

建設技術者を目指す人のための 防災工学

安田 進 共著
石川 敬祐

コロナ社

まえがき

本書は、建設技術者を目指す大学生の方々が、防災工学を学ぶにあたって必要な災害に関する基礎的な知識から災害の予測・対策方法まで順を追って述べたものである。また、その中で各種の災害事例およびそれに対する復旧事例を多く示しており、自治体や民間企業の方々にも実務で参考にしていただけるようにしている。

地震、火山、豪雨、台風と自然災害に頻繁に見舞われる日本にあって、防災工学に関する知識は建設技術者を目指す者にとって不可欠であり、それを実社会に役立たせることが大切である。ところが、防災工学に関してまとめて書かれた本はこれまでほとんど見当たらない。その理由としては、防災工学と一口に言っても地震などの自然災害から工事中の事故といった人為災害まで、災害の種類が非常に多くて網羅できないことが挙げられる。また、防災の概念を知るだけでよいのか、それとも実務に役立つ専門的な内容とすべきなのか、といった選択も書き手はしないといけない。

そこで本書では、建設技術者を目指す方々や従事している方々を対象にし、これらの方々に大切な災害の種類を絞り、記述の内容およびレベルも概念的なものでなく実務的なものとして、以下のような特徴を持たすこととした。

- (1) 災害は自然災害と人為災害とに分けられるが、自然災害を対象にし、さらに、自治体の地域防災計画などで対象にしている主要な災害の、地震災害、風水害、火山災害に絞ることとした。
- (2) 各災害が発生するメカニズムを知ることが大切なので、まずその解説を行うこととした。
- (3) 過去から多くの災害に見舞われてきている日本では、地震や豪雨に対して安全なように構造物を設計し建設してきた。それにもかかわらず地震や豪雨時の構造物の被害があとを絶たない。この矛盾に答えるべく、従来の設計方法で想定していた災害レベルと実際に発生した災害のレベルの違いや、従来の設計で考慮されてこなかったことを説明するようにした。
- (4) 建設技術者は過去の被害事例をよく学んで、将来の災害に備えることが大切である。そこで本書では、災害の種類ごとに過去の代表的な災害事例を紹介することとした。その状況をわかりやすくするため、写真や図面を多く用いた。また、被災後につきの災害に備えて、どのように対策を施して復旧したのかも紹介することとした。

(5) 対策にはハードな対策とソフトな対策がある。例えば、豪雨時に土石流による住宅の被害が発生しそうな地区に対し、砂防ダムを建設して土石流の発生をくい止めるハードな対策を行うか、または、土石流が発生しかけたらすぐに避難できるシステムを備えておくソフトな対策を施すかといった選択がある。両者とも検討が必要であるが、前者のほうが根本的な対策のため、本書では前者を対象とすることとした。

以上のような考えのもと、五つの章に分けて説明していく。まず、1章では、耐震設計など構造物の設計方法が進んできているにもかかわらず、災害が発生し続けている背景を述べ、本書では主要な災害である地震災害、風水害、火山災害に絞る理由を述べる。2章では、三つの災害とも地盤の脆弱性に起因したものが最近目立ってきていることと、地盤の形成過程によって災害に対する地盤の強弱が大きく異なるので、地盤の種類に関する基礎知識を述べる。3章では、地震災害に対する防災のあり方を述べる。そのためには、地震が発生するメカニズムや、地震動が地表面まで伝わってくる間の増幅特性などの基礎を知らないといけないので、まず、この説明を行う。その後、強い揺れ、液状化、自然斜面や造成斜面の崩壊、断層、津波について、過去の地震時における被災事例と復旧方法、今後の予測・対策方法を述べる。4章では、風水害に対する防災のあり方に関し、まず、日本における降水の特徴を述べる。そして、土砂災害として斜面崩壊、土石流、地すべりを取り上げ、被災事例や復旧時の対策、今後の予測と対策に関して述べる。また、豪雨による氾濫として外水氾濫と内水氾濫を取り上げ、同様の説明を行う。5章では、火山災害に対し、まず火山が形成されるメカニズムや噴火の特徴などを述べる。そして、噴火や火砕流、降灰による被災事例を紹介し、火山災害に対する対策の現状を述べる。

上述したように、防災工学を扱った本は少ない。また、防災工学が扱うべき範囲は幅広い。その中で、建設技術者を目指す方々に対象を絞って本書を書いた。読者の方々のお役に立てば幸いである。なお、執筆にあたっては、吉田望 東北学院大学名誉教授、千葉達朗氏（アジア航測株式会社）、後藤聡 山梨大学准教授、中濃耕司氏（東亜コンサルタント株式会社）にお世話になった。感謝する次第である。

