

2022年福島県沖地震における相馬 LNG 基地構内に敷設した グラベルサポートの液状化被害低減効果

石川 明 眞野 英之 橋本 三智雄 若林 雅樹
(技術研究所) (生産技術本部) (土木技術本部) (土木技術本部)

Mitigation of Liquefaction Damage at the Soma LNG Terminal during 2022 Fukushima Off-the-coast Earthquake by Providing Gravel Support

Akira Ishikawa, Hideyuki Mano, Michio Hashimoto and Masaki Wakabayashi

福島県沖を震源とする M7.3、M7.4 の地震が 2021 年、2022 年に連続して発生した。震源から近い相馬 LNG 基地では、2021 年の地震により噴砂や配管基礎の傾斜が生じた箇所にグラベルサポートにより復旧工事を行った。復旧工事が完了する直前の 2022 年 3 月に再度同規模以上の地震を受けた。両地震後の液状化被害を比較した結果、以下の結論を得た。(1)構内道路については、舗装面と側溝との界面からの噴砂などが抑えられその効果は顕著であった。(2)配管基礎についても、グラベルサポートは基礎近傍からの噴砂を抑え、基礎の傾斜を抑止する効果が確認できた。

M7.3, M7.4 earthquakes with epicenters off the coast of Fukushima Prefecture occurred in succession in 2021 and 2022. Following liquefaction damage, including sand boiling and foundation settlement, at the Soma LNG Power Terminal during the first earthquake in 2021, mitigation work involving Gravel Support was carried out. The 2022 earthquake occurred immediately afterwards. In this paper, liquefaction damage in the two earthquakes was compared, leading to two conclusions. First, regarding on-site roads, the suppression of sand boiling at pavement interface was effective. Second, regarding pipe foundation, gravel support had the effect of suppressing sand boiling from the vicinity of the foundation and the inclination of the foundation.

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震では、液状化対策をしていなかった戸建て住宅や構造物の設備基礎、道路などで深刻な液状化被害が生じた。このため、当社では、設備基礎や構内道路など費用的に従来の液状化対策が行えない工作物を対象として液状化被害を大幅に軽減できるグラベルサポート^{1),2)}を開発した(図-1)。この工法は、噴砂が生じると予測される箇所に小粒形の砕石を用いて透水性の高い層をあらかじめ構築し、地表面への排水経路を確保しておくものである。地震時に液状化が生じた際、水のみを地表面に排水させることで噴砂を防ぎ、液状化による基礎の傾斜³⁾を大幅に軽減することを目的としている。

今回、福島県沖を震源とする M7 を超える地震が 2021 年、2022 年に連続して発生した。相馬 LNG 基地では 2021 年の地震後、噴砂や基礎の傾斜が生じた箇所の強化復旧にグラベルサポートを採用する

ことを計画し、その施工直後、あるいは一部施工途中の段階で 2022 年の地震が発生した。

本論文では目視・観察が中心ではあるが、2021 年、2022 年の地震後の液状化被害について調査した結果について報告し、グラベルサポートの液状化被害の低減効果について得られた知見を述べる。

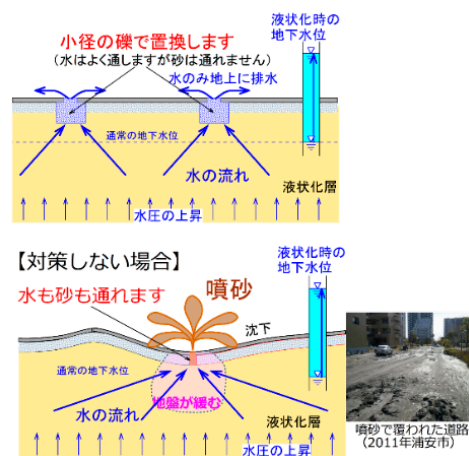


図-1 グラベルサポートの概念図

2. 敷地地盤と地震動

2.1 敷地地盤の概要

相馬 LNG 基地は L 字形の敷地形状であり、造成年代により西側の旧埋立て地(2000 年頃埋立て完了)と東側の新埋立て地(2016 年埋立て完了)の 2 つに大別される。図-2 は東側の埋立てを開始する前の現地の航空写真である。今回、報告対象とする箇所は相馬 LNG 基地のうち西側の旧埋立て地に属する。

