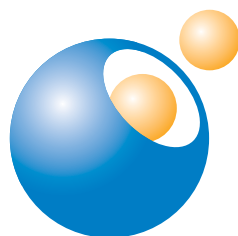


地震時における地盤災害の課題と対策 2011 年東日本大震災の教訓と提言 (第一次)



公益社団法人 **地盤工学会**

2011 年 7 月

公益社団法人 地盤工学会

平成 23 年度 学会提言の検証と評価に関する委員会

東京都文京区千石四丁目 38 番 2 号

TEL: 03-3946-8677 FAX: 03-3946-8678 jgs@jiban.or.jp

<http://www.jiban.or.jp/>

まえがき

地盤工学会の対応

2011年3月11日に発生したM9.0の我が国史上最大の東日本大震災に際して、地盤工学会は地震発生当初から、災害連絡会議メンバーによる初動調査を始めるとともに、震災1週間目の3月18日に、震災対応として以下の方針を決定した。

- (1) 安否確認、会長メッセージ
- (2) 被災地支援：寄付金募集、調査と復旧・復興に対する支援要請への対応
- (3) 調査：初動調査、一次調査団派遣、二次調査団派遣
- (4) 研究：
- (5) 報告・広報：一次報告、二次報告、三次報告、最終報告
- (6) 提言：一次提言、二次提言
- (7) 学会機能のBCP策定と実施

上記方針に従い、4ヶ月経過した現在までに、ホームページ立上げ（3月18日）、第一回調査報告会（4月11日）、プロフェッショナルボランティア制度の立上げ・登録開始（4月1日）、国際地盤工学会アジア地域会議特別報告（5月24日）、地盤工学会誌に調査報告掲載開始（6月号から）、提言案発表（7月1日）、日韓地盤工学ワークショップで震災報告（7月6日）、地盤工学研究発表会にて震災報告および提言案発表（7月7日）を行い、現在、書籍「関東の地盤」増刷後被災自治体への寄贈準備、研究課題の抽出、国自治体への専門家派遣および調査検討の受託等を行っている。今後、12月に日印ワークショップ、国際地盤工学会を通じた地盤防災の重要性に関する国連へのアピール等を計画中である。

東日本大震災が提起したこと

- (a) **海溝型地震の怖さ**：阪神淡路大震災のような内陸活断層型地震の震災とは異なり、今回の地震は、希少頻度の大規模かつ長時間震動が継続したことに加えて余震が継続し、広域多所で被害が発生し、復旧・復興の速度を遅らせている。さらに地盤の沈降という地殻変動を伴い通常の工学的対応のレベルを超えている。さらに津波被害との複合災害；地盤汚染、塩害、災害廃棄物の処理等という未経験の規模の対応に迫られている。
- (b) **公共構造物の安全性レベルと私有財産の安全性レベルの落差**：最新の技術基準に準拠して設計された多くの公共構造物の被害は皆無かあっても軽微で、我が国の耐震技術の有効性が確認される一方、液状化、造成宅地被害など戸建て住宅等の私有財産の安全性レベルの低さと社会システムの不備が顕在化した。
- (c) **システムの機能障害とBCP(事業継続計画)の重要性**：鉄道、産業施設等では、主要構造に機能上の被害がない場合でも付帯設備の被害によってシステム全体の機能障害が浮き彫りになり、システム安全性・事業継続性(BCP)の視点の重要性が確認された。
- (d) **統一的・総合的な復旧・復興政策の実行と地方自治体の技術力強化**：震災復興・放射線被害対策等においては国土交通省、農林水産省、経済産業省、環境省、文部科学省、厚生労働省等多くの省庁が関係しており、また国・県・市町村レベルの違いによる縦割り行政の弊害も多く見られた。そのような困難の中、6月20日、復興基本法が成立し、今後は統一的・総合的な政策の力強い実

施が求められる。一方、自治体の人材や技術力が不足してきており、技術者不足による復興の遅れがたいへん危惧される。将来に亘って防災・減災、調査・設計・建設・維持管理の指導に適切に対応ができる技術系職員の育成が不可避である。

- (e) **法体系の整備**：過去の災害経験は、迅速なる防災関連法令の整備を促してきた。建築関係法令や土地利用制限法令の整備とともに、持続的に安全な社会環境整備を保証する法的整備が望まれる。
- (f) **産業構造・国土構造の顕在化と変化の契機**：世界的規模で極度に分業化して進展してきた現実の産業構造とグローバル・ネットワークの脆弱性が顕在化した。今回の被災規模の大きさと復旧の遅さは、製造企業の海外進出機会促進と産業空洞化の契機ともなる可能性がある。

上記のような認識を共有しつつ、現段階で地盤工学からの社会的貢献の一部として提言（一次提言）を取りまとめる作業を3月末から行ってきた。現在まで地盤工学会では、地震および洪水に関する地盤災害の低減のための提言を2009年に公表してきた。発表後2年後に発生した今回の大震災の実態を踏まえ、2009年度の提言を検証しつつ新たな災害類型を含め、教訓を第一次の提言として取りまとめた。

なお、2011年7月1日に素案を公開しパブリックコメントを募集してから、多くの貴重な御意見を頂いた。ここに、篤く御礼を申し上げます。その御趣旨の殆どは、今回の教訓と提言に反映させた。しかし、以下の内容の御意見は、この第一次の提言に十分に反映させるためには時間が掛る一方で、この教訓と提言は速やかに出版して現在進行中の復旧・復興の実施計画の策定、設計法の見直し、防災・減災事業に参考にして頂く必要があることから、2011年度末を目標に出版する予定の最終版に反映させて頂くことにした。このことを、御了承願いたい。

- ・盛土を含む土構造物の崩壊、地盤の液状化や津波による防波堤・防潮堤などの崩壊などの様々な地盤災害の事例に対する地盤工学的なメカニズムの詳細な検討と理論的説明
- ・個々の被災事例に対する復旧法・対策工法の具体的で詳細な説明と提案
- ・見解が分かれる防災・減災の方法論

今回の教訓と提言の出版や地震災害の調査・研究等の地盤工学会の諸活動には、以下の諸機関および多数の会員から多大なる御支援を頂いています。地盤工学会を代表して、心より感謝の意を表します。

- ・(財)港湾空港建設技術サービスセンター
- ・(財)沿岸技術研究センター
- ・(社)近畿建設協会
- ・(社)中部建設協会
- ・Korean Geotechnical Society
- ・ハットリング工法研究会
- ・(社)鋼管杭・鋼矢板技術協会

2011年7月
地盤工学会会長 日下部 治

目次

1. 序論	1
2. 東日本大震災のインパクト	4
2.1 東日本大震災までの経緯	4
2.2 東日本大震災からの教訓	5
2.3 東日本大震災の復旧・復興と防災・減災	7
2.4 地盤工学会としての対応	13
3. 今回の地盤被害の特徴・課題と提言	14
3.1 従来想定され、対策が一定の効果があった事例	14
3.1.1 地盤の液状化	14
3.1.2 鉄道・道路	18
3.1.3 補強土構造物	19
3.1.4 高さ 15m 以上のダム	19
3.2 従来想定が無いか不十分であり、提言も無いか不十分であった事例	20
3.2.1 巨大津波	21
3.2.2 地震動	26
3.2.3 広域多所災害	26
3.2.4 谷埋め盛土・若年埋立て地の個人所有の戸建て住宅等の被害	28
1) 東日本大震災までの経緯	28
2) 谷埋め盛土宅地	29
3) 若年埋立て地の戸建て住宅	32
4) 地盤災害による戸建て住宅の被害を防ぐための提言	35
5) 下水道	38
6) 地盤液状化による道路面の変状	39
3.2.5 機能を完全に喪失する崩壊プロセスの想定と要求性能の設定の課題	39
3.2.6 付帯設備の地盤災害によるシステムの機能障害	42
3.2.7 広域な地盤沈降と地盤沈下	43
3.2.8 災害廃棄物、津波堆積物、塩害、放射能汚染土壌への対処	47
1) 災害廃棄物や津波堆積物の安全かつ効率的な処理と資源への再生	48
2) 地盤環境影響の評価と適切な対策	50
3) 地震・津波による廃棄物処理施設への影響	51
4) 農地の塩害	51
5) 放射能汚染土壌	51

6) 災害対策井戸	52
3.3 現行基準を満足しない既存土構造物と未対応の自然斜面 の強化復旧、耐震診断・耐震補強の課題	53
3.3.1 現行基準を満足しない土構造物での課題と提言	53
3.3.2 崩壊した場合の社会的影響が大きな虞がある未対応の自然斜面・切土斜面	57
4. 今後の検討・研究課題	59
4.1 技術の普及の課題	59
4.2 技術開発の課題	59
4.3 今後の課題	60

平成 23 年度 学会提言の検証と評価に関する委員会

委員長	日下部 治	地盤工学会会長 茨城工業高等専門学校
副委員長	龍岡 文夫	東京理科大学理工学部 土木工学科
アドバイザー	沖村 孝	(財)建設工学研究所
アドバイザー	善 功企	九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門
アドバイザー	宇野 尚雄	(株)ニュージェック
幹事長	末岡 徹	大成建設(株)技術センター
幹事	風間 基樹	東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
幹事	勝見 武	京都大学大学院地球環境学学
幹事	金谷 守	(財)電力中央研究所地球工学研究所
幹事	古関 潤一	東京大学生産技術研究所人間・社会系部門
幹事	安田 進	東京電機大学理工学部建築・都市環境学系
幹事	吉田 信之	神戸大学都市安全研究センター
委員	谷 和夫	横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院
委員	東畑 郁生	東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
委員	小高 猛司	名城大学理工学部建設システム工学科
委員	堀越 研一	大成建設(株)技術センター土木技術研究所 地盤・岩盤研究室
委員	吉田 望	東北学院大学工学部環境土木工学科
委員	小濱 英司	(独)港湾空港技術研究所地盤・構造部 耐震構造研究チーム
委員	渦岡 良介	徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
委員	若井 明彦	群馬大学工学部建設工学科
委員	佐藤 真吾	(株)復建技術コンサルタント計画部環境課宅地災害 復旧支援プロジェクトチーム
委員	松下 克也	(株)ミサワホーム総合研究所技術開発部構造研究室
委員	遠藤 和人	(独)国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター 廃棄物適正処理処分研究室
委員	保高 徹生	(独)産業総合技術研究所地圏資源環境研究部門 地 圏環境リスク研究グループ
委員	今西 肇	東北工業大学工学部都市マネジメント学科
委員	河井 正	(財)電力中央研究所地球工学研究所地震工学領域
委員	小林 晃	関西大学環境都市工学部都市システム工学科

委員	毛利 栄征	(独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所 施設資源部土質研究室
委員	高橋 章浩	東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻
委員	志村 敦	(財)阪神高速道路管理技術センター企画研究部
委員	石原 雅規	(独)土木研究所 つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム
委員	神田 政幸	公益財団法人鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
委員	佐々木 哲也	(独)土木研究所 つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム
協力者	横田 敏宏	国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究室

1. 序論

2011年3月11日東日本大震災は、戦後最大の震災であり、先進国として日本の最大の震災である。この地震は、海溝型大規模地震であり、主要動が長時間継続し、被害が広範囲で非常に多くの場所で生じ、地震動被害と津波被害が複合するなど、震災の規模・内容は内陸型活断層地震とは大きく異なっていた。また、耐震技術・防災システムが機能して震災を抑制した側面もあるが、巨大津波は防波堤・防潮堤では不十分にしか、あるいは部分的にしか防御できず、各地で海岸沿いの市街地は津波に飲み込まれ死者は多数に及んだ。また、福島第1原子力発電所をはじめ、多数の漁業施設、火力発電所を含む各種産業施設、交通・流通施設、宅地と戸建て住宅、上下水道等のライフライン、広大な農地が甚大な被害を受けた。同時に広域な地盤沈降と地盤沈下および巨大津波に伴い、農地塩害、津波堆積物、放射能汚染土壌、災害廃棄物等の諸問題も生じた。

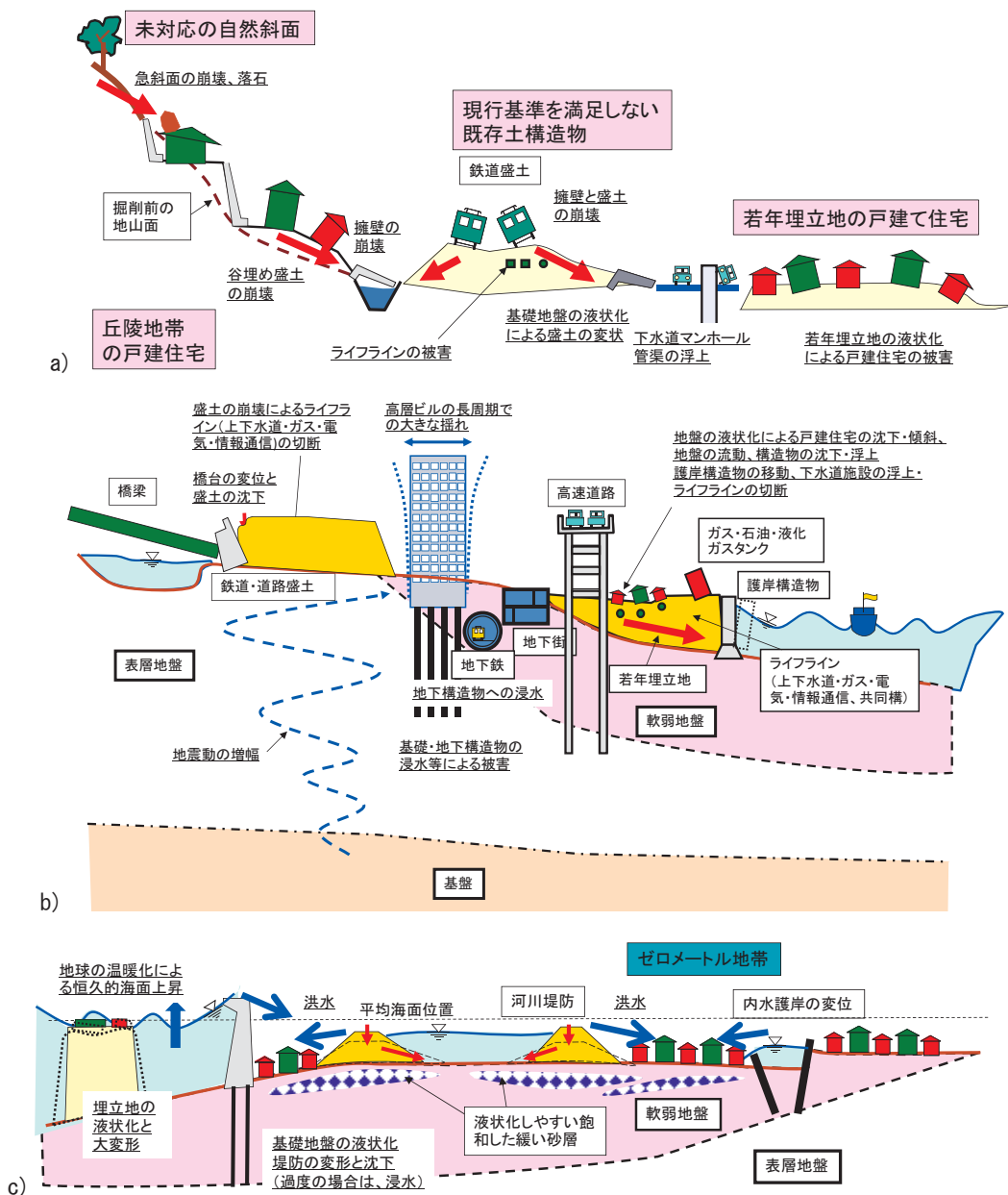


図 1-1 地盤被害の一般的な説明図

今回の震災でも、各種の地盤災害が被害を深刻化させた（図 1-1a, b, c）。まず、盛土・擁壁等の土構造物は、廉価で短期間に造成可能な場合が多いこと、トンネル・斜面切土などの掘削工事とバランスした盛土工事は経済的で自然環境に与える影響が小さくなること、他の人工構造物と比較して耐久性、修復性が優れていることなどから、古来膨大な量が建設されてきて、将来も建設される。しかし、建設技術と社会の安全性と機能性に対する要求レベルは常に進展してきていることから、今日、膨大な数の「現行基準を満足しない既存土構造物」¹⁾と「未対応の自然地盤・斜面」²⁾が存在している。今回の地震でも多くが被災し、社会に深刻な被害を与えた。

注1) 現行基準を満足しない既存土構造物： 基本的に旧技術・旧基準で建設されたものであり、現行の技術基準で要求する性能を満足しない既存の道路・鉄道・宅地・ため池堤体などの盛土・擁壁等の土構造物、河川・海岸堤防、埋立て地、下水道等のマンホール・管渠施設、農業用パイプライン等の地下埋設構造物などである。現実のプロセスでは、現行の技術基準で要求する性能を満足しない虞がある土構造物を耐震診断し、その結果、要求を満足するかが明らかになる。

注2) 未対応の自然地盤・斜面： 崩壊した場合に社会に対する影響が大きいが、調査あるいは対策が未対応の自然地盤・斜面である。現実のプロセスでは、まず、崩壊すると社会に大きな影響を与える虞がある自然地盤・斜面を耐震診断し、その結果、対策の必要性が明らかになる。

さらに、社会基盤施設と大型建築物は、技術の進歩と社会的要求の進展を反映すべく時代とともに改訂されてゆく設計体系・設計基準に準じて設計・構築され、それに対する継続的な維持管理体制もある。一方、私有財産である戸建て住宅ではこのような最新の基準の技術の適用が遅れる傾向にあり、またそれに対する継続的な維持管理体制は通常は存在しない。今回の地震でも、谷埋め盛土の崩壊と若年埋立て地の液状化により多数の戸建て住宅が被災して多数の個人が深刻な被害を受けた。同時に、上下水道の被害が生活をより困難にした。また、支持地盤の液状化は、それを考慮していない戸建て住宅と盛土・擁壁や管渠・パイプライン等の地下埋設物等の土構造物の被害の原因となり、様々な上部構造物の被害の原因にもなった。

これらの地盤災害の多くは、

- a) 締固めの悪い盛土や元々軟弱な地盤等の土自身の問題と、
- b) 地下水・雨水の排水設備が整備されていないことなどの水の問題

の二つが主要な原因である。

また、今回の地震では、地盤災害は極めて多様であることに加えて、極めて広い地域で非常に多くの場所で生じた（広域多所災害）。そのため、復旧・復興が著しく立ち遅れ、多くの場所でその状態が四カ月経過した現在でも継続している。

その一方で、道路・鉄道の高架構造物・橋梁、共同溝、空港等の公共構造物や中・高層ビルは基本的には地盤液状化の判定と必要な場合での対策をしており、無被害か軽微な被害に止まった。また、下水道施設・農業用パイプライン・河川堤防等の公共構造物や、低層住宅、石油タンクなど民間産業施設等でも地盤液状化の対策をしていた場合は、殆ど被害はなかった。また以前から耐震設計をしていたロックフィルダムは無被害か軽微な被害で収まった。さらに、新しい地盤工学技術である補強土工法によって建設された切土・盛土・擁壁等も殆ど被害がなかったか、軽微な被害であった。

地盤工学会は、地盤災害の研究、調査、対策法を専門とする技術者・研究者の集団が会員であり、地盤災害の軽減を通じて社会に貢献する役割があり、そのための活動を従前から行ってきた。今回の震災から教訓を学び、復旧・復興に貢献し、全国での今後の震災を防止・軽減するための提言をまとめることにした。その際、

- 1) それぞれの地盤災害のメカニズム・原因は解明されたか？
- 2) 今回の震災において、地盤工学は、地盤災害の軽減を通じて震災の軽減に貢献できたのか？
- 3) 被害の想定と対策が無いか不十分であったため、どのような地盤災害が生じたのか？
- 4) 現在の段階で、復旧・復興、防災・減災のため、どのような地盤工学の手法・技術を提案できるのか？
- 5) 今後地盤災害を軽減するために、進展させる必要のある地盤工学の調査・設計・施工・維持管理の課題は何か？

の五つを基本的視点とした。第一の視点は視点 2)～5)の基礎となるものであり、原位置での被害調査、地質・地盤調査、室内試験、解析、従来の地震による地盤災害からの教訓に基づいた検討等による解明作業が必要である。しかし、この課題はかなり長期的な研究が必要になるものも多く、この解明を待っていると視点 2)～5)に関する活動の開始が著しく遅れてしまう可能性が高い。そこで、視点 2)～5)に関連して、特に以下の項目に言及することにした。

- a) 被災した土構造物と地盤災害により被災した上部構造物の早期機能回復とともに、強化復旧の重要性
- b) 巨大津波に対する住宅地の高台移転も含む多重津波防御施設の整備構想における地盤工学・技術の活用の必要性
- c) 谷埋め盛土・若年埋立て地での被災した戸建て住宅の復旧、既存の戸建て住宅の耐震診断・補強、新設戸建て住宅の耐震設計における地盤の適切な対処の必要性
- d) 膨大な数になると思われる現行基準を満足しない既存土構造物と崩壊した場合に社会に大きな影響を及ぼす自然地盤・斜面を見出すための耐震診断とその結果に基づく耐震補強の緊急性
- e) 全体のシステムの機能保持のための付帯設備の地盤災害に対する安定性の重要性
- f) 広域の地盤沈降と地盤沈下、農地塩害、津波堆積物、放射能汚染土壌、災害廃棄物の処理と有効利用等の諸問題への地盤工学的対応の必要性

これらの提言は、全国的に見て近い将来に生じる虞がある震災を防ぎ低減するためにも有効であることを目指している。十分な提言の作成にはまだ時間が掛る一方、今回の震災からの復旧・復興に貢献し近い将来の震災を防ぎ低減するための提言には緊急性が高いことから、今回その素案をまとめることにした。

2. 東日本大震災のインパクト

2.1 東日本大震災までの経緯

1995年阪神・淡路大震災以前では、高架構造物・橋梁や中・高層建築物等の上部構造物の基礎構造物、ロックフィルダム・大規模盛土等を除き、鉄道・道路・宅地等の通常規模の盛土・擁壁、河川堤防、ため池堤体、岸壁等の土構造物、下水道等のマンホール・管渠施設などの地下埋設構造物、切土斜面、崩壊した場合に社会に影響のある自然斜面に対して、耐震設計と耐震診断・補強を積極的には行っていなかった。

1995年兵庫県南部地震では、当時は想定外であった高いレベルの地震動によって数多くの社会基盤構造物、中層建築物が崩壊した。また、相当数の自然斜面も崩壊し、埋立て地盤が液状化して港湾施設が大被害を受けた。さらに、数多くの盛土・擁壁等の土構造物も崩壊した。その後、まず上部構造物を対象とした耐震設計に、レベルⅡ設計地震動³⁾が導入され、レベルⅠ設計地震動³⁾とともに耐震設計に用いられるようになってきた。

注3) レベルⅠ設計地震動：構造物の物理的寿命の間に発現する可能性が十分に高い地震動。この地震動に対して、基本的にいずれの新設構造物においても「無被害レベル」の耐震性を要請される。
レベルⅡ設計地震動：現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動。被災して使用できなくなっても崩壊せず、短期間に機能が復旧できることを要請される。

(土木学会第3次提言)

1995年兵庫県南部地震に引き続き、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2009年駿河湾を震源とする地震等においては、各所で道路・鉄道・宅地の盛土・擁壁など土構造物と自然斜面の崩壊、上下水道の管渠施設等の地盤災害が多数生じて、鉄道・道路の路線全体の交通機能、個人生活等に大きな影響を与え、大きな社会問題になった。1995年兵庫県南部地震とこれらの地震での地盤災害を背景として、土構造物とその基礎地盤、及び上部構造物の基礎地盤に対するレベルⅡ設計地震動を考慮した耐震設計が、土構造物の種別と整備・管理機関によって導入時期と導入した耐震レベルは異なるが、その後順次導入されてきた。すなわち、

- a) 重要な擁壁・大規模盛土や上部構造物のように従来から耐震設計してきた場合に対しては、土構造物と基礎地盤に対するレベルⅡ設計地震動の導入、
 - b) 従来耐震設計をしてこなかった通常の盛土のような土構造物に対しては、耐震設計の導入、
 - c) これらに基づいた重要土構造物の耐震診断・耐震補強
- が開始されてきていた。

地盤工学会は、従来から、地盤災害を軽減するための様々な活動を行ってきた。2005年には地盤工学会関東支部が「首都圏を直下地震から守るために—地盤工学からの提言—」を出版した。これを全国に拡大するとともに地盤災害を地震と豪雨・洪水によるものに拡大して、地盤災害のメカニズムと脅威・対策の必要性の意識喚起、および具体的方策の提言と必要な知識の普及を目標として、2009年に「地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために -地盤工学からの提言-」を出版した。この内容を集約すると、以下のようになる。