2018年11月

安田 進
石川 敬祐

目 次

1. 本書が対象とする災害

1.1 災害が発生し続けている背景	1
1.2 本書で対象とする災害	2
引用・参考文献	6

2. 地盤の種類とそこで発生する災害の特徴

2.1 最近の災害が地盤の脆弱性に起因したものが目立つ理由	7
2.2 地球の誕生と地質年代	8
2.3 低地の地盤	9
2.3.1 河川沿いに形成された低地	9
2.3.2 海岸沿いに形成された低地	14
2.3.3 台地を切り刻んで形成された低地	17
2.4 段丘・台地の地盤	18
2.5 山地・丘陵地の地盤	20
引用・参考文献	23

3. 地震災害

3.1 地震の発生と地震災害の分類	24
3.1.1 地震や火山の発生の源	24
3.1.2 震源断層と地表地震断層	27
3.1.3 震源から地表までの地震波の伝搬	29
3.1.4 地震による建造物の被害の種類	32
3.2 強い揺れによる被害	32
3.2.1 強い揺れによる被害の種類	32
3.2.2 強い揺れによる被害事例	33
3.2.3 強い揺れの予測と対策	38
3.3 地盤の液状化	42

3.3.1	液状化の発生およびそれにより被災するメカニズム	42
3.3.2	液状化による被災事例	44
3.3.3	液状化の予測と対策	54
3.4	自然斜面や造成斜面の崩壊	64
3.4.1	斜面崩壊の種類	64
3.4.2	斜面崩壊の事例	67
3.4.3	斜面崩壊の予測と対策	76
3.5	地表地震断層による被害	84
3.6	津波による被害	87
	引用・参考文献	91

4. 風 水 害

4.1	日本の降水の特徴と土砂災害、氾濫	93
4.2	土 砂 災 害	94
4.2.1	土砂災害の被害事例	94
4.2.2	土砂災害の予測と対策	103
4.3	氾 濫	109
4.3.1	氾濫の種類	109
4.3.2	外水氾濫の事例と対策	110
4.3.3	内水氾濫の事例と対策	117
	引用・参考文献	118

5. 火 山 災 害

5.1	火山災害の特徴	120
5.2	火山の噴火と構造、火山噴出物の種類	121
5.3	火山による被害および復旧・復興事例	125
5.3.1	三宅島の噴火	125
5.3.2	雲仙普賢岳の火砕流	127
5.3.3	富士山の噴火	129
5.4	火山災害に対する対策	131
	引用・参考文献	133

あ と が き	134
索 引	135

1. 本書が対象とする災害

構造物を建設するにあたっては、地震や降雨の影響を考慮して設計が行われている。それでも、大地震や豪雨などのたびに災害が発生してきている。これは、設定されているレベル以上の地震などが襲ってきているなどの理由があり、補強などを行って未然に被害を防ぐ必要がある。災害が発生するか否かは、地震などの誘因と地盤などの脆弱性に影響される。自然災害には地震、火山、降雨、降雪などがあり、また、人為災害として火災や建設工事中の災害、地盤沈下などがある。

本書では、地震災害、風水害、火山災害を扱う。

1.1 災害が発生し続けている背景

2011年に発生した東日本大震災は、強い地震動そのものによる構造物の被害に加えて、**図 1.1**に示すように、巨大な津波による甚大な被害を与えた。2015年の台風18号では、**図 1.2**に示すように、茨城県の鬼怒川の堤防が決壊し、広い範囲で浸水被害が発生した。このように、地震や豪雨のたびに種々の災害が発生してきているが、なにも対策を施さないでいて災害を受けているのではない。特に、地震活動が活発で降水量も多く災害が発生しやすいわが国では、昔から災害を防ぐための種々の措置を施してきた。地震力を考慮して構造物を設計し、降水時の河川流量を推定して河川堤防の高さを確保してきた。

それでも災害は防ぎきれていないし、逆に最近災害が増えている印象さえも受ける。その理由としては、以下のようなものが挙げられよう。



図 1.1 津波による被害（2011年東日本大震災，宮城県気仙沼市）



図 1.2 台風による豪雨で決壊した堤防
(2015 年, 茨城県の鬼怒川左岸堤防)

(1) **過去を上回る地震・降雨** 地震や降雨に対する構造物の設計にあたっては、過去の災害事例をもとに地震力の強さ、降水量などを設定して設計することが行われているが、それらのレベル以上の地震力や降水量などが加わることもあるため。

