

講
再

座

農業土木と軟弱地盤対策（その1）

—農業土木技術と軟弱地盤対策—

中村六史†
(Rikuji NAKAMURA)

I. はしがき

軟弱地盤の研究は昭和20年後半から土質工学会を中心に意欲的に実施された。一方、農業土木では干拓事業の全盛期を迎えると、干潟や湖沼を中心に超軟弱地盤研究に多くの勢力がそそがれた。不搅乱試料の採取法に始まり、海成粘土に関する土質試験法の確立に多くの成果が得られた。対象地域は干拓地を中心に堤防および基幹施設が主に取上げられ、昭和40年代には背後地をも含め圃場整備技術を含む地域に拡大した。軟弱地盤のもつ多くの課題が山積していたが、現地で対策を指示し、後追いの理論武装が常であった。今日に至るも、軟弱地盤に関してはまだまだ臨床的な応急処置が必要である。

II. 農業土木と軟弱地

1. 用語と問題点

土質工学用語辞典によると「軟弱地盤とは建造物の基礎地盤として十分の地耐力を有しない地盤」と定義されている。地盤強度による普遍的な区分はなく、軽い構造物と重い構造物によって軟弱地盤の程度が異なるなどの曖昧さもある。軟弱地盤は土の強度のみで定まるものではなく構造物との相対的な関係で使用されている。ちなみに土質工学会の超軟弱地盤研究委員会は、「砂質地盤では間隙比が2以上(S波速度がゼロ)、粘土地盤では自然含水比が液性限界以上のもの」とした暫定案もみられる。軟弱地盤を構成する材料には、粘土やシルト、有機質土、緩い砂質土等が含まれる。これらは海岸、沼沢地、

谷部の沖積地や埋立地など多くみられる。わが国の軟弱地盤の面積は世界的に見て多い方ではないが、軟弱性においては卓越していて、さまざまな対策工が開発されている。

粘性土は一軸圧縮強度やコンシスティンシーに特色を持ち、砂質土では N 値や相対密度がその特性値を示し多く使用される。最近、海成粘土の場合は塩分濃度、鋭敏比、目殻等を重視しつつある。

超軟弱性と高圧縮性は浮泥堆積物（沖積層）の宿命であり、この特性を把握することが最も重要である。軟弱粘土地盤に発生する工学上の問題点として、次の事項が挙げられる。

(1) **安定問題** 斜面や盛土の安定、掘削部の安定、基礎の支持力、擁壁の土圧、杭の横抵抗など土の強度不足のために発生する事項であり、上部構造物の軽量化を含め検討を行う必要がある。この問題の解決には事前調査を十分に行うことが重要である。

(2) 沈下問題 圧密沈下、地盤沈下、杭のネガティブフリクションなどこれらは土の圧縮性に起因する。これに対処するには多少広域的な検討を行う必要がある。

以上、軟弱粘土地盤に対する安定問題で最も危険な状態が施工途中に発生する場合がある。一方、沈下問題では地下水汲上げ等による新たな沈下現象を考慮しなければならない場合がある。

軟弱地盤について一般的に述べることは困難であり、現場ごとに経験と体験に基づいて解釈する必要があるため、ここでは、佐賀・白石平野に限った話

Measures of Soft Ground and Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering (1)—Some Improving Methods of Construction for Soft Clay Ground—

†(株)親和テクノ

弱地盤、干拓地、築造技術、セメント系改良地盤

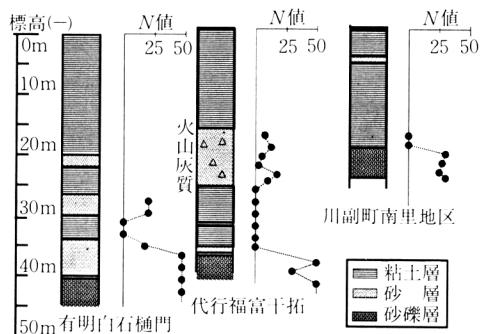


図-1 地質地層比較図

題に絞った。

2. 軟弱地の地質

有明海周辺は地質状況からみて海退、海進の影響が大きい。(一) 40 m 付近に下部砂礫層が各地でみられる。その上に粘土層が、さらに火山灰層や砂層があり、地表部までは沖積層の上部粘土層（いわゆる有明粘土層）が存在する。深度 40 m 以下の礫層は有明海湾奥部海岸線全線でみられる。上下粘土層に挟まれた中間の火山灰層や砂層は簡易構造物の支持層として重要であるがこの層が佐賀、白石平野で局部的に欠けている地域がある。これは海退時の大河川やみおに相当し、この部分は粘土層が厚い。例を有明海北岸地域（佐賀市南部から白石平野南部）とする。