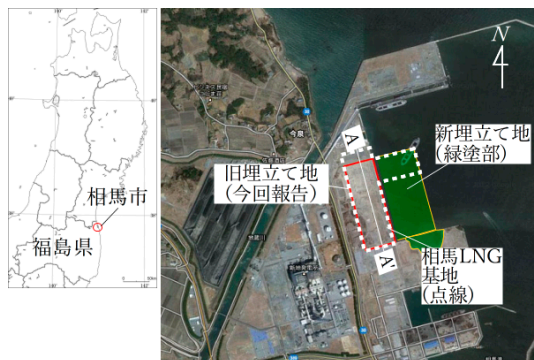


図-2 新埋立て地盤造成前の航空写真

図-3 は、西側の旧埋立て地盤の南北方向の断面図(図-2 の A-A' 断面)を示したものである。盛土層(Bs)を除くと上部が砂質土(Fs)、下部が粘性土(Fc)主体の埋立て土が厚さ約 10m で分布している。埋立て土の下位には、N 値が高く密実な砂層(A_{s1})、N 値の小さい粘性土層(A_{c2})、砂層(A_{s2})、硬質な新第三紀鮮新世の山下層(T_{ms})が分布する。図-3 の地盤調査時に確認された地下水位は DL+0m~+3.19m で

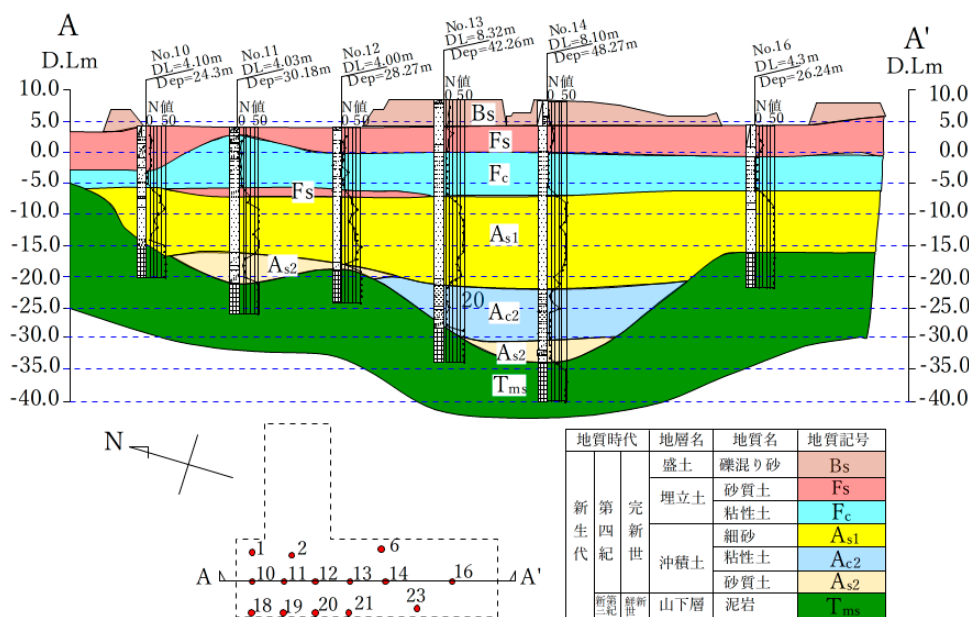


図-3 旧埋立て地盤の横断方向の断面図

あったが、後述する基礎底が GL-1.2m(DL+3m)の配管基礎群のグラベルサポートの施工でウェルポイントによる水位低下が必要であったことを考えると、水位は D.L.+2.7~3.2m 付近であったと考えられる。液状化は埋立て地盤の表層付近に堆積する F_s 層で生じたものと考えられる。

図-4 は図-3 に示したボーリングから採取した試料のうち、F_s 層の粒度分布を示したものである。細粒分含有率 F_c が 35% 付近の試料が多く、局所的に細粒分が少ない箇所でも液状化が生じたと想定される。実際、2021 年、2022 年の地震では埋土地盤全体ではなく、部分的に噴砂が生じた。