(2) **想定の甘さ** 重要度が低いとみなされている構造物では、そもそも設計にあたって設定している地震力や降雨量のレベルが低いため。

(3) **経年劣化** 構造物の劣化や自然斜面の風化など、年月とともに強度が低下し設計時に比べて耐力が低下しているものが存在するため。

構造物を新しく建設する場合は、これらのことを考慮して、例えば**所要安全率**を少し大きくしておくといった、余裕を持たせた設計をすれば災害は防げることになる。ところが、これまでに建設してきた多くの既設構造物では、その余裕がないものが多い。このため補強を行って未然に被害を受けないようにしていく必要があるが、そのためにはばく大な費用がかかるので補強されないままになっている。その顕著なものとして、斜面崩壊対策がある。山地が7割を占め、地震や豪雨で被害を受けやすい斜面が至るところにあるわが国では、危険な斜面のすべてに対策を施すのは到底不可能である。したがって、補強といったハードな対策だけでなく、災害時の安全な避難などソフトの対策も含めた総合的な災害対策を施していく必要がある。

1.2 本書で対象とする災害

地震や豪雨のときに災害が発生するか否かは、それらの誘因（トリガー）、つまり地震や豪雨そのものの強さに大きく左右されるが、災害を受けやすい地盤や生活環境にあるかどうかといった災害に対する脆弱性によっても違ってくる。誘因のおもなものを**自然災害**と**人為災害**とに分けて列挙してみると表 1.1 となる。ただし、分類の仕方には種々あるので、自然災害は日本での専門の研究所である独立行政法人防災科学技術研究所（2015 年から国立

表 1.1 災害の種類

(a) 自然災害 ((独)防災科学技術研究所の分類による)	(b) 人為災害
(1) 地震・火山災害	(1) 火災
①地震 (地盤震動, 液状化, 斜面崩壊, 岩層なだれ, 津波, 地震火災)	(2) 工事中の沈下, 陥没など
②噴火 (降灰, 噴石, 火山ガス, 溶岩流, 火砕流, 泥流, 山体崩壊, 岩層なだれ, 津波, 地震)	(3) 地盤沈下
(2) 気象災害	(4) 油・ガス漏れ
①雨 (河川洪水, 内水氾濫, 斜面崩壊, 土石流, (地すべり))	
②雪 (なだれ, 降積雪, 降雹, 霜)	
③風 (強風, たつ巻, 高潮, 波浪, (海岸侵食))	
④雷 (落雷, (森林火災))	
⑤気候 (干ばつ, 冷夏)	

研究開発法人)の分類方法^{1)†}を転用している。この表に従って過去の災害事例や対策事例の概要を示してみる。

わが国では太平洋プレートやフィリピン海プレート (図 3.2 参照) により強い力が加わっているため、地震活動が活発であり、自然災害のうち**地震災害**がまず深刻な災害として挙げられる。河川や海岸沿いに軟弱な地盤が多く形成されているため、地震時に**揺れ**や**液状化**などによる被害を受けやすくなっている。図 1.3 に 1964 年新潟地震の際に液状化によって沈下・傾斜したアパートを示す。この地震を契機に液状化対策方法が開発され、最近では対策を施して構造物を建設するようになってきている。しかし、2011 年東日本大震災では約 27 000 棟に及ぶ戸建て住宅が液状化による沈下・傾斜といった被害を受けた。これは中・高層建物では液状化を考慮した設計が行われるようになっていたのにもかかわらず、戸建て住宅ではそうでなかったためである。このように、わが国では毎年のように各地で大なり小な

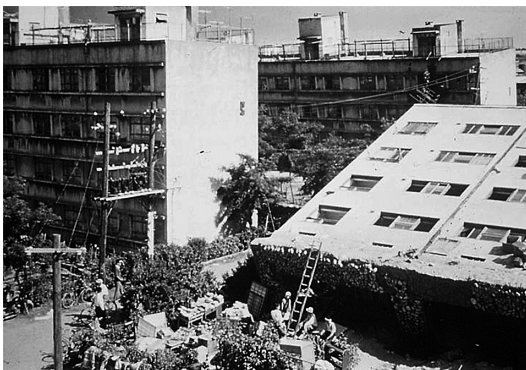


図 1.3 液状化により沈下・傾斜したアパート (1964 年新潟地震, 渡辺隆博士提供)

