

福岡県西方沖地震における締固め砕石ドレーンの液状化防止効果

Effect of Gravel Drain Method on Prevention of Liquefaction in Fukuoka-ken Seihouoki Earthquake

加藤 満*1 田中 幸芳*1 西村 雄二*2
Mitsuru Kato Yuki-yoshi Tanaka Yuji Nishimura

要旨

2005年3月20日に発生した福岡県西方沖地震では、港湾施設、道路、公園施設等に液状化被害が発生し、それらの諸施設を含む埋立地の広い範囲で液状化現象の痕跡が確認された。しかしながら、数多くの液状化被害が発生した^{ももちほま}百道浜地区（福岡市）において、事前に「締固め砕石ドレーン工法」による液状化対策が行われていた都市高速道路では液状化の痕跡や地盤変状が一切認められず、高速道路本線としての機能を損なうことはなかった。

本報告では、筆者らが福岡県西方沖地震発生直後に行った現地調査結果に基づいて締固め砕石ドレーン工法の液状化防止効果を明らかにするとともに、本工法を含む広義の「砕石ドレーン工法」の過去の液状化防止事例を整理し、考察を加える。

キーワード：福岡県西方沖地震 液状化 締固め砕石ドレーン 砕石ドレーン 現地調査

1. はじめに

2005年3月20日10時53分頃、福岡市の北西約40km沖を震源とするマグニチュード7.0の地震が発生し、玄界島（福岡市西区）、博多港、福岡市中心部等の各地に大きな被害をもたらした。福岡市によれば、公共施設の復旧等に要する費用は約800億円とされている。

福岡県西方沖地震と呼ばれるこの地震では、港湾施設、道路、公園施設等に液状化被害や液状化に起因する流動被害が発生し、それらの諸施設を含む埋立地の広い範囲で液状化現象の痕跡が確認された¹⁾。しかし、液状化被害が確認された埋立地においても、百道浜地区の福岡都市高速道路のように事前に「締固め砕石ドレーン工法」²⁾（「グラベルドレーン工法（締固め式）」³⁾ともいう）による液状化対策が行われていた場所では、噴砂等の液状化の痕跡や液状化に起因する亀裂・段差等の地盤変状が一切認められず、高速道路本線としての機能を損なうことはなかった。

本報告では、まず福岡県西方沖地震の発生直後に筆者らが行った地盤改良域（締固め砕石ドレーン工法の施工範囲）およびその周辺の液状化に関する目視調査結果を示し、締固め砕石ドレーン工法の液状化防止効果について報告する。そして、過去のマグニチュード7以上の大きな地震に対する「砕石ドレーン工法」³⁾（「グラベルドレーン工法」³⁾ともいう）

および締固め砕石ドレーン工法の液状化防止事例と今回の現地調査結果を踏まえ、広義の「砕石ドレーン工法」全体の液状化防止効果実証履歴を整理して考察を加える。

2. 百道浜地区における締固め砕石ドレーン工法

2.1 締固め砕石ドレーン工法の原理と施工方法

砕石ドレーン工法は、図1に示すように砕石等の高い透水性を有する材料からなるドレーンを地盤中に柱状に打設し、地震時に砂質土層内に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制するとともに早期に消散させて液状化を防止する工法である。また、締固め砕石ドレーン工法は、砕石ドレーン造成時にケーシング内に装備された鋼製棒（突棒）を上下運動させて砕石を積極的に突き固めるとともに地中に押し広げること、および、施工時の排土量を抑制することで、上記のような砕石ドレーンの過剰間隙水圧消散効果に加えてドレーン杭間地盤の締固めも可能にした工法である。この締固め効果を設計に反映させることにより、通常のコングリートドレーン工法に比べてドレーン杭の間隔が広くなり、ドレーン杭の本数を大幅に減らすことが可能になるため、工費節減や工期短縮を図ることができる。また、砕石ドレーン工法と同様に施工時の騒音や振動が小さいという特長も有していることから、市街地や既設構造物近傍で多く適用されている。締固め砕石ドレーン工法

