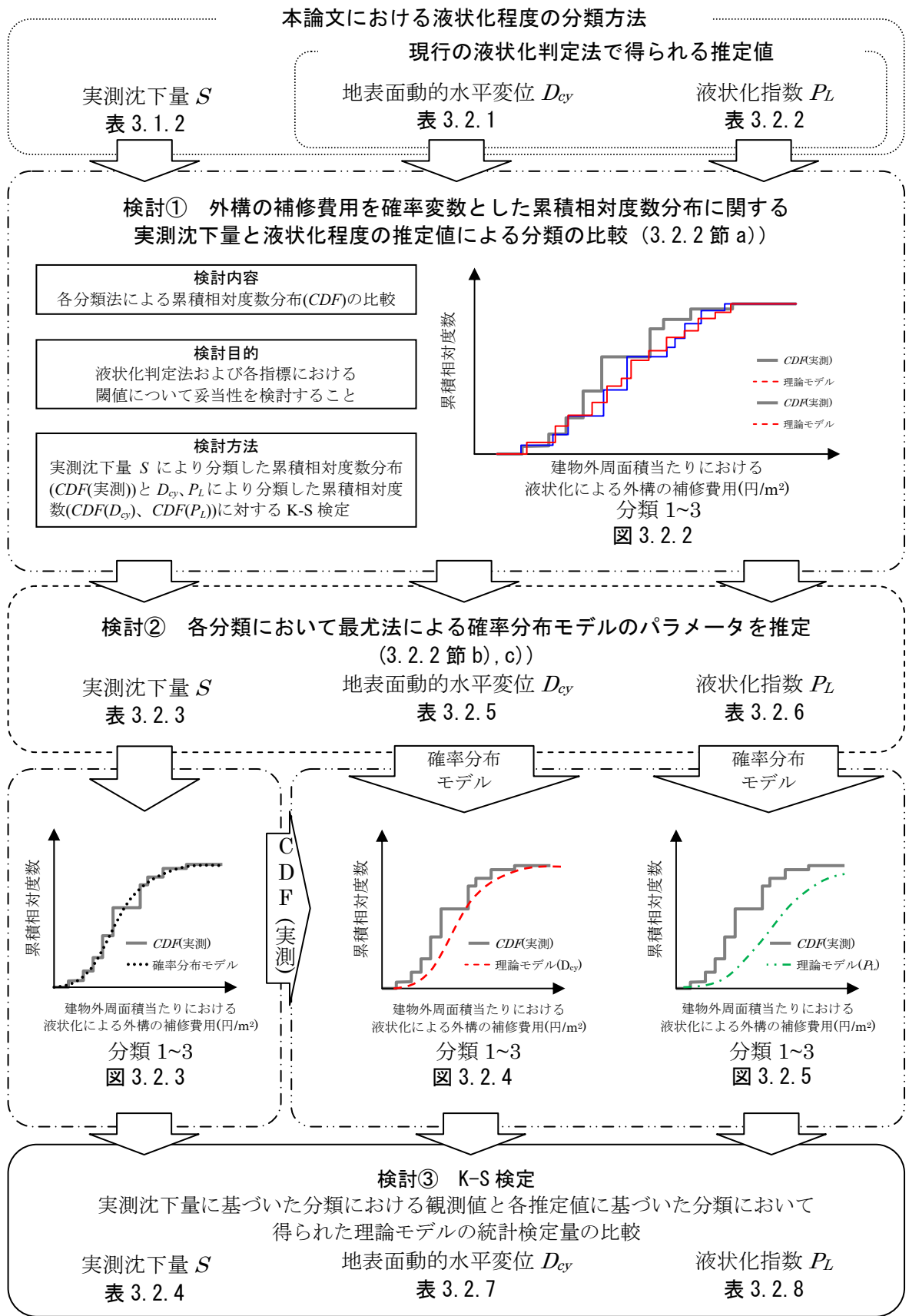


図 3.2.1 本論文における統計的検討の概念図

a) 実測沈下量による分類と液状化程度の推定値による分類における CDF の比較

液状化による外構の補修費用を事前に予測するためには液状化の程度に対応した損失関数を求める必要がある。本検討では最初に、液状化程度のカテゴリの閾値を設定した。分類は3カテゴリとし、実測沈下量  $S$  と地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  の関係について確認した。図 3.2.2 に実測沈下量  $S$  と地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  の関係を、図 3.2.3 に実測沈下量  $S$  と液状化指数  $P_L$  の関係を示す。また、 $D_{cy}$  のカテゴリの閾値は表 3.2.1、 $P_L$  のカテゴリの閾値は表 3.2.2 に示す閾値であり、両図の破線の範囲にあたる。両図から、実測沈下量  $S$  と液状化程度の推定値である  $D_{cy}$  および  $P_L$  の相関はあまり良くない様に見える。建物外周面積当たりの外構の補修費用を確率変数として、表 3.2.1 に示した実測沈下量  $S$  の閾値により分類した際の CDF(実測) と液状化の予測値である地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  を基にそれぞれ表 3.2.1 および表 3.2.2 に示した閾値により分類した際の CDF の適合度を K-S 検定により検定した(図 3.2.4)。その結果、 $D_{cy}$  により分類した CDF は各カテゴリとも有意水準  $\alpha=0.05$  において帰無仮説が採択された。また、 $P_L$  により分類した CDF は、カテゴリ 1 およびカテゴリ 2 では有意水準  $\alpha=0.05$  において帰無仮説が採択されたが、カテゴリ 3 では有意水準  $\alpha=0.05$  において帰無仮説が採択されなかった。したがって、図 3.2.2 において実測沈下量  $S$  と  $D_{cy}$  の関係はよい相関がみられなかったが、現行の液状化判定法により推定された  $D_{cy}$  から建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を求めることができると考えられる。また  $P_L$  については、カテゴリ 1 およびカテゴリ 2 においては有意

表 3.2.1 本論文における液状化程度のカテゴリと地表面動的な水平変位  $D_{cy}$  による液状化の程度との関係

本論文における液状化程度のカテゴリ	カテゴリ1	カテゴリ2	カテゴリ3
地表面動的な水平変位 $D_{cy}$ (cm)	0~5	5~20	20~
$D_{cy}$ による液状化の程度 <sup>10)</sup>	無し 軽微	小 中	大 甚大

表 3.2.2 本論文における液状化程度のカテゴリと液状化指数  $P_L$  による液状化程度との関係

本論文における液状化程度のカテゴリ	カテゴリ1	カテゴリ2	カテゴリ3
液状化指数 $P_L$	0~5	5~15	15~
$P_L$ による液状化の程度 <sup>11)</sup>	極めて少ない 低い	高い	かなり高い

水準  $\alpha=0.05$  において帰無仮説が採択されたことから、3.2.1 節 c)では参考として  $P_L$ により分類した各液状化程度についても確率分布モデルの評価を行っている。なお、2011年東北地方太平洋沖地震に対する液状化判定法の適用性については、2.3節にて既往の論文の知見を示したが、 $D_{cy}$ については、新井<sup>3.9)</sup>は2011年東北地方太平洋沖地震を含む3地震の強震記録を対象に1次元有効応力解析を行い繰返し回数  $N_{eq}$  とマグニチュード  $M$  の関係を検討した結果、既往の提案式を  $M=9.0$  の場合でも外挿して液状化判定を行ってよい可能性を示唆している。一方、 $P_L$ については、2011年東北地方太平洋沖地震による研究成果を反映させた2012年版の道路橋示方書では、改善の余地があるものの、現行の液状化判定法においてもマグニチュード  $M$  が大きい地震に対して適用できる<sup>3.10)</sup>とされている。以上の点を踏まえ、本論文においても液状化判定に用いるマグニチュード  $M$  を9.0とし、地表面最大加速度  $a_{max}$  は本震としてK-NET 浦安で計測された174galを用いた。

