

BCP の視点からみた液状化対策工法の位置づけと今後の展望

The Positioning of Anti-liquefaction Methods Evaluated from a Viewpoint of BCP and Future Prospects

岸 田 隆 夫 (きした たかお)

東亜建設工業(株) 顧問

1. はじめに

「木を観て、森を見ず」、筆者らの研究委員会活動（本稿で記述）に対する外部講師の評価である。勉強会に招いた講師は、日頃、中小企業等のBCP（事業継続計画）作成を支援している。実務家の眼からは、研究委員会が液状化対策工法に特化し過ぎていて、BCPに取り入れるまでにははるかな道のりが必要であるとの率直な意見であった。

他方、従来のBCPを策定する作業では、抽象的な検討が多く、対象施設の地震対策などを丁寧に評価されていないため、定量化が不十分であると、筆者らは考えていた。BCPをより効果的・具体的なものにするためには、まず、検討項目の中で液状化対策を定量的に評価することが最も重要と判断して、評価の道筋とそれに必要な資料を、活動報告書¹⁾として2009年3月に取りまとめた。

その後、2011年3月には東日本大震災が発生して、東北地方に地震と津波の被害をもたらすと共に、東京湾岸を始め関東地方及び東北地方の諸施設に、本来の機能を果たせない程の液状化被害を引き起こした。BCPの上で液状化対策が重要であることを再認識させられた。

本稿の前半では、研究委員会の活動を踏まえて、今回の被災状況をBCPの視点から液状化対策を評価し、後半、複合性が重要であるとの観点から今後の展望を記述した。

2. BCPの視点から見た位置づけ

2.1 BCP地盤改良研究委員会の活動状況

当学会関東支部の研究委員会の一つとして、2007年3月に「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（以下、BCP地盤改良（委）と呼ぶ）」が設置された。その背景に、2004年4月の関東支部の新設を受けて、2005年12月に出版された「首都圏を直下地震から守るために 一地盤工学からの提言」²⁾がある。その中に、取り組みが必要な七つのテーマが掲げられ、技術開発などの長期的課題と位置づけられた。当時、関東支部の研究委員会が、これらのテーマを中核に据えて設立されることが多かった。具体的には、その一つの「レベル2地震動を考慮した地盤改良・埋め戻し方・補強工法の高度化」(下線：

筆者)に沿って、BCP地盤改良（委）が設置された。

現在、既に稼働している施設がレベル2クラスの大地震に遭遇した場合でも、継続するか早期に再開することを、社会から求められる事業は数多く存在する。しかし、その中核となる構造物が、耐液状化を始め十分な耐震性能を有しているとは限らない。この場合、発災前の段階で稼働を休止させて液状化対策を講じられることはまれである。稼働率を一部落とすものの稼働した状況下で、対策工事を実施しなければならない例が多い。

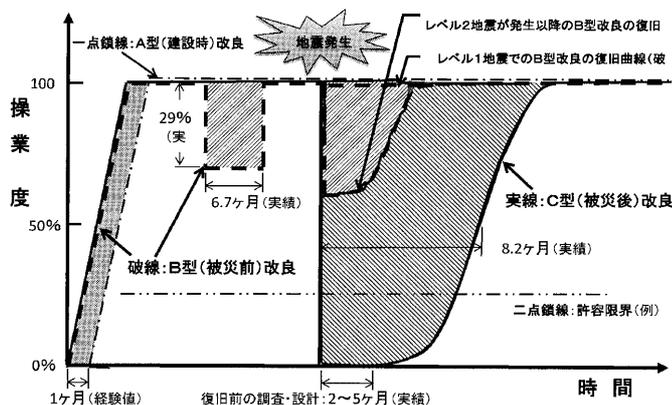
したがって、採用される対策工法には、①施設の稼働を止めることなく実施できること、②既存の構造物があり、その周囲の狭隘なスペースで施工できること、③本来、改良が望ましい構造物直下などで施工できない箇所がある場合に、それを合理的に評価しなければならないことが要求される。さらに、多くの制約から工費が割高になることが多く、施工のため稼働率を落とす期間が長いと生産高の低下に直結することなどに、配慮が必要である。

このため、上記の報告書¹⁾では、①工費、②施工に必要なスペース、③施工期間の三つを、具体的な数字で示した。学会の従来の出版物で、工費が表記されることはこれまで極めてまれであったが、既存構造物が重要な役割を担うBCPを策定する上で不可欠と判断したからである。これらの内容を広報すると共に、意見交換を通じてブラッシュアップするため、2010年5月に千葉で説明会を開催した。その後、2011年3月の東日本大震災では、千葉県埋立地などで多くの液状化被害を受けた。この大震災による被害事例も内容に加えて、支部主催、本部共催により、2011年5月にJGS会館で講習会を実施して、BCP地盤改良（委）の活動を終了した。