† 肩付きの数字は、章末の引用・参考文献を表す。

4 1. 本書が対象とする災害

りの地震災害が発生してきている。一方、世界を見渡すと地震活動が低い国が多く、例えば、日本と同じアジアでもシンガポールでは地震による被害をあまり憂慮していない。

わが国には火山が多く分布する。火山は、地球内部のマグマが上がってきている生き物といってよく、ときどき大災害を引き起こす。図 1.4 に 1991 年に雲仙普賢岳で発生した火砕流によって焼けただれた学校を示す。このときは、普賢岳に形成された溶岩ドームが突然崩れて火砕流を引き起こした。そのような被害が発生することが予想されておらず、報道関係の方々が映像を撮っていたところを襲ったため、43 名もの犠牲者を出してしまった。火山が活動する周期は例えば数百年と長いため、災害の予測をするのが難しく、対策もとれないのが現状である。富士山は 1707 年に噴火（宝永の噴火）し、周辺の小山町などに甚大な被害を与えただけでなく、江戸まで火山灰が飛んできて数 cm も積もった。以後 300 年経ってきており、再度噴火する危険性を有しているといわれている。仮に、現在の東京で火山灰が数 cm 積もると交通機能は麻痺し、ライフラインの機能不全も生じ、その結果として生活ができなくなることが危惧されている。ただし、それに対する対策はまだ考えられていない。また、火山の斜面はもろいので、地震や豪雨でしばしば崩壊が発生している。



図 1.4 火砕流により焼けただれた学校
(1991 年、雲仙普賢岳)

降水量が多く台風にもしばしば襲われるわが国では、河川の氾濫や斜面崩壊などの風水害も毎年のように発生してきている。山地が多く斜面が急峻なことや斜面の風化も進んでいることも、風水害を発生しやすくしている要因である。図 1.5 に 2014 年に広島市を襲った豪雨によって発生した土砂災害を示す。背後の山は急峻で、おもに花崗岩で形成され斜面表層の風化が進んでいたところに豪雨が襲い沢沿いに土石流が発生した。沢の出口に住宅地が開発されていたことが、悲惨な被害をもたらした。わが国では昭和 30 年代から都市の近郊に住宅地が多く開発されてきたが、災害の発生をあまり考慮せずに開発されてきているところが随所であり、今後の豪雨や地震による被害が危惧される場所である。

わが国の国土は南北に長いので、北部では冬に雪が多く降る。このため、毎年のように平地で交通障害が発生し、さらに山地では雪崩が発生する。また、新潟県や長野県などでは雪



図 1.5 豪雨で発生した土石流によって被災した住宅地（2014年、広島市）

融け時期に地すべりが毎年のように発生する。

以上、国内を対象にして主要な自然災害を挙げてきたが、国外を見渡すと、竜巻、干ばつ、自然火災、塩害といったものもある。

一方、人為災害としてはまず火災が挙げられる。個々の不注意によって発生した火災の延焼を防ぐため、耐火建物の建設を推進し、防火帯を設けるなど対策が進んでいる。ただし、1923年関東地震や1995年阪神・淡路大震災で発生したような、大地震によって多くの箇所でも火災が発生した場合の対策はまだ遅れている。また、海岸では2011年東日本大震災で発生したような津波火災や、2016年新潟県糸魚川市で発生した強風による延焼に対する対策も必要である。

建設工事中に発生する事故も、減ってきたとはいえ時折発生するので注意が必要である。最近でも、2016年に博多駅近くの地下鉄の工事中に大規模な陥没事故が発生した。このように、地盤を掘削しているときの事故が目立っている。

東京や大阪の低地では明治時代の末期ごろから地盤が徐々に沈下する現象が発生し、東京都江東区では4.5mもの沈下量に達した。当初はその原因がわからなかったが、地下水の汲み上げによる軟弱粘性土層の圧密に起因することがわかってきた。そのため、昭和30年代後半に地下水の汲み上げが規制され沈下は止まったが、図1.6に示すように、それまでに東京低地では124km²に及ぶゼロメートル地帯（満潮になると水面が地表面より高くなる地帯）が形成されてしまった。この地帯は堤防や護岸によって浸水を防いでいるが、万一地震で壊れたり、気候変動や気象条件によりそこを越える高潮などが生じた場合には、水が流れ込んで水害が発生する危険性も有している。

以上のほか、油漏れやガス漏れなど、多種多様な人為災害がある。

このように災害の種類は多種多様であり、それぞれに被災原因、対策方法、対策の現状が異なり、本書ですべてを扱うことはできない。東京都の地域防災計画では、震災編、風水害編、火山編、大規模事故編、原子力災害編と分けて計画が示されているので、本書ではこの