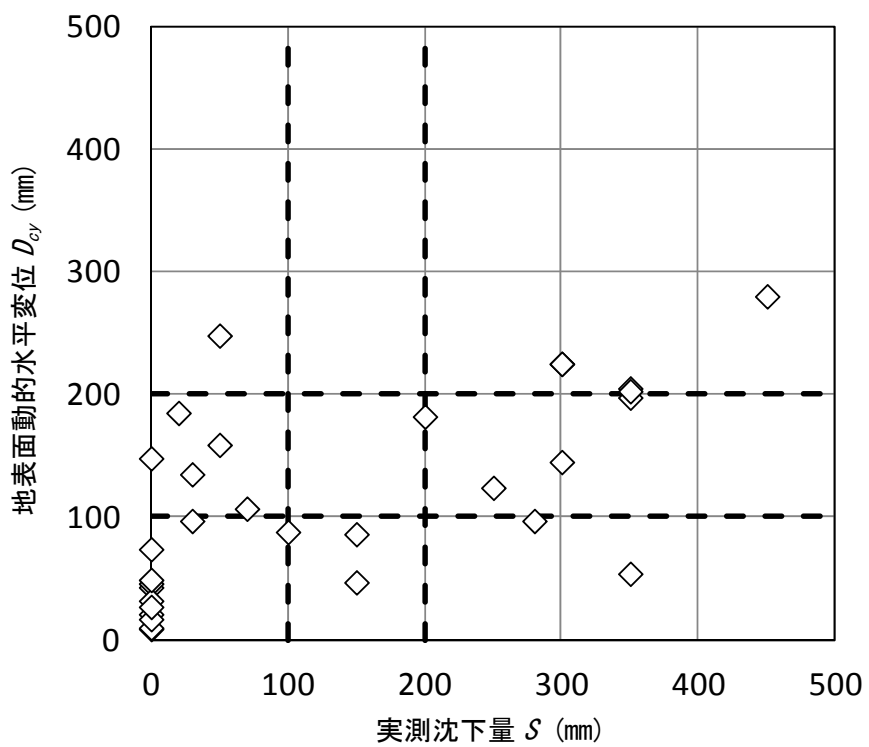


図 3.2.2 実測沈下量  $S$  と地表面動的的水平変位  $D_{ey}$  の関係

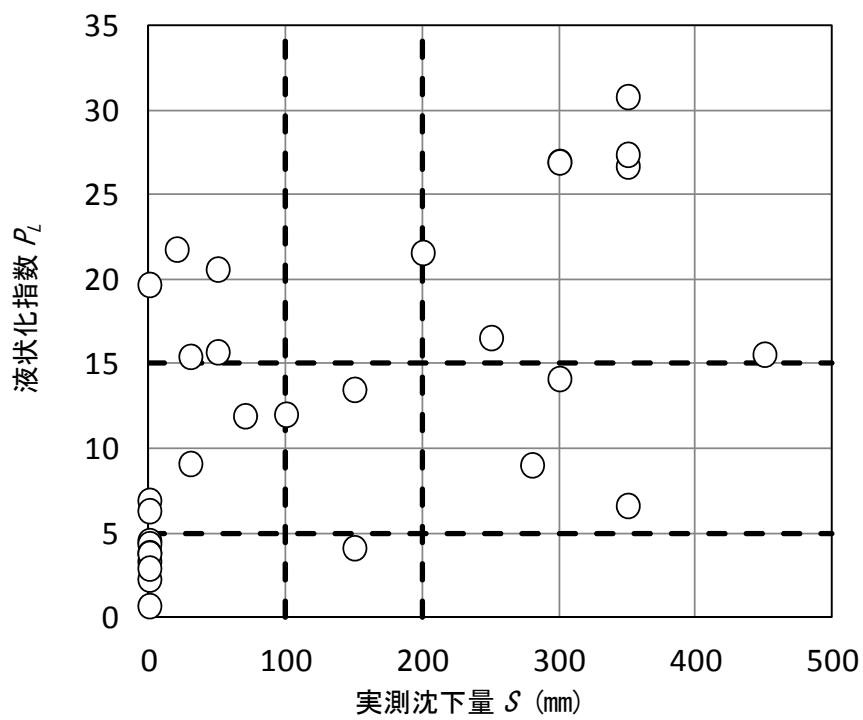


図 3.2.3 実測沈下量  $S$  と液状化指数  $P_L$  の関係



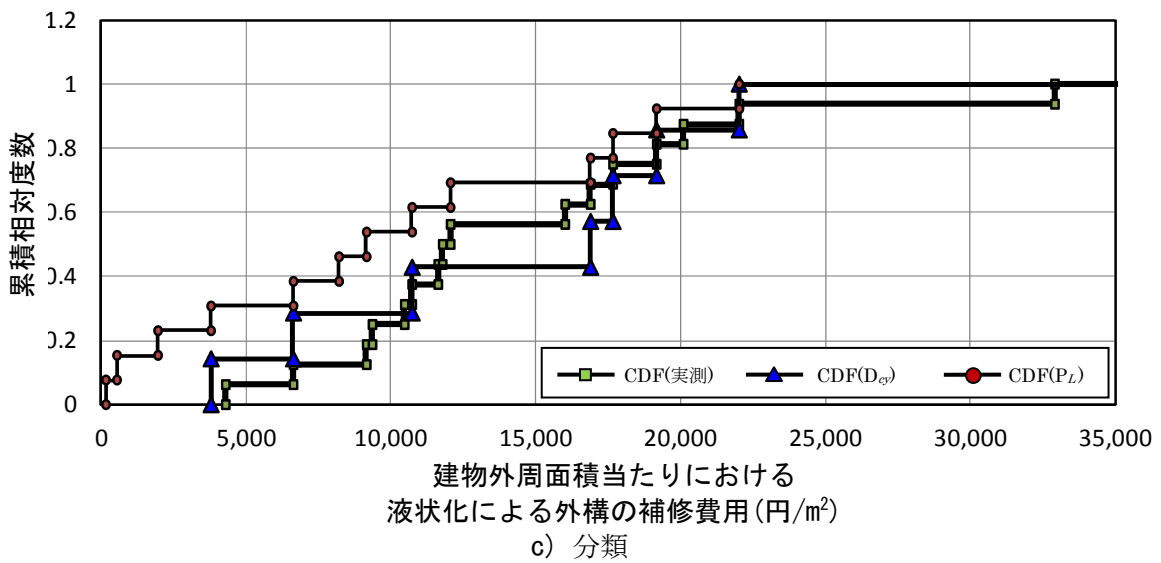
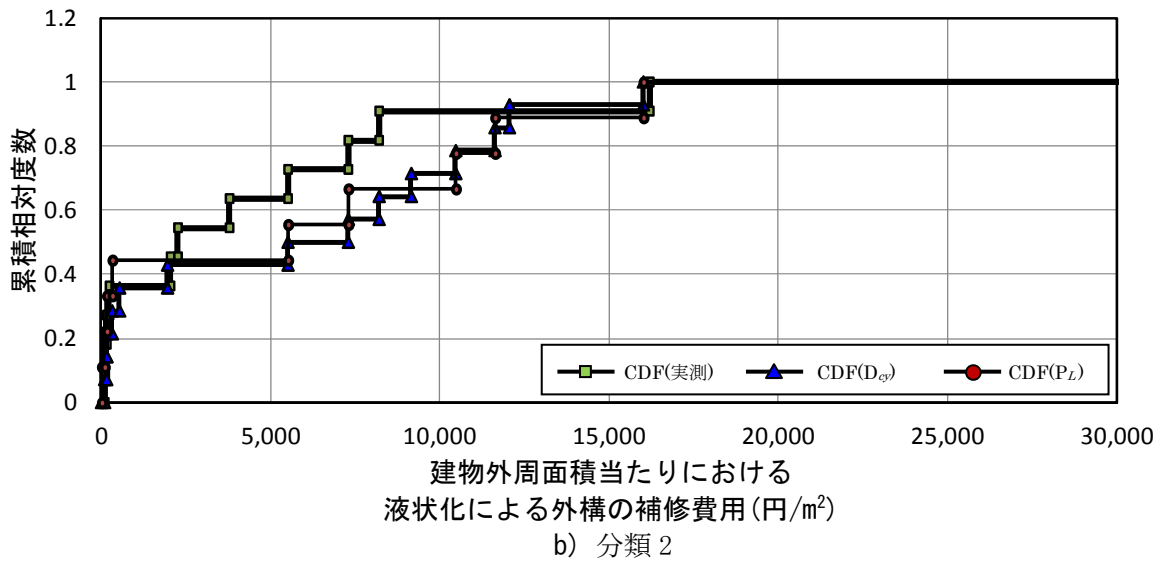
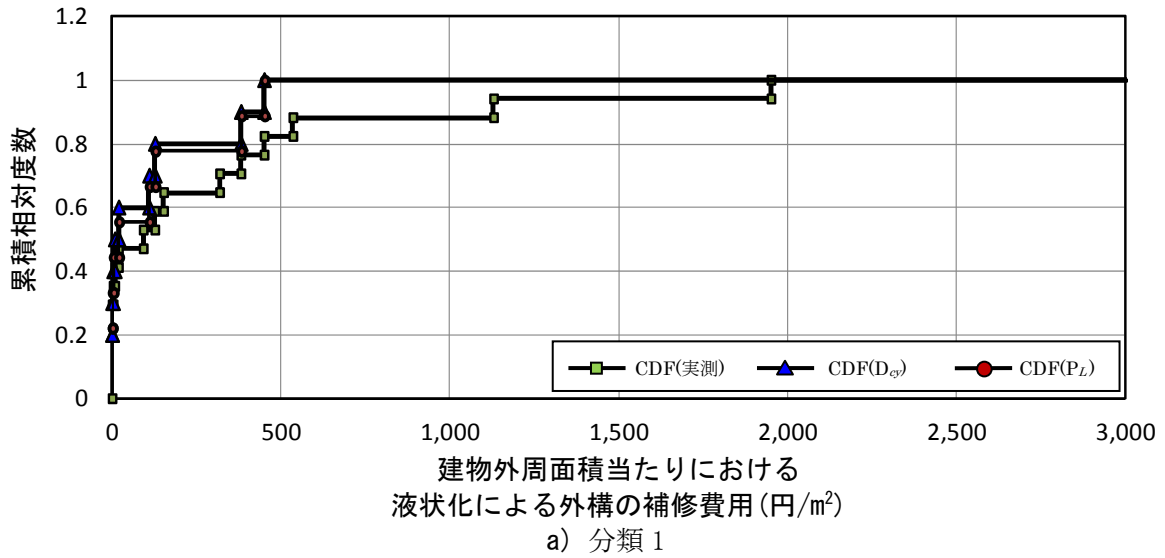


図 3.2.4 実測沈下量、 $D_{cv}$ 、 $P_L$ により分類した各液状化程度における  
建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の累積相対度数

b) 液状化による実測沈下量の分類に対する確率分布モデル

図 3.2.5 に各液状化の程度における建物外周面積当たりの外構の補修費用の累積相対度数分布を示す。また表 3.2.3 に各確率分布モデルにおけるパラメータを示す。表 3.2.3 より、液状化の程度が大きくなるほど対数正規分布モデルの対数平均値が大きくなることが分かる。また、表 3.2.3 に示したパラメータを用いた各確率分布モデルの妥当性について確認する。建物外周面積当たりの外構の補修費用の累積相対度数(CDF(実測))と仮定した理論分布モデルの累積分布関数の適合性を検定する手法の一つに K-S 検定<sup>3.11)</sup>があり、K-S 検定により各分類の検定を行った。なお、K-S 検定では観測値の累積相対度数と理論分布の累積関数の差の最大値(検定統計量)がデータ数の大きさと有意水準  $\alpha$  から予想されるもの(限界値)より小さければ、その関数は設定された有意水準  $\alpha$  において観測値をモデル化するものとして妥当なものとされる<sup>3.11)</sup>。

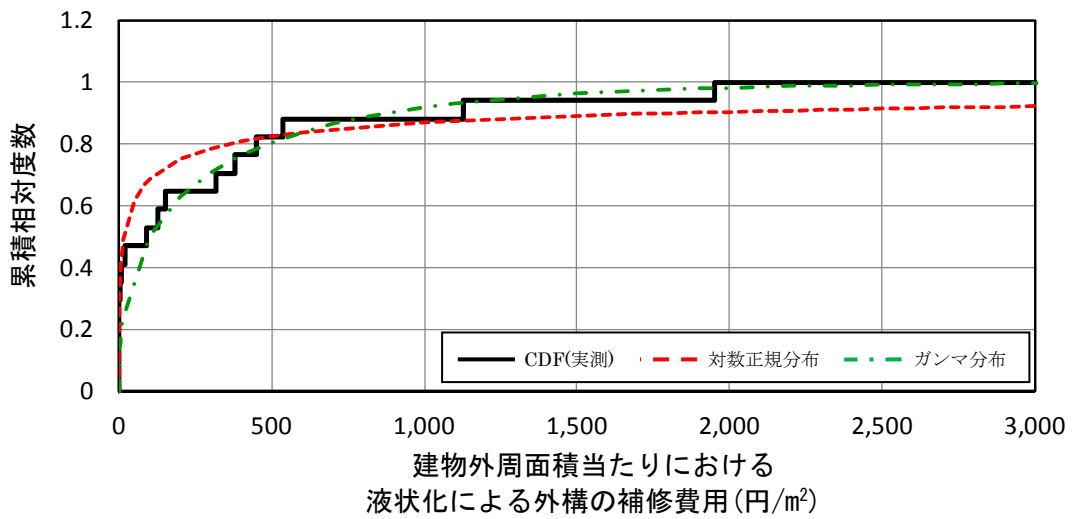
表 3.2.4 に実測沈下量により分類した各分類における確率分布モデルと CDF(実測)の K-S 検定による検定統計量と限界値を比較した結果を示す。同表より、検定統計量が有意水準  $\alpha=0.05$  における限界値より小さいことから、最尤法により推定したパラメータを用いた各確率分布モデルが各分類の CDF(実測)に対して、有意水準  $\alpha=0.05$  において帰無仮説が採択されることが分かる。また各分類において、全体的な傾向としてはガンマ分布の方が観測値を近似しているように見えるが、CDF における観測値と分布関数の差の最大値に基づく検定を行う K-S 検定では対数正規分布の適合度が高い結果となった。

表 3.2.3 最尤法により推定した確率分布モデルのパラメータ  
(実測沈下量  $S$  による分類)

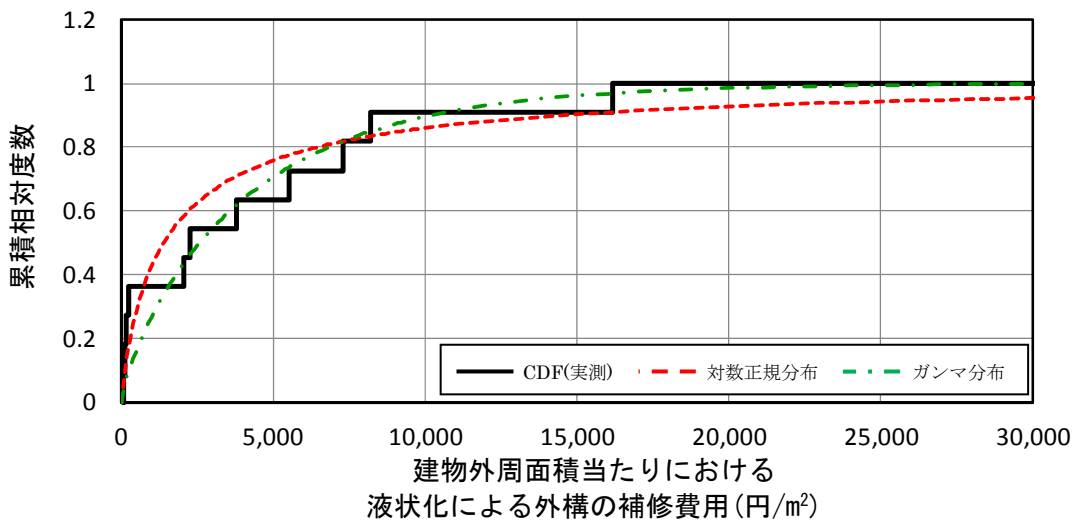
	パラメータ	分類1	分類2	分類3
対数正規分布	対数平均値 $\lambda$	2.81	7.23	9.47
	対数標準偏差 $\zeta$	3.66	1.83	0.48
ガンマ分布	$\alpha$	0.37	0.78	4.50
	$\beta$	831.04	5347.54	3204.70