図-1 の左端は有明干拓白石樋門内側（只江川右岸）の柱状図である。粘土層厚さは 20 m で、その下部にも 2 層の粘土層が堆積しているが火山灰層の確認はできない。

代行福富干拓地先（直立堤防から 60 m 先の処女地盤）の地質は、上部粘土層が 17 m、その下に 10 m 位の砂や火山灰層がありさらに下部粘土層の厚さは 9 m、深度 37 m 以下に砂礫層がみられる。

右端は佐賀市南部の川副町南里地区の柱状図である。5 m 付近に薄い砂層を挟むが、以下は 20 m まで粘土層が存在する。表層粘土は塩分濃度が小さい。

このように、近接した地域の地層も大きく差異を示すので簡易調査法を補充してできるだけ密に多くの情報を得る必要がある。

3. 平野の発達

白石平野は 100 年に 1 km ずつ発達しているとい

われている。古い干拓の記録は白石平野にみられ、推古帝時代とされている。しかし本格的な干拓は慶長 5 年以後であり、築堤などの造成工事による干拓は鍋島藩時代になる。白石町付近には自然干陸地帯があり、その周辺から西部や南部に向けて次第に干拓ができた。当初は、簡単な畦で仕切って農地が造成された。現在の国道 444 号は約 370 年前（寛永の初め）の干拓堤防（五千間堤）である。佐賀市南部の干拓地地形は鋸刃状を示し、堤防の前面は潟が堆積し高く、内側が低く排水不良地を形成する。佐賀市南部の東与賀や有明干拓福富の地先に特に潟の堆積が多くみられる。新しい干拓の造成が困難であり、最近、内水排除のため多くの排水機場が設置されつつある。

III. 軟弱地における構造物築造技術の変遷

1. 堤防・潮止工・樋門

堤防の形状は基礎の形に変化を与える。波力に抵抗する前面部と、この倒伏を支え、海水などの漏水を遮断し、越波に耐える後面部に区分できる。古くは前面工は石積みで直立し、最上部に波返しを置き越波を許さず、盛土は潮遊びの現地土を使用する形式が多かった。その後、緩傾斜堤が優位に立ち、越波も後面の被覆工により潮遊び等に流す形式が多くなった。最近は前面消波工などで地区内に海水等を入れない形式が採用されている。

図-2 に有明干拓有明工区、福富工区、廻里江工区それぞれの堤防断面を示す。

有明工区は昭和8年ごろから着工され、30年代の半ばに完成した。堤防は直立に積み上げた前面石垣の方式である。基礎としては、まず軟弱地盤にそぞろを敷きその上に捨石を置き、沈下や土中への潜りを繰返しながら潟面まで積み上げられる。さらに、抑え捨石を堤防の両端に置き中央部前面工の捨石を施工するなどして海水面上にまで築堤を行う。当然、沈下分は捨石で補われる。潮止めが行われるまでは堤防の前後は当然海水が周辺を取り巻いている。潮止めは有明工区で10カ所にも及ぶ。その後、築堤盛土と前面捨石工や石垣部が積み上げられる。最近の調査の結果、前面石垣部の最大沈下が 8 m もあり、堤防 1 つが完全に沈下し、新たな築堤がなされたこ

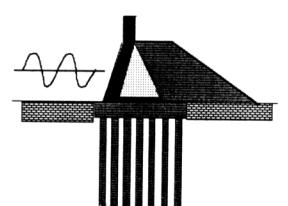
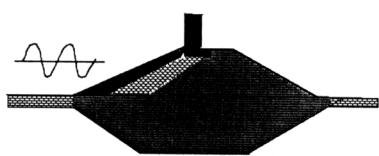
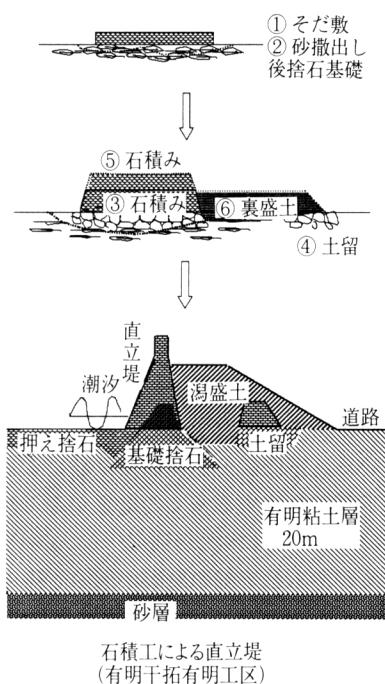