日本建築学会「建築基礎構造設計指針(2019)」による液状化判定では、地表面における設計用水平加速度 $a_{max}=3.5m/s^2$ 、マグニチュード $M=7.5$ の地震で、F_s 層の半分の層厚で $F_L<1$ となり、 $D_{cy}=0.03\sim 0.035m$ の軽微な液状化が予測されていた。

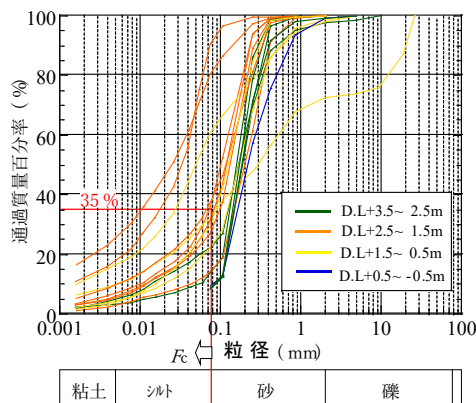


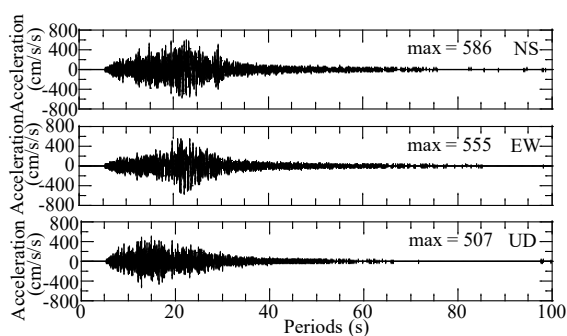
図-4 西側の埋立て地盤の粒度分布

2.2 2021年, 2022年の地震動の比較

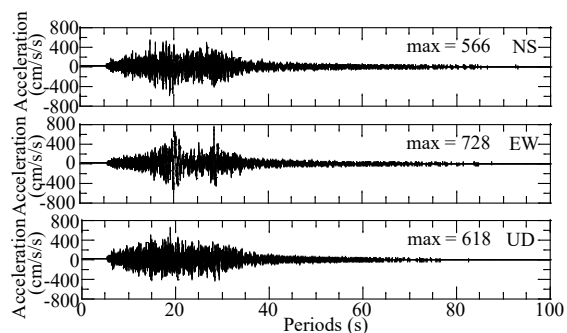
図-5、図-6、表-1は2021年、2022年に生じた福島県沖地震において、防災科学技術研究所のK-NET相馬で得られた地震波データを示したものである。K-NET相馬は相馬LNG基地から約4km南西側に位置している。

2022年の観測記録では、最大加速度はEW成分の728cm/s²、最大速度はEW成分の73cm/s、地震の規模を示すマグニチュードは7.4であった(表-1)。速度波形は加速度波形を1階積分して求めた。2021年の地震と比べるとマグニチュード、地震波の継続時間はほぼ同じであったが、EW成分が最大加速度で1.3倍、最大速度で1.9倍と大きかったことが特徴的であった。

図-7は、K-NET相馬で得られた加速度波形の減衰 $h=0.05$ の加速度応答スペクトル、疑似速度応答スペクトルを示し、建築基準法の工学基盤面での告示波極稀レベルと比較したものである。2022年の加速度応答スペクトルは、0.1~1秒付近まで告示波極稀レベルと同等あるいはそれ以上であったことがわかる。疑似速度応答スペクトルも同様の傾向であったが、EW成分については2022年の地震のほうが大きく、液状化に対して厳しい条件であったと想定される。なお、K-NET相馬の観測記録は、相馬LNG基地内に設置された地震計の記録と概ね整合していたことを付記する。