*1 東京本店 土木技術部 *2 ㈱ジオ ダイナミック

の施工手順を図2に示す。本工法は1992年に運輸大臣評価証⁴⁾を取得し、国土交通省新技術情報提供システム(NETIS)にも登録されている技術であり、2006年3月現在、ドレーン杭延長約110万mの施工実績を有する我国の代表的な液状化対策工法の一つになっている。参考までに、杭間地盤の締固め効果を更に大きくして締固め効果のみでの液状化防止を可能にするとともに、再生砕石等のリサイクル材料の適用性や経済性の一層の向上も実現した「Geo-KONG工法」⁵⁾(静的締固め工法ともいう)も、1997年の開発以来着実に施工実績を伸ばしており、2006年3月現在、砂杭・砕石杭の施工延長が約35万mに達している。

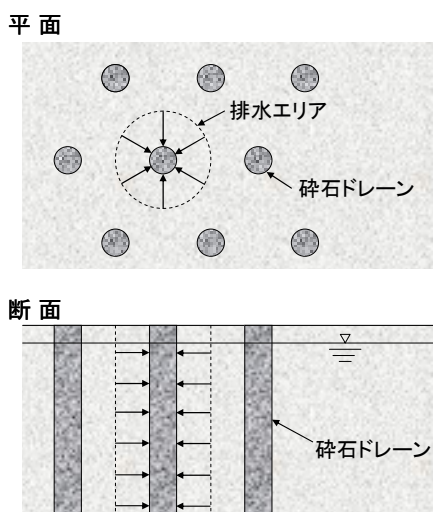


図1 砕石ドレーンの配置例

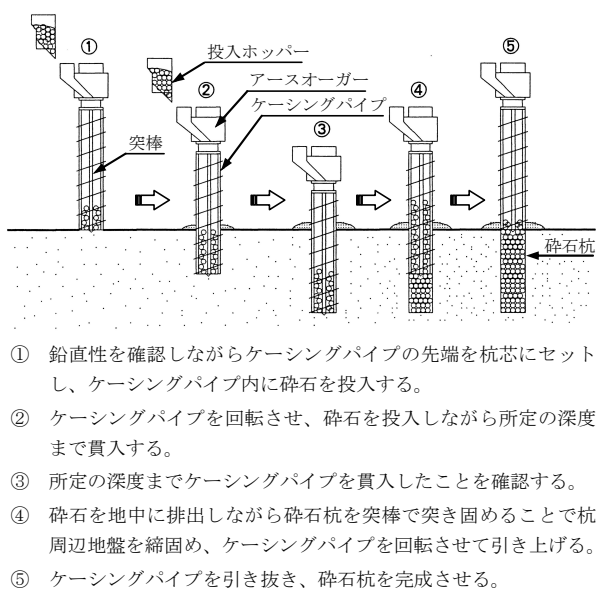


図2 締固め砕石ドレーン工法の施工手順

2.2 百道浜地区における締固め砕石ドレーンの適用箇所

福岡市における大規模ウォーターフロント開発の拠点である「シーサイドももち」には、福岡タワーや福岡ドームをはじめ九州地方を代表する施設が数多く建ち並んでいる。締固め砕石ドレーン工法は、その地域に計画された都市高速道路1号線の液状化対策を目的として採用され、九州支店基礎部(当時)が1993年11月～1994年10月に施工を行った⁶⁾。改良の対象は砂質土を主体とする埋土層とその下部の沖積砂質土層(中州層)であり、ドレーン杭の施工本数は9,936本、ドレーン総延長は約11.7万mである。施工状況を写真1、写真2に示す。本工法が選定された主な理由としては、福岡タワー等の既設の重要構造物や住宅街が近接しており、低騒音・低振動かつ周辺への影響(地盤変位等)が小さい工法を適用する必要があったことや、経済性に優れることが挙げられる。