図-2 堤防築造技術の変遷

で波浪をはい上がらせ減勢させるのに特色がある。ただし施工の結果、堤体が砂でき上がっているため吸い出しや軟弱地盤の沈下により消波効果は十分でなく、多少盛土内の空洞化が進行する傾向がみられる。

廻り江工区はサンドコンパクション工法を基礎改良工として取り入れ、沈下量の軽減と圧密時間の短縮を考慮したものである。前者の沈下量については、砂杭の長さが粘土層厚さのはば半分に節約されたため、沈下阻止効果は薄れたが圧密時間の短縮は著しく、さらに堤体がバットレストタイプのため、築堤完了後の沈下は他のタイプに比べ小さい。

潮止工は干満差がある海面干拓には欠かすことのできない部分である。この箇所は、干潮満潮時に洗掘されないよう堤防横断方向に長い捨石工が施工されている。土のう積から、角落しを行って作業時間を短縮する工法に変わった。最近はゲートシャッターワーク方式も考慮されている。潮止め部は捨石が多いため、しばしば地区内への漏水箇所となることが多い。

樋門の形式は自然の潮汐エネルギーを利用した招き戸方式が一般的であったが、最近は河川の流量が減少し、招き戸周辺の浮泥堆積が多く稼働しにくくなるため、ポンプ排水方式の増設が多くなった。

2. 農道・橋梁

軟弱地には多くの橋梁、灌漑施設が散在する。水路・道路以外は杭基礎工が多く、中でも支持杭方式の場合は地盤沈下による抜き上がり現象が発生し機能上の被害が続出する。農道は山土を搬入し、これを路床として使用してきたが、最近は水路に併設した道路が多くなったため、水路の安定を兼ね備え、セメント系や石灰系の改良材による現地地盤土の改良方式で造成する例が多くなった。

橋梁の場合は、所定の桁高さまで橋台を造成し、これに取付盛土を行い、後に橋梁を架けていたが、盛土時の橋台の移動、盛土の沈下、すべり破壊等が発生する例が多かった。これに対し、限界盛土高さまで橋梁部を1スパン延ばして安定を図ってきた。最近は農業用地内ではボックスカルバート方式が多い。これは道路と橋高が同一で通行に便利であり、沈下も少なく段差も小さい。

3. 用排水路・埋設管路

となる。現在、有明海岸保全事業で消波ブロックによる修復が進行中である。

福富工区は当初有明と類似の方式で根固め捨石が築堤されていたが、伊勢湾台風などの教訓を経て緩傾斜型に変更された。この特徴は、緩傾斜の前面工

軟弱地の特色としてクリークが各地にみられる。白石・佐賀平野では標高(+)5m線以南に発達し、形状は橢円形に近い形で落ち着いていた。昭和28、29年、佐賀県調査によるクリークの平均深さは佐賀東部地区で1.2~1.5m、佐賀県中部で1.1~1.3m、西部地区で0.8mであった。古くは用排兼用型水路でありクリークは貯水池の役目をした。クリークの統廃合後も大容量の貯水池として役目を果たしている。

埋設管路は、用排水分離が取上げられた時期から、地上部を走るU字フリューム管が一時使用されたが、農地の有効利用と加圧方式の観点から地中埋設管に変わった。埋設管直径150mmくらいまでは、埋設も浅く管の沈下はなかったが、幹線の500mm以上では掘削量も多く、埋戻し土の重量や矢板の引抜き空洞等による不同沈下が発生し新たな課題が発生してきた。

4. 建物等施設基礎

軟弱地の建築物は布基礎や杭基礎が多い。家屋は布基礎が一般的で不同沈下が、倉庫や共同利用施設では杭基礎が施工され抜き上がりが多くみられる。最近は沈下しても等沈下するH型鋼を敷いた例や摩擦杭方式が登場してきた。ただし、構造物の重要度が増すとやはり支持杭形式が卓越している。これらと周辺盛土部等の不同沈下も問題である。