- 1) 地盤災害は社会に対する顕在した脅威であり、潜在的にも大きな脅威でもある。しかし、その全体像は社会に広く認識され意識されてはいない。
- 2) 地盤工学会は、地盤災害の脅威を示すだけでなく、それを防ぎ軽減するための地盤工学に基づく方策を示す必要がある。
- 3) 古い時代に古い技術で建設された大量の既存の切土、盛土、擁壁等の土構造物と崩壊すると社会に影響を与える自然斜面は、今日の社会的要求と技術的レベルから見ると安全性が不十分なものが多く、重要なものは地震と豪雨・洪水に対する耐災診断、耐災補強が必要となる。
- 4) 地震と豪雨・洪水によって崩壊した切土斜面・盛土・擁壁等の土構造物を復旧する場合、早期機能回復は当然であるが、元々の古い構造形式に「原状復旧」するのではなく、新しい地盤工学の技術に基づいて経済的で耐災性の高い構造形式の土構造物に「強化復旧」する必要がある。
- 5) 地震と豪雨・洪水に対して、対策を別個ではなく総合的に行えば効果的になる場合が多い。また、関係する諸機関の協力と調整が必要である。
- 6) 自然の斜面・地盤と切土・盛土・擁壁等の土構造物は、地震や豪雨・洪水に対する設計を積極的にはしないとの方針を基本とするのではなく、必要な場合に対して出来るだけ耐災性を高める設計・施工・維持管理をすることを基本とする必要がある。
- 7) 地盤工学は発展してきており今後も発展する必要がある、地盤災害に対応するための様々な技術を地盤防災対策に活用する必要がある。
- 8) 防災的な措置とともに、減災的な措置が必要である。
- 9) 地盤災害とそれへの対応は、今後も継続する必要がある近い将来終結できるものではない（A Never-Ending Story）。地盤工学会は上記についての提言とともに、社会的広報・教育活動を継続してゆく必要がある。

項目 9)に関しては、科学技術振興機構から地盤工学会が受託して Web ラーニングプラザ「地盤の液状化と軽減技術コース」(2008 年)、「地盤災害から人々を守る」(2009 年)を製作した。これらは誰でもホームページ (<http://weblearningplaza.jst.go.jp/>) で閲覧できる。また、地盤工学会誌では技術講座を系統的に掲載し、地盤災害に関する多様な技術講習会、市民講座（出前講座も含む）などを開催してきた。

2.2 東日本大震災からの教訓

このような状況で 2011 年 3 月 11 日に生じた東日本大震災を検討し、以下の教訓が得られた。

- 1) 地盤工学技術の開発と適用によって被害が効果的に防止された例も多い。その一方で、これまで開発されてこなかった軟弱地盤・液状化しやすい埋立て地盤や傾斜地などに土地利用が広がり、古い技術による埋立て地や谷地部などでの盛土が多くなされてきて、宅地等で多くの地盤災害が生じた。
- 2) 地盤工学会の上記出版物と技術基準等で想定されていなかった原因と形態での被害が多数生じた。すなわち、巨大津波、広域多所災害、継続的な大規模余震、付帯設備の地盤災害によるシステムの機能障害、広域な地盤沈降と地盤沈下、農地塩害、津波堆積物、放射能汚染土壌、災害廃棄物等の管理処理問題等である。その中で、以下の被害形態の想定が特に不十分であった。

2.1) 巨大津波による災害

巨大津波による災害の多くは、地盤災害が関与していた。津波の越流による盛土形式の防潮堤と河

川堤防の流出、重力式の防波堤の支持地盤の洗掘による崩壊、道路・鉄道の橋梁の橋桁と橋台裏の盛土、橋台、基礎構造物の流失等、である。また、津波による農地塩害、災害廃棄物、有害物質・放射能汚染土壌・津波堆積土等の管理処理問題にも様々な形態の地盤災害がある。

2.2) 付帯設備の地盤災害によるシステムの機能障害

沿岸部の火力発電所を含む産業施設は、地盤液状化対策など十分な地震対策が施されていた各種重要施設は無被害か軽微な被害であった。しかし、各種の重要な施設本体に隣接する岸壁・配管・輸送施設等の付帯設備で地盤液状化対策と津波対策等の地震対策が十分でないものが、想定外の形で地盤被害と津波により安定性を失い機能を喪失した。このため、多くの産業施設がシステムとして事業継続性(Business Continuity Plan, BCP)を確保できない場合が多かった。また、送電鉄塔については、近接する盛土の崩壊によって被害を受けた一例があった。それ以外では、基礎の不同変位による傾斜が生じる構造的な被害が生じた事例があったが、直接的な機能支障につながるほどではなかった。変電所については、盛土崩壊によって一時的に機能支障をきたした複数の事例があった。

2.3) 広域多所災害

今回の震災の一つの大きな特徴は、広域多所災害である。すなわち、広域でも少数の災害、多所でも狭い領域に集中した災害ならば短期に復旧が可能であるが、広域で多所において多様な震災が発生した。そのため震災からの復旧・復興に非常に時間が掛り、被災者と社会の被害を深刻にした。この広域多所災害に、各地で多数生じた多様な形態の地盤災害が深く関連している。

3) 以下の三つの異なるカテゴリで、地盤災害の有無と深刻さに大きな差が生じた。

3.1) 公的機関と大規模民間組織によって最近の耐震設計基準に基づいて設計・構築され維持管理されてきた以下の土構造物は、震動被害が無いか軽微であった。このことは、地盤工学を含む建設技術での耐震設計が活かしたことを示している。

- ・社会基盤施設、中・高層建築物、産業施設とその基礎構造物、
- ・耐震設計していた土構造物（例：新幹線等鉄道・道路などに建設されていた補強土擁壁）
- ・近代的ロックフィルダム
- ・耐震診断・耐震補強していた既存の土構造物（例：河川堤防の一部）

最近建てられた戸建て住宅の地震動による被害も、限定的であった。これらのことから、地震動強度に関しては、想定内であったと言える。

また、地盤液状化に関しても、それに対する判定を行い必要な対策をしていた低層及び中・高層建築物、道路・鉄道の高架構造物・橋梁、石油タンクを含む産業施設、空港、共同溝、揚水機場、下水処理場本体などの社会基盤設備、碎石・セメント混合土等で埋め戻した下水道管路と浮上対策をしたマンホール・農業用管路等は、無被害か軽微な被害であった。

従って、諸機関の耐震設計に関する技術基準における設計地震動と地盤液状化の予測と対策の規定に関しては、主要な変更を緊急に行う必要はないと思われる。

3.2) 社会基盤施設としての現行基準を満足しない既存土構造物と未対応の自然地盤・斜面

鉄道・道路・宅地等の盛土・擁壁、埋立て地、ため池堤体、河川堤防、下水道マンホール・管渠施設等の地下埋設物など、社会基盤施設としての土構造物の耐震診断・耐震補強と耐震設計の導入は一定程度進められてきてはいた。しかし、旧技術・旧基準で古い時代に建設されていて現行基準を満足しない既存土構造物と崩壊した場合に社会に被害を与える未対応の自然地盤・斜面が多数存在していた。今回の地震で被災し社会に大きな被害を与えた土構造物は、基本的にこれらのものであった。

3.3) 公的な技術基準と維持管理体制が適用されていない私有財産である戸建て住宅（個人被害）

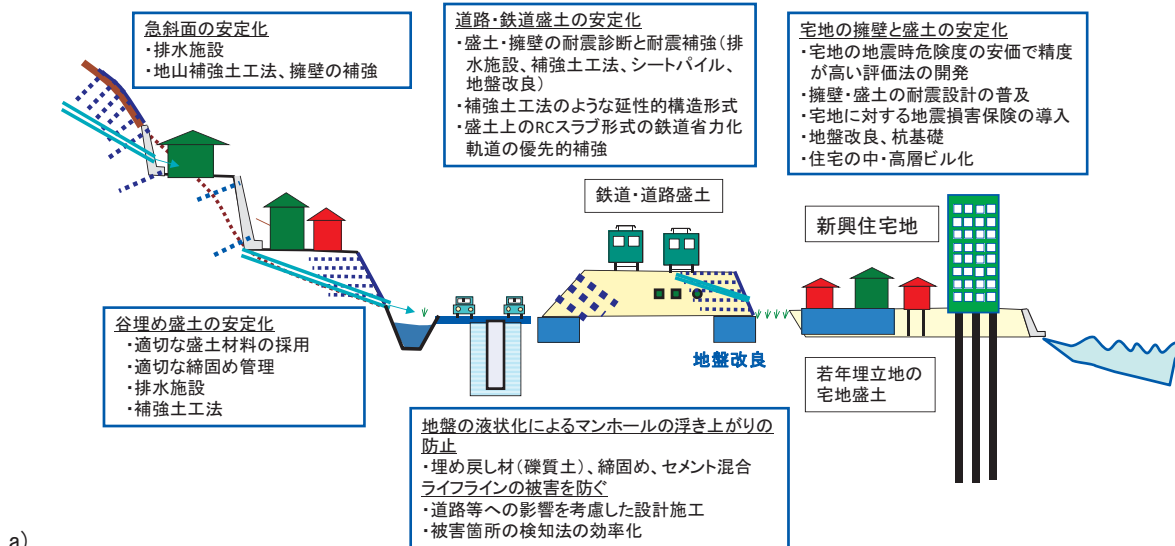
個人所有の戸建て住宅の宅地は、耐震設計と耐震診断・耐震補強が著しく遅れた状態であった。今回の地震でも、津波による戸建て住宅の流出に加えて、内陸丘陵地帯での谷埋め盛土と付随する擁壁の過大な変位・崩壊が多所で生じ、仙台市だけでも 800 を超える宅地が深刻な被害を受けて危険宅地と判定され 1、200 を超える宅地も被害を受けて要注意宅地と判定された。また、臨海部・旧湖沼・旧河道などの若年埋立て地の液状化によって一万戸を超す大量の戸建て住宅が著しい被害を受け、非常に多数の住民に深刻な被害を与えた。地盤液状化による上下水道施設の被害も著しく、個人生活と社会生活に深刻な打撃を与えた。

2.3 東日本大震災の復旧・復興と防災・減災

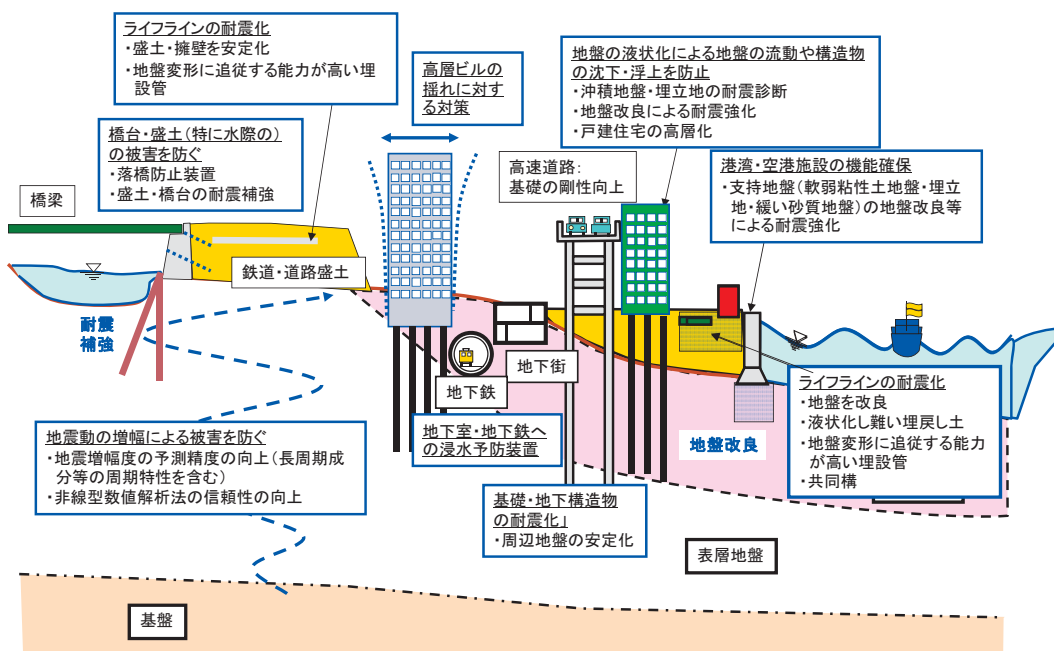
地盤工学会は、今回の震災からの教訓に基づき、震災からの復旧・復興に対して地盤工学がなすべき貢献、全国における将来の震災（広くは自然災害）に備えるための耐震設計と長期的な耐震診断・耐震補強（広くは耐災設計、耐災診断・耐災補強）の課題を検討している。

1) 被災した土構造物の強化復旧

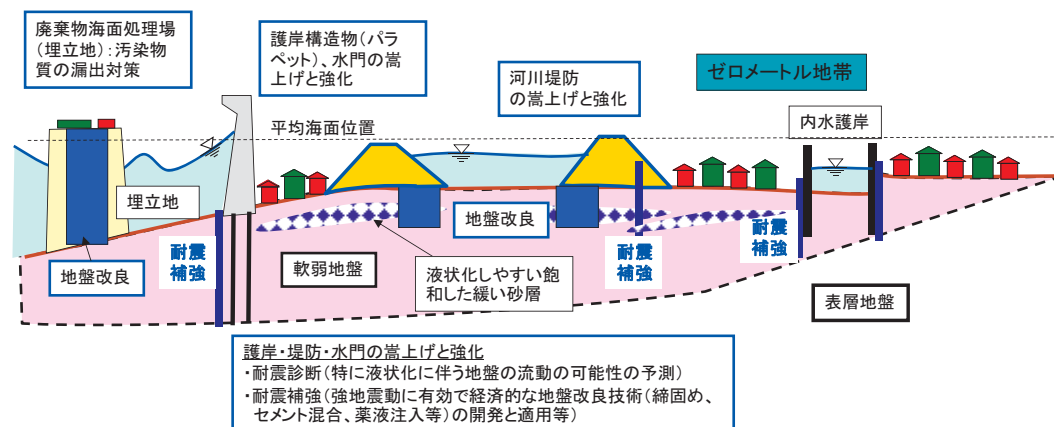
被災した道路・鉄道・宅地・ため池堤体などの盛土・擁壁等の土構造物、河川・海岸堤防と盛土形式の防潮堤、下水道等のマンホール・管渠施設、農業用パイプラインなどの地下埋設構造物等の土構造物、および崩壊した自然斜面は、機能と安全性をできるだけ早期に復旧する必要がある。その場合、構造的には耐震性が高いと同時に経済的である土構造物・斜面に強化復旧する必要がある。それには、**図 2-3** に模式的に示すように、新たに建設する場合に採用されている盛土締固め管理・排水設備の基本的な地盤工学技術と各種の地盤改良技術や補強土工法等の最新の地盤工学技術を活用することができる。



a)



b)



c)

図 2-3 地盤災害を防ぐための多様な地盤工学技術の例

また、本震と余震により、震源域を含む広範囲において不安定化した自然斜面が数多く存在している。これら自然斜面に対しては、今年の梅雨・台風時の土砂災害に対してだけでなく、比較的長い時間軸（年単位）での地盤変形・安定性を計測・予測を継続して、その危険性に対処する必要がある。

さらに、農地の塩害、災害廃棄物の処理と地盤材料としての有効利用、放射能汚染土壌・津波堆積土の処理等にも、最新の地盤工学技術を活用して対処する必要がある。

2) 被災した地域の復興への地盤工学の貢献

復興の構想に対しても、地盤工学の見地からの様々な提案ができる。例えば、津波に対しては、多重津波防御施設と居住地高台移転の構想が提案されている。天端を防災緑地として活用した盛土形式の防潮堤の場合、今回の地震で盛土形式に堤体の多くが津波の越流に伴う浸食・洗掘により流失した事実を考慮すると、津波波力・洗掘に対して耐力があり仮に越流して流失しないことが必要である。さらに、想定した津波が越流しないような盛土形式の防潮堤を従来の技術によって緩い法面で建設すると、堤体幅と土工量が非常に大きくなる（図 2-4）。また、道路・鉄道盛土に二次的な津波溯上阻止と避難場所としての機能を期待する場合、一定の高さが要求される。この場合も、通常の緩法面の盛土形式で建設すると堤体幅・土工量が大きくなる。

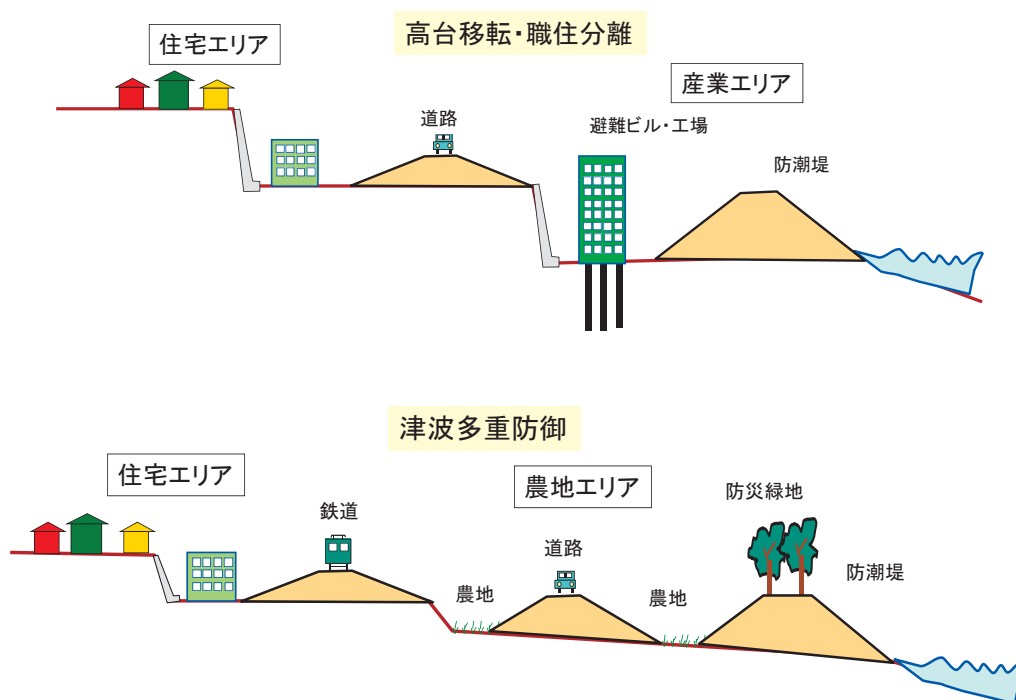


図 2-4 宮城県の復興計画一次案（2011 年 6 月 4 日朝日新聞朝刊）に従来の地盤工学技術を適用した場合の模式図

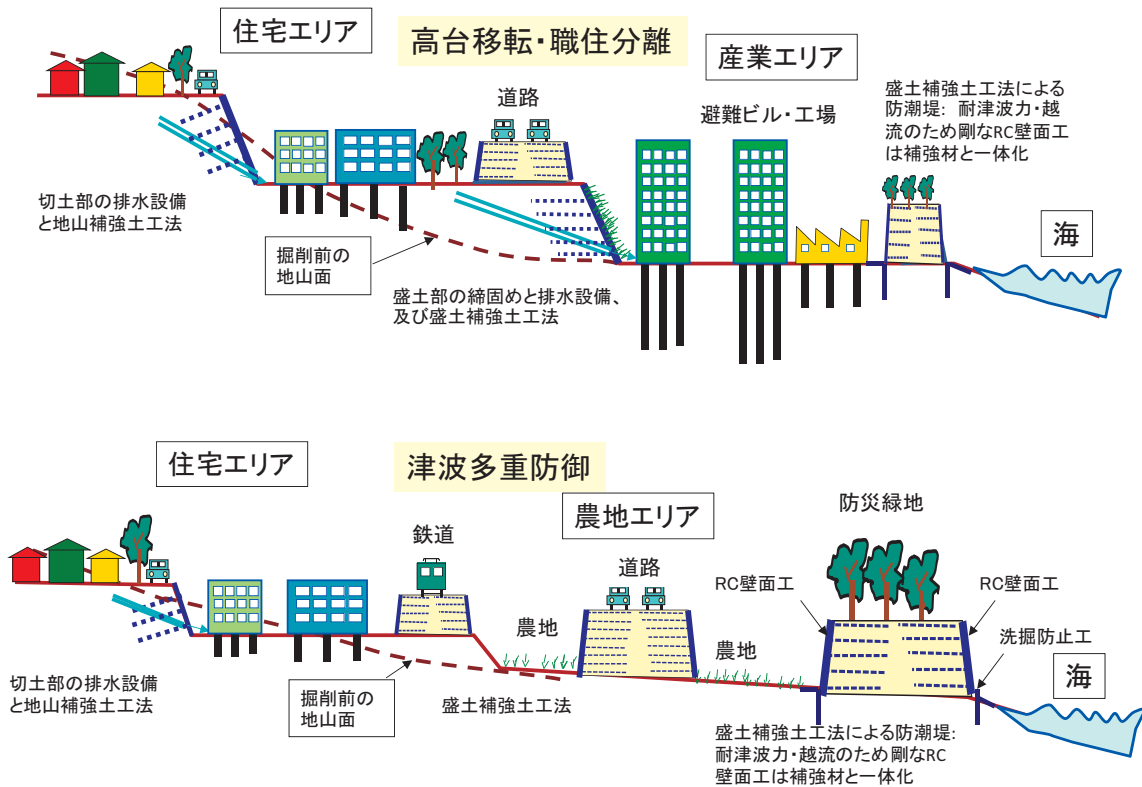


図 2-5 多重津波防御施設と居住地高台移転構想での地盤工学的対応の例

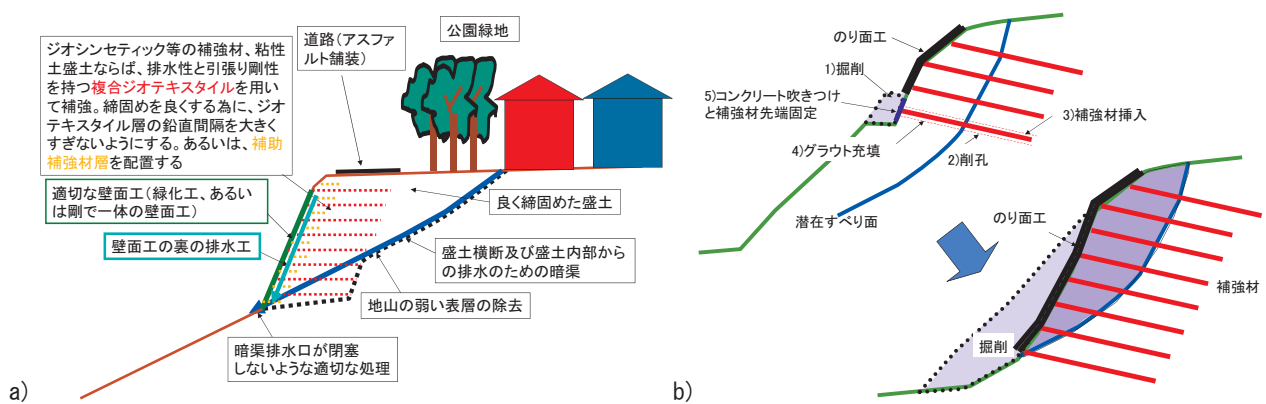


図 2-6 a) 盛土補強工法の例と b) 地山補強土工法による斜面の安定化の模式図

また、住居地の高地移転が提案されているが、今回の地震でも仙台市周辺等で古い技術で建設された多くの宅造盛土・擁壁が崩壊し自然斜面も各所で崩壊している事実を考慮すると、締固め管理が甘く排水設備が不十分な状態で盛土と安定性が十分でない従来形式の擁壁を建設し、また安定化処理が不十分なまま地山を掘削して急勾配切土面とすれば、耐震性が十分ではない盛土・切土が建設される虞がある。場合によっては、必要とされる津波に対する耐力も十分ではない虞がある。

多重津波防御施設と居住地高台移転の構想が有効に機能するには、図 2-3a に模式的に示すように、適切な締固め管理と排水設備の整備等の従来からの基本的な地盤工学技術、および必要に応じてセメント混合等による地盤改良技術や盛土補強土工法(図 2-6a)、地山補強土工法(図 2-6b)などの最新の地盤工

学技術を活用する必要がある。図 2-5 は図 2-4 に対応するものであり、これらの近代的な地盤工学技術を活用例を模式的に示したものである。図 2-7, 2-8, 2-9 は、これらの技術を活用した具体例である。盛土形式の防潮堤は、補強盛土工法によって盛土本体の耐震安定性を確保した上で、壁面は津波力と越流による浸食に対抗できるように補強材と結合して盛土と一体化して分離しにくくした剛な鉄筋コンクリート壁面工で被覆し、また適切な洗掘防止工（根固め工）をするなど、技術的工夫が必要である。