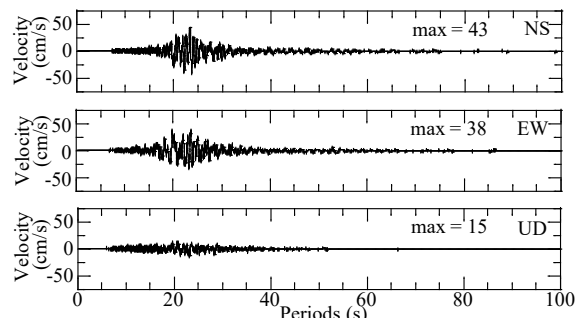


(a) 2021年

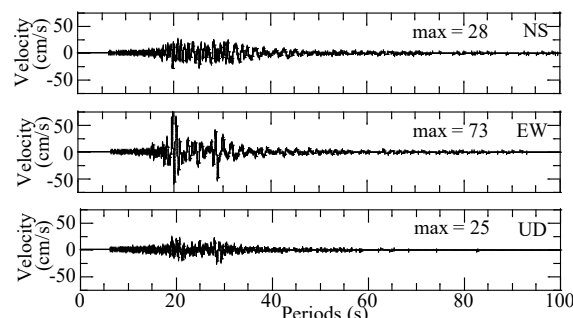


(b) 2022年

図-5 K-NET相馬で観測された加速度波形



(a) 2021年



(b) 2022年

図-6 K-NET相馬における速度波形

表-1 K-NET相馬の観測記録諸元

地震発生日	最大加速度 【cm/s/s】			最大速度 【cm/s】			M
	NS	EW	UD	NS	EW	UD	
2021/2/13 23:07	586	555	507	43	38	15	7.3
2022/3/16 23:36	566	728	618	28	73	25	7.4

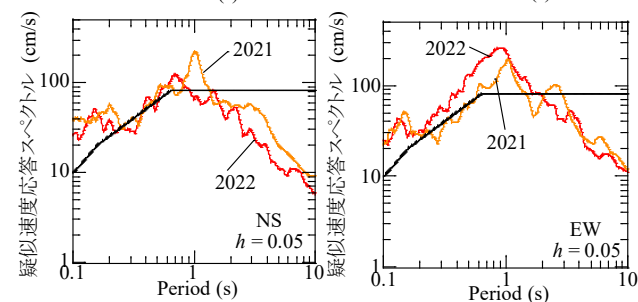
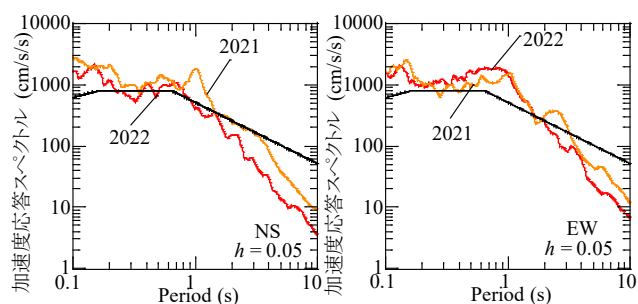


図-7 K-NET相馬の加速度・疑似速度応答スペクトル

3. グラベルサポートの設置と対策効果

3.1 構内道路

① 噴砂の原因考察と対策方法

2021年の地震では、**写真-1**に見られる噴砂が生じた。(a)はL形側溝とアスファルト舗装界面からの噴砂、(b)はL形側溝の背面地盤から生じた噴砂であり、両側で生じた箇所もあった。



(a) L形側溝とアスファルト舗装界面からの噴砂



(b) L形側溝背面の芝生からの噴砂
写真-1 構内道路で生じた噴砂

図-8はこうした状況から想定した噴砂のメカニズムについて示したものである。液状化により上昇してきた地下水は、再生砕石からなる路盤とアスファルト舗装を避けて路盤が薄くなる部分で上昇し、道路端部から噴いたものと考えられる。車道の路盤は厚く締固められているため、路盤が薄くなる道路端部あるいは歩道などに噴砂などの液状化被害が集中して生じる現象は、2011年東北地方太平洋沖地震でも観察されている¹⁾。

以上の考察をふまえて、2021年の噴砂位置に応じて**図-9**に示したL形側溝の両側、道路側、芝生側の3つのパターンでグラベルサポートによる対策

を行った。いずれも、厚さ0.3mの7号砕石層を噴砂位置の道路に沿った方向に全面で敷設し、約10mのピッチで芝生側の地表面につながる通水口を設けている。このような構造にすることで、7号砕石層で噴砂を防ぐとともに、上昇してきた地下水のみが地表面に容易に排水できるようにした。