写真1 施工状況



写真2 施工状況

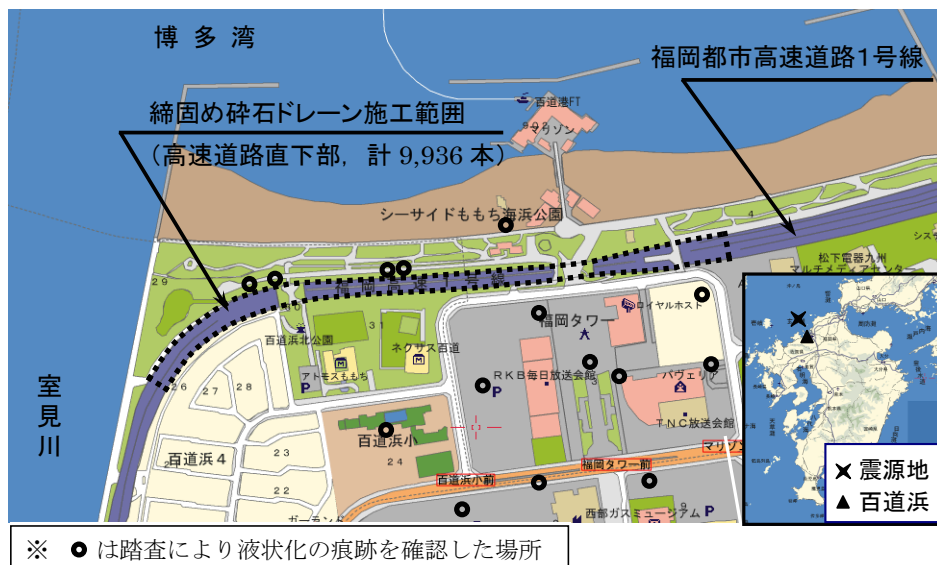


図3 百道浜地区における施工箇所と液状化被害確認箇所

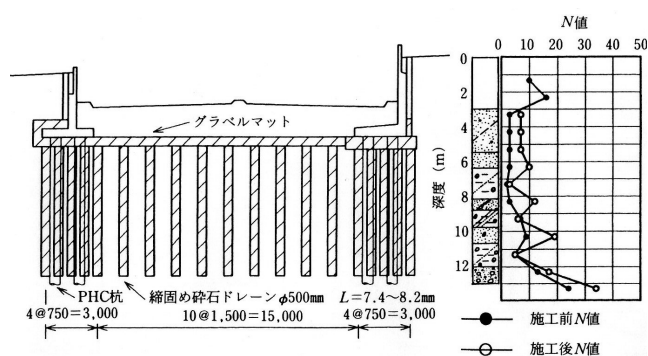


図4 代表的な断面図および施工前後の N 値 (掘割部) ⁶⁾

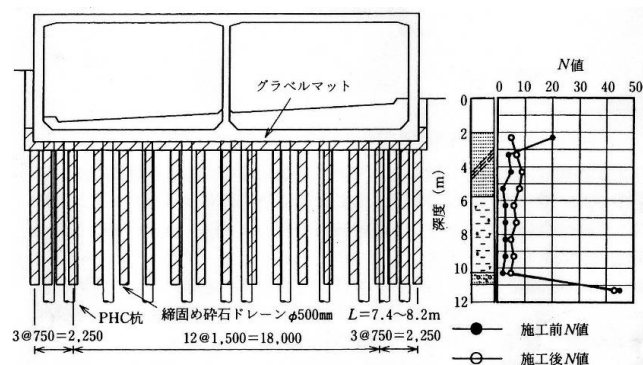


図5 代表的な断面図および施工前後の N 値 (ボックスカルバート部) ⁶⁾

百道浜地区における締固め砕石ドレーン工法の適用箇所を図3に示し、代表的な断面図を図4⁶⁾、図5⁶⁾に示す。地盤改良域(高速道路)には掘割部とボックスカルバート部があるが、ボックスカルバート部は歩道等が高速道路上を横断する

部分のみであり、大部分は掘割部が占めている。また、断面図において道路端部の地盤には密な間隔でドレーン杭が配置されているが、これは、地盤改良域の周囲(側道等)で液状化が発生した場合に高速道路本線への影響を防止するため、すなわち、周囲の液状化層からの過剰間隙水圧の伝播による高速道路直下地盤の軟弱化や液状化を防止するための処置である。

3. 地震後の状況

福岡県西方沖地震において、締固め砕石ドレーン工法の適用箇所である百道浜地区では震度5強が記録された。締固め砕石ドレーン工法による地盤改良域の地震後の状況を写真3~写真7に示し、地盤改良域近傍の未改良域(未対策箇所)と推定される地点の地震後の状況を写真7~写真11に示す。写真7は、地盤改良が行われた高速道路本線と本線に隣接する側道(未改良)の両方の地震後の状況を示している。また、写真7~写真11の撮影地点も含めて、踏査によって噴砂、亀裂、段差、マンホールの浮き上がり等の液状化現象の痕跡を確認した地点を既出の図3に黒丸印で示している。ここでは省略するが、図3の範囲よりも内陸側の地点においても液状化現象の痕跡を多数確認した。