また、防潮堤などの盛土の造成に、津波被害によって発生した廃棄物を塩分処理等して活用することも検討すべきである。

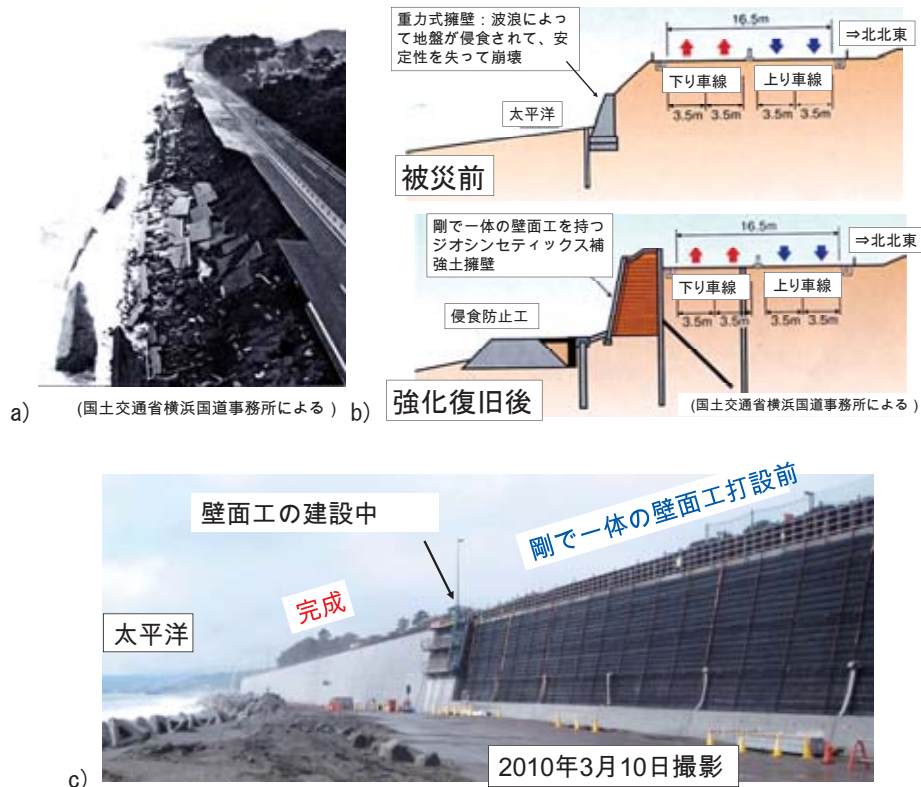


図 2-7 神奈川県西湘バイパスの台風の波浪で崩壊した重力式防波堤のジオシンセティック補強土擁壁による強化復旧：耐波浪性のため、壁面は背後盛土のジオシンセティック補強材と一体化させた鉄筋コンクリート壁面工で被覆（a, b: 国土交通省横浜国道事務所、c: 龍岡文夫）



図 2-8 東北本線名取川橋梁に隣接するジオシンセティック補強土擁壁（今回の地震で無被害、岡本正広）

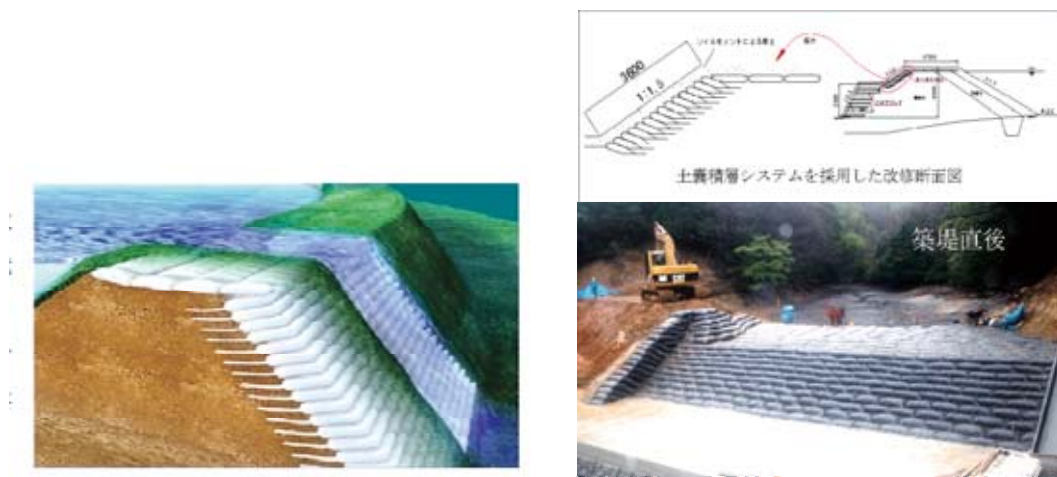


図 2-9 2007 年能登半島地震により被災したため池堤体の補強土工法による強化復旧(毛利栄征)

3) 現行基準を満足しない既設土構造物と未対応の自然地盤・斜面への対策

全国には、耐震性が低く崩壊した場合の社会に大きな被害を与える「現行基準を満足しない既存土構造物」と「未対応の自然地盤・斜面」が潜在的に存在している。これらにはこれまでも対応してきているが、その数が膨大であることから、耐震補強対策事業は橋梁・高架構造物と比較すると相当不十分である。従って、「盛土・擁壁等の土構造物や自然斜面は、崩壊した場合に早期に原状復旧する」という方針を基本とすると、今回の震災のように、広域多所災害が起きた場合に対処することが困難になり、復旧・復興が大幅に遅れることになる。今後の地震に備えるためには、これらに対して継続的な耐震診断・耐震補強を実施してゆくことが緊急の課題である。特に、地震後の緊急輸送ルート確保、生活のための基本的なライフラインの確保等にとって重要である要所の土構造物に対しては、

- a) 新設では耐震設計、盛土締固めレベルの向上・排水設備の整備、地盤改良工法・補強土工法の適用などによる耐震性の向上、
- b) 現行基準を満足しない可能性がある既存の土構造物と崩壊した場合に社会に与える影響が大きい未対応の自然地盤・斜面はできるだけ早急に耐震診断を行い、その結果に基づき、必要に応じて、経済的で効率的な耐震補強する、

という方針を推進する必要がある。

4) 宅地の被災への対策

従来、戸建て住宅の課題は個人の問題とみなして民間に任せる傾向が強く、以下のような状態で放置されてきた。すなわち、3.2.4 で詳細に述べるように、

- a) 埋立て地・盛土を造成した地方自治体・企業体等による住宅開発者への、埋立て地と盛土を宅地に整備した住宅販売者の宅地購入者への地盤の品質説明と必要な場合での品質保証が制度化されておらず、購入者はその制度がない状態で戸建て住宅を購入する状態であった。
- b) 谷埋め盛土と擁壁の地震時安定性や埋立て地の宅地の液状化の予測・対策に関する最新の技術が実質的に有効に適用されていないなど、技術管理システムが未整備であった。

- c) 個人で負担可能な谷埋め盛土・若年埋立て地の宅地の耐震診断法と低価格の復旧工法・対策工法の開発が遅れていた。
- d) 宅地の被災に対する保険制度が未整備であった。

更に、生活に直結する下水道施設などの地盤に埋設されるライフラインでは、支持地盤と埋戻し土の改良による液状化対策が十分ではなかった。

これらの諸課題の解決は緊急である。戸建て住宅の地盤の液状化による災害を防ぐ場合、宅地を液状化させない方法と建物基礎で対処する方法がある。ところが、両者に対して現状では宅地造成等規制法と建築基準法関連での法的な規制がなく、実質的に地盤の液状化を考慮した建築が殆ど行われていない。従って、地盤工学会としては、宅地に対して地盤の液状化を防ぐための制度化に貢献する必要がある。

地盤工学会は、また、谷埋め盛土・若年埋立て地の被災戸建て住宅の復旧、既存戸建て住宅の耐震診断・耐震補強、新設戸建て住宅の地盤を含めた耐震設計のための標準的技術基準の設定と低価格の対応技術の開発と普及、保険制度の提案等の諸課題に寄与する必要がある。ライフライン地下埋設物の強化復旧、耐震診断・耐震強化、耐震設計の諸課題についても同様である。

2. 4 地盤工学会としての対応

地盤工学会としては、地震による地盤災害に関連して、社会基盤設備の整備・管理に責任を持つ国・地方公共団体および民間機関とそれらに所属する技術者、これら社会基盤設備と大規模建築物の設計・施工を担当する技術者、および一般社会に対して、以下の活動を行ってゆく。

- ・技術基準の基本となる項目の整備と公開
- ・研究の振興とその成果の効果的発信
- ・情報の収集・整理と専門家への公開
- ・技術者教育
- ・一般市民への情報の公開

および

- ・地盤情報の収集・整理と公開と、地盤情報を活用した防災・土地利用計画の基本的考え方の提言：
今回の震災からの教訓の総括と、それに基づいた提言が必要とされる。その提言では、効果的な技術を適用し、持続的・段階的に安全な国土を形成していくために法的な整備が不可欠であることにも触れる必要がある。

3 今回の地盤被害の特徴・課題と提言

3.1 従来想定され、対策が一定の効果があった事例

今回の震災では極めて多数の地盤災害が生じたが、この間地盤災害の対策のための地盤調査法、設計法、対策工法、維持管理のレベルは向上してきたことから、一定の効果が発揮された例も多い。今回の震災からの復旧・復興と、今後我が国での震災の防止・軽減に貢献するためには、これらの経験を総括して今後活かす必要がある。

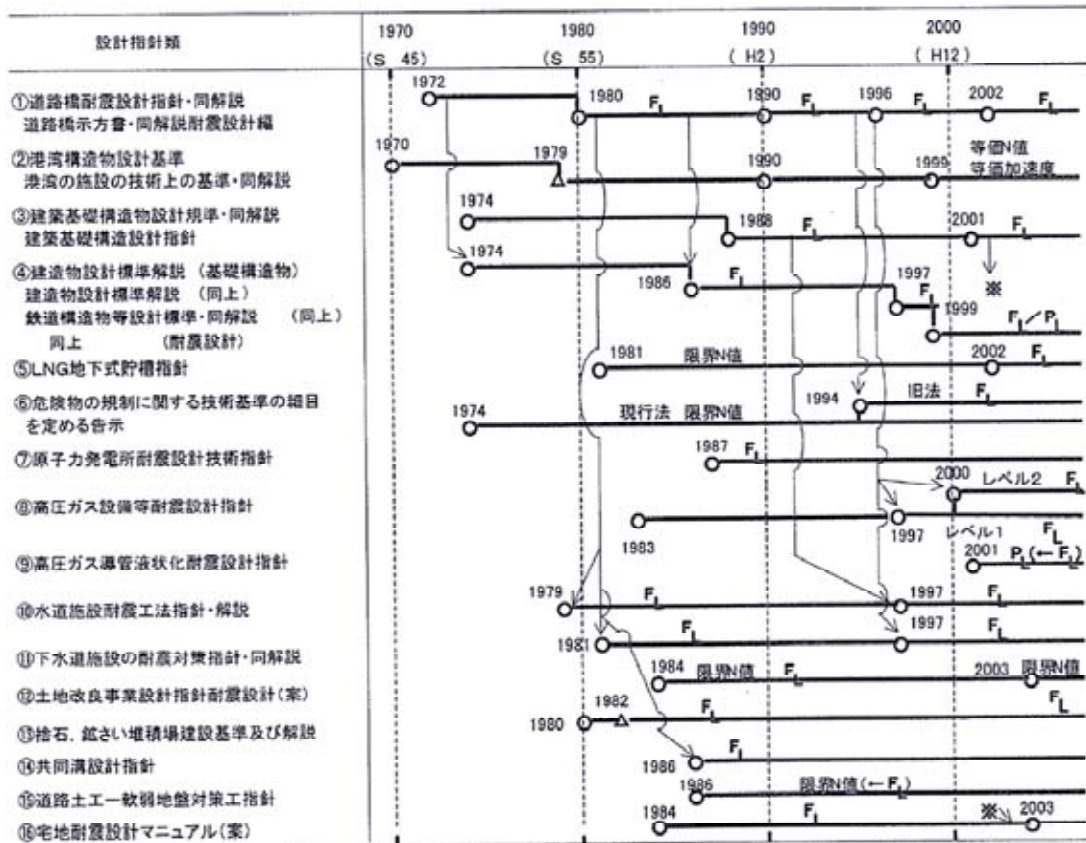


図 3-1 地盤液状化が各種構造物の設計基準類に取り入れられた年

3.1.1 地盤の液状化

1964年新潟地震での地盤の液状化による甚大な被害が生じたことを契機として、地盤の液状化の予測とその対策法の実施は、公共機関が整備・管理する社会基盤施設(例、道路、鉄道、岸壁・護岸、共同溝・・・)に対しては、組織内部で遵守される地盤液状化の予測と対応策に関する技術基準があり、それによって設計・施工することになる。図 3-1 に、地盤の液状化が各種構造物の設計基準類に取り入れられた年を示す。なお、 F_L は、土の要素の液状化に対する安全率(Liquefaction Resistance Factor)のことであり、「地盤の液状化に対する強度」を「地盤に作用して液状化を生じさせる地震荷重」で除した値である。 F_L 法とは、この値に基づいて地盤の液状化の程度を予測をする方法である。 P_L は、ある地点での地層全体の予測される液状化の程度をあらわす指標(Liquefaction Potential Index)である。大きな民間組織の中・高層ビル(UR等の住宅を含む)や石油タンク等の産業施設でも、施主とコンサルタント・建設会

社等の技術者が、地盤液状化の予測・対策等の対応をするのが普通となっている。今回の地震でも、以下の事例では、調査・設計段階で地盤の液状化の予測を行い必要な場合は対策をしており、地盤の液状化による地盤災害は無かったか軽微であった。

- a) 東京湾臨海部の鉄道（京葉線等）、道路（湾岸道路、首都高速道路湾岸線等）の若年埋立て地等を通過した部分での高架構造物・橋梁、共同溝。なお、首都高速道路湾岸線の東扇島、舞浜入口、市川PAで、地盤液状化により路面が変状したが、数日で応急復旧した。これらは、設計段階で地盤液状化への対応はしていなかった。
- b) 東京湾臨海部のURの住宅団地（浦安市のサンドコンパクションパイル工法で地盤改良していたRC壁式構造2階建ての団地）、杭支持で対応していた中・高層ビル（住宅ビルも含む）
- c) 東京湾臨海部浦安市の地盤改良で対処していた東京ディズニーランド等の建築物
- d) 仙台空港B滑走路においては、地盤液状化の判定が行われ、その結果に基づいて固化処理による滑走路下地盤の液状化対策が実施されており、効果が発揮された。未対策の部分では液状化によると考えられる地盤沈下が生じた(図3-2)。
- e) 仙台塩釜港高松埠頭や茨城港常陸那珂港区での耐震強化岸壁等では、裏埋め土や壁体支持地盤で液状化判定に基づいて対策が施されており、地震発生の数日後には緊急物資搬入のための応急供用が開始された。
- f) 海岸部の化学プラント・タンク等を含む産業施設の主要構造物の支持地盤
- g) 杭支持の霞ヶ浦揚水機場（水資源機構）
- h) 農業用大口径幹線パイプライン（直径1.5–2.6 m）で、碎石で埋め戻した区間では被害が軽減された。



図3-2 仙台空港での地盤液状化によるエプロン部の沈下（地盤液状化未対策部）（港湾空港技術研究所提供）

また、以下の事例では以前の災害からの復旧に際して必要な対策をしており、今回の震災では地盤液状化による被害は無かったか軽微であった。

- ・下水道の碎石やセメント改良土による埋め戻しにより浮上対策していたマンホール・管渠施設：宮城県栗原市で、2008年岩手・宮城内陸地震により被災した管路を、液状化対策として有効な「リブ付き塩ビ管+碎石埋め戻し」によって強化復旧した個所は、無被害か軽微な被害であった。なお、埋戻し土の固化による強化復旧は、2004年新潟県中越地震の復旧で多く採用され、2007年新潟県中越沖地

- 震において当該技術を使って復旧した区間の被災は非常に小さく、当該技術の効果が確認されている。
- ・河川堤防の支持地盤の液状化対策等の強化復旧を適切に行った個所（例：1978年宮城県沖地震、2005年宮城県北部地震などで被災した北上川下流部の河川堤防）は、概ね無事であった。なお、堤内側の法尻に布団籠等のドレーンによる堤体内の水位低下対策が液状化対策としても有効であった個所もある（詳細なメカニズムは解明されていないが）。
 - ・宮城県仙台市内で、1978年の宮城県沖地震により被災を受けた宅地に対して鋼管杭や地下水排水工が施工された場所では、宅地地盤の被害は軽微であった。

すなわち、公共的な機関によって整備・管理された社会基盤施設（道路・鉄道・港湾等の構造物・・・）に対しては、組織内で遵守される技術基準（示方書、設計基準、設計標準・・・）では地盤の液状化の予測法と対応法の規定が、40年以上前から順次整備されてきていた。また、大型民間建築物（中・高層ビル、UR等の住宅、産業施設等）の設計でも、発注者側・受注者側の担当技術者は地盤の液状化を考慮してきた。今回、これらの効果が発揮された。

これらのことは、地盤の液状化に対する技術基準が整備されていなかったため、1964年新潟地震において、地盤液状化によって多数の道路橋・鉄道橋で落橋し、多数の中層ビルが沈下傾斜し、石油タンクが沈下して炎上し、多くの場所で埋設管路が浮上し、河川堤防が沈下・移動した事例とは対照的である。さらに、1995年阪神・淡路大震災を契機にして、地盤の液状化の判定でもレベルⅡ設計地震動を考慮するようになったことから、これらの構造物では地盤の液状化対策はかなり入念に行われるようになってきている。

今後の課題として、以下の二つが挙げられる。

(1) 地盤の液状化の予測能力の改善

現在の殆どの技術基準では、全国を対象として共通の設計地震動の考え方に基づいて地盤の液状化を判定している。そのため、地盤条件・地震動に関して包括的な内容となっている。一方、個々の場所で個々の構造物の設計に際して、結果として安全側に予測されることを目指している。このため、個々の場所の個々の地震による地盤の液状化の予測の精度は必ずしも高いと言えない。東京湾臨海地帯の若年埋立て地の液状化の発生も、地震動・地盤条件などの条件の詳細から見て正確に予測していなくても、その危険性を過小評価しないかどうか工学的に重要になる。

公共構造物や中・高層ビルのレベルⅡ設計地震動が導入される前の段階での各種の設計指針等に従った耐震設計では、基本的にレベルⅠ設計地震動を用いていた。これらの場合でも、15頁に示す事例 a), b), c)のように、今回の地震で実際に液状化した東京湾臨海部等の若年埋立て地盤は、設計地震動に対して液状化すると予測され必要な場合は対策が実施されていた。

一方、今回の地震では、東京湾臨海部の若年埋立て地において、地表加速度はレベルⅠ設計地震動程度であり殆どの構造物の地震動被害は無いか軽微であったにも関わらず、非常に大規模な液状化が生じた。地震動の継続時間が非常に長かったことが、地盤の液状化の規模を拡大させたと思われる。すなわち、同一の地表加速度でも、他の条件が同じであれば継続時間が長い方が短い場合よりも地盤は液状化しやすい。また、本震の30分後に発生した大きな余震の影響も、地盤の液状化の規模を拡大させたと思われる。1995年阪神・淡路大震災以降は、殆どの技術基準でレベルⅡ設計地震動に対して地盤の液状化を予測す

ることになった。これらの技術基準では、地震動の継続時間の影響を不十分にしか考慮していない。しかし、これらの現行の技術基準に従った場合、考慮する地震加速度がレベルⅠ設計地震動よりもかなり高いため、今回の地震動加速度はレベルⅠ設計地震動程度であったが継続時間が非常に長かった東京湾臨海地帯の若年埋立て地の液状化を予測し必要な対策を講じることになる。

以上のことから、今回の東京湾臨海部の若年埋立て地の液状化は、工学の立場から見て、想定外の現象であると言うことにはならない。

一方、液状化が生じた若年埋立て地に隣接する戦前の埋立て地では液状化が生じていない傾向にある。この地盤の年代効果の影響とともに上記の主要地震動の継続時間の影響は、現在の設計基準類に十分に反映されているとは言えず、今後検討すべき課題である。すなわち、元々レベルⅡ設計地震動を想定しない旧基準で設計・構築された土構造物と支持地盤の液状化の危険性を、現在の技術基準類に基づいた手法によって、それぞれの場所での液状化が生じる入力加速度レベルで評価する場合には、その危険性を継続時間が長い地震に対しては過小評価する可能性がある。また、震源と地震を特定して所定の地盤の液状化の予測をする場合、加速度振幅はレベルⅠ設計地震動相当であっても継続時間が長い地震動に対する予測方法が必要となる。とくに、近い将来予想されている東海・東南海・南海地震では、太平洋沿岸だけでなく瀬戸内海やさらに山陰地方、各地の臨海部等の若年埋立て地は今回の地震動で東京臨海部が受けたのと同様に継続時間が長い地震動を受けて、液状化する可能性がある。一方、年代効果によって液状化に対する強度が増加している地盤に対しては、液状化の危険性を過大評価する可能性がある。

現行の技術基準での地盤液状化の予測法の精度の改善のために、具体的には以下の検討をする必要がある。

- a) 今回の地震でレベルⅡ地震動を受けた地盤の液状化を正しく予測できるのかどうか、検証する必要がある。すなわち、
 - ・レベルⅡ程度の地震動を受けた地盤で、液状化が予測されないのにも関わらず実際には液状化した例があるのか？ それは、地震の継続時間の影響か？
 - ・レベルⅡ程度の地震動を受けた洪積層等の古い地盤で、液状化が予測されたのにも関わらず実際には液状化しなかった例があるのか？ それは、年代効果の影響か？
- b) 今回の地震でレベルⅠ地震動を受けた地盤の液状化を正しく予測できるのかどうか、検証する必要がある。すなわち、
 - ・震央距離が遠くてレベルⅠ程度の地震加速度が低い地震動を受けたが液状化した若年埋立て地において、継続時間が長く余震が発生したために、液状化発生および液状化による被害が甚大になったメカニズムを解明する必要がある。
 - ・浦安市などでは噴砂の量が大変多く、また、地盤の沈下量も大きかった。この現象と地盤の液状化に対する強度に与える粒子径・細粒分含有率の影響を解明する必要がある。

その上で、地盤の液状化の予測における地震荷重の詳細な設定法、年代効果（例：N値～液状化強度関係に対する年代効果の影響）の考慮の必要性、粒径・細粒分含有率の影響を考慮する方法を再検討する必要がある。その作業のために、関係する埋立て地の液状化の程度、造成年代と旧地形が入力されたデータベースを構築しておく必要がある。

(2) 低価格な地盤液状化対策の開発

表 3-1 は地盤の液状化対策を目的とした地盤改良工法のリストである。これらの地盤改良工法が、今回の地震において地盤の液状化対策に実際に効果があったのかどうか、検証する必要がある。

表 3-1 (参考) 地盤液状化対策を目的とした地盤改良工法の分類 (岸田、三反畑、末岡他 事業継続を可能に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、2009年3月 地盤工学会関東支部)

原理	工法	工法概要	概算工費	振動・騒音	地盤への影響	施工機械	変位抑制(剛性)
締固め	サンドコンパクションバイブル工法	振動によりケーシングを地盤中に貫入し、良く締まった砂杭を造成し、周囲の砂地盤を締め固める。	1,000～2,000円/m ³	あり	あり	大型	あり
	振動棒工法	地盤中に振動棒を打設し地表から充填材を投入し地盤を締固める。	1,000～2,000円/m ³	あり	あり	大型	あり
	静的締固め砂杭工法	振動を用いずにケーシングを地盤中に貫入し、砂杭を造成する。	2,000～3,000円/m ³	少ない	あり	大型	あり
	コンパクショングラウチング工法	流動性の小さいソイルモルタルを地盤中に圧入し、地盤を締固める。	10,000～15,000円/m ³	少ない	あり	小型	あり
排水	砕石ドレーン工法	地盤中に砕石杭を打設し液状化時の過剰間隙水圧を消散させる。	2,000～4,000円/m ³	少ない	少ない	大型	少ない
	人工材排水工法	地盤中に透水性の良い人工排水材を打設し液状化時の過剰間隙水圧を消散させる。	2,000～4,000円/m ³	少ない	少ない	中型	少ない
置換	事前混合処理工法	地盤を掘削し、埋立土砂に事前にセメント等の安定材を添加混合し、投入する。	3,000～4,000円/m ³	少ない	あり	大型	あり
	軽量土工法	地盤を掘削し、粘性土等にセメントと軽量材を混合して投入する。	8,000～12,000円/m ³	少ない	あり	大型	あり
固化	深層混合処理工法	地盤中にセメントなどの安定材を投入し原位置で攪拌混合して固化する。	4,000～6,000円/m ³	少ない	少ない	大型	あり
	高圧噴射攪拌工法	地盤中に高圧のセメントスラリーを噴射し、固化体を造成する。	20,000～60,000円/m ³	少ない	少ない	小型	あり
	薬液注入工法	水ガラス系や高分子系の薬液を注入して地盤の強度増加や不透水化を図る。	20,000～30,000円/m ³	少ない	少ない	小型	少ない
	溶液薬液注入工法	予め劣化成分を取除いた恒久型の薬液を砂地盤中に注入し、液状化防止を図る。	20,000～30,000円/m ³	少ない	少ない	小型	少ない
構造物の補強	杭増し打ちによる補強工法	液状化時に耐えられるように基礎杭を増し打ちしたり、杭頭を補強する。	(20,000～50,000円/m ³)	少ない	少ない	小型	あり
	矢板による補強工法	構造物の周囲などに矢板を打設して液状化時の水圧伝播を抑えるとともに構造物の補強を行う。	(20,000～50,000円/m ³)	少ない	少ない	小型	あり
	固化による杭補強工法	液状化時に耐えられるように構造物の周囲を固化し、補強を行う。	(20,000～50,000円/m ³)	少ない	少ない	小型	あり