IV. 構造物の安定と沈下およびその対策

1. 土構造物のすべり破壊

軟らかい地盤上に盛土したり、掘削する場合、短時間にすべり破壊が発生する。このすべり破壊は比較的狭い範囲に起きるが、一般には単位幅当たりの

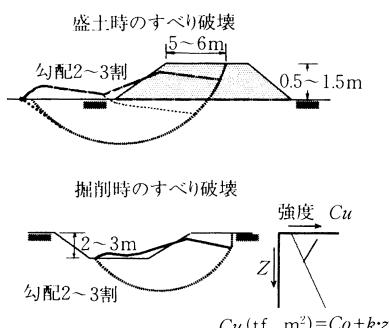


図-3 水路や盛土のすべり破壊

2次元状態で解析を試みることが多い。この予測法には、沈下量と盛土や掘削斜面先の水平方向の変形量を観測してこの動向から破壊かどうかを予測する方法がある。すべり破壊の前兆として急速盛土施工後2~3日後とか、どこかに亀裂が生じているとか、水路等から気泡が確認できるとか多くの情報がある。

軟弱地盤での多くの事故例から、すべり面は図-3に示すような円弧状のすべり破壊となる。

すべりの「面」が確認された例は少ない。しかし、すべり出し点と滑落土の最大膨れ面が比較的円弧状になり、解析結果と一致することが多い事例で確認されている。室内のモデル載荷試験によると、最初は盛土下部に発達する多くの亀裂がみられるが、この段階ではすべりにつながらない。しかし、これ以上の載荷があると下部の亀裂が消滅し徐々に法尻下部に向けて、まとまった亀裂らしきものが進行し、全体のすべりに発展することが確認されている。

すべりの安定解析には簡易Bishop法が多く使用されている。安定計算上、次の事項を考慮しながら処理するのがbetterである。

- ① 低盛土では施工中が危険断面となることが多い。施工機械重量を加味する必要がある
- ② 整備後の水位低下等（管理水位）で発生する亀裂深さまでは強度を持たない層とする
- ③ 亀裂に浸入する雨水などによる水圧
- ④ 鋭敏粘土の周辺地盤の乱れによる強度低下
- ⑤ 地盤強度は現地採取の不搅攪試料による一軸圧縮強度を使用する

など、を計算以前に考慮する必要がある。

地表面での亀裂は現況で表層より60~70cmであるが、圃場整備後の管理水位から水路近くの水田亀裂は1m位になると想定できる。

軟弱地の水路では法落ち防止のため長さ5~6mの杭柵がしばしば使用してきた。この効果として、安全率が0.1程度上昇することが判明した。

2. 施設・構造物の沈下

(1) 堤防の沈下 有明干拓堤防の3タイプの施工高さと時間-沈下曲線を比較した。各堤防の基礎と上部工はそれぞれ異なる。

図-4に堤防3タイプの施工期間、沈下量を示す。

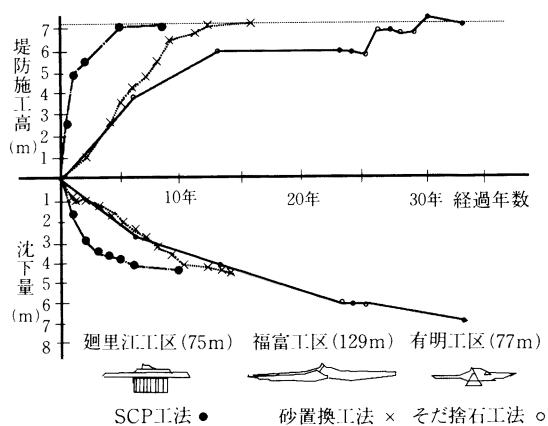


図-4 築堤の形態と沈下速度

有明干拓有明工区の堤防は直立型で沈下量は8mにもなった。堤防高さは伊勢湾台風前は6.5mであったがその後7.2mに修正され、経過時間30年位で完成した。

福富工区は砂置換基礎で緩傾斜堤防のため、12年位で完成している。沈下量は軟弱層の上部が置換されているため4.5m位でおさまった。

廻里江工区はサンドコンパクションパイル基礎で上部はバットレスタイプであり、5年間で完了し沈下量は4m程度となった。施工期間の短縮は可能であったが沈下量に関しては阻止効果が少ないことが判明した。砂杭長さを粘土層の中間で止めた結果とも推測できる。

(2) 農道の沈下 路線が長いため軟弱層の厚さや圧縮特性が異なり、軟弱粘土地の新設道路には不同沈下がつきものである。傾向として、道路縦断方向の沈下と横断方向のわだち付近の沈下の2種に大別される。前者は橋梁取付け部、道路を横切る樋管、地盤の局所的な軟弱性による不陸が発生する。わだちは車輪の集中荷重や路面のひび割れなどにより生じるが、これは農道と一般道路の設計条件の違いによるものもある。