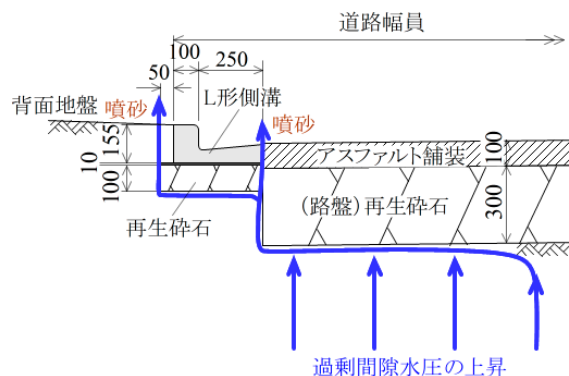


図-8 構内道路における噴砂のメカニズム

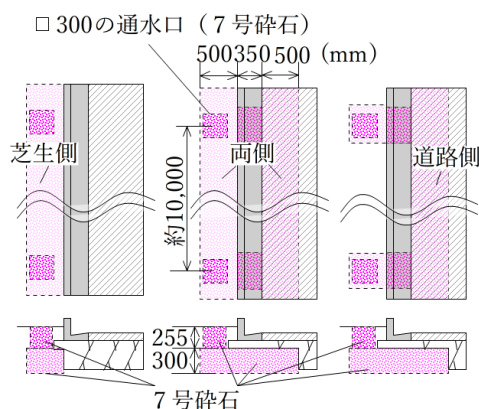


図-9 構内道路で実施したグラベルサポート

グラベルサポートによる対策を**図-10**に示す位置で施工した。ここでは、観察写真をもとに対策効果について述べる。なお、グラベルサポートを施工した直後であったため、アスファルト舗装は未施工であった。

② 2022年の地震での対策効果

■ B号道路両側 (**図-10**①: 両側、**写真-2**)

2021年の地震時には、L形側溝、舗装面の割れや凹凸が見られた他、L形側溝とアスファルト舗装の界面から噴砂が生じていた。白○で囲った部分は、強い地震動による亀裂と考えられるが、液状化した部分としない部分との揺れ方の差異が、路盤の亀裂発生に影響を及ぼしている可能性がある。