3.1.2 鉄道・道路

1995年阪神・淡路大震災以降に改訂された設計基準に基づいて耐震診断・耐震補強された橋梁と新設された橋梁は、上部構造とともに基礎構造物にも重大な損傷は見られなかった。一方、旧基準で建設された未補強であった高架構造物のRC柱、橋梁の支承等で損傷した例が少なくない。

3.1.3 補強土構造物

近年、盛土補強土工法（図 2-6a）と地山補強土工法（図 2-6b）が数多くの現場で適用されるようになってきた。

- a) 今回の地震において、地山補強土工法で補強された自然地山の切土法面と切土擁壁での被災事例はほとんどないようである。例えば、宮城県女川町で震度 6 以上の強震動を受けた後、津波が遡上してかなりの部分が水浸した地山補強（ネイリング）の切土法面でも、被害は見られなかった（図 3-3a）。また、福島県須賀川市の既設盛土においては、無対策の重力式擁壁やブロック積み擁壁では円弧状のすべり崩壊が発生したが、同じ盛土内でも地山補強土工法によって耐震補強された区間では無被害であった（図 3-3b）。

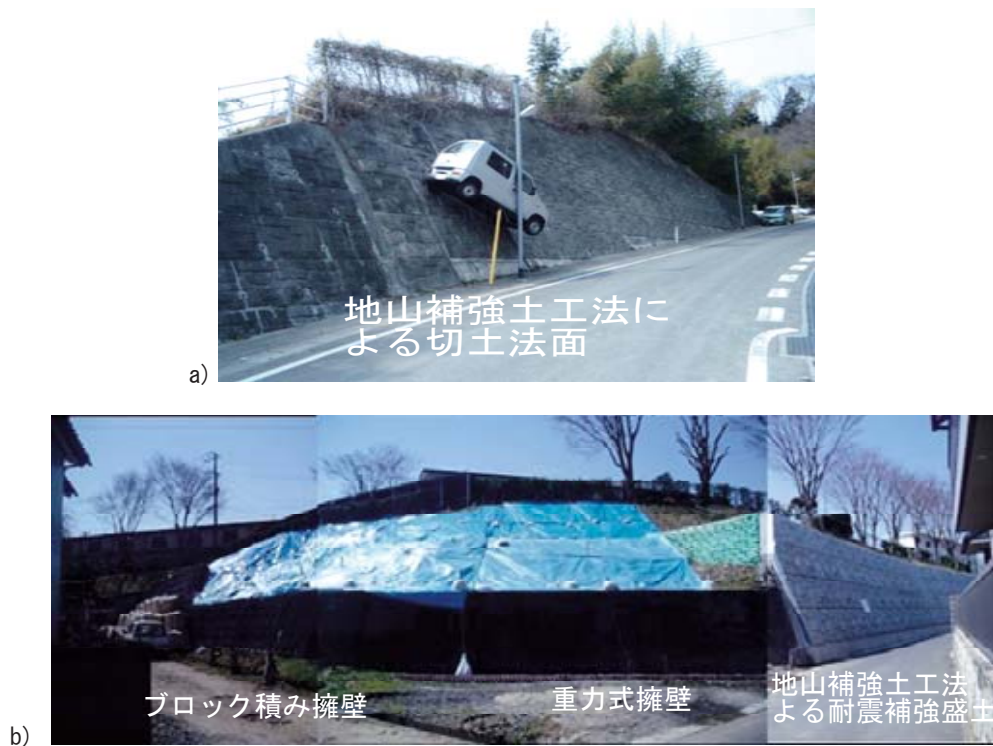


図 3-3 崩壊を免れた地山補強土工法による切土斜面（小高猛司）

- b) JR 東日本の新幹線を含む鉄道・道路等に建設されたジオテキスタイルで盛土を補強した擁壁とそれを活用した橋台は、従来型の無補強の盛土や抗土圧構造物（擁壁や橋台）と比較して被災例はほとんどなく、高い耐震性を示した（例、仙台付近（図 2-8）、一ノ関付近、盛岡付近）。また、住宅地盛土に建設され、高い耐震性を示した例もある（山元町）。また、岩手県田野畑村机浜では、無補強の道路盛土が津波により著しく浸食され、さらにその上部の切土斜面も表層が崩壊した。しかし、反対側にある補強土擁壁は津波による浸食を受けず変状も発生していなかった。

3.1.4 高さ 15 m 以上のダム

今回の地震の地震動は、0.1 秒から 0.7 秒程度の周期成分が多く、これはすべての型式のダムの固有周期の範囲であり、ダムにとっては強力な地震動であった。しかし、コンクリートダム(約 260 基)とフィル

ダム（約 140 基）に行った地震後の点検によると、これらのダムは強い地震動に耐えた。すなわち、コンクリートダムは本体の損傷は皆無であった。フィルダムでは、現行の技術基準を満足しない既存土構造物と見なされる昭和 24 年竣工の灌漑用ため池ダム（藤沼ダム）が破堤した（図 3-4）。しかし、その他では、10 ダム程度で天端に亀裂、のり面の変形が見られたが、安全性に問題はなかった。その中でも、亀裂の発生したアースフィルダムは、建設年代 1960 年以前のものが多い。1970 年代以降のロックフィルダムは、良好な挙動を示した。ただし、アスファルトコンクリートの表面遮水壁ロックフィルダムで遮水壁に亀裂が生じた。これは、地震当時まだ気温が低く、特に揚水発電の上池は標高が高く、極めて寒冷であったため、アスファルトの伸び能力が小さかったことが大きな要因である。ただし、ダム本体にはなんら異常はなく、安全性は損なわれなかった。継続時間の長さや余震の多さからコンクリートダムに比べフィルダムの損傷が多かったと推定される。

今後、全国レベルで、近代的な設計施工のされていない古いダムで下流に災害をもたらす虞のあるフィルダムを見つけ出し、適切な補強をすることは、大きな課題である。



図 3-4 藤沼ダム（須賀川市）北東側の堤体決壊箇所（安田進）

3. 2 従来想定が無いか不十分であり、提言も無いか不十分であった事例

前述のように、従来想定されていない要因と形態の被害が多数あった。すなわち、

- ・巨大津波、
 - ・継続的な大規模余震、
 - ・広域多所災害、
 - ・非常に多数の個人所有の戸建て住宅の被害、
 - ・機能を完全に喪失する崩壊、
 - ・付帯設備の地盤災害によるシステムの機能障害、
 - ・地盤工学的な対応が必要な広域な地盤沈降と地盤沈下、農地塩害、津波堆積物、放射能汚染土壌、災害廃棄物と有効利用等の諸問題
- である。

3.2.1 巨大津波

二つの基本的な技術的課題がある。

1) 津波防御施設（防波堤・防潮堤、海岸堤防・河口近くの河川堤防等）の設計・建設・維持の課題

今回、これらの施設は津波高さが想定高さを超えるまでは機能していたが、その多くは超えてからの越流・浸食・洗掘等によって基礎地盤とともに崩壊した。盛土形式の防潮堤は両のり面と天端面はコンクリート工で三面張りにしてあるが、越流した津波が下流側（陸側）ののり面を急速に流下する際に生じる強烈な吸い上げ力により、盛土に固定されていない天端のコンクリートスラブと下流側最上段のコンクリートのり面工が剥ぎ取られ、そこから盛土の浸食が開始されて、やがて全断面が喪失したものが多かった。図 3-5 に示すのは、そのようなパターンの破壊が開始された状態の例である。それでも、釜石港防波堤のように津波エネルギーの軽減に貢献した防波堤（図 3-6）や防潮堤もあった。しかし、その崩壊と完全機能喪失（場合により機能の部分維持）のプロセスには不明な点が多く、今後、検討・研究に基づいた対策法の確立が必要である（後述）。なお、これらの津波防御施設だけで問題が解決するのではなく、多重津波防御施設と避難システムも必要である（後述）。

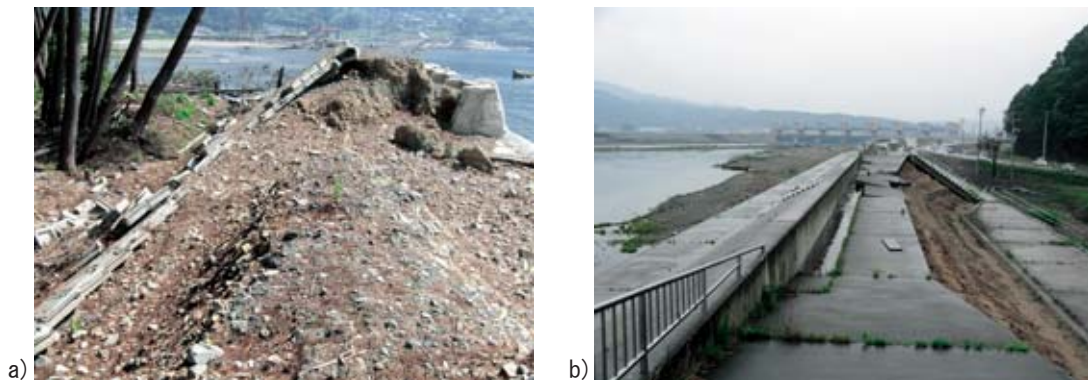


図 3-5 a) 天端面のコンクリートスラブと下流側のり面最上段のコンクリートのり面工がはぎ取られた防潮堤（大船渡市三陸町越喜来漁港付近）：b) 天端面のコンクリートスラブが移動し下流側のり面最上段のコンクリートのり面工がはぎ取られた防潮堤（宮古南津軽石付近）。これらの箇所の延長上では全断面が消失した箇所がある（龍岡文夫）



図 3-6 釜石港の津波による防波堤の被害（港湾空港技術研究所提供）

2) 津波防御施設以外の社会基盤構造物の津波に対する耐力の確保の課題

今回の地震では、以下のように多様な社会基盤設備が巨大津波によって損傷・崩壊し、様々な課題が

示された。

- ・岸壁等港湾施設： 図 3-7 に示すのは、相馬港の矢板岸壁の被害である。おそらく、津波（押し波）だけによって引き起こされた被害ではなく、地震動である程度変状して、その後の津波（引き波を含む）で変状が拡大したと思われる。
- ・河川堤防と付帯設備（堰・水門・排水機場）(図 3-8)
- ・電力流通設備（配電、変電、鉄塔等）
- ・下水処理施設（沿岸地域）
- ・鉄道・道路盛土（盛土法面の洗掘・流失による崩壊、橋梁部での落橋と橋桁・橋台背面盛土・橋台・基礎の流失）(図 3-9)
- ・高速道路（津波堆積物による道路やインターチェンジの閉鎖）
- ・杭基礎の引抜きを伴う低層～中層建築物の倒壊（図 3-10）



図 3-7 相馬港における矢板式岸壁の被害（港湾空港技術研究所提供）



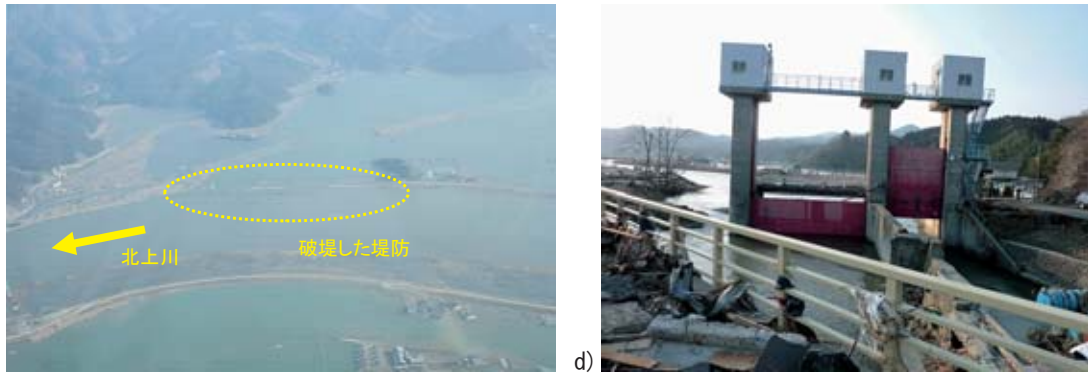


図 3-8 北上川河口部、内容：津波による越流、決壊、水門損傷）： a) 右岸 4.0 km 堤防破堤； b) 左岸 3.0 km 堤防の崩れ； c) 右岸破堤した堤防； d) 左岸 0.0 km 月浜第二水門の損傷（東北地方整備局提供）



図 3-9 a) 宮城県気仙沼市本吉町津谷川左岸： 橋台上流部での河川堤防が決壊、右岸でも同様に橋台上流部が決壊。左岸の決壊幅は約 16 m であり、橋樋管などの構造物があった形跡があることから、それが弱部になり決壊した可能性もあるが、橋台上流側のみが決壊した原因は不明である。また、橋台下流側では橋台背面が浸食されていたが、それより下流側の堤防には目立った被害はみられなかった（渦岡良介）； b) 上流側か見た JR 東日本気仙沼線本吉駅陸前小泉駅間の津谷川橋梁（橋げた流失、橋脚損壊：津波は高架橋の桁を越流）（龍岡文夫）



図 3-10 女川町における津波により転倒した RC 建築物（小高猛司）

これらの被害に対処するためには、以下の対応が必要である。

- 1) 溯上津波による防潮堤・河川堤防の被災メカニズムの解明、特に、
 - i) 盛土形式での既往の法面对策工の津波に対する効果（図 3-5 参照）
 - ii) 津波波力と越流による浸食・洗掘による堤体の崩壊（図 3-5 参照）
 - iii) 基礎地盤の洗掘

- 2) 津波を考慮した設計の課題
 - i) 津波波力・越流浸食と基礎地盤の洗掘に強い防潮堤・防波堤構造物、
 - ii) 津波外力を考慮した港湾施設の設計
 - iii) 河川堤防の付帯設備の堰・水門・排水機場の崩壊に対する設計
 - iv) 道路・鉄道：津波および津波運搬物の外力を考慮入れた設計
 - ・橋梁：津波で流出しない背面盛土・橋桁・橋台・基礎の経済的で有効な構造（洗掘に強い基礎）
 - ・盛土： 図 2-4 に示すように津波に対する多重防護施設の一つとして二次的な津波溯上阻止機能を期待する場合は、図 2-5 に示すように、越流浸食・流出、洗掘を防止する構造形式とその設計が課題となる。
 - ・路線選定と構造的対処：津波に対する街作りに応じた道路・鉄道の路線選定と、それに対応した構造的な対処とともに、列車・自動車の制御と退避を含めた防災計画が必要になる。なお、首都圏を想定した場合、巨大津波による地下街・地下鉄の浸水は人命に直結する深刻な課題である。

今回の様な巨大津波による大被害を一つの施設で対処するのは困難なことから、津波多重防護施設と住居地高台移転の構想が提案されている(図 2-4)。共通課題として設計津波高さの決定の課題があるが、ここで触れない。以下は、この提案に対する地盤工学の立場からの提言である（図 2-5）。

- 1) 後述のように、防潮堤などの盛土の造成に、津波被害によって発生した廃棄物を塩分処理等して活用する。
- 2) 防潮堤・防波堤等の海岸津波防御施設：
 - ・ RC 構造物形式での基礎地盤に対する根固め工や矢板工などによる洗掘対策が必要。また、滑動と転

倒防止に杭等基礎構造物の非常に大きなせん断・引抜き抵抗を確保する必要など課題がある（場合により、地盤の液状化の影響を考慮する必要がある）。

・防潮堤背面や護岸背面の安定性と機能確保のための設計や施工技術開発にあたっては、以下の点を考慮する必要がある。

a) ゲート周辺が弱点を有している。

b) 越流による天端コンクリートスラブと裏面（陸側）のり面のコンクリート工の不安定化、その後の盛土の浸食・背面地盤の洗掘が起因となって安定性が損なわれた。

c) 引き波による背面からの津波力により盛土と前面（海側のり面）のコンクリート工の不安定化・津波の波力、洗掘、越流した津波の流速圧などの点で、水理学の分野との協同研究が必要である。

・天端を防災緑地とする盛土形式の防潮堤を採用する場合、土地利用の観点から堤体底面幅を小さくして土工量を削減する必要となる場合がある。また、今回の地震では、海岸に近い通常の盛土形式の堤体の多くが、津波の越流により浸食・洗掘により消滅したことから、津波波力・洗掘に対して有効に抵抗できて、仮に越流しても消失しない耐力が必要となる。これらの課題に対して、盛土補強土工法を活用して盛土本体を安定化させ、天端とのり面のコンクリート工は補強材で結合して安定化できる可能性がある。なお、越流による盛土の浸食・流出に強い構造形式の例として、農業土木で実用化されている盛土補強土工法による越流許容型ため池堤体（図 2-9）がある。

3) 海岸近くの津波避難施設

・中高層ビルでは、建築物自体に津波耐力があり、基礎杭には十分な引き抜け抵抗が必要（場合により地盤液状化を考慮する必要がある）。

・地下シェルターを検討する価値がある。

4) 耐震性ととも二次的な津波溯上阻止、あるいは仙台東部道路のように避難場所としての機能を期待して道路・鉄道盛土を活用しようとする場合、一定程度の高さが必要となる。その場合、通常の盛土形式で建設すると堤体幅と土工量が大きくなりすぎる場合がある。これらの場合に対して、盛土補強土工法によって安定的に盛土法面を急勾配にしたり壁面が鉛直に近い補強土擁壁を建設する方法を提案できる。

5) 高台に住居地を移転・整備する場合、仙台市周辺の古い時代に建設された多くの宅造盛土が崩壊している事実を考慮する必要がある。すなわち、古い技術レベルで、例えば不十分な締固めや排水設備が不十分な盛土とそれに付随して安定が十分でない擁壁を建設したり、安定性に対して十分な処置をしないまま地山を掘削して急勾配斜面とすれば、耐震性が保証できない。また、切土部と盛土部の法面も、場合によって津波耐力が必要となる。従って、住宅や重要施設をできるだけ安定な切土部に配置する一方、安定化と敷地確保と言う矛盾を解決するために、必要に応じて切土斜面は地山内部に鉄筋等を配置する地山補強土工法などで斜面を急勾配化しつつ安定化する工法を提案できる（図 2-6b）。また、生活道路や公園等は、良く締固め排水設備を配置して安定化した盛土部に配置するのが良いであろう。この場合も、盛土の安定化と敷地確保と言う矛盾を解決するためには、盛土を必要に応じてジオテキスタイル等で補強する盛土補強土工法を提案できる（図 2-6a）。

6) 農地を巨大津波から防護するためには、海岸堤防に代表される線的な構造物だけでなく、堤防背後の農地や林地などの面的な構造物も活用した段階的に防護レベルを上げる多重防護の考え方に基づく防護技術の導入が不可欠である。

3.2.2 地震動

今回の地震での地震動（最大地表加速度 PGA）のレベルは、従来から耐震設計で採用してきたレベル II 設計地震動と比較しても、想定外ではない。しかし、プレート境界型地震の連動によるマグニチュードが 9.0 にもなったことの結果として、設計地震動の設定に関して、従来想定してないか想定が十分でなかった以下の課題が浮き彫りになった。

- 1) 継続時間が非常に長いため繰返し载荷が多数回となり、土構造物・地盤の劣化（液状化現象を含む）が進んだ。また、震央から遠くなるほど地震動の卓越振動数は減少する傾向にあるが、同一の地表加速度でも卓越振動数が低いほど地盤内に生じるひずみは大きくなって地盤の劣化がより進む。これらのことから、土構造物と地盤のより合理的な耐震設計をするにあたっては、レベル II 設計地震動には適用する最大加速度レベルとともに地震動（加速度の時刻歴）そのものを示す必要がある。
- 2) 極めて広い地域が強震動を受け、広域多所災害をもたらした。
- 3) 大規模余震が長期に多数継続的に発生した。このような余震が土構造物の耐震性や復旧活動に与える影響は従来想定していなかった。本震、余震の影響範囲が広いと、東北地方から関東にかけては、本震後に発生した余震の影響により鉄道の復旧を遅らせた。また、これらの余震は谷埋め盛土の宅地の変形と若年埋立て地の液状化を助長した。また、翌日に生じた誘発地震である長野・新潟境地震では、JR 東日本の飯山線の盛土（現行基準を満足しない既存土構造物の一つ）が崩壊した。

将来の構造物の供用期間など所定の期間内での所定の地点における所定のレベルの地震動の正確な予測は極めて困難であり、当面不可能である。しかし、その想定は重要構造物では設計上必要になる。そのため、地震学や地質学・応用地質学と協働を進め、歴史地震の痕跡（液状化跡や津波堆積物等）の調査とその調査結果に基づく地震作用（地震力・断層変位・地殻変動）の設定について研究を推進すべきである。主体となる分野は地震学や地質学・応用地質学であり、調査技術や地震作用（地震力・断層変位・地殻変動）の設定は地盤工学との関係が深く、共同作業が必要である。

これらは地盤データベースに収録して、被災ポテンシャルの予測や土地利用計画に反映させることが必要である。

3.2.3 広域多所災害

広域でも少数の災害、多所でも狭い領域に集中した災害ならば、通常は短期の復旧が可能になる。しかし、今回の震災では、個々の場所での被害は極端に甚大ではないが広域多所災害であるため、

- ・被害の全貌の把握に非常に時間がかかる、
- ・直ちには到達できない被害地点が多い、
- ・対応すべき災害の数が膨大である、
- ・ガソリンなどの必要物資の供給不足になってしまった、

などの理由で、復旧・復興に極めて長時間が掛っている。現在でもその途上であるものも多く、被災者と社会の被害を深刻にしている。

これに関連して、現行基準を満足しない可能性がある既設土構造物（盛土・擁壁等）と崩壊した場合に社会に対して大きな影響がある虞がある未対応の自然地盤・斜面に対しては、必要な耐震診断・耐震

補強を実施する努力はしているが、対象地点が膨大なため、その達成は遥かに遠い状態にある。従って、「被害箇所が少ない、あるいは被害箇所が多くても被害地域が広大ではない」ことを暗黙の前提として、「まれにしか発生しない地震に対しては特別な耐震対策はしないで、そのような事象の発生により壊れたら直ちに復旧する」と言う方針を採用せざるを得なかった。しかし、今後もこれを基本方針にした場合は、広域多所災害が再び起きた時に、十分に対応できないことになる。特に、広域に線状・面的に展開する鉄道・道路、河川堤防、上下水道、電力送電設備等は、一か所の崩壊が広域にわたる機能支障を引き起こす可能性があるため、復旧が緊急に必要となる。このため、広域多所災害に備えて、出来る限り、必要な耐震診断・耐震補強を進めてゆく必要がある。

以下は、広域多所災害への対応の提案である。

- 1) システム全体としての、初動対応のための被害推定システムの整備が必要である。
 - ・今回地震では、電力では有効に機能した例がある（東北電力）。
 - ・鉄道は、構造物、軌道構造、信号設備、電気設備、車両、駅設備、運転からなる巨大なシステムであり、震災時にどの部位・部門に欠落しても、鉄道の安全、かつ定常な運行は不可能になる。したがって、広域多所災害に対するハード対策として、鉄道システム全体としての耐震評価技術、診断技術の確立、そして診断結果に基づく継続的な強化が必要である。同時に、無被害・被害等の被害箇所推定システムは確立されていないのが現状であるため、地震後の鉄道全体の被害推定システムの研究を進める必要がある。