表 3.2.4 実測沈下量  $S$  による分類における検定統計量と限界値

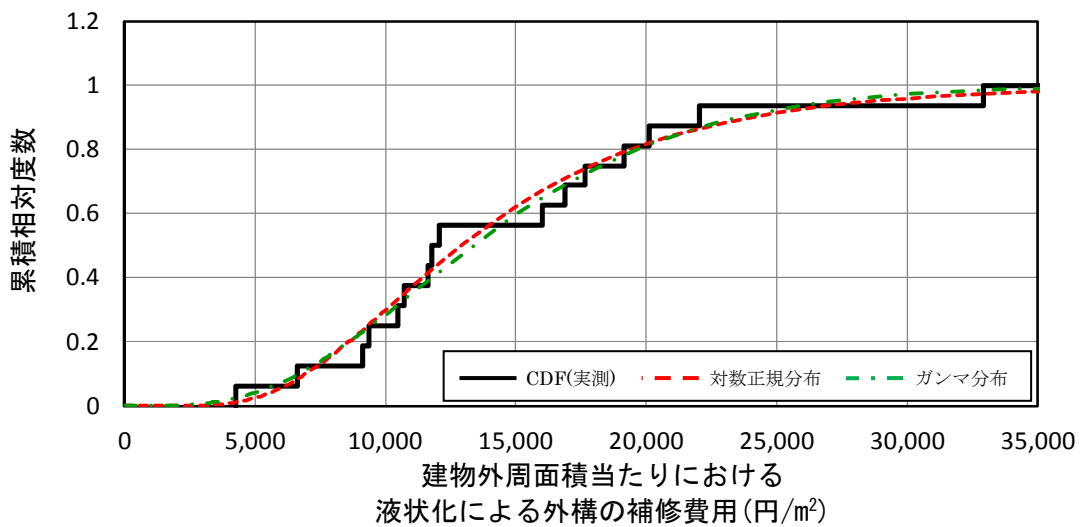
		対数正規分布	ガンマ分布
分類1 データ数(n=17)	検定統計量	0.213	0.253
	棄却限界値	0.318	
分類2 データ数(n=11)	検定統計量	0.220	0.271
	棄却限界値	0.409	
分類3 データ数(n=16)	検定統計量	0.120	0.146
	棄却限界値	0.327	



a) 分類



b) 分類 2



c) 分類

図 3.2.5 実測沈下量  $S$  により分類した各液状化程度における  
建物外周面積当たりの外構の補修費用の累積相対度数

c)  $D_{cy}$ および $P_L$ による分類から求めた確率分布モデル

3.2.1 節 a)において、実測沈下量  $S$  による分類と液状化程度の推定値による分類における CDF の比較を行った結果、現行の液状化判定法により推定された  $D_{cy}$  から建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を求めることができる可能性を示した。また  $P_L$  については、分類 1 および分類 2 においては有意水準  $\alpha=0.05$  において帰無仮説が採択されたことから、参考として  $P_L$  により分類した各液状化程度についても確率分布モデルの評価を行った。

液状化程度の推定値である  $D_{cy}$  および  $P_L$  による各分類において、確率分布モデルのパラメータを最尤法により推定した。さらに、 $D_{cy}$  および  $P_L$  による各分類において推定されたパラメータを用いた確率分布モデルと CDF(実測)について K-S 検定により適合度検定を行った。表 3.2.5、表 3.2.6 には各分類における確率分布モデルのパラメータを示す。図 3.2.6、図 3.2.7 に建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を確率変数とした CDF(実測)と  $D_{cy}$ 、 $P_L$  により分類した各確率分布モデルの累積相対度数分布を示す。さらに、図 3.2.6、図 3.2.7 の CDF(実測)と確率分布モデルについての K-S 検定による検定統計量と 限界値を比較した結果を表 3.2.7、表 3.2.8 に示す。同表より、 $D_{cy}$  による分類から求めた確率分布モデルの検定統計量は各分類において有意水準  $\alpha=0.05$  の時の 限界値より小さい値を示すことが分かる。一方、本検討では  $P_L$  による分類から求めた確率分布モデルの検定統計量は分類 3 において対数正規

表 3.2.5 確率分布モデルのパラメータ  
( $D_{cy}$ による分類)

	パラメータ	分類1	分類2	分類3
対数正規分布	対数平均値 $\lambda$	2.09	7.56	9.38
	対数標準偏差 $\zeta$	3.24	1.87	0.60
ガンマ分布	$\alpha$	0.47	1.12	4.75
	$\beta$	232.89	4994.53	2909.74

表 3.2.6 確率分布モデルのパラメータ  
( $P_L$ による分類)

	パラメータ	分類1	分類2	分類3
対数正規分布	対数平均値 $\lambda$	2.09	6.75	8.62
	対数標準偏差 $\zeta$	3.41	2.60	1.44
ガンマ分布	$\alpha$	0.54	0.79	1.98
	$\beta$	224.08	6454.68	4996.92

分布モデルおよびガンマ分布モデルの適合性が低い結果を示している。以上の結果により、液状化程度の推定値である  $D_{cy}$  と各液状化程度のカテゴリにおける確率分布モデルを用いることで液状化による建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を事前に予測する事ができると考えられる。なお、液状化による建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を  $P_L$  に基づいた液状化程度から予測するためには、表 3.2.2 に示した様な閾値で液状化程度を分類せずに、実測沈下量  $S$  による分類における CDF に合うような閾値を設定することが考えられる。

表 3.2.7 各液状化程度における K-S 検定による検定統計量の比較  
( $D_{cy}$ による分類)

		対数正規分布	ガンマ分布
分類1 データ数(n=17)	検定統計量	0.303	0.265
	棄却限界値	0.318	
分類2 データ数(n=11)	検定統計量	0.233	0.334
	棄却限界値	0.409	
分類3 データ数(n=16)	検定統計量	0.207	0.122
	棄却限界値	0.327	

表 3.2.8 各液状化程度における K-S 検定による検定統計量の比較  
( $P_L$ による分類)

		対数正規分布	ガンマ分布
分類1 データ数(n=17)	検定統計量	0.292	0.277
	棄却限界値	0.318	
分類2 データ数(n=11)	検定統計量	0.268	0.287
	棄却限界値	0.409	
分類3 データ数(n=16)	検定統計量	0.510	0.426
	棄却限界値	0.327	

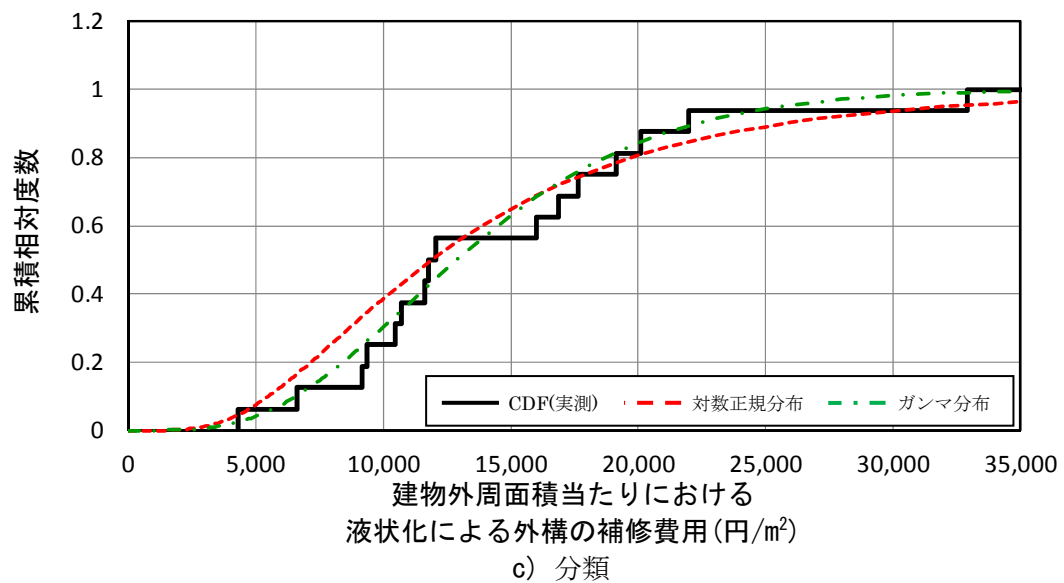
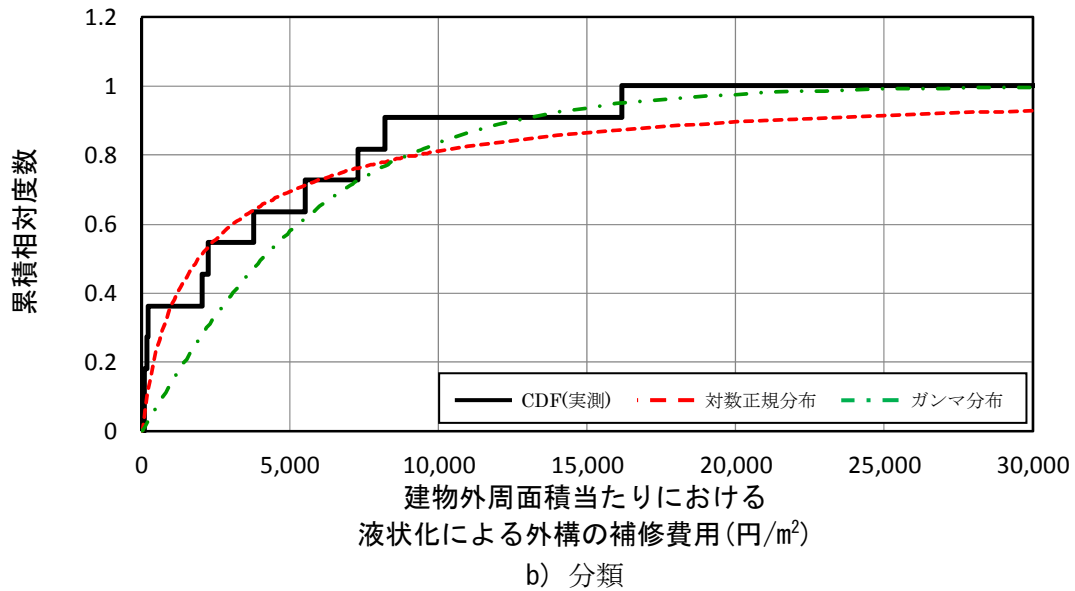
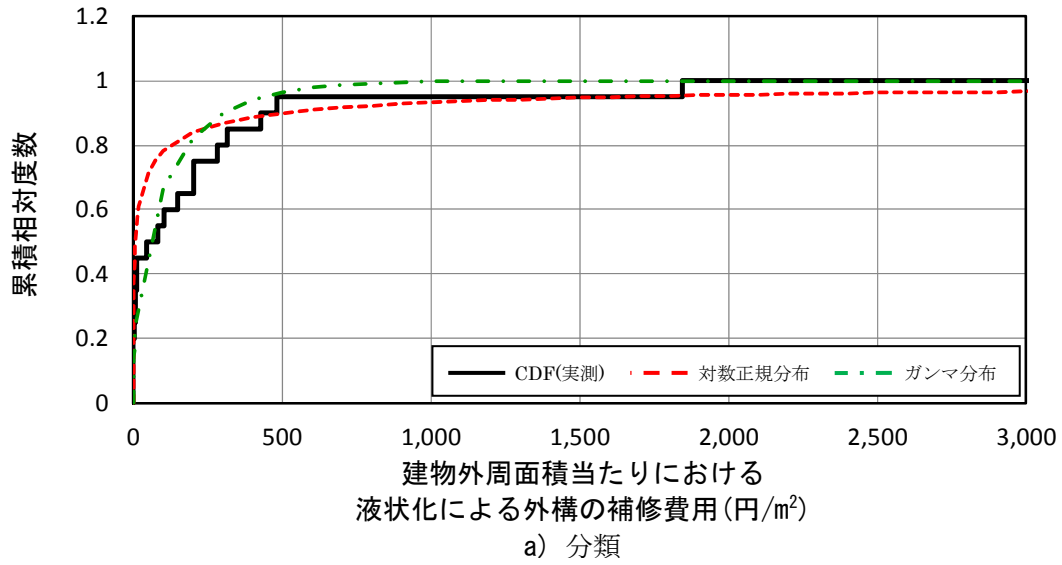