2.2 復旧曲線上における液状化工法の位置づけ

中央防災会議の「事業継続ガイドライン」³⁾で復旧曲線をもって提示された概念図を、液状化工法を位置づけ評価するために加筆したものを図-1に示す。横軸に時間軸を、縦軸に災害発生時の前後の操業度を表現している。操業度の低下率とその期間の積が、「ヶ月」数で表した操業低下量である。

(A型)当初の建設時に行う液状化対策：締固め工法(SCP, 振動棒)、セメント混合改良工法(CDM, DJM)、排水工法(グラベルドレーンGD)等。東日本大震災も含めて過去の地震で被災した例はほとんどない。



図一 復旧曲線上での液状化対策工法の位置づけ

(B型) 操業開始後、被災する前に、一般的に操業を止めずに行う液状化対策：静的締固め工法、薬液注入工法、排水工法（パーティカルドレーンVD）等。過去の地震では、A型同様に被災はほとんどないか、被災した場合でも操業に影響を与えない被害に留まっている。

(C型) 地震発生まで液状化対策を講じずに被災し、ほぼ例外なしに操業停止に追い込まれ、その中で行われる液状化対策：既存施設が障害となり、B型工法を中心に、施設を撤去した場合にはA型からも選択される。

上記報告書¹⁾では、B型の例として20例、C型として14例を集めて、復旧曲線を示している。被災前B型対策による操業度への影響量は、ばらつきはあるものの、操業低下率の単純平均で29%に留まり、その期間は6.7ヶ月間である。これらの調査結果を、図一1に（実績）を付して記入した。その積の操業低下量は平均1.9ヶ月分である。これまでの地震被害調査から、レベル1地震による操業度の低下はほぼ見られず、レベル2の地震を受けた場合にも、平均的には施設の許容限界の操業度を確保できるものと推定される。これに対して、C型では操業度が10%の低下に留まった1例を除き、全て操業停止に陥り、平均8.1ヶ月分の操業低下が生じた。この値は、B型の事前対策に要した操業低下量の4倍以上に当たる。C型の内、操業低下期間が2ヶ月以下と被災が軽微だった4例を除いた平均の操業停止量は10.9ヶ月であり、液状化対策を行わずにレベル2地震に襲われた際、発生する操業低下量の一つの目安と考えられる。

なお、A~C型、それぞれで地盤改良に必要な相対的な費用と、それに伴う操業低下量を、表一1に示す。

C型では更に破損施設の撤去費用、サプライチェーンへの間接的な損害を与えることになる。建設時に実施するA型地盤改良の費用は比較的小さく、効果も高いので、液状化地盤に構造物を新設する場合には、液状化対策が必須と言える。既存構造物に対しても、被災前B型地盤改良を実施することに合理性があることが分かる。

さらに、C型で着目すべき点は、復旧（改善）施工に先立つ調査・設計に2~5ヶ月を要していることである。被災の可能性を予見すると共に、被害想定に対する復旧計画を予め複数準備してあれば、この期間を半減することが可能である。C型を選択せざるを得ない状況で、

表一1 パターン毎の地盤改良工費と工期、地震による操業低下量

地盤改良	A型	B型	C型
地盤改良費/B型	0.3 [*]	1	0.9
低下発生時期	建設時	被災前	被災後
[サンプル数]	[多数]	[20例]	[14例]
操業低下率:D	(100%)	29%	99%
操業低下期間:T	(1ヶ月 [*])	6.9ヶ月	8.2ヶ月
操業低下量:D×T	(1ヶ月)	1.9ヶ月	8.1ヶ月
レベル1地震後低下量	0	0.1ヶ月	8.1ヶ月
レベル2地震後低下量	0	1.7ヶ月	10.9ヶ月 [*]