一方、2022年地震時は2021年の地震の際に見られたL形側溝や路盤の顕著な凹凸は見られず、L形側溝と路盤の界面からの噴砂も生じなかった。

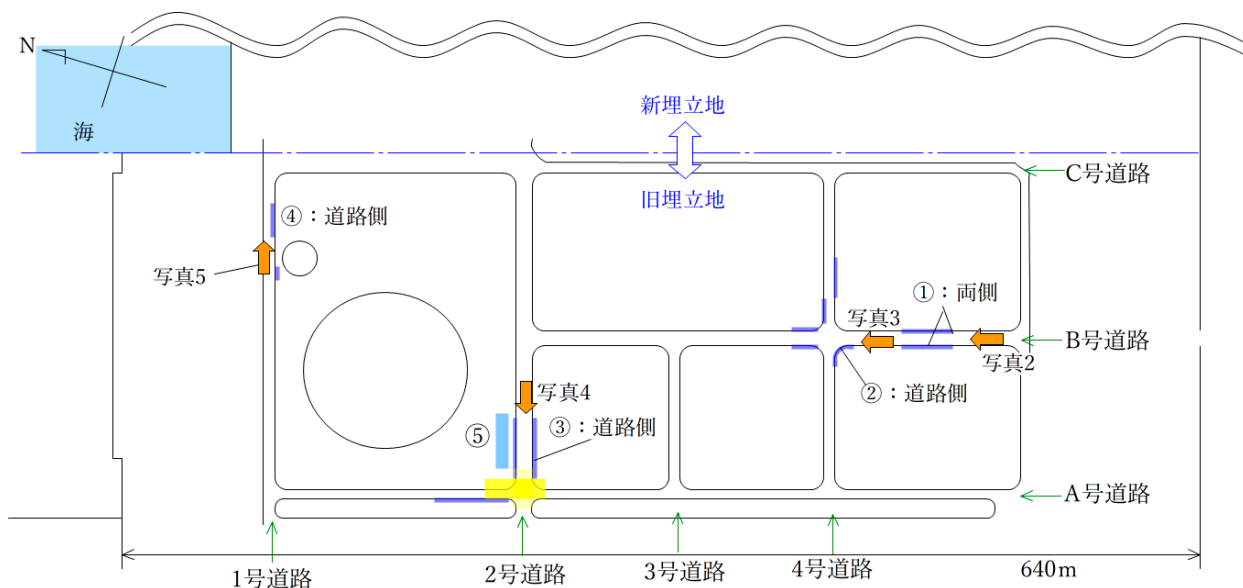


図-10 グラベルサポートの設置位置



(a) 2021年地震後



(b) 2022年地震後

写真-2 B号道路 (図-10①：両側)

ら2~3mほど離れた対策を行っていない芝生部分から噴砂が生じたが、グラベルサポートを施工した箇所では、L形側溝やアスファルト舗装界面からの噴砂やL形側溝の損傷は見られなかった。



(a) 2021年地震後



(b) 2022年地震後

写真-3 B号4号交差点 (図-10②：道路側)

■ B号4号交差点 (図-10②：道路側、写真-3)
2021年の地震時には、L形側溝とアスファルト舗装面の界面から噴砂が生じていた。2022年の地震では、2021年では噴砂が生じなかった交差点か

■ 2号道路 (図-10③ : 道路側、写真-4)

2021年の地震では、写真手前のアスファルト舗装の亀裂が見られた他、アスファルト舗装の噴砂口と陥没、L形側溝の凹凸が見られた。写真奥のエリア(図-10の黄色で塗った箇所)は全体に沈下量が大きく、L形側溝や舗装面もこの沈下にもなまってなだらかに沈下した。グラベルサポート施工時にL型側溝のレベルを調整したが、2022年の地震では、道路の全体的な沈下は前年と同様な傾向が見られた。埋立て地であり場所により土質が異なることが液状化による沈下の差となったと考えられ、液状化を許容する本工法では沈下差を完全になくすのは難しいことがわかった。



(a) 2021年地震後



(b) 2022年地震後

写真-4 2号道路 (図-10③ : 道路側)

■ 1号道路 (図-10④ : 道路側、写真-5)

2021年の地震では、他の箇所と同様にアスファルト舗装の亀裂やL形側溝とアスファルト舗装の界面からの噴砂が生じていた。2022年の地震では、界面からの噴砂は生じておらず、L形側溝も全般に無被害に近い状態であった。舗装部の亀裂も生じなかった。



(a) 2021年地震後



(b) 2022年地震後

写真-5 1号道路 (図-10④ : 道路側)

全体を通して構内道路におけるグラベルサポート敷設の効果は以下にまとめられる。

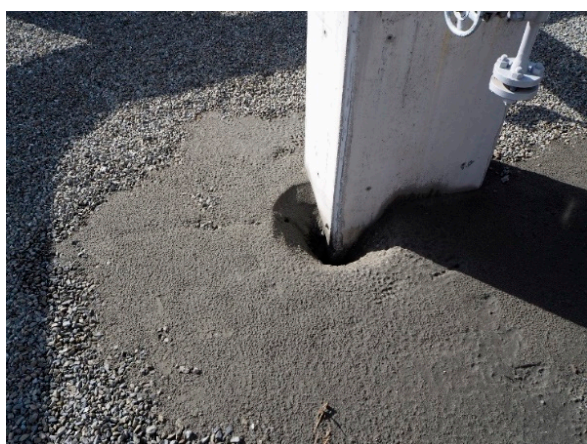
- ・2022年の地震では、2021年の地震で見られたL形側溝とアスファルト舗装の界面からの噴砂は生じなかった。構内道路の噴砂抑止の点で、グラベルサポートの効果は顕著であったといえる。
- ・2021年の地震で見られたアスファルト舗装面の破壊やL形側溝の部分的な凹凸も2022年の地震では見られなかった。2021年のアスファルト舗装面の亀裂は液状化被害が大きかった箇所が生じており、グラベルサポートにより過剰間隙水圧を速やかに消散させた効果である可能性がある。
- ・写真-3など、グラベルサポートの敷設箇所から1~数m離れた芝生から噴砂が生じた箇所があった。路盤がなく埋立て地盤が露出する箇所では、表層地盤の強度のばらつきや地震動の方向・強さにより噴砂位置が異なる可能性があり、これらを完全に防ぐことは難しいといえる。
- ・対策を行っても写真-4のように全体的な沈下が生じる箇所もみられた。グラベルサポートは噴砂や基礎の傾斜など液状化被害を低減する工法のため