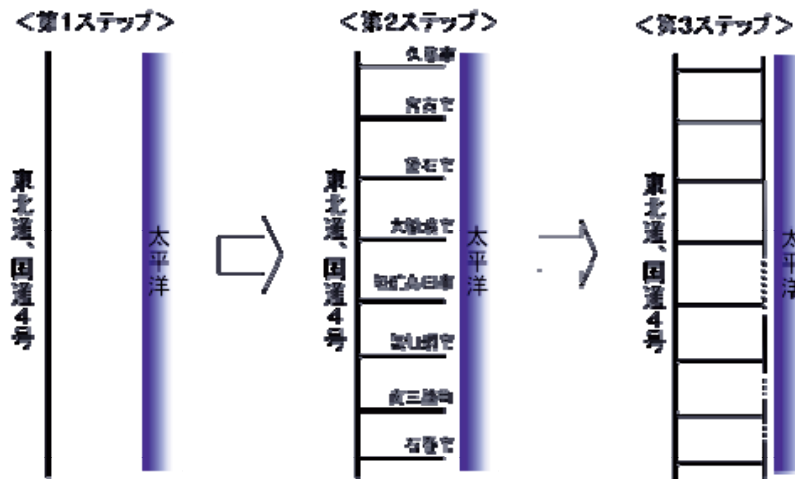


図 3-11 「くしの歯」作戦の進捗状況（国土交通省資料より抜粋）

- 2) ライフラインには、余力があるネットワークが必要である。

重要ライフライン（高速道路、高速鉄道、電気、ガス、上下水道、電信電話等）は、広域に亘り全滅することは、絶対に避けなければならない。そのためには、以下の方策が必要である。

 - ・今後システム全体としての余裕（冗長性）と融通性があるシステム構築と総合対策が必要である。たとえば、一般道路では津波による盛土の流出や橋梁の流失、落橋により交通ネットワークが断絶した。道路では、緊急輸送路の早期確保のため、「くしの歯」作戦によって約1週間後に緊急輸送

路を確保・開放した。これが可能となったのは冗長性がある道路ネットワークの存在である。図 3-11 に示すように、「くしの歯」作戦では、津波により大きな被害がでた沿岸部に素早くアクセスするために、まず内陸側の南北ルート（東北道、国道 4 号）を確保し、次に「くしの歯」である東西ルートを確保して、沿岸部の南北ルート（国道 45 号他）を約 1 週間で通行可能にした。

- ・弱点となる多くの現行基準を満足しない既存土構造物を抱えているシステムでは、継続的な耐震診断・耐震補強が必要となる。
- ・幹線ネットワークを新たに構築することにより、二重のネットワーク構築を目指すことも検討する必要がある（例：神戸市の上下水道）



図 3-12 JR 東日本飯山線横倉～森宮野原間の盛土の崩壊と剛で一体の壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁で強化復旧（JR 東日本提供）

3) 「壊れたら直す」から「備え」への基本方針の転換

- ・第一に、被災した土構造物と地盤・自然斜面の復旧には、地盤工学の最新の技術を生かして、耐震性が高く経済的である構造物に強化復旧する必要がある。翌日に生じた誘発地震である長野・新潟境地震で崩壊した JR 東日本の飯山線の盛土は、ジオテキスタイル補強土工法（図 2-6a）によって強化復旧された（図 3-12）。
- ・第二に、システムの機能維持にとって肝要な地点での「現行基準を満足しない可能性がある既存土構造物」と「未対応の自然地盤・斜面」は、できるだけ耐震診断と経済的で効率的な耐震補強を実施し、新設の土構造物は適切な耐震性を持たせる、と言う基本方針に転換する必要がある。全国的に見て、今後の震災を防ぎ軽減するために、この課題の緊急性は高い。

3.2.4 谷埋め盛土・若年埋立て地の個人所有の戸建て住宅等の被害

1) 東日本大震災までの経緯

戸建て住宅の被害は、津波による流出の他は、丘陵地の谷埋め盛土の崩壊と若年埋立て地の液状化による被害に集中している。これらの場合、下水道等のライフラインの被害が個人生活の震災を深刻化させた。これらの要因をまとめると、以下のようなになる。

- a) 埋立て地・盛土を造成した地方自治体・企業体等による住宅供給者への地盤の品質説明と、また埋立て地と盛土を宅地に整備した住宅供給者の住宅購入者への地盤の品質説明と必要な場合での品

質保証が制度化されていない。そのため、購入者は地盤の品質説明とそれによる品質確認がない状態で戸建て住宅を購入する状態であった。2000年4月に住宅の品質確保等促進法が施行され、建設業者や宅地建物取引業者は10年間の無償補修等を行う義務が課せられることになった。しかし、そこには地盤の液状化の予測と対策に関する宅地建物の品質保証は扱われていない。

- b) 地盤の液状化に関する最新の技術が実質的に有効に適用されていない場合が多いなど、技術管理システムが未整備であった。すなわち、宅地の設計・施工に関しては、「宅地防災マニュアル」が1988年に制定され、1998年、2007年に改定された。2007年の改訂版では、地盤の液状化に関する項目が取り入れられている。各自治体では「宅地造成技術マニュアル」をそれぞれ制定しており、軟弱地盤が予想される場所では、地盤の液状化の調査を行うことが示されている。しかし、地盤の液状化に関しては「宅地造成等規制法」などによる法律的な規制がないため、これに関する検討の実施が限定的であった。
- c) 個人で負担可能な谷埋め盛土・若年埋立て地の宅地の耐震診断法と低価格の復旧工法・対策工法の開発が遅れていた。
- d) 宅地の被災に対する保険制度が未整備であった。

更に、生活に直結する下水道施設などの地盤に埋設されるライフラインでは、支持地盤と埋戻し土の改良による液状化対策が十分ではなかった。

2) 谷埋め盛土宅地

道路・鉄道・河川堤防・海岸施設・電力設備等の公共的社会基盤施設の盛土・擁壁等の土構造物の地震被害とその社会的影響の重要性の問題に対する社会認識は、近年の何回もの地震での地盤被害によって高まっていた。これらの地震では、谷埋め盛土などの個人資産の戸建住宅に地盤被害も生じた。

戸建住宅では、建設時には宅地造成等規制法により、宅地造成等規制区域では基準を満足した場合には許可され販売用に供される。しかし、宅地造成等規制区域は、我が国の国土面積の2.7%に過ぎず、それ以外の区域に対しては安全な宅地造成の規制が及ばない。加えて、建設時には許可基準を満足しても、宅地は個人資産であるため販売後の維持管理は個人の責任になり、現実には殆ど実施されない。このため、建設時からの時間経過に伴う地下水位の上昇や盛土・擁壁の変位等に関しては注意が及ばない場合が多く、地下水位が高い宅地が多い。このような条件下で地震が発生すると、傾斜地に盛土された谷埋め盛土や腹付け盛土では液状化に起因する被災が発生しやすい。このため、1995年阪神・淡路大震災と2004年新潟県中越地震での多くの宅地の被災を契機にして、地震時に対して耐震性を考慮した新しい基準が2007年に設定された。しかし、その強制力は十分ではないことに加えて、これは新設の宅地を対象としたものであり、既存の宅地に対してはその効力は及ばない。既存の宅地に対しては、将来の地震に対する備えのために宅地耐震化推進事業を進めることとしているが、法の改正後、日が浅いことも一つの理由として、その効果はまだ発揮されていない。これらのため、**図 3-13**に模式的に示すように危険な状態で長期間放置されているケースが、基準を満足する場合よりもはるかに数多く存在していた。このため、実存する宅地の殆どは、地震に対する備えがなく、実際に、東日本大震災では、仙台市だけでも、主に谷埋め盛土と関連した擁壁の崩壊により800を超える宅地が深刻な被害を受けて危険宅地と判定され(**図 3-14**)、さらに1,200を超える宅地も被害を受けて要注意宅地と判定された。

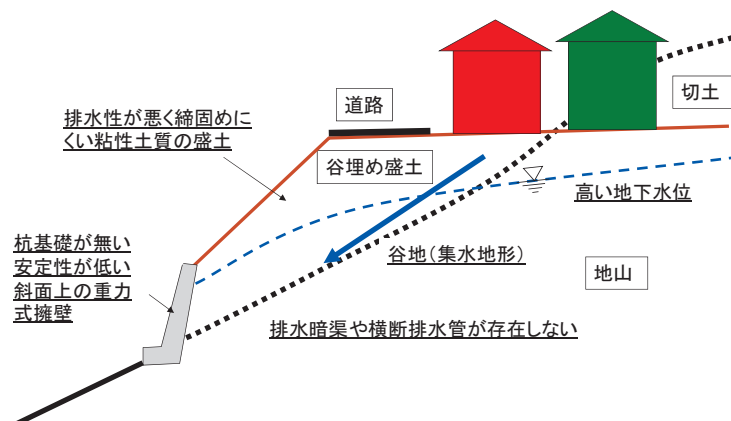


図 3-13 谷埋め盛土の宅地での地盤工学上の諸問題の模式図



図 3-14 宅地の被災例（仙台市青葉区折立）（風間基樹）

今回の被害の特徴とパターン分類は、以下のとおりである。

- (1) 多数の箇所丘陵地を切盛りした宅地造成地が被害を受けた。このうち、宮城県内の被害では、1978年宮城県沖地震によって被災した箇所が再び被災した箇所や、新たに被災した箇所がある。新たな箇所が被災した原因の一つとしては、1978年宮城県沖地震よりも振幅が大きく継続時間が長い揺れが考えられる。
- (2) 一般に、造成宅地基礎地盤の地震被害のメカニズムは、図 3-15 のようなパターンに分類できる。このうち大規模な被害としては、a) 自然地盤内で発生する滑り面をもつような地すべり性の崩壊現象による宅地被害はほとんどなく、b) 谷地形を埋めたいわゆる谷埋め盛土部の斜面開口部での被害が多発している。図 3-16b に示すのはこのパターンの被害例であり、谷埋め盛土部の斜面開口部の変状事例である。この写真の場所は、図 3-16c の上部の谷埋め盛土部の斜面開口部に位置している。また、長い継続時間の地震動の影響のためと思われる e) 盛土部の沈下も非常に多く、切盛り境界部の宅地建物の不同沈下となって被害が顕在化している。

パターン b の地震被害である図 3-16a に示す宮城県白石市での事例では、1978年宮城県沖地震の際に被害を受けた造成宅地が再び被害を受けた。しかし、集水井などの対策によって被害が限定的にとどまった。仙台市太白区緑ヶ丘でも、1978年宮城県沖地震の被害を受けて抑止杭と地下水位低下工法を併用した対策を行っていたため、今回の地震では盛土全体の滑動崩落を防ぐことができた。こ

のように、一度被害を受けた宅地が再度、被災を受けた事例としては、2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震の事例がある。

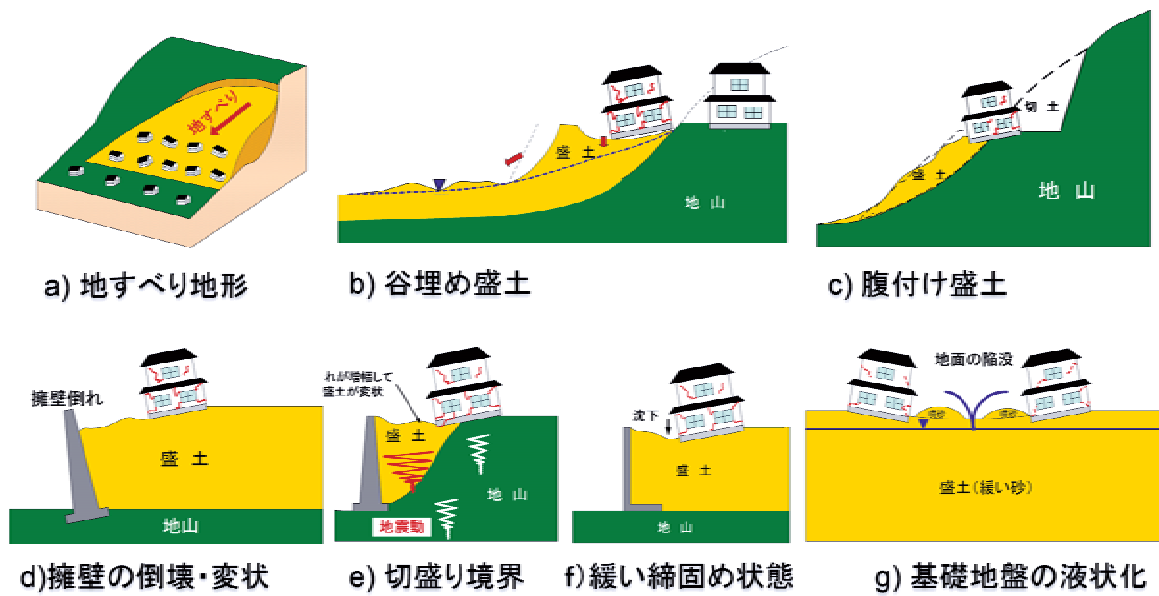


図 3-15 宅地の基礎地盤の地震被害のメカニズムによるパターン分類

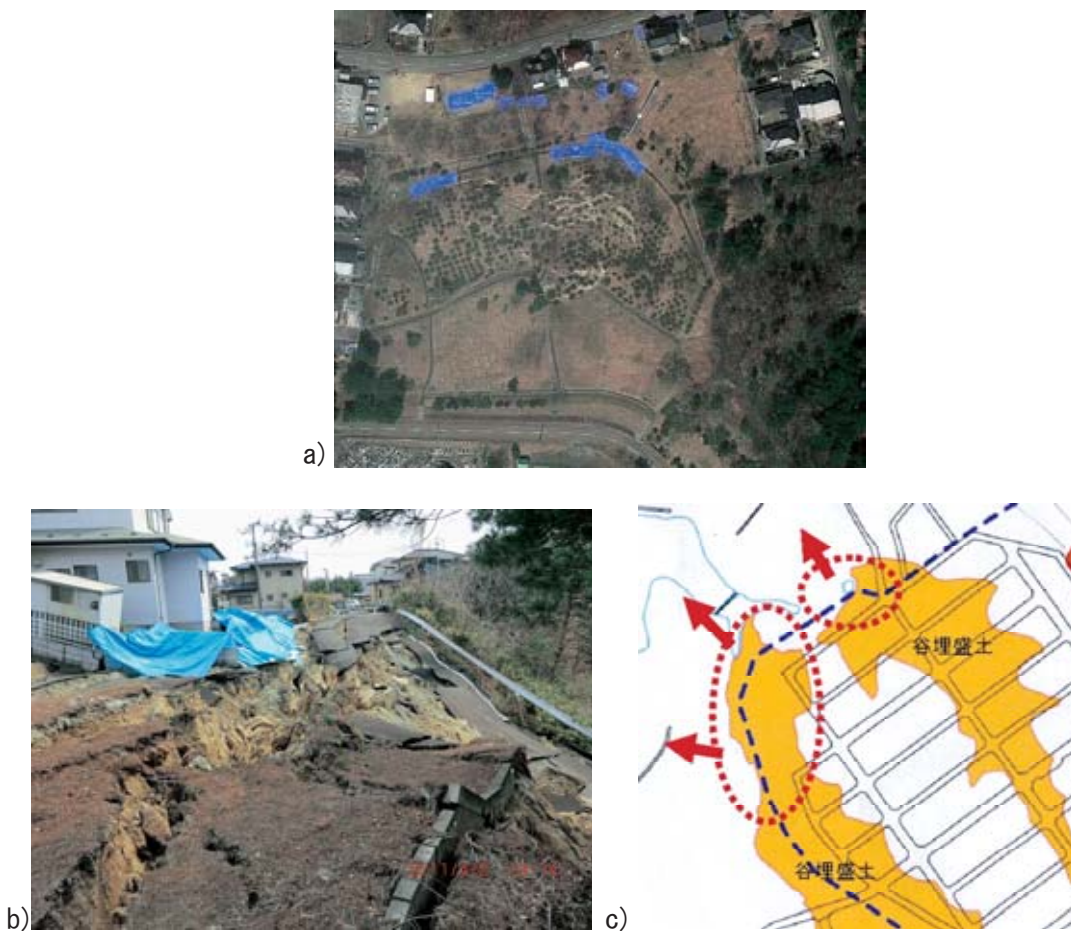


図 3-16 a) 宮城県白石市での、1978 年宮城県沖地震で被災した造成宅地が再び被害を受けた事例 (Google 画像)、b)

谷埋め盛土部の斜面開口部の変状事例（風間基樹）、c)事例 b)の位置（上部の谷埋め盛土部の斜面開口部）（佐藤真吾）

震災復旧に関しては、「宅地擁壁復旧技術マニュアル（1995年）」や「被災宅地復旧技術マニュアル（暫定版）（1994年）」等に加えて、宅地所有者の啓発のために、「我が家の擁壁チェックシート」や「我が家の宅地安全マニュアル」等も自己啓発用として発行されている。しかし、その実行は個人に任されていたため、確実な実行性は低かった。さらに、現状でも復旧工法には耐震対策を明文化したものがないため、今後周期的に起こる大地震に対する対策は不十分になる可能性がある。このような状態に対し、平成18年(2006年)に宅地造成等規制法が改正になり、都道府県知事は地震時に居住者に危害を生じる発生のおそれ大きい大規模盛土造成宅地を“造成宅地防災区域”として指定することが出来るようになった。これに従って、現在各地の自治体で地震時における変動予測調査が始められているところである。ただし、まだ調査段階であり、対策には至っていない。

また、これらの復旧の課題では、個人で費用負担することが困難となる場合が多い。すなわち、宅地の基礎地盤が被害を受けた場合には、建物のみ建替えや修繕にとどまらないため、個人の費用負担も大きくなる。

さらに、その復旧は、狭隘な場所での施工になり、また降雨による二次災害への対応が必要となる。また、宅地造成地では、盛土変状より下水道等のライフラインも被害を受けやすいことは従来から知られていたが、実際にはその対策が殆ど行われていなかった。このため、今回の地震でも甚大な被害が発生した個所があった。

3) 若年埋立て地の戸建て住宅

若年埋立て地に建設されていた戸建て住宅も、上記とほぼ同様な状況であった。すなわち、東北から関東にかけて広い範囲で地盤液状化が発生し、構造物に影響を与えた。震央から最も遠い地盤液状化発生地点の一つは横浜市金沢区であり、その震央距離は422kmである。この最大の震央距離自体は国内外の過去の地震による地盤液状化発生範囲から特に遠いわけではない。しかし、地盤液状化が与えた被害に関しては、やはり地震規模が大きかったことに起因して、特徴的な被害が発生した。すなわち、震央距離が380kmと遠かった東京湾岸の若年埋立て地で図3-17に示すように非常に広い範囲で地盤液状化が発生し、住宅地に甚大な被害が発生して、1万戸を超す戸建て住宅が図3-18に示すように沈下や傾斜した。また、下水道などのライフラインと道路が甚大な被害を受けた。同様の被害は関東平野内の沼や川などを埋めた若年埋立て地盤でも数多く発生した。東北においては丘陵地の造成宅地の一部でも発生した。東北地方、関東地方の河川堤防なども地盤液状化により多大な被害を受けた。



図 3-17 推定した地盤の液状化が発生した範囲(安田進・原田健二)



図 3-18 地盤の液状化による家屋・道路の被害(安田進)

民間が行う戸建て住宅の建設において、施工者が遵守を義務付けられている地盤液状化の予測と対策に関する明確な技術基準がなく、実際に多数の戸建て住宅が宅地の液状化による被害を受けた。すなわち、以下の諸問題がある。

- (1) 戸建て住宅に対しては、図 3-1 に示す公共構造物の設計基準類に記述されているような、基準化されたあるいは標準化された地盤液状化の判定法がない。
 - a) 現状では、地盤液状化の予測をする場合、ハザードマップに頼る場合がある。しかし、ハザードマップの作成法は各機関に任されていて標準化された方法によるものではない。また、個々の戸建て住宅の地盤液状化予測に対する精度は、通常十分ではない。また、地盤の液状化の有無と程度は想定する地震動の大きさに依存するが、そのことを考慮していない場合が多い。
 - b) 地盤液状化の判定を「想定した地震荷重」と「推定した地盤の液状化に対する強度」を比較して行う場合に、想定すべき地震入力が統一されていない。
 - ・戸建て住宅を対象とした日本建築学会小規模基礎設計指針での「地盤液状化の判定法」では、レベル II 設計地震動の考慮を明示していない。ただし、今回の地震によって東京臨海部で実際に広範な液状化が生じた若年埋立て地での地震動はレベル II 設計地震動に達していない(図

3-19)。従って、上記の「レベルⅡ設計地震動を考慮していないこと」が、今回の地盤液状化を想定外とする理由とはならないはずである。しかし、この点について、技術者の間で統一見解がないことは確かである。

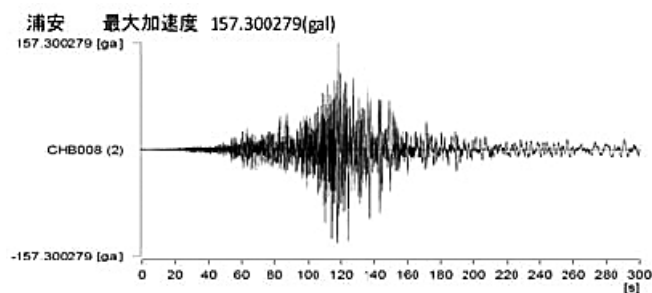


図 3-19 浦安市の K-NET において記録された地震波形

・従来から地盤の液状化の対策を行ってきた公共構造物や中・高層ビル等に対する地盤の液状化の判定では、現状では通常レベルⅡ設計地震動を想定している。従って、主要地震動の継続時間の影響への考慮が不足していても、今回の地震での東京臨海部の若年埋立て地の液状化の可能性を実質的に過小評価することにはならない。

このように、両者の地盤液状化の判定法での設計地震動の設定法には整合性の問題があり、担当技術者によっては異なる判定がなされることになる。

c) 戸建て住宅の地盤調査には、通常スウェーデン式サウンディング試験のような簡易地盤調査が行われる。しかし、この方法では粘性土、シルト、砂質土等の土質と地下水位の判定が困難であり、測定深度に限界がある等の理由で、地盤の液状化の十分精度がある予測は難しい。一方、公共構造物や中・高層建築物に対する地盤液状化の予測には、ボーリング孔内の標準貫入試験と採取した土質試料の地盤液状化に関する室内土質試験の結果が用いられているが、この方法は戸建て住宅に対しては高価と考えられ敬遠されてきた。

(2) 埋立て地を造成した機関・企業体のそれを購入した住宅供給者に対しての、また埋立て地を宅地として整備した住宅供給者の購買者に対しての地盤の品質説明および必要な場合の地盤の品質保証は、従来は明確には制度化されていなかった。ここで言う地盤の品質説明とは、宅造盛土の崩壊と地盤液状化の可能性、仮に盛土が崩壊したり液状化した場合に生じる可能性がある被害、地盤の品質確認をするために必要な地盤調査の必要性とその費用、必要になった場合の対策工法の方法と費用などの説明である。

すなわち、2001年国土交通省告示第1113号第2号では、「地震時に液状化のおそれのある地盤の場合または・・・、建築物の自重による沈下その他の地盤の変状等を考慮して建築物または建築物の部位に有害な損傷、変形及び沈下が生じないことを確かめなければならない。」とあり、それに対応した建築基準法施行令93条解説（地盤・基礎杭の許容応力度）では「地盤の許容応力度の検討に際しては、基礎の寸法・形状・・・その範囲に液状化のおそれのある場合には、液状化による沈下等の影響が軽微であることが確認できない限り地盤の短期許容応力度を設定することはできない」とある。上記が戸建て住宅にも適用されると解釈した場合には、戸建て住宅でも地盤の液状化の検討は必要に

なる。また、若年埋立て地が地震時に液状化しやすいことは建設技術者にとって良く知られたことである。これらのことから、戸建て住宅でも地盤の液状化の検討をする設計者は居たであろう。しかし、実態としては、戸建て住宅に対する地盤の液状化の検討は、その実施を建築確認時にチェックすることとはなされておらず、そのため義務化されているとは一般には解釈されていなかった。さらに、地盤の液状化の検討と必要な場合はそれに対する対策の実施に必要な技術的手段と技術基準も整備されておらず、それに対応できる技術者集団も養成されていなかった。

4) 地盤災害による戸建て住宅の被害を防ぐための提言

以下は、丘陵地の宅造盛土と埋立て地の宅地の問題に共通した提言である。

- (1) 既存の宅地に対しては、2007 年度に宅地造成等規制法の改正により創設された大規模盛土造成地滑動崩落防止事業を推進するため、国土交通省の主導により全国の都道府県ならびに市町村に対して呼びかけられている「大規模盛土造成地の耐震診断」を早急に実施する。
- (2) 被災宅地における公的支援復旧対策方策の導入が必要である。すなわち、丘陵地の宅地盛土の被害の多くは、所有者が異なる数十の個人宅地を含む広範囲の宅地盛土が一体として滑動崩落することによって生じたものである。また、個々の宅地・擁壁の被害に加えて、道路等の公共社会基盤施設の被災も含まれる。さらに、公共社会基盤施設の復旧は、舗装等による道路・交通機能の回復に伴う構造的な原状復旧が多いことから、道路と宅地を恒久に安定化するためには盛土全体の滑動崩落を抑止する強化復旧が必要であり、この対策によって宅地安定化に対する住民負担が軽減する。従って、復旧には、被害の程度に応じて行政の適切な関与が必要である（表 3-2 参照）。