目視による調査ではあるが、写真3~写真7に示すように締固め砕石ドレーン工法の適用範囲内では噴砂等の液状化現象の痕跡や液状化に起因する地盤変状等の被害が一切認められず、高速道路は健全な状態であった。一方、写真7~写真11に示すように、地盤改良域近傍の未改良域では高速道路に隣接する側道を含めた多くの地点で液状化現象の痕跡や液状化に起因する亀裂、段差等が確認された。したがって、この

ような地盤改良域とその近傍の未改良域の地震後状況の対比から、締固め砕石ドレーン工法の液状化防止効果が実証されたと考えられる。

なお、締固め砕石ドレーン工法の施工箇所（高速道路）のうち、掘割道路の擁壁やボックスカルバートは杭基礎によって支持されており（図4、図5参照）、その支持力および地盤拘束効果（せん断変形抑制効果）等によって構造物の地震時の安定性が確保されるとともに液状化の発生や地盤変状がある程度抑制されたとも考えられる。しかしながら、掘割道路の擁壁部以外の車道部は改良地盤上に直接路盤を置く構造であるにもかかわらず液状化の痕跡や地盤変状が認められず、その一方で地盤改良域近傍の未改良域では噴砂跡が多数確認されて亀裂や段差等の明確な液状化被害も発生していること等を考慮すると、締固め砕石ドレーン工法の液状化防止効果が実証されたと判断するのが妥当であると考えられる。



写真3 地盤改良域の地震後の状況
(高速道路に液状化の痕跡なし)



写真4 地盤改良域の地震後の状況
(路面に変状がなく液状化の痕跡もなし)



写真5 地盤改良域の地震後の状況
(路面に変状がなく液状化の痕跡もなし)



写真6 地盤改良域の地震後の状況
(高速道路に液状化の痕跡なし)



写真7 高速道路本線と側道の地震後の状況
(未改良の側道には多数の噴砂跡あり)



写真 8 側道で確認された噴砂
(写真 7 の噴砂の一つを接写)



写真 11 歩道橋に生じた段差
(未改良域に位置する基礎部およびその付近で噴砂を確認したことから、液状化に起因する段差であると考えられる。)



写真 9 側道で確認された噴砂と陥没



写真 10 歩道部でのマンホールの浮き上がり
(噴砂が確認されたことから液状化に起因する浮き上がりと考えられる。地盤改良域近傍の未改良域で確認。)

4. 砕石ドレーン工法の液状化防止効果実証履歴

締固め砕石ドレーン工法を砕石ドレーン工法の応用技術の一つとして考えた場合、砕石ドレーン工法はこれまでにマグニチュード7以上の大きな地震を幾つか経験し、その都度液状化防止効果を実証されている。詳細はそれぞれの調査報告等^{3),7)-9)}に譲ることにして、ここでは砕石ドレーン工法のこれまでの液状化防止効果実証事例に福岡県西方沖地震での実証事例を加えて整理し、表1に示す。いずれの地震も様々な施設や構造物等に甚大な被害を与えた大地震であり、砕石ドレーンによる地盤改良域近傍の未改良域では噴砂等の液状化の痕跡や液状化に起因する被害が多数確認されている。しかし、砕石ドレーンによる地盤改良域では液状化被害が一度も発生しておらず、更に、釧路沖地震後に運輸省港湾技術研究所(当時)と筆者らが共同で行った砕石ドレーン杭の発掘調査においては、一度液状化防止効果を発揮した砕石ドレーンが地山砂によって目詰まりしなかったことを粒度試験やX線回折等によって確認するとともに、今後の地震に対しても有効に機能することを確かめている^{3),7)}。

上記のように、表1は砕石ドレーンの液状化防止効果の実証履歴を示しており、この表から砕石ドレーンの液状化防止効果が様々な施設や構造物(港湾施設、建築構造物、道路等)で実証されていることが分かる。また、表1のいずれの地点も中規模クラス程度の地震を想定して砕石ドレーンの設計が行われていたことを勘案すると、設計時に想定された水平震度や最大加速度と同等以上の地震動が作用している地点があるにもかかわらず、砕石ドレーンによる地盤改良域では液状化の痕跡が一度も確認されていないことも分かる。