め、埋立て地盤のように場所により液状化層厚や液状化の程度に違いがある場合、このような緩やかな不同沈下を生じる。ただし、噴砂等に起因する局所的に大きな沈下は防ぐことができるため、道路の使用性が失われるような不同沈下となる可能性は低いと考えられる。

3.2 配管基礎群

① 基礎被害の原因考察と対策方法

図-10の⑤の位置に、各種配管を支持する基礎群があり、2021年の地震で写真-6に示した基礎周りからの噴砂が生じた。写真-6(b)では、噴砂を生じた右側に基礎が傾斜したことがわかる。



(a) 基礎界面からの噴砂状況 1



(b) 基礎界面からの噴砂状況 2

写真-6 2021年地震後の配管基礎群の状況

図-11は配管基礎の近傍に生じた噴砂と基礎の沈下・傾斜のメカニズムについて示したものである。地盤と基礎の応答の違いから、地震時に基礎周りに隙間が生じ易いことなどから、基礎周囲が弱部となり噴砂が生じた。この噴砂による地盤の体積減少と噴砂近傍の緩み領域の拡大に伴う地盤の進行性

破壊により基礎の傾斜や不同沈下が生じたと考えられる。基礎近傍の地盤の液状化が継続している間、基礎の傾斜がゆっくりと進行していくことは模型実験により観察されており^{2),3)}、2021年の地震でも、基礎群にこうした現象が生じたものと考えられる。

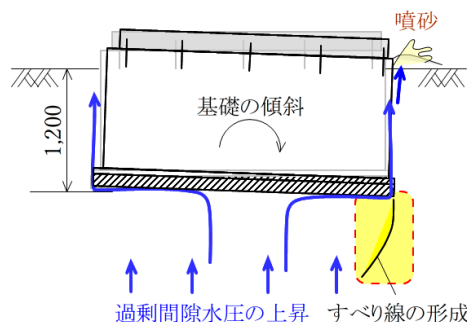


図-11 配管基礎群における噴砂のメカニズム

以上の考察から、排水により基礎周り直下の地盤から速やかに水のみを地表に排出させることで水圧を下げ、この部分の液状化を防止して地盤強度を確保すれば液状化被害を大幅に軽減できると考え、図-12に示すグラベルサポートによる対策を実施した。基礎周り直下の地盤に対策するため、基礎長辺両側の下を幅約300mm及び基礎外側の幅約500mmの範囲を厚さ300mmの7号砕石で置換する。この砕石層から地表への排水を行うためφ300のVP管に7号砕石を充填した通水口を設けた。また、対策を行った基礎両端以外の位置からの噴砂を軽減するため地表面に厚さ150mmの砕石層を設けた。