表 3-2 宅地被災規模と復旧の仕組み（被害のパターンは図 3-15 参照）

被害の程度分類	被害のパターン分類	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
1) 数十戸以上の宅地に関する大規模な被害（個人の対応を越えるもの）		◎	◎	—	—	—	—	◎
2) 数戸の宅地に関する中程度の被害、公共施設や隣地に危険が及ぶ被害		—	○	○	○	—	—	○
3) 個別の宅地の範囲内で限定される被害（個人の対応となるもの）		—	—	△	△	△	△	△
個別の宅地地盤の被害であるが原因が共通的で被害戸数が非常に多い被害		—	—	—	○	○	○	◎

復旧において◎：行政の関与が望まれる被害、○：行政のある程度の関与が望まれる被害、△：行政の関与が不要な被害

この仕組みの一例として、1995年阪神・淡路大震災後に創設された道路災害復旧事業や災害関連緊急急傾斜地崩壊対策事業等の特例措置で対応が図られた、民間宅地擁壁等における再度災害防止のための対策事業がある。東日本大震災においても上記の制度を活用し対応することを検討すべきである。

- (3) 丘陵地の大規模盛土造成地（谷埋め型、腹付け型）の地震被害を受けた箇所と受けなかった箇所を調査し、その原因を究明し、従来から言われている盛土の不十分な締固め、不十分な排水処理、安定性に欠ける擁壁などの原因と比較検討し、今後の宅地の耐震化に活かすことが必要である。
- (4) 新設と既設の丘陵地の宅造盛土と埋立て地での戸建て住宅の基盤条件の把握が必要である。
- a) 土地・地盤の成り立ちを反映した土地利用計画や防災計画の策定： 例えば、扇状地（土石流の頻発地域）、氾濫原（洪水の頻発地域や地震時に液状化の原因となる軟弱地盤の存在の可能性が高い地域）での洪水、自然堤防と後背湿地（地震時に液状化しやすい飽和砂質地盤や長期的な圧密沈下が生じやすい軟弱粘土地盤が多い地域）、三角州での軟弱地盤、谷埋め盛土、埋立て地盤等の人工地盤等を把握
- b) 埋立て地や盛土範囲を把握する調査手法の確立：
- ・土地履歴調査、旧地形の把握、埋立て地や盛土以前の土地利用、埋立て地や盛土の造成年代、過去の災害履歴、土地改変履歴等のデータベース(DB)の整備と開示（法的整備含む）
 - ・施工履歴と現状（盛土材料、締固め度・N値、変形状態、地下水・表面水等）
- これらの方策を個人で全て実施するのは通常は困難であり、自治体の積極的な援助が必要である。
- (5) 既存の戸建て住宅の宅地盛土の耐震診断の方法の開発と制度の整備、耐震補強と埋立て地の液状化対策の低価格の方法の開発
- (6) 宅造盛土・埋立て地の宅地の建設技術（排水・締固め等）に関する基準の整備及びその導入・実施体制の整備による対策工法の提案体制の確立
- (7) 損害保険の適用法の修正。例えば、地盤災害の対策を施した場合には保険料を低減する制度の導入。
- (8) 新設の戸建て住宅： 購入予定者が地盤の品質確認ができるように、販売者による地盤の品質説明が専門知識のある技術者によって行われることを義務化する必要がある。そのためには、宅地に関する品質説明ができる「地盤品質判定士」の制度の導入を提案する。被災を受けた宅地に対する「被災宅地危険度判定士」は、各都道府県によって既に制度化されている。「地盤品質判定士」は、被災した宅地の危険度の判定とともに既存の宅地の品質説明と品質判定ができる資格である。
- (9) 地盤の予備的な品質確認に役に立つ地盤情報の公開：地盤工学会は、2010年出版の「関東の地盤」の他に、全国各地域の地盤情報を収集し誰でも自由に利用できるように整理してHP上に「電子地盤図」として公開してきた。これを更に推進するために、

- a) 国と地方公共団体が実施してきた地盤情報の公開の推進と維持管理の継続、
- b) 地方自治体が保有する建築確認の際の地盤情報の公開、
- c) 道路・鉄道・電力・ガス等の社会基盤施設の整備・管理に責任のある民間企業から地盤情報の公開の協力を推し進める必要がある。そのためには、一定の法的な整備が必要である。

特に、以下は若年埋立て地の液状化の対策に関する提言である。

(1) 戸建て住宅に適用できる標準的な地盤液状化の判定法の開発：

- a) ハザードマップは、地盤液状化の調査をするべきかの判断をする予備判定法としての意義がある。この作成方法の標準化と精度を高める。特に、旧河道、旧湖沼、埋立てなど地盤の履歴を考慮した信頼性のあるハザードマップの再整備が各自治体にとって必要である。
- b) 地盤の液状化の判定のための適切な地震荷重の設定： 地盤液状化の判定を担当する組織、技術者、担当者が参照するか採用する統一的な地震荷重を設定する必要がある。地盤工学会は、その際リーダーシップをとるべきである。その中で、戸建て住宅に対しても、通常の公共構造物や中・高層ビルと同様に、レベル II 設計地震動を想定して地盤液状化の判定をするのかを検討する必要がある。それに対応して PGA（地表最大加速度）+波形（継続時間、卓越周波数）を規定するのかが検討する必要がある。
- c) 地盤の液状化に対する強度の推定： スウェーデン式サウンディング試験は、これまで宅地の標準的な地盤調査法として用いられてきた。しかし、この方法では、土の粒子径・均等係数等の土質の判定が困難であること、調査可能な深度が小さいこと、正確な地下水位の推定が難しいことなどの理由で、高精度な地盤液状化の判定は難しい。従って、詳細な地盤液状化のための地盤調査が必要な個所を洗い出す目的の予備調査に用いるのが良い。その際、今回の東京臨海部等での地盤液状化が生じた個所と生じなかった個所のスウェーデン式貫入試験のデータを収集・整理して、この予備調査の精度を向上させる必要がある。

一方、公共構造物と中・高層建築物に対しては、土質判定が容易で深い地盤まで調査ができるボーリングによる標準貫入試験や採取試料の室内土質試験等による地盤調査が行われる。従来、同様の地盤調査を戸建て住宅に対して適用することは、個人が負担する費用としては高過ぎると思われてきた。しかし、ボーリングによる標準貫入試験は数 10 万円程度（住宅の建設費全体の数%程度）からの費用で実施できることから、今後戸建て住宅でも必要に応じて実施することを推奨できる。同時に、精度を確保しつつより低価格で実施できる調査法の開発も必要である。
- d) 地盤工学会として、個人でも活用できる地盤液状化の予測法の手引きを示す必要がある。
- e) 地盤の液状化によって被災した戸建て住宅に対しては、液状化した地盤の再液状化を考慮する必要がある。

(2) 戸建て住宅に適用できる地盤液状化対策工法の開発

- a) 被災した戸建て住宅に対しては、簡易な 200 万円以下で実施可能な家屋の沈下回復・傾斜是正工法や直下地盤の改良技術の開発が必要である。また、家屋の沈下回復・傾斜是正だけでなく、地盤の液状化防止や液状化しても沈下しない方法で復旧することが望まれる。最近、コンパクショングラウテ

イング(CPG; 図 3-20)、薬液注入、高圧噴射など、建物直下を地盤改良できる技術が急速に進んでいるので参考にすると良い。



図 3-20 浦安市での CPG による地盤の直下改良 (安田進)

- b) 既設の戸建て住宅に対しては、液状化の可能性のある地盤に建設された場合に対する低価格の対策工法（沈下・傾斜を防止するための簡易杭等、200 万円程度）の開発が必要である。
- c) 新設の戸建て住宅に対しては、宅地が地盤液状化の可能性があると判断された場合に適用する、既設とは別途な低価格の地盤液状化対策工法（表層地盤改良、柱状地盤改良、小口径杭等）の開発が必要である。従来地盤液状化による戸建て住宅の被害を軽減すると考えられていたべた基礎に関しては、今回浦安市などで戸建て住宅の地盤液状化による沈下は、べた基礎の方が布基礎よりも大きい傾向にある。これは、べた基礎の方が布基礎より重いためである可能性がある。また、支持地盤に液状化が発生した場合に住宅を小口径杭で支えて沈下しないようする工法の場合、住宅回りは地盤が沈下してライフラインの被害や段差などが発生することを念頭においておく必要がある。

(3) 戸建て住宅の地盤液状化に被害を防ぐための社会的広報活動

社会一般に地盤の液状化とその対策法に関する知識を広く普及する。地盤工学会としては、従来一定の活動をしてきたが、より一層の努力が必要である。

5) 下水道

若年埋立て地の戸建て住宅の住民は、地盤液状化による下水道管路の浮上等によっても著しい被害も受けた。また、宮城県・福島県をはじめ、各地で埋め戻し土の液状化により下水道マンホールと管路が浮上した。全国には、耐震性の低い既存の旧技術・旧基準で建設された下水道管路が多数存在していて、埋立て地、および埋立て地でなくても埋め戻し土が、将来の地震によって液状化して被災する可能性が高い。この状態に、緊急に対応しなければならない。このような既設の下水道マンホールの耐震性を向上する技術として、重量調整や過剰間隙水圧消散による対策方法など幾つかの工法が開発され適用されるようになってきた。ただし、既設の管渠施設に対して一般的に普及した方法がまだ開発されてきていないのが現状である。今後そのような工法を開発して対策しやすくする必要がある。



図 3-21 浦安市での宅地と道路の不同沈下（石原雅規）

また、下水道は自然流下を基本としているため、その他のライフラインに比べ特に地盤の不同沈下の影響が大きい。浦安市等のように全面的に液状化した地域においては、図 3-21 に示すように道路に比べて宅地の沈下量の方が大きく、道路を切り下げた場合には土被りが不足するおそれがある。また、このような不同沈下とともに縦断勾配不全によっても下水道施設の被害が生じた。また、広域に液状化した地域（埋立て地や造成地）の歩道や道路の下には、水道、ガス等の他のライフラインも敷設されている場合が多い。これらの復旧においては、関係者で協力して耐震対策に取り組むことが重要である。

6) 地盤液状化による道路面の変状

国道・県道・市町村道等で地盤液状化により道路面が変状して、交通障害が生じた。広域多数被害であったため、復旧が遅れた場所も多い。

3.2.5 機能を完全に喪失する崩壊プロセスの想定と要求性能の設定の課題

2011 年東日本大震災は、極めて稀に発生した巨大地震であり、それによる津波の高さも従来の想定を上回るものであったために甚大な被害が生じてしまった。今回のように極めて稀に発生する可能性のある非常に強大な自然災害に対しても安全な構造物を合理的に設計する方法は、社会が構造物に期待する安全性の要求レベルとそれを実現させるために必要な社会的なコストのバランスを考量して定められる。

現在、社会基盤施設の耐震設計では、1995年阪神・淡路大震災の経験を踏まえて、一般に、2 段階の地震動レベル（レベルⅠ とレベルⅡ）を設定して、構造物の挙動がそれぞれ使用限界と修復限界（あるいは終局限界）を超えないようにしている。この性能設計の考え方は、コンクリートや鋼を主要な材料とする構造物に対しては、津波による被災など一部の例外を除いて、今回の地震において概ね有効に機能したと評価されている。また、数十年から百数十年に一度の頻度で発生するレベルⅠの津波を上回る規模の津波に対しても、相当の損傷を受けたものの、その機能を完全に失うことはなく、ある一定の減災効果が発揮できたものも少なくはない。

しかし、土構造物によっては、構造体の一部ないし全体が流動化ないし大きく形状を変えてしまうほどの変形をしてしまい、構造物としての機能を完全に失ってしまうような壊滅的な状態（機能完全喪失の崩壊）に至ってしまった。その結果、極めて甚大な損害を発生させてしまったものがある。その例を

以下に挙げる。

- ・最初の大きな津波に対して被災した津波防波堤・防潮堤が、越波やその引き波によって浸食・洗掘されてしまい、後続する津波に対して無力であった。
- ・旧技術で建設されたため池の堤体（例えば藤沼ダム、図3-4）が被災して大量の貯水が鉄砲水となって下流の人家が被災した。

このように土構造物が壊滅的な破壊状態（機能完全喪失の崩壊）に至ってしまう理由は、土構造物がその表面あるいは内部の水（土石流など流れ下る土砂も含む）の流れによって表層の一部で浸食・洗掘あるいは内部で地中浸食（パイピング）が始まると、それによる地盤材料の流出が短時間に周辺に拡大して構造体が完全に流れ下ってしまうからである。また、このように土構造物が一気に崩壊してしまう「流動破壊」は、液状化が関与すると考えられる地震時の斜面の流動的な崩壊（移動が速く移動距離も長い斜面崩壊）でも生じている。

さらに今回の地震では、杭基礎構造物の杭が引き抜かれた状態での転倒という、これまで余り想定していなかった激しい破壊の事例も見られた。巨大津波に見舞われた女川町の沿岸部において、十数メートルの長さの杭を底面にぶら下げた状態でRC造の中層建築物が横転していた（図3-10）。現在、各方面の研究者により原因の究明が進められているが、地震動による杭周辺地盤の液状化と高さ十メートルを超える津波波力の複合作用が考えられているようである。このような事例は、地震動による地盤液状化と津波という複合作用による基礎構造物の壊滅的な破壊状態（機能完全喪失の崩壊）とも言え、津波避難施設であるならば避けなければならない事態である。

このような観点から、社会の安全の観点から非常に重要な構造物については、設計で想定したレベルを超えた作用（地震動や津波など）あるいは想定しなかった作用の組合せに対して、ある程度の損傷を受ける（修復限界（あるいは終局限界）を超える）ことは仕方ないとしても、その影響が壊滅的な破壊状態（機能完全喪失の崩壊）に拡大・直結しないようにすることが重要である。別の言い方をすると、たとえ初期的ないし部分的な破壊状態に至ってしまった場合にも、その破壊状態の影響を限定的なものに留め、その作用、さらには後続する作用に対して全く無力となる（減災効果が完全に失われてしまう）状況に至ってしまうことがないように構造物を粘り強いものとして設計すべきである。たとえ現在または過去に想定した規模を超えた作用あるいは作用の組合せを受けて修復限界（あるいは終局限界）を超えてしまった場合にも、一定レベルの減災効果を維持することによって、被害を無制限に拡大させないように設計するという考え方は従来の設計法にはなかったことである。

一方、社会の安全を守るために建設された各種の土構造物は膨大な数量に上り、また、その中には旧技術によって建設されて未だに新技術による耐震診断・耐震補強が行われていないために現行基準の要求性能を満足しない可能性がある（現在、想定されている作用あるいは作用の組合せに対して安全とは言えない）既設土構造物が多いのも事実である。また、たとえ現在の技術基準によって設計・構築されていたとしても、人類の知識は完全とは言えないので、今回の大震災のように想定したレベルを超えた巨大津波に襲われる可能性が全くないとは言いきることはできないと思われる。例えば、原子力発電所の耐震設計で策定される基準地震動 S_s においても、地震学的見地から S_s を上回る強さの地震動が生起する可能性を否定できないとの認識に立ち、「残余のリスク」⁴⁾ という概念が導入されている。

注4) 2006年9月19日の原子力安全委員会において決定された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審

査指針」の中で、「策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすことのリスク」と記されている。この「残余のリスク」の存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきである、とされている。

このような状況において、全ての土構造物に対して、現在の技術基準で想定している地震動や津波高さなど、あるいはそれらの組合せを超えるレベルの作用を考慮して設計することは、社会経済性の面から合理的とは言えず、現実的ではない。さらに、地震動については、レベルⅡ設計地震動の定義は「現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さの地震動」とされているので、これを上回る強さの地震動を明確に定義することは原理的に困難がある。しかしながら、上に述べたように、人類の知識は完全とは言えないので、現在想定される最大級の強さを上回る地震動の発生を完全に否定することが難しいことも事実である。

そこで、想定される作用（地震動や津波など）あるいは作用の組合せを超えた作用を受けて仮に終局限界に至った場合でもその機能を完全に失うことがないように配慮した設計を、ある条件に適合した構造物に限定して行うことが考えられる。このような構造物としては、社会の安全性に対して極めて重要であり、それが壊滅的な破壊状態（機能完全喪失の崩壊）を受けた場合に被害が極めて甚大となるものが挙げられる。対象となる構造物の例を以下に示す。

- a) 密集市街地を守る津波防波堤・防潮堤・河口近くの河川堤防
- b) 三大都市部のゼロメートル地帯を守る防波堤・防潮堤・河川堤防・護岸構造物
- c) 有害物を含む廃棄物を貯留する大規模な処分場の堤体
- d) 下流に市町村または人家がある貯水用のフィルダム・ため池の堤体・鉱さいダム
- e) 災害時の大規模な避難所

これらの土構造物が、本震の地震動ないし先行する津波によって壊滅的な被害を受けてしまうと、大きな余震による地震動ないし後続する津波、あるいは地震直後の豪雨・洪水に対して無防備な状態になり、被害が非常に拡大し復旧に必要な時間と労力が膨大になる可能性がある。

これらの構造物に対する設計の考え方としては、土地利用や避難体制等のソフト対応に加えて、以下のようなものが考えられる。

- a) 防潮堤・防波堤を、越波・越流や引き波によって過度に浸食・洗掘あるいは地中浸食（パイピング）されないようにする。【大規模な津波被害を防ぐ】
- b) ゼロメートル地帯を守る堤防を、越波・越流によって過度に浸食・洗掘あるいは地中浸食（パイピング）されないようにする。【大規模で長期の浸水被害を防ぐ】
- c) フィルダムやため池あるいは廃棄物処分施設の堤体を、大規模な崩壊を生じないようにし、かつ、越流によって浸食・洗掘されないようにする。【貯水（または貯留）機能の低下を限定的なものに留め、下流の大規模な被害を抑える】
- d) 多重防護の仕組みを導入する。被害を複数の防災構造物（ハード）や避難システム（ソフト）を組み合わせて被害レベルを低減する。例えば、ダムが決壊することも想定し、ダムの下流に洪水流の一部を一時的に貯留する容量を確保する。

このような考え方を適用するにあたって、現在の設計基準で設計された土構造物が想定されたレベルを超えた作用（地震動や津波など）あるいは作用の組合せを受けた際の挙動、また、古い設計基準で設計されたために崩壊の危険性が高い土構造物が現在の設計基準で想定する作用（地震動や津波など）あるいは作用の組合せ、ないしそれを超えた作用あるいは作用の組合せを受けた際の挙動を評価する必要がある。そのためには、現在想定しているレベルを超えた作用（地震動や津波など）あるいは作用の組合せの概念を導入し、また、その作用あるいは作用の組合せに対する要求性能を明確にする必要がある。

現在想定しているレベルを超えた作用（地震動や津波など）あるいは作用の組合せについては、理論的に考えられる規模、歴史上発生したと推測される最大規模、さらに不確実性を考慮してそれらに一定の割り増しを行った規模などが考えられる。

要求性能としては、終局限界（構造物の破壊ないし早期に修復することが不可能な程度に損傷を受ける）に達するが、

- a) 損傷の影響が極端に大きくならない程度に抑えて、多数の人命の脅威にならないようにする。すなわち、初期的ないし部分的な破壊後にも、最低限の機能が発揮できるように構造物の残留変形を抑えるように設計する。機能の回復には再構築が必要であるが、災害低減に寄与できる一定以上の残留機能を保持できるようにする。【残留機能（第2機能）の保持】
- b) 連続して襲来する津波ないし余震（2回目以降の地震作用）あるいは豪雨などとの複合作用に対して、壊滅的な破壊状態（機能完全喪失の崩壊）に至らないように設計する。【複合作用や繰返し作用に対する被災防止】

このような設計思想を確立するために、以下のような課題が考えられる。

- a) 構造物の破壊を超えてその変形ないし損傷の程度を予測する技術を開発する（被災による構造物の崩壊のメカニズムやプロセスを解明する）。
- b) 従来想定されていたレベルを超えた作用あるいは作用の組合せに対する要求性能（人命安全確保・ライフセーフ（life safe）、大惨事防止（catastrophe prevention）など）を設定する。
- c) 要求性能に対する構造物の機能（破壊後に残留する機能）を明確にする。
- d) 対象とする構造物の適用範囲を明確にする（極めて重要な防災施設のみに限定する）。
- e) ハードとソフトと組み合わせ、さらに複数の防災施設を組み合わせたシステムとして設計する（多重防護の考え方の枠組みを構築する）。

3.2.6 付帯設備の地盤災害によるシステムの機能障害

今回の地震での沿岸の産業施設の挙動に関しては、地盤液状化対策など十分な地震対策が施されていた各種重要施設は無被害か軽微な被害であった。しかし、以下の例のように、各種重要施設本体に隣接する付帯設備で地盤液状化対策等の地震対策が十分でないものが、想定外の形で地盤被害を受け結局は津波による波力・洗掘等で安定性を失い機能を喪失した。このため、多くの産業施設がシステムとして事業継続性を確保できない場合が多かった。

- a) 石油会社の危険物貯蔵施設では、オイルタンク等の危険物貯蔵タンクの耐震性が確保されたにも関わらず、これらのタンクから栈橋や周辺施設に至る配管等の施設が被災し、結局はオイルを供給するという施設に要求された機能を地震直後に果たすことができなかった。

- b) 火力発電所については、上記と同様、重要施設の耐震性は高いものの、配管等の周辺施設が地震動や津波によって被災し、電力供給という発電所としての重要な使命を地震直後に果たすことができなかった。
- c) 2007年新潟県中越地震の際の柏崎原子力発電所では、設計上の耐震クラスの異なる施設間の接続部に被害が発生し、発電所としての機能復旧に時間を要した。今回の震災でも同様の現象が生じていたか、今後確認する必要がある。

以上は、重要施設の付帯設備の耐震性の確保における地盤災害対策、および、重要施設と付帯設備との接続部の耐震性向上技術の開発が重要であることを示している。特に、地盤液状化に対しては、以下の対策が必要である。

- a) 岸壁・荷揚げ場等の施設を津波に伴う洗掘に対して安定性を確保するためには、支持地盤が液状化して支持力を失うことを避けなければならない。そのためには、地盤改良もしくは表層地盤の保護が必要である。
- b) 地盤液状化により浮上・沈下・傾斜した施設の早期復旧は、相当困難である。これに対する技術の開発が必要である。
- c) 多様な地盤工学技術による対策工法があるが、それらのコスト・確実性の観点から適切な対策工法の提示をする必要がある。

3.2.7 広域な地盤沈降と地盤沈下

地震時に、地盤は地殻変動に伴い沈降・隆起することがあり、締固まっていない地盤が地震時にゆすり込まれることや液状化後に過剰間隙水圧が逸散することにより沈下することがある。今回の地震では、両者が広い範囲で生じた。

1) 広域地盤沈降

東北から関東にかけての太平洋沿岸部で非常に広い範囲で地盤沈降が生じた。これは地盤の圧縮によるものではなく地殻変動に伴うものであり、各所で数10cmの沈降(牡鹿半島では1.2メートル)が生じた。三陸海岸では、このような地盤沈降が太古から繰返して生じ、その結果リアス式海岸が形成された。地盤沈降は、歴史的に見れば避けがたい自然現象であると言える。

仙台平野では、海拔ゼロメートル以下の面積が地震前の3km²から16km²に増え、5.3倍になった(図3-22、3-23、表3-3)。沈降により各地で図3-24に示すように住宅や農地が、2011年6月でも冠水した状態のままになっている。さらに、津波によって被災した地区の復旧の妨げになっている。排水しようにも海岸堤防が破壊されていたり、堤防高さが足りなくなっている。海岸堤防の復旧には長時間かかり、その間浸水被害が続き、さらに沈降にともなって地下水の塩水化が進行していくため、浸水地域の復興に深刻な問題を投げかけている。

この地震に伴う広域地盤沈降のため、各地の海岸地域、港湾施設、農地、市街地では排水不全状態になり浸水・冠水の被害が生じ、水没の危険に晒された。この広域地盤沈降は、温暖化による海水準の上昇と同じく、高潮・津波・豪雨・洪水による浸水被害や地下水の塩水化などの問題を長期的に深刻化させる。特に、地盤沈降した場所における海岸堤防は、背後のゼロメートル以下の標高の堤内地と海岸潮位との相対的標高差が増大し、基盤を浸透する海水浸透の動水勾配が増加する。この堤防の安定性、堤内地の地盤の塩水化防止(特に農用地として活用する場合)に対処するため、堤防の敷幅増大や止水壁