図 3.2.6  $D_{cy}$ により分類した液状化程度における  
建物外周面積当たりの外構の補修費用の累積相対度数

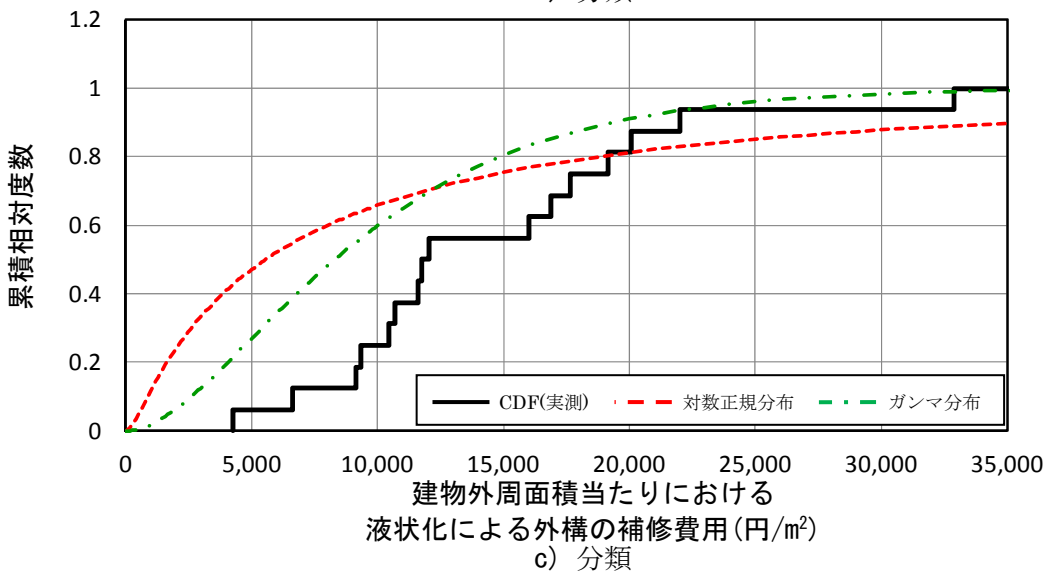
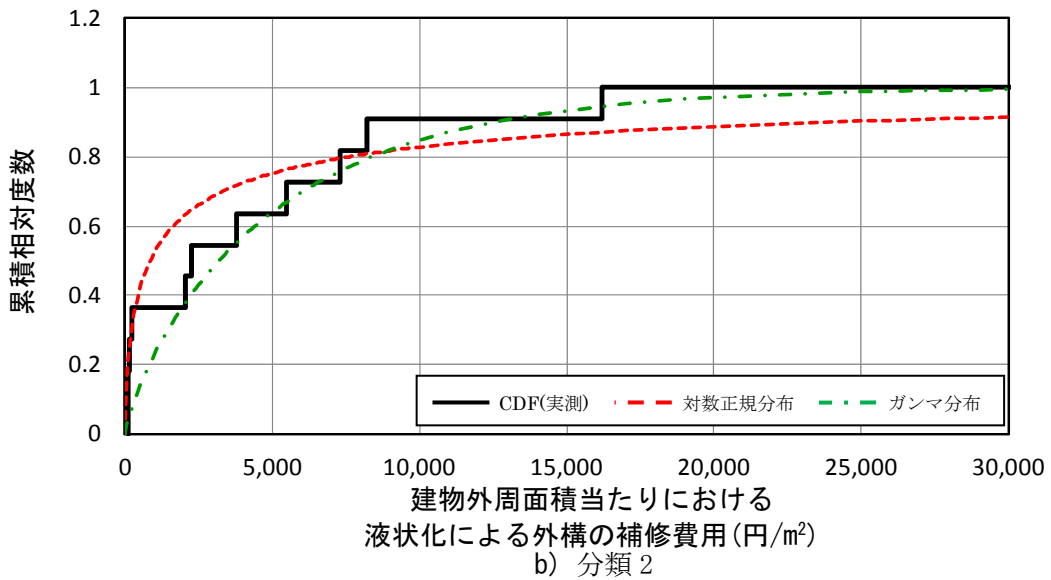
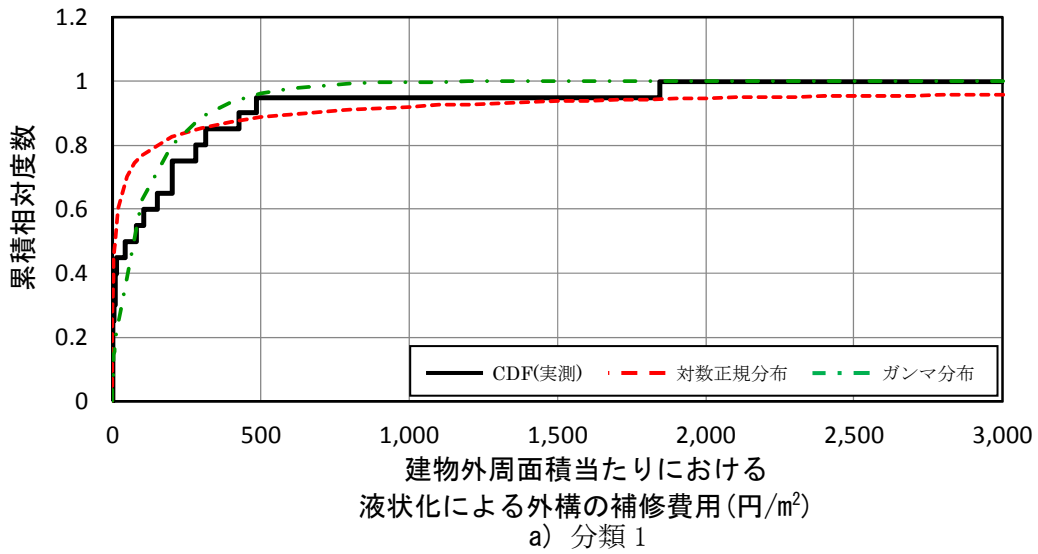


図 3.2.7  $P_L$ により分類した液状化程度における  
建物外周面積当たりの外構の補修費用の累積相対度数

### 3.2.2 液状化地盤の損失評価法の提案

本算出法は、地震により液状化が生じた際の外構の予想最大損失として任意の非超過確率における補修費用の算出を目的としている。本算出法のフローチャートを図 3.2.8 に示す。本算出法的前提条件として地震動の設定を文献 3.13)を参考に、地震動強さを特定した場合 (PML2) を想定している。現行の液状化判定法では地震の規模であるマグニチュード  $M$  を 7.5 とし、損傷限界検討用 (再現期間: 50 年程度) として最大地表面加速度  $\alpha_{max}=200gal$ 、終局限界検討用 (再現期間: 500 年程度) として  $\alpha_{max}=350gal$  を設定して液状化判定を行うことが推奨されている<sup>3.12)</sup>。一方、文献 3.13) では、PML2 の定義として再現期間が 500 年程度の地震動に対する損失の非超過確率 90%値とされており、本算出手法における PML2 の算出には終局限界検討用の  $\alpha_{max}$  を用いて液状化判定を行う。得られた液状化判定結果 ( $D_{cy}$ ) に基づいて、表 3.2.1 に示した 3 分類に対象施設を分類すると、表 3.2.5 に示した  $D_{cy}$  による分類における確率分布のパラメータを用いることによって任意の非超過確率における補修費用を算出する事が出来る。また、算出された補修費用をもとに液状化対策工費との大小関係から費用対効果の判断が可能となる。

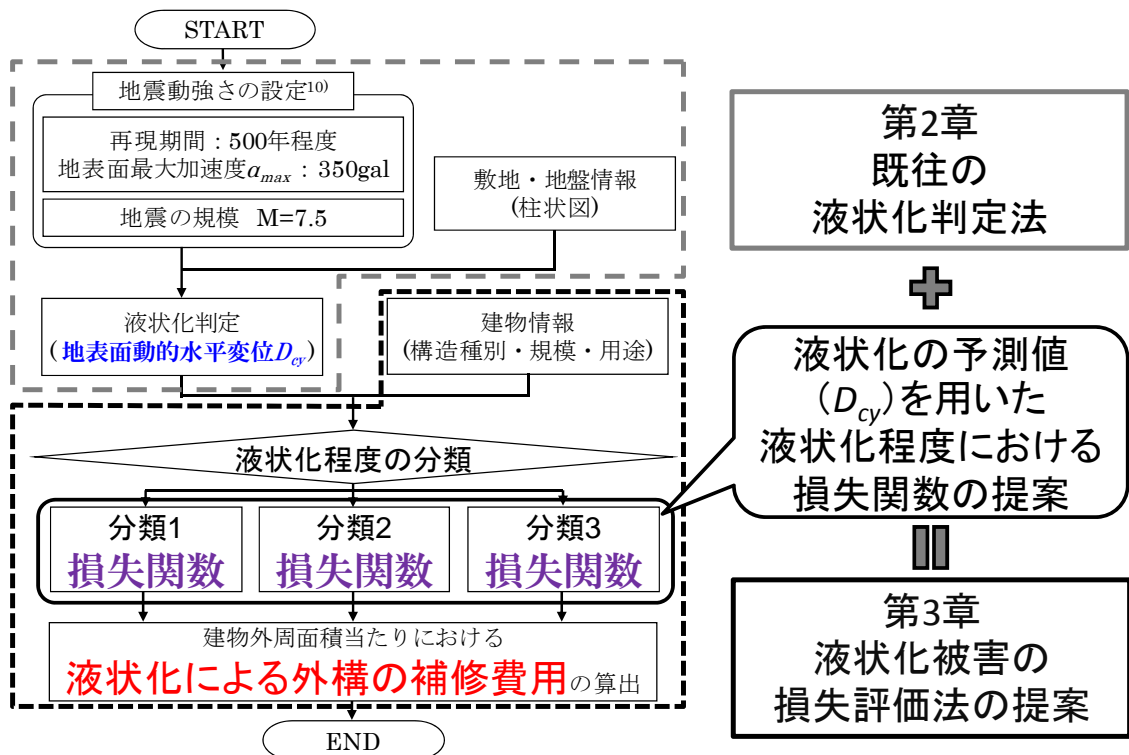


図 3.2.8 外構の補修費用の算出フロー



### 3.3 本章のまとめ

本章では 2011 年東北地方太平洋沖地震により大規模な液状化被害が生じた千葉県浦安市の公共施設を対象とした液状化による地盤被害の状況についての調査結果を示した。さらに、液状化による地盤の沈下量と建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の関係に相関がみられたことから、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用を液状化による地盤の損失とした損失評価法を提案した。以下に本章の要点を示す。