(地盤改良による操業遅れ分) ※経験値*Tが2ヶ月を越えるものの平均

BCPを策定する場合に、留意する必要がある。

2.3 東日本大震災における液状化対策の効果と考察

2011年3月に発生した東北地区太平洋沖地震による地盤構造物の被災状況（特に、液状化被害⁴⁾）を、BCP（事業継続計画）の視点からみれば、次の①~⑦を挙げることができる。①タンクの火災を始め埋立地に立地する多くの施設に、液状化が主原因と推定される被災を受け操業停止が発生した、②埋立地や内陸低湿地など軟弱な砂質地盤上に建つ戸建て住宅に、液状化の被害が数多く見られ、施設としての機能が大幅に低下した、③建設時に地盤改良（A型）等を適切に施した構造物は、被害を免れた、④被災前に既存構造物に排水系を含めて地盤改良（B型）を施した施設では、一部未改良部分との間に段差が生じるなどの障害が発生したが、構造物本体の機能を十分に果たすことができた、⑤過去の地震で液状化した地盤は、再度、液状化する例が多く、地震発生前の液状化対策（B型）の必要性が認められた、⑥液状化地盤に立地する構造物は、液状化により大きな被害を受けただけでなく、復旧までに多くの日時を要して、関連事業などに大きな影響を及ぼす例が見られた、⑦多くの機関が地震時のBCP計画を持っていたが、勤務者の帰宅の可否判断、宿泊者に必要な品々の準備などに十分な点があった。

その他、⑧Webによる情報から、地震動から噴砂までの液状化現象が時間的な推移で明らかになった、⑨地盤技術者が取組む液状化対策に、国縣市、及び、市民レベルでの関心が高まっているなどが、印象に残った。

いずれにしても、既存の構造物に対してBCPを立案する場合、地盤技術者は液状化による被害を最小限に食い止めることが求められており、また、関係者と協議して、それに対応できる手段を有している。

3. 液状化対策工法の今後の展望

今回の東日本大震災の経験を踏まえ、液状化対策工法の今後の動向を、「複合（一化、一性）」のキーワードで捉えて、各項目を具体的に検討して展望としたい。

3.1 外力の複合性

液状化対策を検討する上では、地震力をいかに設定するかが重要である。東日本大震災では、本震の後、約35分後に比較的大きな余震に見舞われた。本震余震共に液状化した地域もあったが、本震では過剰間隙水圧の上昇はあったものの噴砂が見られなかった地域で、余震で噴砂が初めて見られた場合があった⁴⁾。従来、一つの

論 説

地震で過剰間隙水圧が上昇した状態で、二つ目の地震動を想定して設計することはほとんどなかったため、今後、こうした複合的な地震力を取り入れるかの判断が必要である。

例えば、締固めで浅層盤状改良した地盤では、深い部分で液状化しても対象構造物は被害を受けない場合が報告されている⁵⁾。この場合、本震後、下部の液状化層に接した改良体の底部から過剰間隙水圧が浸透して、改良層内の有効応力が低下することが想定される。その段階で大きな余震を受ければ、浅層盤上改良体の機能が低下して噴砂が地表面に生じて、地盤上の構造物に不同沈下が生じるなど被災することが考えられる。

すなわち、大きな余震にも耐えられる性能を要求される場合には、浅層盤状改良体を地盤の過剰間隙水圧で緩むことがないように、固化処理を行うか、適切な間隔で下層の過剰間隙水圧を地表面に速やかに解放する礫柱または透水性の大きいパーティカルドレーン VD 材を設けるなど、追加の手当てが必要である。

また、今回の東日本大震災のように、地震に加えて津波が来襲することや、水害時や積雪時に地震を受けることを想定すれば、外力を複合した形で考えることが必要になる。したがって、その複合した外力に見合う液状化対策が、今後、要求されよう。

3.2 液状化対策の複合化

想定する地震動がレベル2と大きくなっても、建設時に行う地盤改良工法（A型：図-1）によって液状化を防ぐことができる場合でも、操業開始後に採用できる地盤改良工法（B型：図-1）では部分的に液状化が発生することが考えられる。勿論、液状化対策としては、A型のように「防災」できることが望ましいが、既存構造物の周囲の地盤を改良するB型で「減災」ができることも大きな価値が認められる。多くの制約条件があるB型の場合、その効果の評価に当たっては、A型に見られる安全側の単純化で設計しようとする、過大な費用が掛かってしまう。特に、B型の液状化対策では、実態に合わせて評価することで、工費を低減することが強く求められている。

一例として、グラベルドレーンGD工法を施工する際、サンドコンパクションSCP工法と同様に振動を加えて打設することができれば、排水効果に加えて締固め効果も合わせた相乗効果を期待できる。その試算例⁶⁾を、図-2に示す。