表1 砕石ドレーンの液状化防止効果実証事例

場 所	地 震 名	発生年月	マグニチュード*	対象構造物、適用箇所等	効果
釧路港、釧路西港	釧路沖地震 ^{3),7)}	1993年 1月	7.8	港湾施設(岸壁背面地盤等) 《 同一地点で3度液状化防止 》	◎
	北海道東方沖地震 ^{3),7)}	1994年 10月	8.1		◎
	十勝沖地震 ⁸⁾	2003年 9月	8.0		◎
八 戸 港	三陸はるか沖地震 ⁹⁾	1994年 12月	7.5	穀物サイロの基礎地盤	◎
大阪市西島地区	兵庫県南部地震 ⁷⁾	1995年 1月	7.2	高規格堤防試験工事(盛土前) および 集合住宅の基礎地盤	◎
福岡市百道浜地区	福岡県西方沖地震	2005年 3月	7.0	高速道路(掘割道路)の基礎地盤	◎

砕石ドレーンの設計では、多くの場合、その早期消散効果によって抑制された過剰間隙水圧が許容値を満足するように改良率等を決定する³⁾。また、締固め砕石ドレーン工法の場合には、実績に基づく施工後の地盤N値の推定値を用いて砕石ドレーンの設計を行う³⁾。設計時に想定されたレベル以上の地震動が作用したのにもかかわらず液状化の痕跡も液状化被害も一度も確認されていないという事実は、例えば密実な砕石ドレーン杭の存在による複合地盤効果(改良地盤全体としての剛性増大)や砕石ドレーンの打設に伴う静止土圧の増大等、現在の設計実務ではほとんど考慮されていない効果の存在を示唆しているのではないだろうか。また、締固め砕石ドレーン工法の場合、現状では杭間中央位置で締固め効果を評価しているが、本工法による締固め原理を勘案するとそれが非常に安全側の評価になっている可能性もある。類似の締固め原理のGeo-KONG工法による改良地盤で行った標準貫入試験では、杭間中央位置から砕石杭に近くなるほどN値が大きくなる傾向が認められた⁵⁾。

以上のような「液状化抵抗の増大に寄与する効果」を適切に評価して設計法に反映させることは、より一層の合理化や経済性向上を図る上で重要な課題であると考えられる。

5. おわりに

福岡県西方沖地震は、玄界島などの各地に大きな被害をもたらした。筆者らは、締固め砕石ドレーン工法の施工箇所およびその周辺における液状化被害調査を重点的に行ったが、事前に締固め砕石ドレーン工法による液状化対策が行われていた場所では液状化の痕跡や亀裂・段差等の地盤変状が一切認められず、高速道路本線としての機能を損なうことはなかった。

締固め砕石ドレーン工法を含む砕石ドレーン工法の液状化防止効果の確実性は、これまでの多くの液状化防止事例によ

りほぼ実証されたものと考えられる。しかし、百道浜地区や釧路港湾地域をはじめとして、これまでに液状化防止効果が実証された地点はすべて施工後の経過年数が十数年程度以内で比較的若齢であることから、今後も調査研究を継続することで長期安定性を明確にし、液状化防止効果の永続性の実証を一層確かなものにしたと考えている。

最後に、現地調査およびそのとりまとめにあたってご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会:福岡県西方沖地震・土木学会被害調査団速報(第2報)、2005.4
- 2) 伊藤克彦・中島豊・大北康治・大石博:締固めを伴うグラベルドレーン工法、土と基礎、Vol.39、No.2、pp.41-46、1991.2
- 3) グラベルドレーン工法研究会:グラベルドレーン工法技術資料、1996.4
- 4) 運輸大臣評価証 第92204号(液状化防止工法、平成2年運輸省告示 第344号)、1992.9
- 5) 加藤満、田中幸芳、市川晴雄、三代信之:低騒音・低振動の地盤締固め工法Geo-KONG工法、基礎工、Vol.31、No.12、pp.38-41、2003.12
- 6) 伊藤克彦、吉田幸司、田中幸芳、橋立健司:締固め砕石ドレーン工法における最近の施工例、基礎工、Vol.24、No.7、pp.109-113、1996.7
- 7) (社)地盤工学会:地盤工学・実務シリーズ18「液状化対策工法」、pp.385-389、2004.7
- 8) 加藤満、田中幸芳:平成15年十勝沖地震におけるグラベルドレーンの液状化防止効果、基礎工、Vol.32、No.2、pp.73-76、2004.2
- 9) 塩井幸武:三陸はるか沖地震における液状化現象、第31回地盤工学研究発表会講演集、pp.1033-1034、1996.7