あ と が き

建設技術者は、防災工学を習得するにあたって過去の被害事例をよく学び、将来の災害に備える必要があります。ただし、“百聞は一見に如かず”。災害の現場を体験していただくことも大切です。ただし、その際いくつかの点に留意が必要です。

まず、現地踏査に向かう前に、“地形や地盤条件、気象条件、過去の災害事例”の概略について資料調査を行っておく必要があります。甚大な自然災害が発生すると、航空機による空中写真や人工衛星の合成開口レーダーによる地盤変状の分析が関係機関で行われ公開されるので、これらのデータを活用すると広域的な災害状況をいち早く確認することができるようになります。

さらに、今後はSNSなどのリアルタイムの情報も有用なデータとなることが考えられ、既往資料（アナログ）～最新の技術（デジタル）を駆使して、幅広い情報を集約することも必要になるでしょう。つぎに、現地踏査を行ううえで最も注意しなければいけないのは“人命救助や復旧・復興”が最優先であり、被災された方々に不愉快な思いをさせるような現地調査は慎むことが大切です。また、災害の現場には危険がつきまといまいますので、安全性に十分注意していただきたいと思います。

2018年11月

安田 進
石川 敬祐

索引

【う】	埋立地 14	自然堤防地帯 9	天然ダム 68, 99
【え】	液状化 14, 42, 44	七号地層 10	【と】
——に対する安全率 56	液状化危険度マップ 57	斜面崩壊 67	土砂災害 94
液状化指数 56	越水 112	斜面保護工 106	土砂災害警戒区域 104
【か】		シラス台地 20	土砂災害特別警戒区域 104
海岸段丘 18		人為災害 2	土石流 94, 96
海溝 24		震央 30	【な】
外水氾濫 13, 110		震源域 29	内水氾濫 13, 117
海嶺 24		震源断層 27	流れ盤 22
崖崩れ 94		浸透 112	【は】
火砕流 20		震度階 31	ハザードマップ 39, 131
火砕流堆積物 124		【す】	【ふ】
火山碎屑岩 123		スレーキング 73	風化 22
河成段丘面 18		【せ】	プレートテクトニクス 24
活火山 131		正断層 27	【ま】
軽石 124		性能設計 59	マグニチュード 31
カルデラ 122		ゼロメートル地帯 5	マグマ溜まり 120
【き】		洗掘 112	【や】
逆断層 27		線状降水帯 111	山崩れ 94
急傾斜地の崩壊 94		扇状地 9	【ゆ】
【こ】		せん断波 30	遊水地 114
後背湿地 9		【そ】	有楽町層 10
【さ】		疎密波 30	揺れ 38
三角州地帯 9		【た】	【よ】
【し】		谷底低地 17	抑止工 105
地震応答解析 39		断層 20	抑制工 105
地震基盤 30		【ち】	横ずれ断層 27
地すべり 94, 107		地質区分 7	【り】
自然災害 2		地表地震断層 27, 84	流動 51
自然堤防 9		沖積層 12	
		【つ】	
		津波 87	
		【て】	
		抵抗率 56	



【N】	【P】	【S】
N 値 45	P 波 30	S 波 30

— 著者略歴 —

安田 進 (やすだ すすむ)

1970年 九州工業大学開発土木工学科卒業
1972年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了
(土木工学専攻)
1975年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
(土木工学専攻), 工学博士
1975年 基礎地盤コンサルタンツ株式会社入社
1986年 九州工業大学助教授
1994年 東京電機大学教授
2016年 東京電機大学副学長
2018年 東京電機大学名誉教授
2018年 東京電機大学プロジェクト研究教授
現在に至る

石川 敬祐 (いしかわ けいすけ)

2003年 東京電機大学理工学部建設環境工学科卒業
2005年 東京電機大学大学院理工学研究科修士課程修了
(建設工学専攻)
2005年 基礎地盤コンサルタンツ株式会社入社
2011年 東京電機大学助手
2014年 博士(工学)(東京電機大学)
2014年 東京電機大学助教
2018年 東京電機大学准教授
現在に至る

建設技術者を目指す人のための防災工学

Disaster Prevention Engineering for Person Aiming to Become Construction Engineers

© Susumu Yasuda, Keisuke Ishikawa 2019

2019年1月11日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 安田 進
石川 敬祐
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 壮光舎印刷株式会社
製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-05263-3 C3051 Printed in Japan

(大井)



＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。