この結果から、締固め効果を期待するSCPの工費の平均値を1とした場合、排水効果によるGDの工費が約1.7倍であるのに対し、両方の効果を参入できるGCPにすることで約50%に削減できることが分かる。打設時に地盤が盛り上がる量が少ない場合、すなわち、締固め効果が大きいと、工費は小さくなる。また、礫が砂の材料費が高いと、工費が増加する。しかしながら、全国の176箇所の内、礫材または碎石の単価（m³当たり）が砂材を上回った地点は46箇所26%に留まるが、逆に下回る地点は114箇所65%、同等の地点は16箇所9%を占

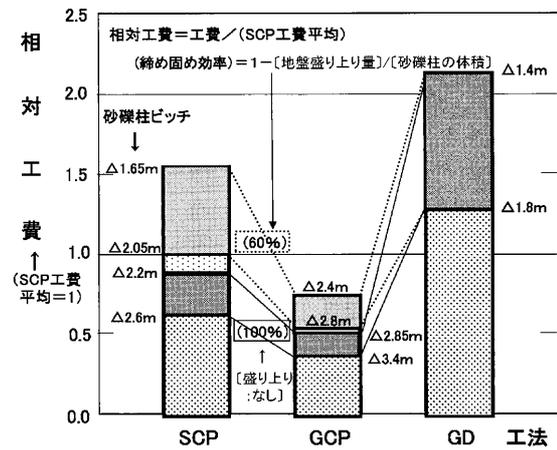


図-2 SCPを基準としたGD, GCPの工費比較例

める⁷⁾。したがって、ケーシングパイプの摩耗の増大などで若干工費が上昇するが、SCPの設計段階でGCPとの工費を比較することで、さらに、GDを動的に施工が可能な状況か否かを判断することで、液状化対策工費を全国の多くの地域で削減できると判断される。

一方、二つ以上の対策工法を複合化することにより、想定していない状況へのリスクを低減する効果も期待できる。例えば、地下水位低下工法による液状化対策では、下層の粘性土地盤が圧密して地盤沈下が懸念される場合、十分に水位を落とせない状況が想定される。こうした際には、浸透注入工法や不飽和化工法、さらには、礫材を入れて連結した大型土のう（一辺が1m程度）を敷く工法と組み合わせることで、補完関係と共に、多重対策によりリスク低減を図ることができる。

3.3 計画、調査、設計、施工の複合化

BCPの一環として液状化対策を計画・設計する際、リスクマネジメントの手法と複合化して検討することを提案したい。横軸にリスクの発生確率、縦軸に影響度をとったマトリックスの上で、リスクを分析・評価して、それに適した対策を選択することが行われている。ここでは、それぞれの軸を3分割して、図-3を作成した。

一般に、発生確率が大きく影響度が大きい場合には、その事業を止めてしまうなど「回避」が、逆に、確率が小さく影響度も小さい場合には、そのリスクを受け容れるなど「保有」の対応が、合理的と判断される。さらに、確率が小さく影響度が大きい場合には、保険を掛けるなど「移転」の対応が合理的と言われている。一方、液状化対策を考えると、レベル1の地震では発生確率が中程度、影響度が大、レベル2地震では確率が小さく、影響度が大に位置づけられる。液状化を伴う地震被害への対応として、地震保険を掛けるだけで済ますことは、事業者の被害ばかりかサプライチェーンの中断による社会への影響が大きく、適切とは言えないであろう。まず、適切な規模の液状化対策を講じて、被災する確率を下げると共に、影響度（被害額）を小さくする対応こそ取るべき行動である。

なお、図-1に示したA型とB型の対策は、図-3の上では破線と実線の矢印に表現することができる。こ

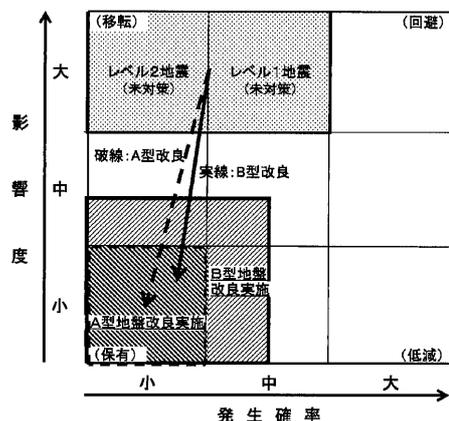


図-3 液状化対策工法のリスク対策での役割

うしたハード対策に加えて、必要に応じて地震保険に加入するなどソフト対策を組み合わせることが望ましい。その地震保険料は、地盤特性、液状化対策の実施や規模によって、合理的に設定されるべきであることを強調したい。