- 1) 液状化による地盤の沈下量と建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の関係に相関がみられた。
- 2) 現行の液状化判定法で用いられている液状化程度の指標および液状化程度の閾値を参考に、実測沈下量  $S$ 、地表面動的水平変位  $D_{cy}$  および液状化危険度  $P_L$  の分類の閾値を決定し、各分類に対して液状化による地盤の損失を算出するための損失関数を求めた。
- 3) 現行の液状化判定法を用いた液状化による地盤の被害の損失を予測する の算出フローを示した。

### －第3章の参考文献－

- 3.1) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査報告書，2011.7
- 3.2) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：平成23年浦安市液状化対策技術検討調査報告書，2013.2
- 3.3) 国土地理院：土地条件図「東京東南部」，1980.3
- 3.4) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：第1回浦安市液状化対策技術検討調査委員会資料1-6-3 公共公益施設の被害状況，2011.7
- 3.5) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：第2回浦安市液状化対策技術検討調査委員会資料2-4-3 建築物の被害・液状化対策，2011.7
- 3.6) 千葉県浦安市研究センター：第3報千葉県内の液状化－流動化現象とその被害の概要及び詳細調査結果－浦安地区(1)－，2011.5
- 3.7) Mapion：<http://www.mapion.co.jp/>，2012.10.25 参照
- 3.8) 諏訪仁，関松太郎：兵庫県南部地震における建物の補修費用に関する統計的評価，構造工学論文集，Vol.51B，pp.143-148，2005.3
- 3.9) 新井洋：2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の液状化に関する等価繰返し回数，第47回地盤工学研究発表会梗概集，pp.1559-1560，2012.7
- 3.10) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，pp.136-141，2012.3
- 3.11) Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang：土木・建築のための確率・統計の基礎，pp.361-364，2007.1
- 3.12) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.61-68，2001.10
- 3.13) 日本建築学会：地震リスク評価とリスクコミュニケーション，2011.3

## 第4章 液状化被害における損失評価法の適用性の検討

### 4.1 概説

本章では、3章で提案した液状化による地盤被害の損失評価法を用いて液状化によるリスク評価を行うことでその適用性を示すことを目的としている。

4.2節では最初に、3.2節で示した液状化を考慮した損失評価法を用いて、千葉県浦安市入船および東京都江東区辰巳で実際に液状化対策工が施工された2事例<sup>4.1),4.2)</sup>を対象に、液状化対策前後の地盤条件で液状化による地盤被害の損失を評価した。次に、液状化による被害を抑制するための事前対策費である液状化対策費と、液状化による地盤被害の損失評価法から予想される液状化による外構の補修費用の比較を試みた。なお、千葉県浦安市入船での事例では実際に施工された液状化対策工の仕様のうち、砂杭の杭長さを変数として液状化対策費と予想される液状化による損失との関係について検討した。一方、東京都江東区辰巳での事例では液状化対策を行う前において液状化が生じると判断された層のうち、比較的浅い層の $N$ 値を増加させた際の液状化による地盤被害の損失への影響について検討を行っている。

4.3節では、地震保険や不動産投資信託の分野や企業および地方自治体の防災計画においては複数建物を対象とした地震リスクの評価が重要であること<sup>4.3)</sup>、また地盤条件が液状化による地盤の損失に与える影響について検討するため、千葉県浦安市内を非埋立地、埋立地で分類し、各地域で10施設の公共施設を仮定して地域ごとに複数建物の液状化による地盤被害の損失を評価した。

## 4.2 液状化対策工による物的損失の低減に関する適用性

### 4.2.1 千葉県浦安市入船における検討

#### 4.2.1.1 対象施設の条件および立地条件

浦安市入船の土質構成と液状化対策前の  $N$  値、液状化安全率  $F_L$  の深度分布を図 4.2.1 に示す<sup>4.1)</sup>。なお、同図では液状化対策工の改良範囲のみを示している。対象地盤は比較的緩い埋立地であり、対象施設は教育施設とした。表 4.2.1 には液状化対策前の地盤条件に対する液状化判定結果として、損傷限界時 ( $\alpha_{max}=200\text{gal}$ ) および終局限界時 ( $\alpha_{max}=350\text{gal}$ ) における地表面動的的水平変位  $D_{cy}$  の値を示している。さらに同表には、 $D_{cy}$  の値を用いた本損失評価法における液状化程度のカテゴリ (3.2 節、表 3.2.1 参照) を示している。図 4.2.1 および表 4.2.1 より、地盤改良前における想定地盤の液状化判定結果は損傷限界時および終局限界時ともに

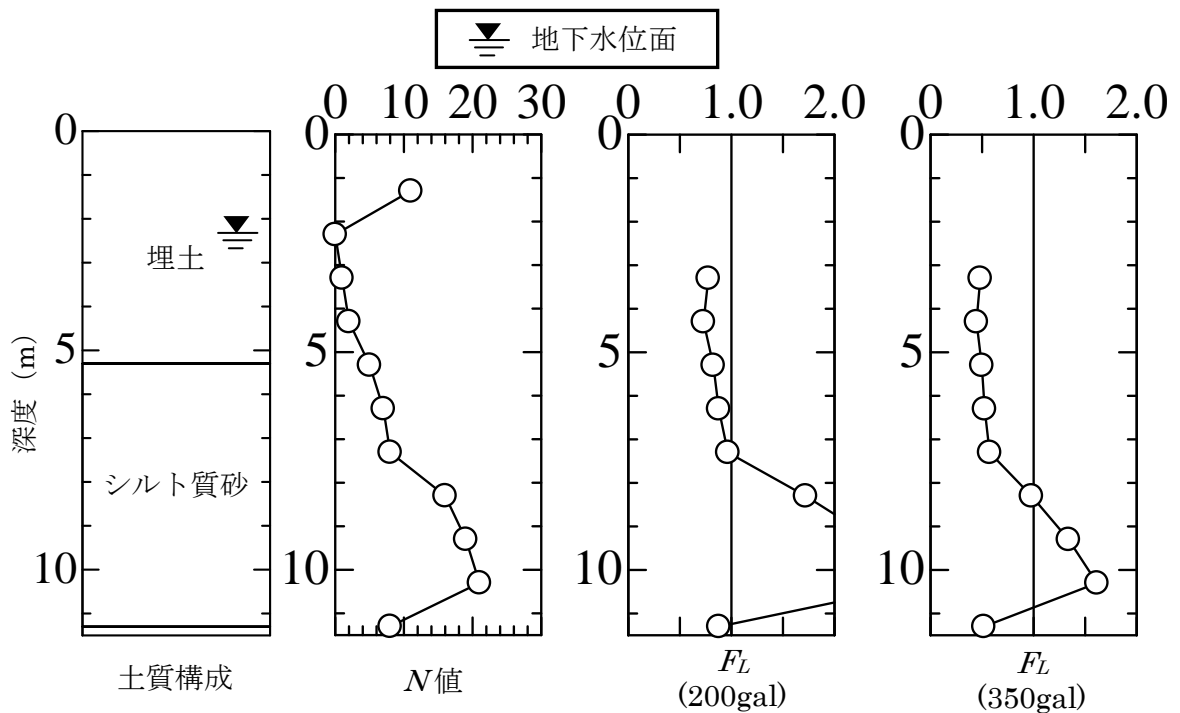


図 4.2.1 土質構成と液状化対策前の  $N$  値、 $F_L$  の深度分布<sup>4.1)</sup>

表 4.2.1 液状化対策前の地表面動的的水平変位  $D_{cy}$  と液状化程度

	$D_{cy}$ (cm)	
	損傷限界時	終局限界時
地盤改良前	10	14.4
建築基礎構造設計指針 <sup>4.4)</sup> における液状化程度	中	中
本論文における液状化程度のカテゴリ	分類2	分類2

$D_{cy}$ では液状化の程度が『中』程度であることが分かる。また、本損失評価法における液状化程度の分類としては『分類 2』に分類されることが分かる。

#### 4.2.1.2 液状化対策工法の概要

本事例では、建築物の直下の地盤において液状化が生じないように液状化対策が行われている。本事例で用いられた液状化対策工法は、振動式サンドコンパクションパイル工法（SCP工法）であり、本事例における SCP 工法の仕様を表 4.2.2 に示す。

図 4.2.2 に液状化対策による地盤改良前後の  $N$  値および液状化安全率  $F_L$  の深度分布を示す。さらに、表 4.2.3 に液状化対策工に対する要求性能を、表 4.2.4 に液状化対策による地盤改良

表 4.2.2 本事例における液状化対策工の仕様<sup>4.1)</sup>

砂杭の径	800mm
砂杭のピッチ・配置・改良率	2.0m・正方形配置・12.5%
砂杭の長さ・改良深さ	10m
概算工費	1500円/m <sup>3</sup>

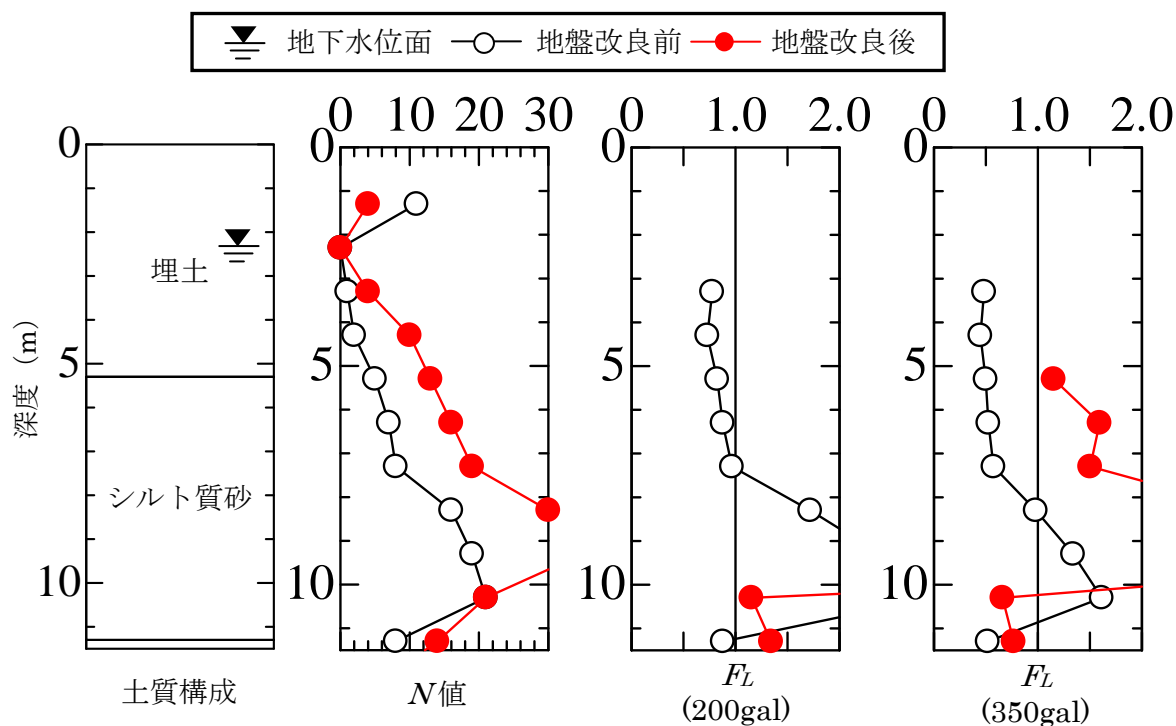


図 4.2.2 土質構成と液状化対策前後の  $N$  値,  $F_L$  の深度分布<sup>4.1)</sup>

前後における液状化判定結果を示す。液状化対策による地盤改良前では液状化程度が『中』と判定されたのに対し、地盤改良後では損傷限界時において表 4.2.3 に示す①の要求性能を満足しており、終局限界時においても  $D_{cy}$  が 1.6cm の沈下量が生じると判定結果であったが、表 4.2.3 に示す②の要求性能を満足していることが分かる。