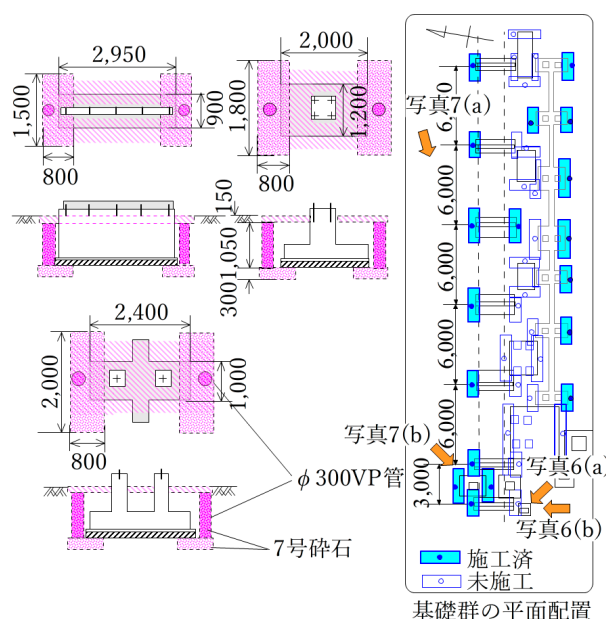


図-12 配管基礎群の対策

② 2022年の地震での対策効果

2022年の地震はこれら基礎群の外周部の一部基礎に対する対策の施工が終了した時点で生じた。図-12の青色を塗った部分が地震時にグラベルサポートの施工が終了していた箇所である。

写真-7に地震後の基礎周りの状況を示す。

- 2021年の地震で生じた基礎周りの噴砂は、2022年の地震では生じなかった。施工途中ではあったがグラベルサポートは基礎周りの噴砂抑止に一定の効果を果たしたと考えられる。また、2021年の地震と比べて目立った基礎の傾斜や地盤へのめり込みも見られなかった。
- 基礎下に敷設した7号砕石層から地表への排水管であるφ300mmのVP管内に充填した7号砕石の一部が、地震後に地表周囲にこぼれていた。この現象は、ほぼ全てVP管で見られた。地震で上昇した水圧により地下水が地表へ排水される際に、水の勢いにより地表面に近い部分の砕石が一部押し流されたものと考えられる。このことは、敷設した7号砕石層が水圧消散の機能を果たした痕跡ともいえる。



(a) 地震後の基礎群



(b) φ300mmのVP管から噴出した7号砕石
写真-7 2022年地震後の配管基礎群の状況

4. 結論

2021年、2022年に発生した福島県沖地震において、相馬LNG基地構内で行ったグラベルサポートによる液状化被害の低減効果について調べ、以下の結論を得た。

1. 構内道路については、2021年の地震で見られたL形側溝とアスファルト舗装の界面からの噴砂は対策後の2022年では生じなかった。噴砂抑止の観点からグラベルサポートの効果は顕著であった。液状化の影響と思われるアスファルト舗装面の破壊やL形側溝の部分的な凹凸もほとんど見られなかった。一方、場所により液状化の程度が異なったことによると考えられる緩やかな不同沈下は複数個所で見られ、液状化を防止しない対策工法であるグラベルサポートはこれらの不同沈下までは完全になくすことは難しいことが確認された。
2. 配管基礎については、2021年の地震で生じた基礎周りの噴砂は2022年の地震では生じなかった。施工途中ではあったが、グラベルサポートは基礎周りの噴砂抑止に一定の効果を果たしたと考えられる。2022年の地震では目立った基礎の傾斜や基礎の地盤へのめり込みも見られなかった。上立り管φ300mmのVP管から、管内に充填された7号砕石が地表周囲に噴出した状況が観察された。液状化時の地下水の上昇流により生じた現象と考えられ、敷設した7号砕石層が水圧消散の機能を果たした痕跡ともいえる。

謝辞

相馬LNG基地構内で得られた貴重な記録の公開にご理解頂きました石油資源開発株式会社様に御礼申し上げます。また原位置データの記録をしていただきました清水建設(株)東北支店、地震波の分析にご指導いただきました清水建設(株)技術研究所の森井グループ長に感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 眞野英之, 石川明: “表層礫置換による小規模構造物・外構の液状化被害低減工法 —グラベルサポート工法—”, 基礎工 Vol.49, No.5, pp.36-39, 2021
- 2) 眞野英之, 社本康広, 石川明, 吉成勝美: “構造物外周直下の礫置換による小規模構造物の液状化被害低減対策”, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.1, pp.59-69, 2016
- 3) Akira Ishikawa, Yan-Guo Zhou, Yasuhiro Shamoto, Hideyuki Mano, Yun-Min Chen, Dao-Sheng Ling: “Observation of post-liquefaction progressive failure of shallow foundation in centrifuge model tests”, Soils and Foundations, 55(6), pp.1501-1511, 2015