の利用などを考える必要があるが、これらには地盤工学の知識が不可欠である。

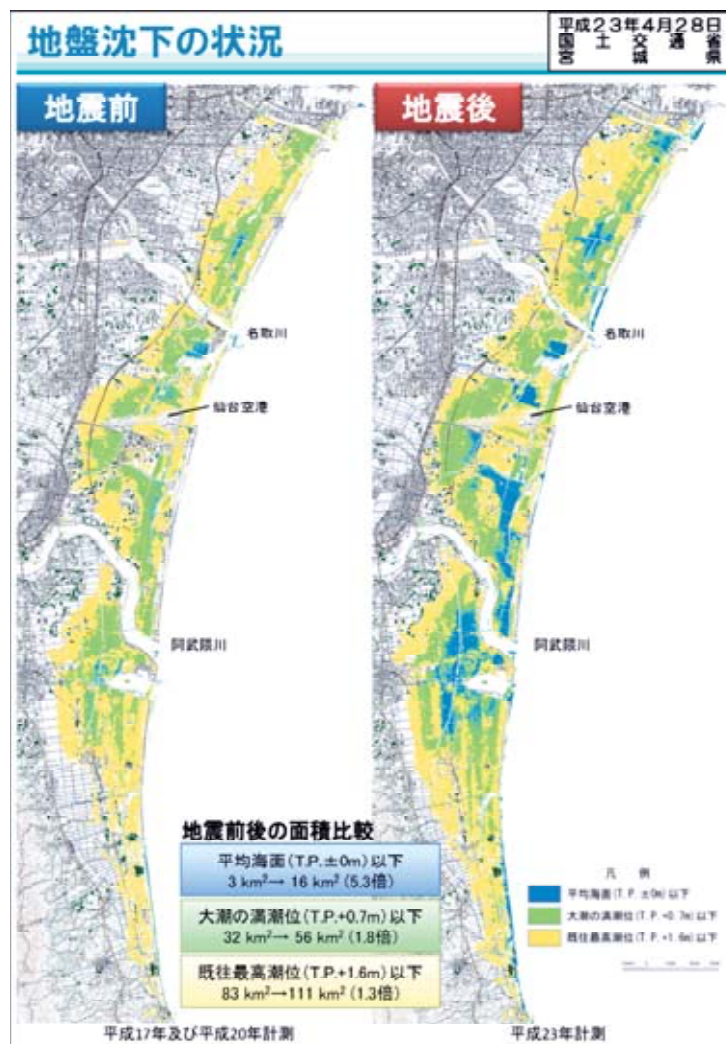


図 3-22 宮城県南部、内容：地震後の広域地盤沈下（東北地方整備局・宮城県）

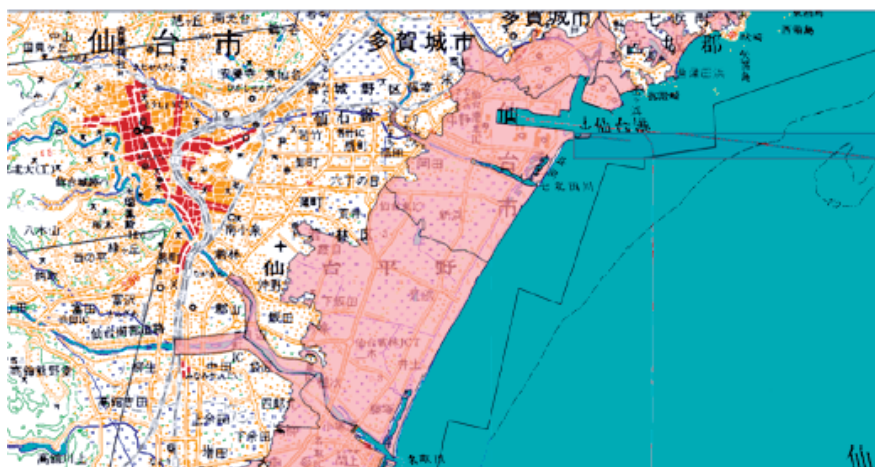


図 3-23 仙台平野の地盤の浸水地域 (国土地理院による)

表 3-3 各地の地盤沈下量（地盤沈降によるものが主）

（国土地理院 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下調査；

http://www.gsi.go.jp/sokuchiki_jun/sokuchiki_jun40003.html）

岩手県		宮城県		福島県	
市町村	地盤沈下の変動量	市町村	地盤沈下の変動量	市町村	地盤沈下の変動量
宮古市	0.50m	気仙沼市	0.74m	相馬市	0.29m
山田町	0.53m	南三陸町	0.69m		
大槌町	0.35m	牡鹿半島	1.20m		
釜石市	0.66m	石巻市	0.78m		
大船渡市	0.73m	東松島市	0.43m		
陸前高田市	0.84m	岩沼市	0.47m		



図 3-24 宮城原石巻市（二日後）（東北地方整備局提供）

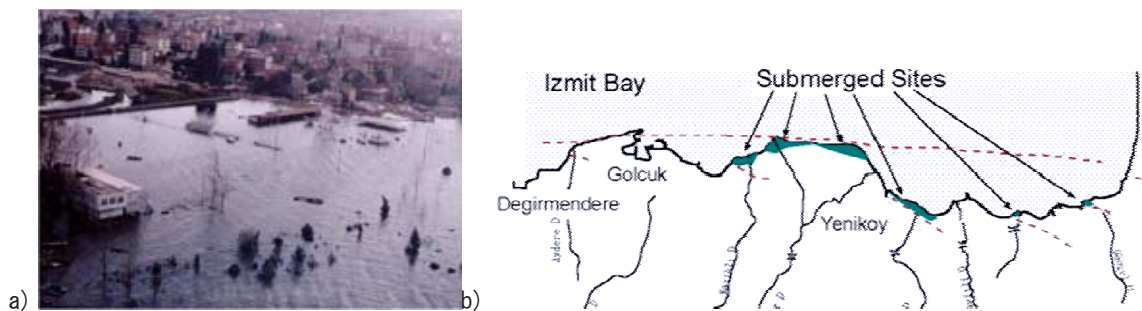


図 3-25 a) トルコ・コジャエリ地震によるギョルチュックの冠水状態； b) 水浸した地区（安田進）

1999 年のトルコ・コジャエリ地震でも、イズミット湾岸で図 3-25a に示すように広域に地盤沈降が発生した。このうちギョルチュックでは図 3-25b に示すように、1.5 m 程度の沈降が生じ、1 km 四方の地区が冠水した。この被災に関しては地盤工学会も調査団を派遣し、地盤調査を含む詳細な調査を行ったが、メカニズムの解明には至らなかった。国内でも、地震ともなう広域な地盤沈降は過去の地震でも各地で発生してきた。南海地震のたびに図 3-26 に示すように高知市付近が 1～1.5 m 程度沈降し、高知市内も

冠水する被害を受けてきている。今後、南海、東南海、東海地震により、また同様な地盤沈降が生じる可能性は大である。

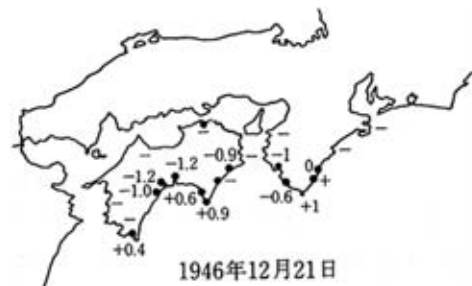


図 3-26 過去の地震における高知付近の地盤の沈降(河角廣による、数値の単位 m)

なお、将来の堤内地と海岸潮位との相対的標高差は、現在までの地盤沈降量と今後の変動量及び地球温暖化に伴う海面上昇量の総和であり、今後それぞれ監視追跡していくことが必要である。

以下は、上記に対する対策の提言である。

- a) 長期的な地盤沈降量と地球温暖化に伴う海面上昇量の総和としての相対的標高差の長期監視
- b) 地盤沈降が社会に与える影響を、今回の地震の事例などから整理。
- c) 広域地盤沈降のメカニズムの解明
- d) 災害による地形変化のデジタルマッピングの実施
- e) 原位置被災残壊物・津波堆積物・掘削土の市街地の嵩上げ、防波堤・防潮堤・埋め立てへの利用



図 3-27 浦安市における地盤の液状化による地盤の沈下 (安田進)

2) 広域な地盤沈下

液状化が広く発生した東京湾岸の埋立て地では、図 3-27 に示すように液状化にともなって広域に地盤が最大 50 cm 程度も沈下した。幸い浸水にまで至っている地区は無いが、浦安市などでは広い範囲で地盤全体が沈下している。そのため、自然流下のシステムをとっている下水道の復旧を今後どのように進めるかなど、大きな問題を抱えている。このように広域に地盤が沈降や沈下を生じると、生活に困難をきたすとともに、高潮の際に洪水を生じるなど災害に弱い地区となってしまう。東京の低地に広く拡が

るゼロメートル地帯では今回の地震では幸い堤防や護岸の被害がなく浸水被害が発生しなかったが、全国に多くある低地ではこのような災害の弱点を有している。

東京の低地のゼロメートル地帯では護岸や海岸堤防・河川堤防の耐震補強が進められ、地震水害の危険性は徐々に減少してきている。ただし、浸水の危険性はまだ完全には無くなっていない、必要な耐震点検と耐震強化等の早急な対策が必要である。また、全国の他の浸水危険地帯においても、危険性の検討を行い、対策を施していくことが必要である。

3.2.8 災害廃棄物、津波堆積物、塩害、放射能汚染土壌への対処

今回の地震では、膨大な量にのぼる災害廃棄物や津波堆積物の処理と有効利用、膨大な量に達すると見られる放射性物質で汚染された土壌、巨大津波によって広範囲の農地が冠水したことによる塩害(図 3-28a)と津波堆積物(図 3-28b)が課題となっている。

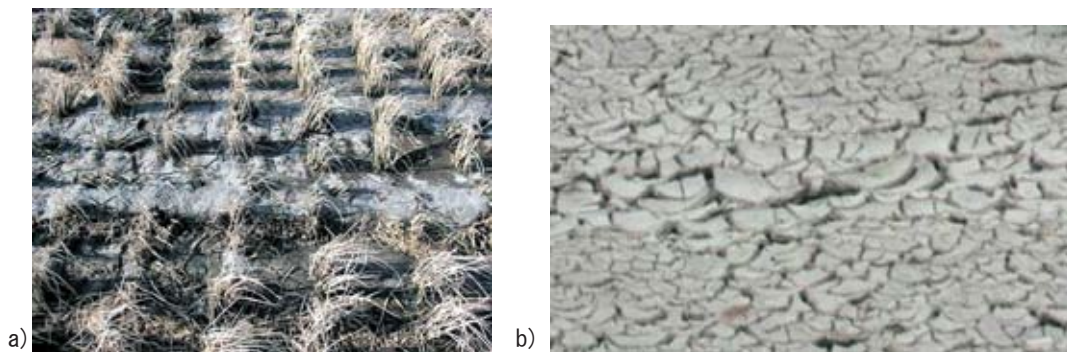


図 3-28 農地の津波被害: a) 塩害の例(宮城県亘理山元地区)。土砂堆積のない水田。津波が畦畔を超えて到達した形跡はなく、海水が排水路から逆流して侵入。乾燥して表面が塩分で白くなっている。地盤沈下も大きく湛水状況が続く; b) 農地での津波堆積物の例(宮城県亘理山元地区): 農地に津波が遡上し数 cm 以上のヘドロが農地全面に堆積(毛利栄征)

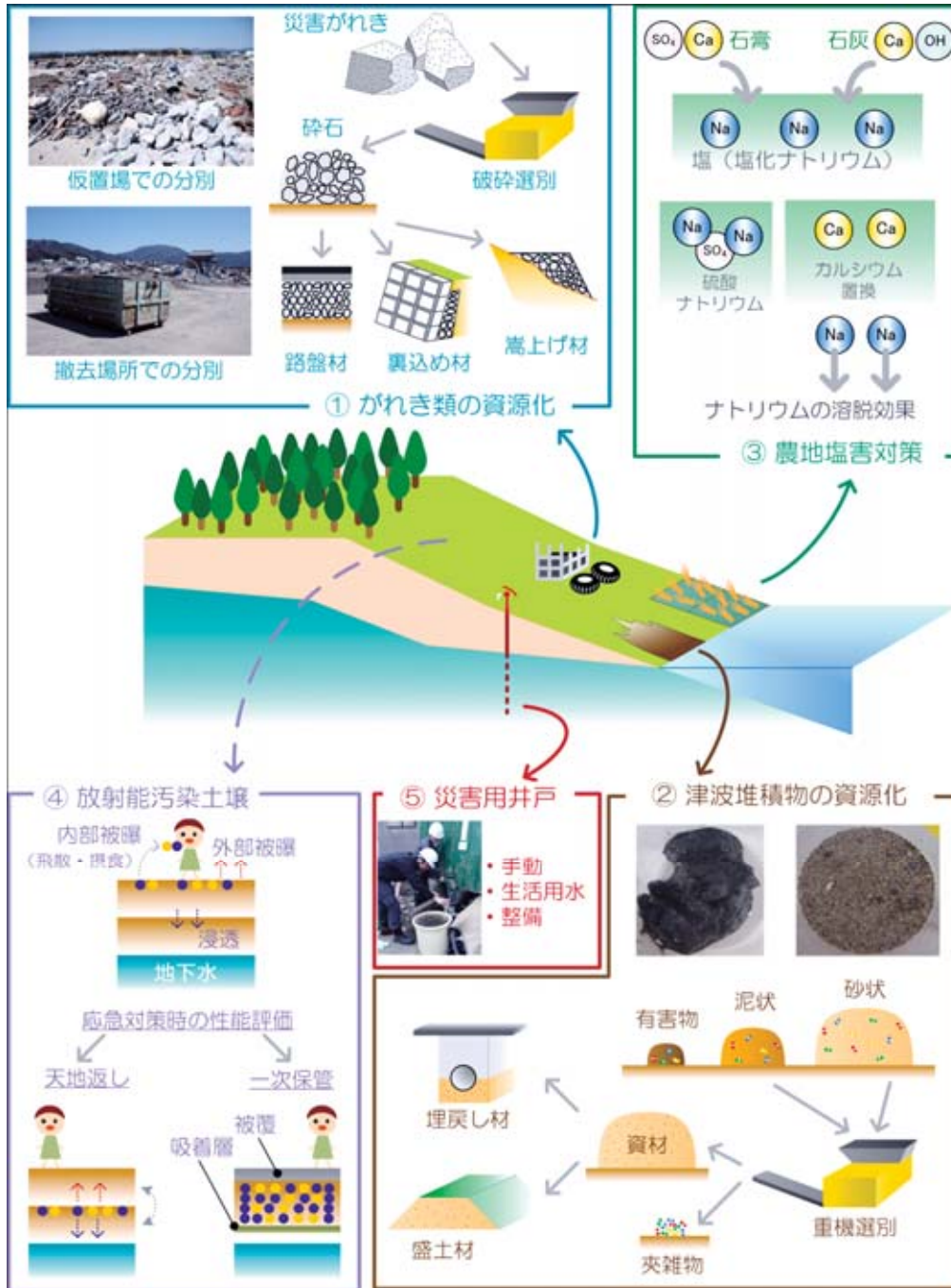


図 3-29 災害廃棄物、津波堆積物、塩害、放射能汚染土壌への対処（遠藤和人氏による）

以下は、これらの問題に対する提言である。図 3-29 は、それを簡略に示したものである。

1) 災害廃棄物や津波堆積物の安全かつ効率的な処理と資源への再生

地震災害時には、地震被害によって発生したがれき等の廃棄物、津波によって発生した廃棄物、津波によって陸上に打ち上げられた津波堆積物が膨大な量となる。今回の地震では、廃棄物の発生量は環境省により岩手・宮城・福島の三県で 2490 万トンにのぼると推算されており、津波堆積物は国立環境研究所により 1000 万 m^3 以上と試算されている。これら全てを埋立て処分することは経済性および埋立て容量確保の観点から難しく、可能な限り震災復旧・復興時に有効利用されることが望ましい。特に、地震

被害によって発生した廃棄物のうち環境影響の懸念のないものや、津波堆積物の中でも砂分を主体とするものは有効利用しやすい性状であることから、収集・仮置き段階で分別するなどして「地盤工学的な資材として再生」し、利用するように努め、その結果として最終処分量を少なくする努力が望まれる。それらを実現するためには、以下の課題が挙げられる。

- a) 資源再生化のための材料評価および処理手法の確立が必要である。津波堆積物はそのほとんどが土砂であり、砂分が卓越するものもみられることから、土質材料としての活用が考えられる。例えば「建設工事で遭遇する廃棄物混じり土対応マニュアル（土木研究所）」などをもとに廃棄物と土砂とを分離し、土砂は発生土の土質区分基準等に基づいて細粒分、含水比、強熱減量などから利用可能性と用途を評価することが考えられる。しかし、分級処理後の土砂の中にも細かい木くず等の有機質混在物が残留する可能性があり、大量の発生土からそれを効率的に除去することは容易ではない。従来、有機物を混入した土質材料は盛土材等には使われない傾向があるが、多少の有機物が残留した土質材料を適材適所に有効利用する方法を、検討・研究に取り組む必要がある。また、有害物質の含有の懸念がある津波堆積物については、砂分は有効利用しやすい性状であること、かつ、有害物質は砂分よりも粘土分やシルト分などの細粒分に含有している場合が多いと考えられることから（自然由来の場合はその限りではないが）、土壌洗浄法で細粒分を除去すること等により地盤工学的な資材として利用できるように努めることが必要であり、最終処分量を少なくする努力が望まれる。廃棄物については、不燃物と可燃物を分別して分解性のあるものを資材として用いないのはもちろんのこと、砕石機械を活用して材料を小片に破碎することにより空隙を減らし、造成後の圧縮の継続を減らすことも有効である。
- b) なお、有害物質を含有しうる津波堆積物の地盤環境影響の評価については次項で述べるが、有害物質の種類や含有・溶出量によっては環境リスクが極めて少ないものもある。そのような材料については、公共事業として建設・管理される嵩上げや盛土などで物質吸着機能や封じ込め機能等を付加したり事後モニタリングを継続して、安全性を確認しつつ利用する「管理型有効利用」の方法も考えられる。地域によっては自然由来の重金属類が環境基準を超えて含まれているケースも考えられるが、地域固有の土砂であるということを鑑みて、適切なリスク評価に基づいた堆積土砂への対応の方向性が打ち出される必要がある。
- c) 津波被害によって発生した廃棄物は、塩分濃度が高いことが推測されるため、土木資材として有効利用するためには、塩分の影響を把握することが必要である。そのため、塩害の迅速な測定方法と判断基準、塩分除去技術、利用者側の塩分許容濃度や資材利用時の長期的な影響について具体的な検討を進めておくことが重要である。
- d) 資源化された材料を嵩上げや高台、防潮堤の造成に適用するにあたっては、その地盤工学的適性を評価することも重要である。今回の地震では盛土で液状化などによる多くの被害がみられたことから、十分な締固めと排水設備に加えて補強土工法の活用等による耐震性能を有する土地の造成は重要な課題である。一方、いくつかの廃棄物盛土が地震や津波に対して健全であった例もみられていることなどの知見を整理し、資源化材料による嵩上げや高台、防潮堤の造成に関する設計法の確立につなげることが重要である。
- e) 今回の大震災では「どのような材料がどのような場所で使用できるか」という需要側の情報が少なく、有効利用や処理が停滞している。再資源化材料と利用用途のマッチングを示しておくこと

もに、平常時より需要側のデータベースをマッピングとともに整備しておくことも重要であり、地盤工学的な復旧作業をソフト面で支える役割を担うものである。

- f) 津波堆積物の量と性状を把握することが困難であると、全体の処理計画の立案が遅れることになる。したがって、津波や洪水由来の堆積物の量や性状を推定する手法の確立が必要である。

なお、法律上の廃棄物の定義（人間の活動に伴って生ずるもので、汚物または自分で利用したり他人に売却できないために不要となったすべての液状または固体状のもの）に基づけば、本項で挙げた材料を「廃棄物」と呼ぶのはもともとの所有者の心情を考慮すれば適切ではないかもしれない。当該地域での活用を目指すという社会目的も踏まえると「津波残壊物」「地震被災残壊物」などの表現も考えられるが、ここでは混乱を避けるため行政等で広く用いられている「災害廃棄物」とした。

また、災害廃棄物および津波堆積物については他学会でも取組みが行われており、上記の課題の取組みにあたっては、関連するこれらの他学会や他分野の研究者や技術者と協力しながら活動を行っていくことが必要である。

2) 地盤環境影響の評価と適切な対策

今回の震災では、油などの有害物質を保有していた事業所・施設が地震と津波により被災し、これらの物質が漏洩して土壤汚染を引き起こしている懸念がある。また、津波堆積物についても、場所によっては自然由来のフッ素やヒ素、そして震災に伴い事業所等から漏洩した有害物質を含有している懸念がある。土壤汚染や有害物質を含む津波堆積物の存在は、従前の土地利用の継続を阻害するのみならず、有害物質の浸透に伴い旧地表面以深の地盤環境、さらには地下水環境へ影響を与える可能性があり、浄化コストの増大も懸念される。以下は、土壤汚染および有害物質の含有が懸念される津波堆積物に対する地盤環境影響の視点からの提言である。

- a) 効率的な調査： 津波の被害を受けた地域は広大であり、地盤環境影響の評価にあたっては効率的に調査を行い、迅速・効率的かつ戦略的な対策の実施に反映させる必要がある。土壤汚染調査については、有害物質保管施設の情報などに基づき調査を行うことが有効と考えられる。また、津波堆積物に含有される重金属類濃度は津波堆積物の発生源における自然的原因の重金属類の濃度に大きく影響を受けるため、津波堆積物の発生源や津波堆積物の土質を考慮した調査地点の設定などが考えられる。
- b) 土壤汚染・地下水汚染・土壤粉塵・悪臭など様々な地盤環境影響評価の実施： 津波堆積物の早急な除去が難しい場所においては、津波堆積物から旧地表面以深への有害物質の浸透による汚染拡散が懸念されることから、汚染状況を確認するとともに、津波堆積物及び旧地表面以深における有害物質の挙動解析を行い、旧地表面以深の地盤環境や地下水環境への長期的な影響評価を行う必要がある。土壤汚染についても同様に、汚染状況の把握、有害物質の挙動解析、地盤環境や地下水環境への長期的な影響評価を行う必要がある。また、被災地では津波堆積物由来と考えられる土壤粉塵が多く、大気中の粉塵、特に粉塵量そのものの評価と対策も項目として取り上げる必要がある。廃棄物や津波堆積物、また、排水能力を失い澱んだ水を抱えた浸水地からは悪臭が発生している例もみられ、その対策は復興復旧における進行形の課題となっている。例えば、pH問題に一定の配慮をしつつ衛生問題の改善目的として石灰散布を効率的戦略的に行うなどの対策の必要がある。

- c) 災害廃棄物の仮置き場の地盤環境影響評価も重要な事項である。災害廃棄物の受け入れにより現地盤が汚染されてしまい、後々の土地利用が阻害されたり多大な浄化コストがかかったりといったことがないように、評価と対策が求められる。また、がれきによる埋立てについては、環境へのインパクトを減らすために埋立て地の底部および側部を難透水性の層で覆う技術などに地盤工学に関わる実務技術が貢献できる。
- d) 今回の震災では海中にも多量のがれきが堆積している。がれきの中に重篤な有害物質が混入していれば、底質や海水の汚染が懸念されることから、その評価・調査が必要である。
- e) 津波堆積物の量と性状を把握することが困難であると、災害廃棄物や津波堆積物の処理計画全体の立案が遅れることになる。したがって、津波や洪水由来の津波堆積物量を推定するモデルの構築や、有害物質保管施設のマッピング、津波災害時の有害物質影響シミュレーションのための洪水・津波氾濫解析の構築などの取り組みは、災害時の対応を迅速に進めるばかりでなく、事前に有害物質の広がり把握するなどの点で有効であり、災害時の地盤環境を保全する防災へ向けた取り組みとして位置づけられる。

3) 地震・津波による廃棄物処理施設への影響

今回の震災では、廃棄物最終処分場で大きな被害を受けたという事例は報告されていない。津波被災地に海面処分場は存在していなかったが、今回の地震による公有水面埋立て施設を含む沿岸構造物の被災状況の調査などに基づいて、将来海面処分場に地震と津波が襲った場合の耐震性・耐津波性を考慮しておく必要がある。廃棄物最終処分場は震災廃棄物の受入施設として重要な役割を担うことから、既設と新設の廃棄物最終処分場の耐震性・津波耐久性の診断と強化のための、調査方法・設計基準の検証が必要である。