表 4.2.3 液状化対策工に対する要求性能<sup>4.2)</sup>

液状化対策工に対する要求性能	
①	地表面加速度200gal(中地震)に対してすべての地点で、液状化安全率 $F_L \geq 1.0$ を満たすこと
②	地表面加速度350gal(大地震)に対して平均液状化安全率 $F_L \geq 1.0$ かつ地表面動的的水平変位 $D_{cy} \leq 5.0\text{cm}$ である

表 4.2.4 液状化対策前の  $D_{cy}$

	$D_{cy}$ (cm)	
	損傷限界時	終局限界時
地盤改良前	10.0	14.4
地盤改良後	0.0	1.0

#### 4.2.1.3 液状化対策工の費用対効果の検討

予測される液状化による地盤被害の損失と液状化対策工の工費との比較を行うため、前述した液状化判定の結果と 3 章で示された確率分布モデルのパラメータを用いて、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の中央値および 90%非超過確率値（以下、90%値）を算出した。表 4.2.5 に地表面動的的水平変位  $D_{cy}$  により液状化の程度を評価し、対数正規分布のパラメータを用いて算出された中央値および 90%値を示す。なお、同表の中央値および 90%値を算出する際の液状化程度の分類は終局限界時の液状化判定の結果に基づいている。さらに、液状化対策工の費用と比較するため、建物の供用期間を 50 年とし、供用期間中に液状化判定

表 4.2.5 建物外周面積当たりにおける液状化による外構の補修費用の中央値および 90%値

		地盤改良前	地盤改良後
対数正規分布	中央値	約2000(円/m <sup>2</sup> )	約10(円/m <sup>2</sup> )
	90%非超過確率値	約22000(円/m <sup>2</sup> )	約500(円/m <sup>2</sup> )

の損傷限界時（再現期間 50 年）および終局限界時（再現期間 475 年）に相当する地震が発生する確率を(4.2.1)式から求め、供用期間の年数で除すことで 1 年間当たりの期待損失額を算出した。その結果、1 年間当たりの期待損失額は、損傷限界時において 440 円/m<sup>2</sup>、終局限界時において 46 円/m<sup>2</sup>であった。一方、上記の液状化対策工の仕様（表 4.2.2）を基に、液状化対策工の費用を算出すると 15000 円/m<sup>2</sup>程度であり、建物の供用期間を 30 年とすると、1 年間当たりで 300 円/m<sup>2</sup>の液状化対策工費となる。したがって、本事例では、液状化に対する事前対策費である液状化対策工費の方が事後対策費に相当する損失より小さくなることが確認できた。

$$P = 1 - (1 - p)^I \quad (4.2.1)$$

ここに、 $P$ ：発生確率、 $p$ ：1 年間で発生する確率（再現期間の逆数）、 $I$ ：供用期間

## 4.2.2 東京都江東区辰巳における検討

### 4.2.2.1 対象施設の条件および立地条件

本検討の対象敷地は東京都江東区辰巳であり、2011年東北地方太平洋沖地震により液状化が生じた範囲内に立地している。当該敷地は地表面から深度10m程度まで軟弱な粘土層や緩い沖積層が堆積している。なお、仮定した対象施設は教育施設である。

### 4.2.2.2 液状化対策工法の概要

本事例は建物の直下の地盤をSCP工法により改良した後に所定の深度まで掘削した事例である。そのため、本事例の地盤は図4.2.3のような地盤構成になっている<sup>4.2)</sup>。液状化対策後に6.6m掘削しているため、外構の補修費用を算定するために掘削した6.6mの地盤を掘削しない場合を想定して、一般的にSCP工法では液状化対策後にN値が5~10上がることを考慮して、液状化対策前の表層から6.6mまでのN値を5程度上げた場合と10程度上げた場合を想定して液状化対策後の液状化判定を行っている。

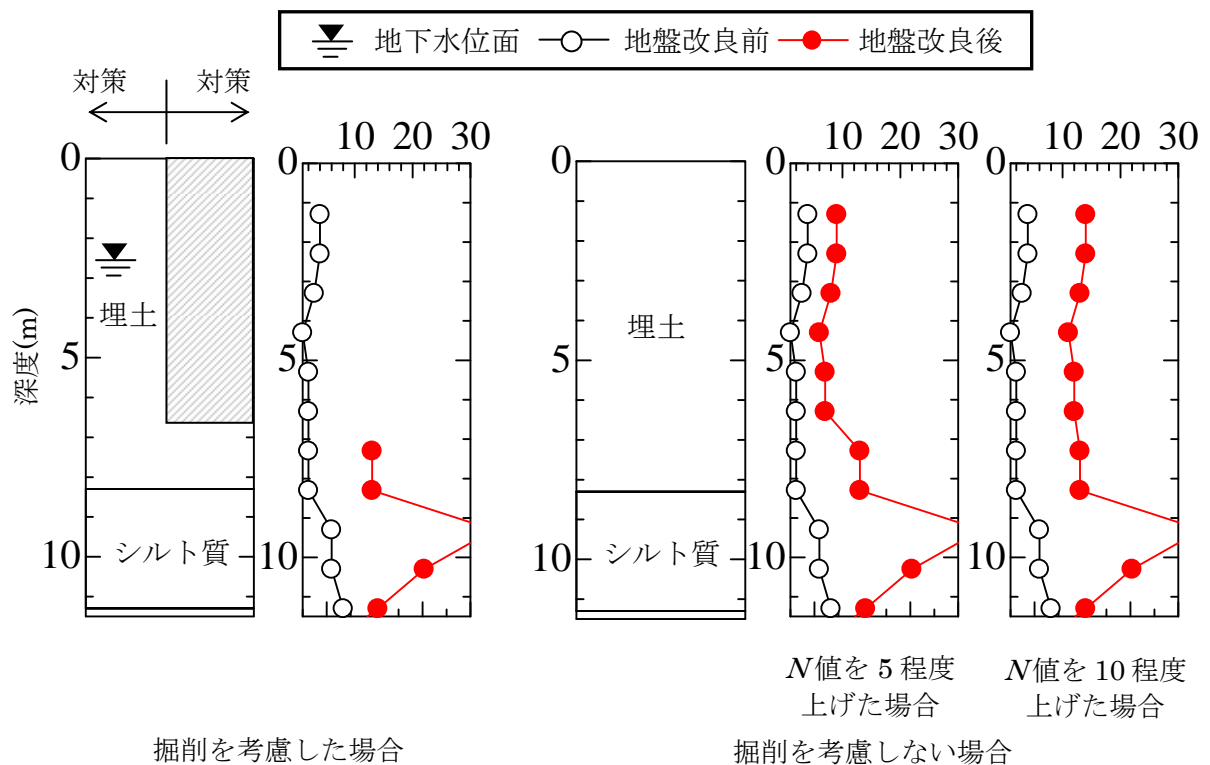


図 4.2.3 地盤条件および掘削範囲におけるN値の設定条件



### 4.2.2.3 液状化対策工の費用対効果の検討

#### a) 地盤の $N$ 値を 5 程度増加した場合

地盤改良により  $N$  値が 5 程度増加した場合の地盤改良前後の  $N$  値、液状化安全率  $F_L$  の深度分布を図 4.2.4 に示す<sup>4.2)</sup>。なお、同図では改良範囲のみを示している。表 4.2.6 には液状化対策前後における想定地盤に対する液状化判定結果として  $D_{cy}$  を示している。図 4.2.4、表 4.2.6 より、液状化対策前における想定地盤の液状化判定結果は損傷限界時および終局限界時においても表 4.2.3 の液状化対策後における要求性能を満たしていないことから、液状化対策の効果がみられなかった。

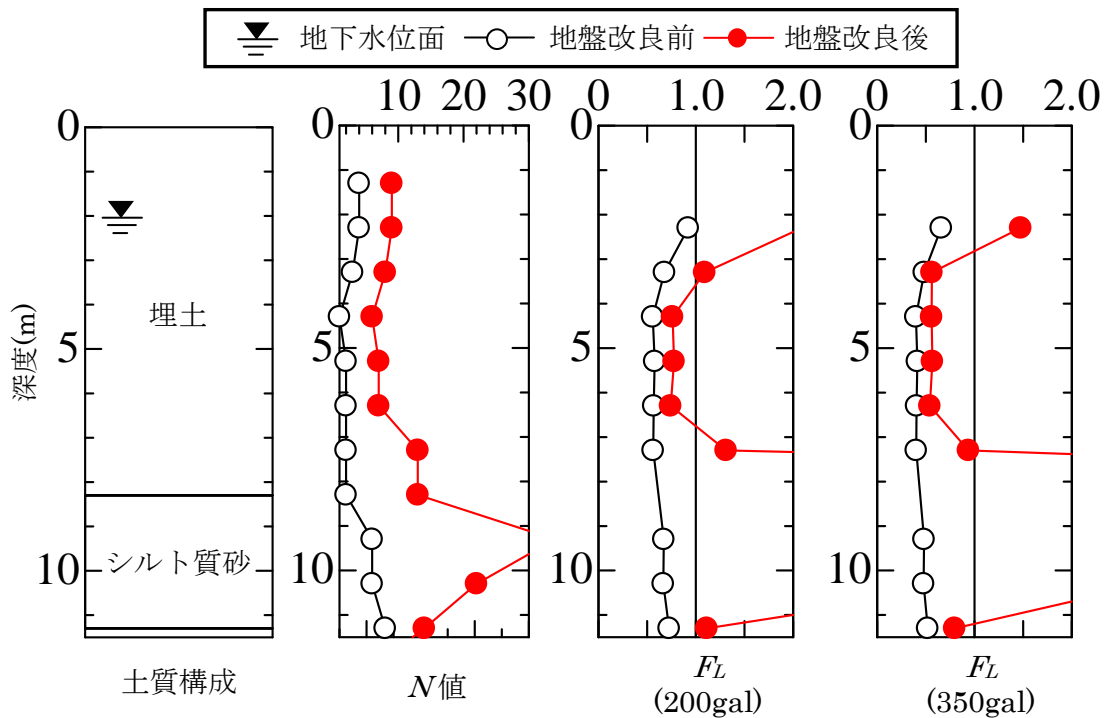


図 4.2.4 土質構成と液状化対策前後の  $N$  値、 $F_L$  の深度分布

表 4.2.6 液状化対策前後の  $D_{cy}$  の比較

	$D_{cy}$ (cm)	
	地盤改良前	損傷限界(200gal)
	終局限界(350gal)	24.7
地盤改良後	損傷限界(200gal)	3.5
	終局限界(350gal)	7.2

b) 地盤の  $N$  値を 10 程度増加した場合

地盤改良により  $N$  値が 10 程度増加した場合の江東区辰巳の土質構成と地盤改良前後の  $N$  値,  $F_L$  の深度分布を図 4.2.5 に示す<sup>4.2)</sup>。なお、同図では改良範囲のみを示している。表 4.2.7 には液状化対策前後における想定地盤に対する液状化判定結果として  $D_{cy}$  の値を示している。図 4.2.5、表 4.2.7 より、地盤改良前における想定地盤の液状化判定結果は損傷限界時に  $D_{cy}$  では液状化の程度が『中』程度、終局限界時には  $D_{cy}$  では液状化の程度が『大』程度であることが分かる。一方、改良後では損傷限界時において表 4.2.3 に示す①の要求性能を満足しており、終局限界時においても  $D_{cy}$  が 1.7cm の沈下量が生じると判定結果が得られているが表 4.2.3 に示す②の要求性能を満足していることが分かる。また、文献 4.5) に参考に想定地盤における液状化対策工費を算出すると 15000 円/m<sup>2</sup> 程度となり、建物の供用期間を 50 年とする