また、設計・施工の段階での工夫も考えられる。グラベルドレーンGDを施工する際、ケーシング内の中掘りでなく、ケーシングパイプの外側にオーガーの羽を付けて回転して施工することが多い。この羽の数を少なくすると、地表面に上がって来る土砂量が減少する。したがって、排水量がほとんどなければ、掘削土を周囲の地盤に押し込んで、静的締固め方法と同様の効果を期待でき、さらに礫柱の排水効果との複合効果を発揮できる。

このように、計画、調査、設計、施工に加え、施工管理、維持補修を含めて一連の情報の共有化を行い、必要に応じて前の段階に戻って改善を図るなど、液状化対策をより効果的にするための複合的な対応が重要である。

3.4 事業者と行政の複合的対応

当初、BCPは事業者が、自分たちの事業継続を中心に組み立てられてきたが、上述のとおり、サプライチェーンや地域に与える影響の大きさを考えれば、一つの事業だけで評価できない面が多く見られる。地域の行政から見ても、一つの事業者の操業が低下することは、税収の低下や雇用の減少につながる。さらに重要施設のダウン、事業者の転出まで被害が拡大すれば、その行政区全体に大きく悪影響を与える。したがって、地盤改良を中心とした地震対策を対象として、税制上の優遇策を講じるなど、公的に支援することが望まれる。

一方、事業者も自分たちの施設を地震から守っても、地域に住む従業員の住宅や地域の道路やエネルギーなどのインフラストラクチャーが損壊した場合には、操業度を維持することが困難になる。事業者は継続して社会的な役割を果たすためには、経済的な判断だけでなく、社会的責任(CSR)の面からの決断が求められている。このことは、東日本大震災だけでなく、その後のタイ国中心部での大洪水でも顕在化した。

したがって、事業者と行政がコミュニケーションを平時から密に行い、相互啓発的な複合対応を行うことが望まれる。地盤技術者が中立的な第三者として、このコミ

ュニケーションに参加することで、社会全体としてより効果的な対応になることが期待される。

4. ま と め

今回の東日本大震災の経験、及び、その前に実施された関東支部のBCP地盤改良(委)の検討結果を踏まえ、液状化対策工法の今後の動向を、複合(一化、一性)のキーワードで捉えてみた。

液状化対策工法の実施にあたって、地盤技術者、発注者を始めステークホルダーは、それぞれの立場で社会的責任SRを果たすことが望まれる。言い換えれば、社会全体でBCPを立案して、実現化することが期待される。液状化対策もそれを形作る大きな役割を担うことができるであろう。社会という「森」の中で、社会を地震被害から守る液状化対策が、「大きな木」の役割を果たすことになろう。

付 記

BCP地盤改良(委)は、次のメンバーで活動を進め、本稿のバックグラウンドになった。謝意を表したい。

付表-1 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メンバー(2007.3~)

委員長		岸田 隆夫	東亜建設工業
WG1 施工法 課 題	WL1	田村 昌仁	建築研究所
	委員・WL2	深田 久	不動テトラ
	委員・幹事	内田 明彦	竹中工務店
	委員	林 健太郎	五洋建設
WG2 設計方法 評価方法	WL	小峯 秀雄	茨城大学
	委員・幹事	石井 裕泰	大成建設
	委員	大石 幹太	日建設計シビル
	委員	高橋 英紀	港湾空港技術研究所
WG3 普及方策 研究開発	WL・幹事長	三反畑 勇	ハザマ
	委員・幹事	末政 直見	武蔵工業大学
	オブザーバー	末岡 徹	大成建設
	オブザーバー	安田 進	東京電機大学

WL:ワーキング・リーダー, WL1(2007.3~12), WL2(2008.1~).

参 考 文 献

- 1) 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, 147p., 2009.
- 2) 地盤工学会:首都圏を直下地震から守るために—地盤工学からの提言—, 60p., 2005.
- 3) 中央防災会議:事業継続ガイドライン 第二版, 28p., 2009.
- 4) 国土交通省関東地方整備局・公益社団法人地盤工学会:東北地方大平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書, 65p., 2011.
- 5) Ishihara, K. (1985): Stability of natural deposits during earthquakes, *Proc. of 11th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 321~376.
- 6) 岸田隆夫:耐震グラベルコンパクション工法による既設護岸の液状防止対策, 第29回全国港湾工事報告会報告概要, pp. 82~94., 1983.
- 7) 建設物価調査会:建設物価3月号, pp. 121~134., 2012. (原稿受理 2012.3.23)