下水処理施設も津波等の塩害をうけることで生物処理が効かなくなり、処理能力が低下する可能性が高いことから、下水処理施設の構造的安定性のみならず、塩害防止に向けた、防潮堤や堰堤等の対策を施しておくことも重要である。

4) 農地の塩害

農地の津波被害は、単一の方策ではなく、防潮堤・排水設備等による多重防護・面的防護が必要である。

対策に関しては、八郎潟干拓の時の技術とその後の経験がある。また、1998年台風18号による高潮被害を受けた熊本県八代市での除塩実績がある。水稻の作付けには土壌の塩分濃度を0.1%以下にする必要があるが、その方法として鉛直浸透を大きくして地表面の塩分濃度を低下する方法に加えて、石灰や石膏によるナトリウム吸着現象を利用して土壌中の塩分を洗い流す方法がある。いずれも、農地の排水を促進することが重要で、地下暗渠排水管や排水路の整備が不可欠となる。

農地の津波被害を軽減するためには、海水の浸入を受けた農地のクリーニングを速やかに行えるように、地震と津波浸食に対して耐久性の高い用水路と排水路を構築しておくことが重要である。

5) 放射能汚染土壌

今回発生した膨大な量の放射能汚染土壌の長期管理・処理は長期的な課題である。以下は、放射能汚

染土壌の長期管理・処理に対する地盤環境影響の視点からの提言である。

- a) 原位置での放射能汚染土壌の管理に資する地盤環境影響評価： 現在、学校の校庭等では空間線量の低減を目的として、地表付近の放射能汚染土壌を剥ぎとり、その土壌を地下埋設工法・上下置換工法により原位置で埋設している。地下埋設工法・上下置換工法により放射能汚染土壌を長期に管理する際においては上部の空間線量のみならず、下層に埋設された放射能汚染土壌による地盤環境・地下水環境への影響評価、さらに長期管理に資する技術的管理基準の策定が必要である。
- b) 放射能汚染土壌からの放射性物質の除去方法の検討： セシウムは粘土鉱物への吸着能力が高いことから、土壌の分級洗浄工法を改良するなどして放射能汚染土壌に適用することで、長期管理が必要な放射能汚染土壌量を削減するための技術、評価法の開発が必要である。
- c) 放射能汚染土壌・廃棄物の処理・封じ込めの技術評価： 大量かつ様々な放射能レベルの廃棄物や放射能汚染土壌が今後発生すると考えられるが、その処分・封じ込め等においては、当該処理・管理に伴う人の被ばく量低減、放射能汚染土壌の飛散・流出の防止、さらに長期的な周辺の地盤環境・地下水環境影響の防止等、放射能汚染土壌の長期管理に資する技術評価が必要である。

なお、本項の「放射能汚染土壌」という用語については、これ以外にも「放射性物質による土壌汚染」「放射性物質含有土壌」なども考えられる。「放射性物質」とは「放射線を放出する物質」のことであり、「放射能」とは「放射線を放出する能力」のことである。「放射性物質含有土壌」という用語を用いると、放射性物質の含有量が低く、その影響が問題とならない土壌（バックグラウンドレベルも含む）も該当してしまうことになる。ここでは、「放射性物質を許容レベルを超えて含有する土壌」を対象とするため、「許容レベルを越え」た状態を「汚染」とし、「放射能汚染土壌」とした。重金属類や有機塩素化合物などによる土壌汚染との混乱を避けるため、「土壌汚染」ではなく「汚染土壌」としたことも一定の意味があると考えている。

6) 災害対策井戸

災害時にはインフラ機能が停止することが多く、水道水が長期にわたって利用できなくなる可能性が高い。今回の東日本大震災においても、井戸水源を有している個人家庭では、飲料水以外の水を井戸から得ているケースも少なくなく、このような個人家庭では、周辺住民に対して井戸の解放を行っているケースもみられた。飲料水として使うことが水質面から難しくても、生活用水としての水が確保できるだけでも、災害後の公衆衛生を保全することが可能であり、極めて有効である。そのため、災害時の地下水利用をより積極的に考え、被災地域の人口に見合った災害時地下水揚水井戸の整備を進める必要がある。

今後の震災対応のため、地下水賦存量の把握や災害時に化学薬品が混入しないような施設設置場所等の検討を進めることが必要であり、災害時の生活水を目的とした地下水利用を防災対策として推進することが考えられる。また、災害時に安全に地下水を利用できるように、平常時から地下水汚染を防止するよう地盤や地下水汚染の状況を地域毎に把握しておくことも必要となる。また、津波や地盤沈下によって地下水が塩害を受ける可能性もあることから、事前に地下水に影響を及ぼすような塩害地域を予測することも大切である。

また、地下水および災害対策井戸については他学会でも取組みが行われており、上記の課題の取組みにあたっては、関連するこれらの他学会や他分野の研究者や技術者と協力しながら活動を行っていくこ

とが必要である。

3.3 現行基準を満足しない既存土構造物と未対応の自然斜面の強化復旧、耐震診断・耐震補強の課題

被災した盛土・擁壁等の土構造物の機能や自然斜面の安全性は、できるだけ早期に復旧する必要がある。その一方、構造的には原状復旧するのではなく、被災前の従来工法による場合よりも、経済的である工法で耐震性が高い土構造物・斜面にできるだけ早期に強化復旧する必要がある。

今日の、膨大な、「主に旧基準によって構築され現行基準を満足しない可能性がある既存土構造物」と「崩壊した場合の社会的影響が大きい虞がある未対応の自然地盤・自然斜面」の存在は、歴史的に見て不可避なものである。これら既存土構造物と未対応の自然地盤・斜面の耐震診断・耐震補強（広くは耐震診断・耐震補強）の課題の重要性は、従来から指摘はされていたが、対策の現状は不十分なものであった。これは、これらの数量が膨大であるため、現在でも耐震診断と対策は終了しておらず、安全性の確保との追いかけてこになっていて、永続的な課題となっているからである。それでも、これらを持続的に診断し必要な場合は強化していくことは、安全な国土建設への避けて通れない道である。今後、これらの対策を継続、あるいは開始する必要がある。それには、きちんとした盛土の締固め・排水処理等の従来からの地盤工学技術を実行するとともに、各種の最新の地盤調査技術や地盤改良技術・補強土工法等の最新の地盤工学技術を活用する必要がある。以下、今回の震災から得た教訓と提言である。

3.3.1 現行基準を満足しない土構造物での課題と提言

- a) 旧河道・海岸等の若年埋立て地と丘陵地帯の谷埋め盛土と関連した擁壁、若年埋立て地での戸建て住宅と関連したライフラインは、今後も地震被害を受ける事例が多い可能性が高く、優先的に耐震診断することが必要である。
- b) 道路・鉄道の盛土、擁壁、橋台裏の盛土では、今回の地震でも、少なからず、盛土支持地盤の液状化・すべり、堤体内のすべりを原因とした被害が生じた。これらの被災した土構造物を復旧する場合、道路・鉄道では機能の早期機能復旧が求められているため、強化復旧できない場合がある。早期機能復旧かつ強化復旧が可能となる技術を開発する必要がある。
- c) 河川堤防： 今回の地震では、多くの個所で、支持地盤の液状化・すべり、堤体内の液状化・すべりを原因とした堤体の沈下が生じた(図 3-30)。



図 3-30 宮城県多賀城市砂押川右岸における地震動による河川堤防の変状、堤内地が浸水被害（渦岡良介）

従来から、地震によって堤防が大きく損傷した場合、平常時の水位または津波の遡上によって堤内地（背後地）が水に浸かる可能性がある区間については、レベルⅡ地震動を対象とした堤防の耐震性能照査が行われている。しかし、平成 23 年（2011 年）5 月現在で、国管理河川の耐震性能照査対象区間の 47 %が照査未了となっている。全国的に見て、この耐震性能照査の実施は十分とは言えず、今後も継続する必要がある。

今回の地震において、旧河道の埋立て地をはじめとする、堤防の基礎地盤の液状化による沈下、堤体内地下水位が高くなっている堤防の堤体内の液状化に伴う被害が多数見られた。従前より進められている基礎地盤の液状化対策に加え、堤体内水位調査を含めた堤体内の液状化を加味した耐震性能照査と浸透に対する堤防強化とあわせた堤体液状化対策を、着実に進める必要がある。

耐震性能照査における照査外水位は、堤防の地震後の緊急復旧が概ね 14 日間で完了している事を考慮して 14 日間に発生する確率が 1/10 の水位としている。また、津波の遡上が予想される場合には、津波高についても考慮することとしている。地震後の緊急復旧工事実施の要否の判断基準は、治水上の観点から、耐震性能照査において考慮する外水位ではなく、計画高水位（HWL）となる。このため、例え耐震性能照査対象外の区間であっても、堤防の沈下によって天端高さが HWL を下回ったり、地震により堤防に発生したクラックの下端が HWL よりも下まで到達してしまったりした場合は、緊急復旧工事を行うこととなる。今回の地震においては、関東地方における国管理河川で緊急復旧工事を行った堤防 48 箇所のうち、耐震性能照査対象となっていた箇所は一つもない（東北は、22 箇所中、3 箇所）。

なお、従来の地震においては、被災箇所が相対的に少なく、被災範囲も相対的に小さかったことから、地震後の緊急復旧工事を 14 日間で完了することが概ね出来ていた。しかし、今回の地震での河川堤防の被害は、箇所数が多く、かつ広範囲にわたっている広域多所災害であった。さらに、地震発生から出水期まで比較的時間があつたことから、広域多所災害に対する緊急復旧において重要となる道路等の復旧に資材等が優先的に投入され、河川堤防の緊急復旧工事の開始が若干遅くなった。今後、河川堤防で広域多所災害が生じた場合、この期間で緊急復旧を完了させることは困難となり得る場合もある。従って、いつ地震が起きても想定する期間内に緊急復旧を完了させる必要がある場合は、地震に対する整備レベルを、現在よりも上げることも選択肢の一つとなる。

d) 港湾・空港施設： 港湾施設においては、1983年日本海中部地震での秋田港での岸壁の被災以降、地震後の被災地への緊急支援物資の搬入に資するよう耐震強化岸壁を整備してきている。しかし、古い基準で作られた岸壁も多く、最新の基準で想定しているレベルⅡ地震動に対する耐震性について確認することが望ましい。空港施設においても、基本施設の耐震化（地盤液状化対策等）が進められつつあるが、完了しておらず、今後継続して耐震化をすすめる必要がある。

e) 下水道施設においては、従来から下水道管路の浮上対策（埋め戻し土の液状化対策）の必要性は認識されていた。しかし、下水道管渠等の耐震基準の適用が義務化されたのは、2006年と比較的新しい。このため、耐震性が低い旧基準・旧技術で建設された下水道施設が多数存在していて、これらの耐震化は十分には進んでいない。リスク評価に基づき優先順位を定め、効果の高いところから耐震化対策をとることが重要となる。

下水処理施設は海岸沿いの低地に建設される場合が多く、このため津波とともに地盤液状化の被害も受けやすい。しかし、処理場の津波に対する診断・補強（既設）、設計（新設）の課題認識は遅れていた。また、既設の処理施設の耐震補強については十分には進んでいない。今後、これらに対応する場合、下水処理施設として、地震後でも最低限の機能が確保されるべく（あるいは、少々の修復で復旧できるべく）、施設の津波に対する設計・補強や耐震補強を行う必要がある。

谷埋め盛土内の埋設施設の対応は、宅地造成事業者とともに他の社会基盤設備と一体となって対処すべきものである。

f) 農業施設： 農業用パイプラインの地盤液状化対策、ため池堤体・農業用フィルダムの1953年以降の指針に従っての耐震改修の課題は、必要性は認識しつつも、いずれも数が膨大であり、対策が追いついていないのが現状である。

今回の地震において、昭和24年（1949年）に竣工した灌漑用ため池（河川区域外にあるアースフィルダム）である藤沼池の堤体が破堤した（図3-4）。当時の施工での材料の転圧等の品質管理は、現在に比べて水準が相当低いと推定され、現行基準を満足しない土構造物と見なされる。このダムの決壊の原因は、堤体のすべり破壊か、堤体の液状化か、基礎を含むすべり破壊か、浸透破壊か、セッシュや崩壊土砂の流入などのためにより貯水が堤体頂部を越流したためかなど、現在でも決壊原因が解明されていない。

農業用幹線パイプラインでは、図3-31に示す例のように、埋め戻し土の液状化により浮上すると言う被害が各所であった。



図 3-31 農業用幹線パイプラインの被災例（約 1.4 km にわたり亀裂・沈下、亀裂の深さは最大で 1.6 m 以上、埋戻し土の液状化によりパイプが浮上（毛利栄征）

また、農業用幹線パイプラインの地震時動水圧の影響と思われるパイプの離脱や漏水などの被災があった。なお、この被害は、現在の技術基準では十分に想定していないものであった。今後、地震時動水圧の発生機構の解明と定量的な評価、対策技術を提示する必要がある。

これらの農業施設に関連した現行基準を満足しない既存土構造物の耐震診断・耐震補強の事業は膨大であるが、今後も継続的に進めてゆくしかない。しかし、新設の施設を構築するような全面的な耐震改修だけでなく、老朽度や不適格な機能に対応する耐震補強技術を開発し、事業を推進することも重要である。すなわち、以下が提言できる。

- i) ため池、フィルダムなどの貯水構造物の地震時の損傷は、外面的には天端の亀裂や堤体法面のすべり、漏水が特徴的であるが、これらの損傷の程度と余裕度（安全性）については十分解明されておらず、調査、診断、評価方法を提示する必要がある。
 - ii) 近代的な施工技術によらないため池等の貯水構造物の耐震診断技術と具体的な耐震対策技術を提示する必要がある。
 - iii) ため池やダムなどの貯水構造物については、施設の耐震対策にとどまらず、決壊したときの被害を軽減するためのハザード対策についても整備を進めることが重要で、決壊時の洪水誘導や人命の安全性を守る下流施設の構築などを含めた地域防災に貢献する取り組みを進める必要がある。
- g) 鉱さいダムなど、過去に造成された施設の維持管理、耐震性の向上、有害物質の漏洩対策が必要である。特に、既に閉山された鉱山に付属する鉱さいダムの安定対策に関しては、全国的な実態や対策工の方向性に関して十分な情報が公開されているとは思えない。この実施の必要がある。
- h) 採炭採鉱跡地の地下空洞の陥没

全体として、現行基準を満足しない既存土構造物の数、対策の進展、設計法の確立時期は、土構造物の種類、管理機関によってまちまちである。今後、地震や豪雨・洪水等による自然災害の予防のために旧基準で設計・構築された土構造物や対策が必要な自然斜面の耐震診断・耐震補強を継続的に進めるこ

とを保証する法律（国土管理法のような）の整備が必要である。

3.3.2 崩壊した場合の社会的影響が大きな虞がある未対応の自然斜面・切土斜面

従来は、崩壊した場合に社会的影響の大きい自然斜面および切土斜面は、豪雨に対する設計を行うが耐震設計は行っていない。地震に対する積極的対応の必要性は従来から認識されていたが、対応は殆ど進んでこなかった。

今回の地震でも、2004年の中越地震の時と比較すると数は少ないが、堆積軟岩地域で凝灰岩の風化物あるいは軽石混じりの風化火山堆積物の斜面が崩壊した（福島県白河市内等、図3-31）。また、地震後の降雨による崩壊の懸念が今回の場合も多いと思われる。



図3-31 白河市葉の木平での自然斜面の崩壊（安田進）

以下は、提言である。

- a) 地震後の豪雨による崩壊による二次災害の対策が必要である。特に、土砂流出防止の緊急対策とともに、降雨による「土砂災害警戒情報」の活用による避難が望まれる。また、地震後数年間、降雨による山腹崩壊件数が増大するという経験がある。この山腹崩壊による河川への流木の流入は洪水の危険性を増加する。これに対処することが必要である。
- b) 今後、崩壊した場合の社会的影響が大きな重要な自然斜面と切土斜面に対する耐震診断・耐震補強（既設）と耐震設計（新設）を、重要な地点で実施することが必要である。
- c) 上記のための、信頼できる方法の開発が必要である。特に、地質・地形条件を反映した地震時崩壊危険度評価の再検討が必要である。今回の地震は、硬岩、軟岩、火山地域等広範囲に亘っているため、地質・地形特性から見た検討が必要になる。例えば、宮城県牡鹿半島を中心とした硬岩山地で表層型崩壊が多く発生した。奥羽山地の新第三紀の軟岩地域では表層崩壊が少なかった。一方、火山地域では岩手・宮城内陸地震では土石流型の崩壊が多かったが、今回は報告されていない。このため今後、地質・地形特性に加えて、地震波特性（加速度、卓越周期、継続時間等）等の要因の考察が必要になる。
- d) 地震に対する効果的な対策工の評価が必要である。全体として崩壊が少なかったが、枠工が斜面崩壊

に一定の効果を発揮したと思われるケースがあった（ある場所で、対策工済みの斜面では崩壊が発生せず、隣接する自然斜面で崩壊・変状が発生し、斜面肩に位置している宅地が被害を受けた）。一方、切土斜面でモルタル吹きつけの対策が施された斜面で斜面上部からの小規模崩壊も見られた例がある。1978年の宮城県沖地震で滑り崩壊が生じた谷埋め盛土の箇所で、地下水排水・鋼管杭等により抑止工等の対策工は一定の効果を上げたと思われるが、再度変形している箇所があった。これらの工法の有効性の再評価が必要である。

- e) 津波の影響を考慮した設計。自然斜面下端のブロック積擁壁の基礎地盤が津波で洗掘され転倒し斜面の浸食を加速した事例がある一方、盛土をジオテキスタイルで補強した擁壁は崩壊していない例がある。これらの事象の検証と、それに基づいた対策法の開発が必要である。
- f) 地盤内調査手法の開発と普及。自然斜面、切土斜面は、盛土斜面と異なり地盤条件が不明な場合が多く、崩壊発生後に地盤条件が明らかになる場合が多い。このため、崩壊発生前でも地盤条件を把握する必要がある。

4. 今後の検討・研究課題

4. 1 技術の普及の課題

1) 設計指針等の技術基準による技術の最低限の実施の保障の課題

地盤液状化の問題に代表されるように、技術基準の制度の全国的な組織、市町村、民間（個人）の間での精粗の差は非常に大きい。戸建て住宅の建設にも適用される最低限の基本的技術が普及するための制度（法的制度も含む）が必要である。

2) 技術支援（情報提供、専門家派遣、人材育成・教育）

民間（個人）、小規模自治体（下水事業、戸建て住宅許認可、地方道の整備・維持管理等を担当）、小規模鉄道等は、大規模災害を経験することは非常に希であり、それへの対応の技術的・財政的準備はほとんどないか不足している。さらに、精通した技術者を継続的に担当させることが困難な状況にある。そのため、これに対応する制度が必要である。地盤工学会としても、対応する情報提供、専門家派遣や人材育成・教育の必要がある。

また、戸建て住宅の設計・施工・維持管理に関する技術者の学校・社会での地盤工学教育を普及させる必要がある。

地盤工学者は宅地の地盤危険度判定にも応えていく必要がある。このためには、既に制度化されている被災を受けてしまった宅地の「被災宅地危険度判定士」に加えて、宅造盛土の変状や若年埋立て地の液状化などにより被災した宅地の危険度の判定と伴に既存や新設の宅地の品質判定ができる「地盤品質判定士」などの資格制度の創設が提案できる。また、これにともなう責任保険制度の確立も考えていく必要があろう。

4. 2 技術開発の課題

現在の地盤災害に対する耐震診断・耐震補強、耐震設計、耐震工法等の技術は不十分であり、様々な技術開発が必要とされている。

a) 土構造物に対するレベル II 設計地震動への設計時の対応の促進： この必要性は、本震災を契機として高まっている。それに対応して、透明性の高い被害調査体制の確立と情報公開、さらに想定外の非常事態が発生した場合の施設の操作や施設周辺地域の安全確保対策などが新しい重要課題となっている。

b) 耐震診断技術

例えば、埋立て地等の若年人工地盤の液状化や逆に自然地盤特に洪積地盤の年代効果の過小評価などを適切に評価できる技術の開発が必要である。

c) 二次災害への効果的な対処技術

3月11日の本震、その後の余震により、震源域を含む広範囲において不安定化した斜面が数多く存在している。今年の梅雨・台風時の土砂災害の危険性だけでなく、本震によるダメージを考慮した比較的長い時間軸（年単位）での地盤変形・安定性を計測・予測する技術の開発が必要である。

d) 効果的な予防処置と復旧処置

例えば、異種構造物・異種地盤条件から成る線状構造物（鉄道・道路・上下水道・河川堤防、海岸堤防、防潮堤、送電線・・・）の弱点個所の抽出と対策の技術（供用継続中での補強、地盤注入、地山補強土工法等）

e) 鉄道・道路等：被災後の「早期復旧と強化復旧（同時、段階的・多機能（地震・降雨・洪水）」の技術の開発

f) 複合災害（本震+地震、地震+津波、地震+土石流、地震+降雨・洪水）（同時、前後）

- ・ 巨大津波に対する盛土、橋梁の抵抗特性
- ・ 広域多所災害では復旧に時間がかかる□被災後の降雨・洪水被害
- ・ 盛土等土構造物と自然斜面の耐震性と耐豪雨・洪水性を総合させる対策(2009年地盤工学会会長特別委員会報告に詳しい)。
- ・ 河川堤防と支持基盤の耐震設計法の進展とともに豪雨・地震同時発生時の設計
- ・ 河川堤防の越流に対する耐力向上：余裕高だけでなく余裕幅の取り入れ、天端の遮水舗装、法肩を丸める案、裏法面の緩傾斜化を推進する案
- ・ 盛土形式の防潮堤の耐震性ととも津波波力、越流、洗掘に対する耐力がある構造形式

g) 全国的視野

近い将来に生じるとされている東南海地震、南海地震等や予測不能な全国各地での現行基準を満足しない既設の土構造物に対応する必要がある。

例えば、濃尾平野で、東海・東南海地震時の津波に備え、平野部の人命を守るためには、公的な避難構造物の整備が必要不可欠である。また、現在の地盤沈下した状況に対しての高潮堤防、河川堤防の機能低下の見込みについて見解を示す必要がある。中部国際空港を擁する伊勢湾においては、大津波時に人工島が受けると考えられる被災形態について、地盤工学的に十分に検証を進める必要がある。

4. 3 今後の課題

今回の教訓と提言を踏まえて、今後具体的な実施計画(具体的な調査方法、対策工法、コスト、期間など)の検討をする必要がある。特に、長期的な研究開発課題と区別して、現時点で利用可能な技術を使った現場に役に立つ実施案を作る必要がある。そのためには、民間の現場経験のある実務者の意見を取り入れて、地域住民に直接役に立つ提言を早急にまとめる必要がある。

地盤工学会の地盤災害関係（地震・豪雨・洪水等）の 主な研究報告等の資料・出版物（2000年以降）

- 液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究（その2）報告書 2003年3月 液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する受託研究委員会
- 液状化地盤中の杭挙動と設計法に関するシンポジウム 2004年12月 液状化地盤中の杭挙動と設計法に関する研究委員会
- 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシンポジウム 2004年5月 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関する研究委員会
- 土構造物の地震時における性能設計と変形予測に関するシンポジウム 2007年 土構造物の地震時における許容変形と性能設計に関する研究委員会
- 首都圏を直下地震から守るために—地盤工学からの提言—
2005年12月「首都圏直下地震に対する地盤工学からの提言」策定委員会 地盤工学会関東支部
- 造成宅地における耐震調査・検討・対策の手引き—地震から既存の住宅を守るために—
2007年2月 造成宅地の耐震調査・設計・対策・方法に関する検討委員会 地盤工学会関東支部
- 液状化を考慮した地盤等構造物の性能設計 2008年液状化を考慮した地盤と構造物の性能設計に関する研究委員会 地盤工学会関東支部
- 事業継続を可能に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年3月 地盤工学会関東支部
- 地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために—地盤工学からの提言—
2009年8月 2007年度会長特別委員会
- 造成宅地の耐震調査・検討・対策ケーススタディー—宅地造成等規制法改正に伴うわかりやすい実物例—
2009年11月 造成宅地の耐震調査・検討・対策の事例研究委員会 地盤工学会関東支部
- まさ土地帯の風化及び降雨浸透特性と斜面災害に関する研究報告書 2003年3月 まさ土地帯の風化および降雨浸透特性と斜面災害に関する研究委員会 地盤工学会中国支部
- 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関する研究報告 2003年3月 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関する研究委員会
- 斜面防災を考える 2004年4月 平成16年度総会特別講演会 地盤工学会関西支部
- 降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム 2006年11月 降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究委員会
- 斜面災害における予知と対策技術 2007年12月 九州における地盤災害と防災技術研究委員会 地盤工学会九州支部