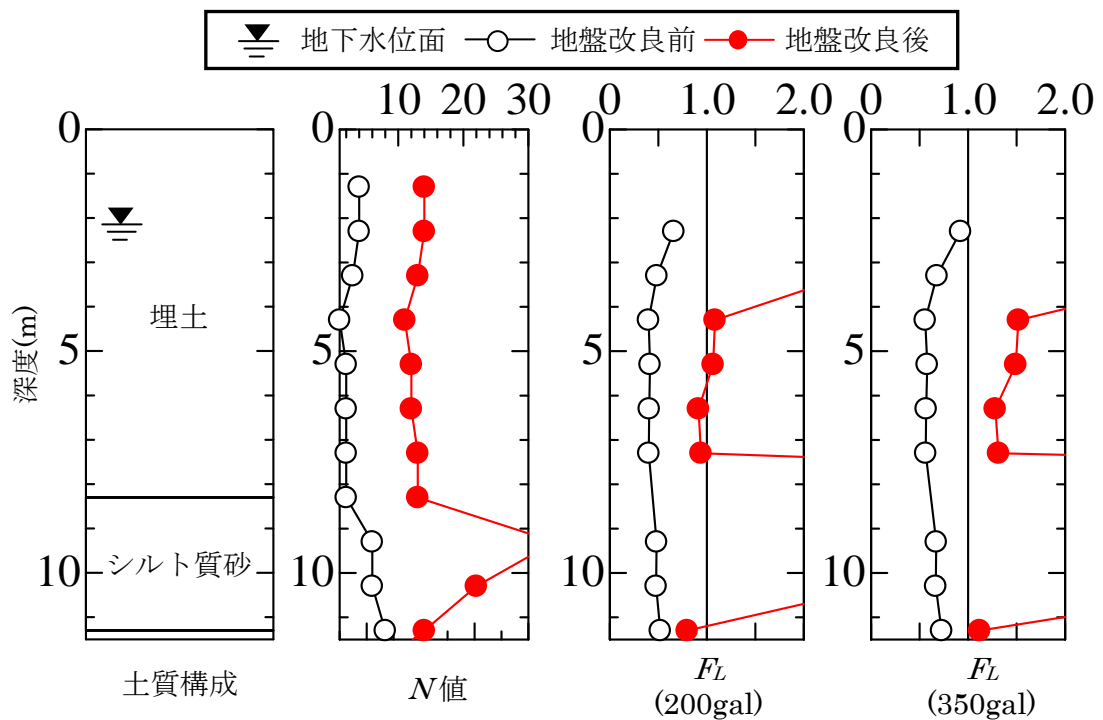


図 4.2.5 土質構成と液状化対策前後の  $N$  値,  $F_L$  の深度分布

表 4.2.7 液状化対策前後の  $D_{cy}$  の比較

	$D_{cy}$ (cm)	
	地盤改良前	損傷限界(200gal)
	終局限界(350gal)	24.7
地盤改良後	損傷限界(200gal)	0.0
	終局限界(350gal)	1.7

と、1年間当たりの液状化対策工の費用は300円/m<sup>2</sup>となる。一方、液状化対策を行わなかった場合の想定地盤における外構の補修費用は液状化判定結果より、損傷限界時には22000円/m<sup>2</sup>、終局限界時には24000円/m<sup>2</sup>と算出することができる。さらに、建物の供用期間を50年として、供用期間中に損傷限界時および終局限界時に相当する地震動が1度発生するという前提で1年間当たりの期待損失額を算出すると、それぞれ440円/m<sup>2</sup>と480円/m<sup>2</sup>となる。したがって、想定地盤における外構の補修費用は液状化対策工費より高くなることが分かる。以上のことより、本事例の想定地盤に対しては地盤改良を行った方が経済的に有利であると考えられる。

## 4.3 施設群に対する液状化による損失評価法の適用性

### 4.3.1 損失評価の概要

### 4.3.2 浦安市内の3地域における液状化に対する損失評価

本検討では地盤条件および液状化判定で設定する地表面最大加速度  $\alpha_{max}$  をパラメータとして、浦安市内の3地域を対象とした液状化に対するリスク評価を試みた。

#### 4.3.2.1 立地条件および建物条件

図 4.3.1 に本検討で対象とした地点を示す。また、対象施設は小学校を仮定している。浦安市は 1970 年代と 1980 年代に埋立てを行っており、本検討におけるパラメータの一つを地盤条件とするため、埋立ての有無と埋立て年代により検討地域を図 4.3.1 に示したような 3 地域に設定した。さらに、各地域において 10 箇所程度の柱状図を用いて液状化判定を行い、各液状化判定の結果を用いて液状化に対する損失評価を検討する。なお、2011 年東北地方太平洋沖地震により浦安市では B 地域および C 地域で顕著な液状化被害が生じた一方、A 地域における液状化被害は報告されていない<sup>4,6)</sup>。

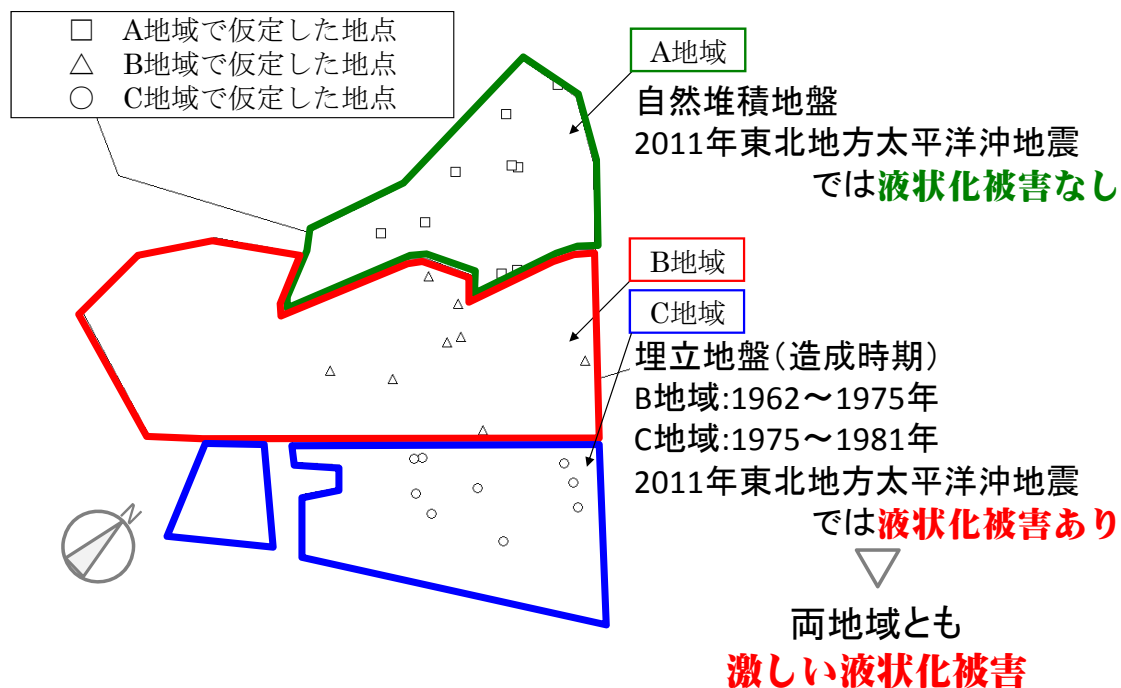


図 4.3.1 仮定した対象施設の地点および各地域の 2011 年東北地方太平洋沖地震による液状化被害の概要

#### 4.3.2.2 液状化判定

現行の液状化判定として日本建築学会基礎構造設計指針で示されている地表面動的水平変位  $D_{cy}$  を求める方法がある。本検討では浦安市内の公共施設の柱状図を用いて  $D_{cy}$  を算出し、液状化による地盤被害の損失を評価した。

#### 4.3.2.3 外力の設定

地表面動的水平変位  $D_{cy}$  を推定する液状化判定では 4.4 節で示したように外力として地表面最大加速度  $\alpha_{max}$  および地震のマグニチュード  $M$  の設定が必要である。本検討においては、 $\alpha_{max}$  をパラメータとし、マグニチュード  $M$  は建築基礎構造設計指針の値を参考に 7.5 とした。なお、同指針において、 $\alpha_{max}$  は液状化判定の終局限界検討用として 350gal が推奨されており、この値は「1995 年兵庫県南部地震などの際に、液状化した地盤上で観測された最大値にほぼ対応している」とされている。そこで、本検討では  $\alpha_{max}$  を 0gal から 450gal までの 25gal ごとに設定し、液状化判定を行った。

#### 4.3.2.4 液状化による損失の算出方法

液状化判定の結果に基づき、液状化の程度を表 3.2.1 に示した閾値で分類し、3.2 節で前述した各分類の確率分布モデルを用いて損失を算出する。本検討で用いる確率分布は対数正規分布とし、中央値（50%非超過確率値）と 90%値（90%非超過確率値）を算出した。さらに、算出された中央値と 90%値を小学校の建設を前提とした単位面積当たりにおける外構の再調達価格<sup>4.7)</sup>で除すことで液状化による損失率とした。

#### 4.3.2.5 液状化に対する損失評価の結果

図 4.3.2 に浦安市内の 3 地域における液状化による損失（中央値）を単位面積当たりにおける外構の再調達価格で除した液状化による損失率と地表面最大加速度  $\alpha_{max}$  の関係について、各地域の 10 施設の平均値を示す。同様に、図 4.3.3 には液状化による損失を 90%値にし

た場合の関係を示す。両図より、3地域間での比較では中央値、90%値ともに、A地域における損失が比較的小さく、C地域における損失が大きい。また、A地域の傾向に対し、B地域とC地域の傾向が似た傾向であり、C地域の損失率が若干高くなる傾向が見られた。これは、非埋立地と埋立地の違いや埋立て年代によるものと思われ、2011年東北地方太平洋沖地震により生じた液状化被害の様相との矛盾はないものと考えられる。一方、不動産の価値を評価する際に、地震による損失は1つの指標、要素となる。例えば、PMLの値が15%を超えるような場合、その施設は投資対象としてリスクが大きいと判断される。本検討で示した様な地域の液状化による損失評価を行うことで、建物のみでなく地盤の液状化を考慮した不動産投資のリスクの判断が行える可能性がある。

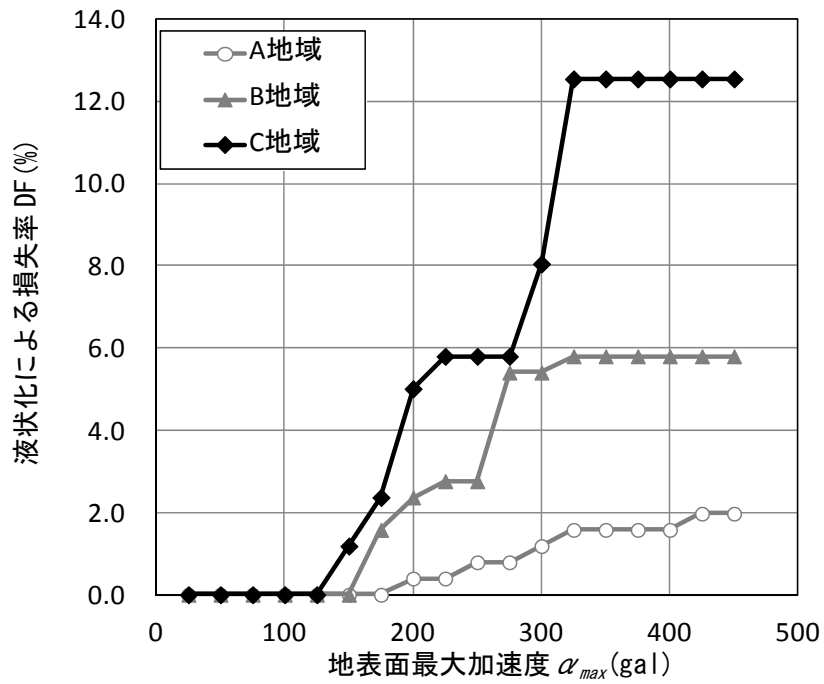


図 4.3.2 対象地域における地表面加速度  $\alpha_{max}$  と液状化による損失率(中央値)の関係

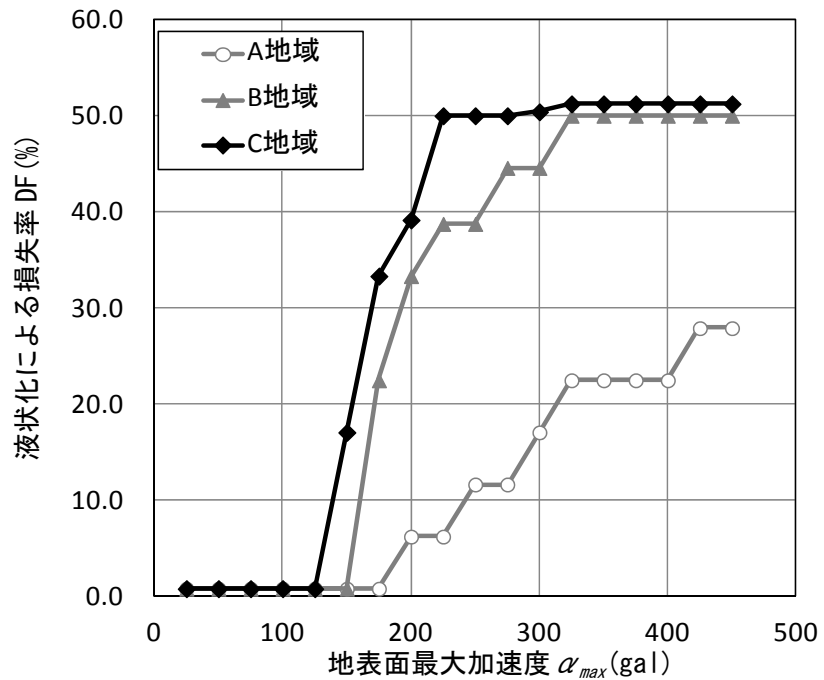


図 4.3.3 対象地域における地表面加速度  $\alpha_{max}$  と液状化による損失率(90%値)の関係

#### 4.4 本章のまとめ

本章では前章で提案した液状化による地盤被害の損失評価法を用いて、主に千葉県浦安市を対象に公共施設を仮定して損失評価を行った。以下に本論文のまとめを示す。

- 1) 前章で提案した液状化による地盤被害の損失評価法から得られる損失と液状化対策工の工費を比較し、液状化対策工の経済効果に関する検討方法の一例を示した。
- 2) 浦安市内において複数の公共施設を仮定して液状化による地盤被害の損失評価を行い、液状化による地盤被害の損失評価法の有用性を示した。



## －第4章の参考文献－

- 4.1) 安田進, 原田健二, 石川敬祐: 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害, 地盤工学ジャーナル, Vo.7, No.1, pp.103-115, 2012.3
- 4.2) 原田健二, 大林敦, 吉富宏紀: 建築物における締固め工法による液状化対策効果の検証, 基礎工 2012 年 12 月号, 2012.12
- 4.3) 清水友香子, 石田寛: 地震増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオの地震リスク評価手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.626, pp.511-518, 2008.4
- 4.4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, p.66, 2001.10
- 4.5) 地盤工学会 関東支部: 事業継続を可能とするための既存構造物周囲の地盤改良(補強)工法に関する研究委員会 調査報告書, pp.31-32, 2001.3
- 4.6) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会: 第2回浦安市液状化対策技術検討調査委員会 資料 3-3-3 建築物の被害状況の整理と要因分析, 2011.10
- 4.7) 財)建築保全センター: 平成 17 年度版建築物のライフサイクルコスト, pp.198-199, pp.272-273, 2005.9

## 第 5 章 結論

本研究は液状化による地盤被害の損失評価法の提案を目的とするもので、具体的な事例を把握するため 2011 年東北地方太平洋沖地震により大規模な液状化が生じた千葉県浦安市の公共施設を対象に、被害実態と補修に関する資料調査およびヒアリング調査を行った。液状化による地盤被害の損失として外構の補修費用に着目し、液状化程度と液状化による地盤被害の損失の関係について統計的検討を試みた。その結果、液状化による地盤被害の損失を確率変数とした累積相対度数分布において、液状化による地盤の実測沈下量と液状化程度の予測値である地表面動的水平変位  $D_{ey}$  および液状化指数  $P_L$  との適合度を検定するとともに、液状化による地盤被害の損失を算出するための損失関数を推定した。推定した損失関数を用いた液状化による地盤被害の損失の算定方法を示すとともに、液状化対策工の費用と予想される損失との関係や複数建物の液状化による地盤被害の損失を算出するケーススタディを行った。以下に本論文の要点を示す。

①外構被害が生じた施設の割合を地表面動的水平変位  $D_{ey}$  による液状化程度の閾値を参考として実測沈下量  $S$  に基づいて液状化程度の分類ごとに検討した。その結果、各分類において約 7 割の施設においてアプローチ・犬走り・舗装等の被害が見られた。また、敷地面積当たりにおける総補修費用の約 8 割が外構の補修費用であった。敷地面積当たりにおける外構の補修費用と敷地面積に対する建物面積の比率の回帰直線については負の相関が見られたものの相関係数が低いこと、建物外周面積当たりにおける外構の補修費用に杭基礎の種別に明確な差異が見られなかったこと、液状化による実測沈下量と建物外周面積当たりにおける外構の補修費用の回帰直線は正の相関が見られ敷地面積に対する建物面積の比率との回帰直線の相関係数より高い値を示した。

②①の結果から、各液状化程度における建物外周面積当たりの外構の補修費用について最尤法により対数正規分布モデルおよびガンマ分布モデルのパラメータを推定した。推定した各分布モデルのパラメータを用

いて K-S 検定により統計検定量を比較したところ、ガンマ分布モデルに比べ対数正規分布モデルの方がより適合していることが分かった。

③各公共施設の地表面動的水平変位  $D_{cy}$  および液状化指数  $P_L$  を算出し、②と同様に各液状化程度における建物外周面積当たりの外構の補修費用について確率分布モデルを示した。本論文で示した液状化程度のカテゴリでは  $D_{cy}$  によるカテゴリの方が  $P_L$  によるカテゴリより適合性が高いことが分かった。

④既往の液状化判定法を用いた液状化による地盤被害の損失評価法を示すとともに、本評価法を用いたケーススタディを行った。損傷限界時および終局限界時を想定した際の中央値および 90%非超過確率における外構の補修費用と液状化対策工として比較的用いられているサンドコンパクションパイル工法の工費と比較した。さらに、浦安市内の複数の公共施設を仮定した液状化による損失評価を行い、本論文で示した液状化被害の損失評価法の有用性を示した。

今後は、本論文で示した液状化地盤の損失評価法を一般化するために 2011 年東北地方太平洋沖地震以外の地震や他地域における液状化被害と損失に関するデータの蓄積や公共施設以外の用途種別の施設における液状化被害と損失の関係の把握を行う必要がある。また、本論文で対象としなかった上下水道などのライフラインに対する液状化による被害と補修費用の関係などについてもデータの蓄積を行うことで、実際の液状化被害に近い損失評価になることが考えられる。一方、本論文で示した液状化地盤の損失評価法から得られるリスク値については、従来の建築物を対象とした PML などと関連づけることで、本論文で示した様な損失評価の適用事例より有効な活用が望まれる。

## 謝 辞

本研究は、2011年東北地方太平洋沖地震による千葉県浦安市内の公共施設に生じた液状化被害についてまとめ、液状化による地盤被害の損失評価手法を提案したものです。

日本大学理工学部建築学科地盤基礎研究室の安達俊夫教授および山田雅一准教授には、筆者が大学4年生の時に研究室に配属されて以来、地盤基礎工学に関する学識について御指導、御鞭撻を頂くと共に、自由気ままな著者を温かく見守って頂きました。安達教授には博士論文の主査を務めて頂き、貴重なご意見、ご助言を賜りました。また、山田准教授にはこれまでの学生生活で多大なる御迷惑をお掛けし、お詫びの言葉も浮かばないくらいです。今後、もし研究などの面で御協力できることがあれば、いくらでもお申し付けください。

工学院大学の宮村正光教授には、筆者が修士課程の学生の頃から公私にわたりお世話になり、博士課程の2年生になってから始めた地形・地盤条件と事業継続性の関係に関する研究の頃から事業継続性やリスク評価の考え方を一から御指導いただきました。また、査読論文の審査の際にはご心労をお掛けしてしまったこととお詫びさせていただくとともに、宮村教授の温かい励ましにより、ここまで心が折れずに研究を継続できました。何とお礼を申し上げてよいのか、感謝の言葉もありません。

本学の岡田章教授、神田順特任教授には、御多忙の中、本博士論文の副査を担当していただき、大変ご迷惑をお掛け致しました。ここに、感謝の意を示させていただきます。また、本論文をまとめる際に先生方から賜りました貴重な御意見、御指摘は今後の研究活動に活かしていく所存です。

本研究を行うにあたり、浦安市内の液状化被害の被害調査にご協力頂いた浦安市役所の八田吉浩氏をはじめとする関係各位の皆様に御礼を申し上げます。

大林組の諏訪仁氏、不動テトラの原田健二氏、吉富宏紀氏には、本研究に対してリスク評価や地盤改良の観点から貴重な御意見を、また、大和ハウスの永雄健一氏には、本研究の根幹をなす確率論や査読論文の投稿先などについて、多くの御助言を賜りました。

鹿島建設の實松俊明氏、日本大学生産工学部の下村修一先生には、著者が修

士課程の学生になった頃から地盤工学、特に土圧に関連した分野について御指導いただきました。また、博士課程に進学してからは研究に関する御指摘や励ましを頂きました。心より感謝を申し上げます。また、立岡慎吾氏、細木敬祐氏、木原朋広氏、平真人氏、松原宗佑氏、田口智也氏、軽部宏紀氏、朝枝亮太氏をはじめとする本研究室の修了生および工藤諒太氏、矢部智久氏、山下哲平氏をはじめとする卒業生の皆様にはお会いするたびに研究に対する励ましを頂きました。松原氏、田口氏、さらに酒匂教明先生には、著者が大学4年生の時に行われた研究室の合宿において大学院への進学を熱心にお誘い頂きました。そのおかげでこれまでの間に修士論文、博士論文と論文をまとめることができました。また、卒業生の星野公男氏、杉山修平氏、谷口早紀氏、増田慧吾氏、日向野翔氏は、本研究および本研究に関連した内容を卒業研究としてまとめており、各研究で得られた知見が本論文に含まれております。簡単で申し訳ありませんが、各位に感謝の意を示させていただきます。

本研究室OBの新山龍氏とは同氏が4年生の時から地形・地盤条件とBC（事業継続性）の関係について共同で研究を行うようになり、その後、2011年東北地方太平洋沖地震が起きた際には浦安市や宮城県内の被害調査を共に行いました。本研究の一部は同氏の修士論文の内容が含まれており、修士論文をまとめる段階でかなりの負担をかけてしまったことをお詫びすると共に、心から感謝しております。

平成25年度の本研究室の大学院生である藤森圭祐氏、森垣大佳氏、道明裕毅氏、通山開氏とは筆者の学生時代最後の院生仲間であり、皆様のご支援、ご協力により、本論文がまとめられたこと、さらには楽しい学生生活で終わったことを感謝いたします。藤森氏および森垣氏はこれから社会人としての活躍を、道明氏、通山氏には残り1年となった大学院生生活を満喫する事を期待しております。また、通山氏には本研究をさらに発展させた『通山法』の提案を期待しております。

最後になってしまいましたが、これまでの間、学業に専念させてくれた両親、家族に感謝いたします。

平成26年2月14日

太田 宏