道路の不同沈下の主因は路床下の軟弱粘土層にあり、その誘因として盛土荷重と交通による繰返し荷重の影響が考えられる。解析の結果、盛土による圧密沈下が80%を占めた。一方、軟弱地における道路の沈下は自動車等の繰返し荷重で沈下しその量は70%を占め、残り30%が圧密によるものとした建設

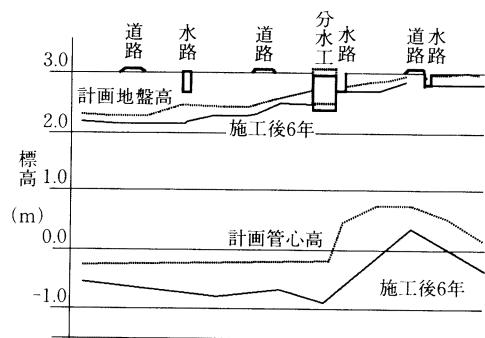


図-5 パイプラインの不同沈下

省の報告もある。いずれにしろ、この対策としては路床の剛性か厚さを再検討すべきである。

(3) 埋設管の沈下 白石平野の農業用埋設管の延長は10数kmにも及ぶ。管の直径は40cmから2mまで様々である。管の埋設法として長さ10mの二重の仮設矢板が土留めに使用されている。施工後6年経過した地区(2km)の管路の沈下量調査結果を図-5に示す。

軟弱地盤に管路を設置する場合、多くは農地内に仮設矢板を打ち込み、掘削し、所定の深さに山土や砂を敷きこれに鋼管等のパイプを設置する。これを盛土(砂や山土)で押え、耕土を返し矢板を引き抜く工法が採られている。10年経過後、管路の沈下は50cm、構造物の沈下が60cmにも達している。とくに構造物と管の取付け部の段差が大きい。管路の経年沈下をみると埋設時から2~3ヵ月後の初期沈下量は15~20cm、3年後に30~40cm、4年後40~50cmであった。その後、2年間は年に6~8cm、7年経過後から2~3cmと沈下速度は鈍化傾向にある。

沈下の誘因として重機走行による表層地盤の乱れ、矢板打ち込みによる周辺地盤の乱れ、地下水低下による土性変化、埋戻し土の単位重量増加、余盛荷重による沈下、空のパイプの浮き上がり、矢板引抜きによる沈下等が考えられる。中でも埋戻し土の荷重沈下と矢板引抜き後の地盤内の空洞沈下が大きい。

3. すべり破壊防止と沈下軽減策

軟弱地盤に関する不同沈下やすべり防止対策工として、軟弱粘土の強度補強や沈下軽減のためスラリー系の地盤改良材が多く使用されるようになった。

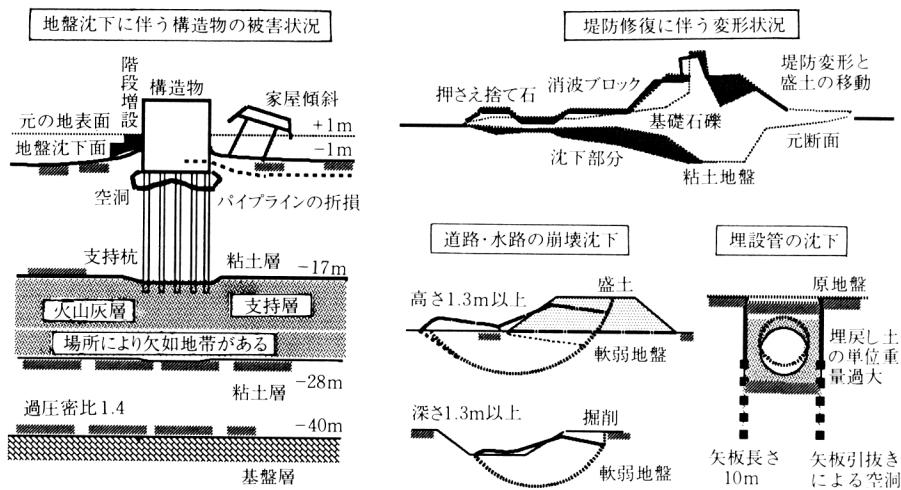


図-6-1 各種施設・構造物の問題箇所

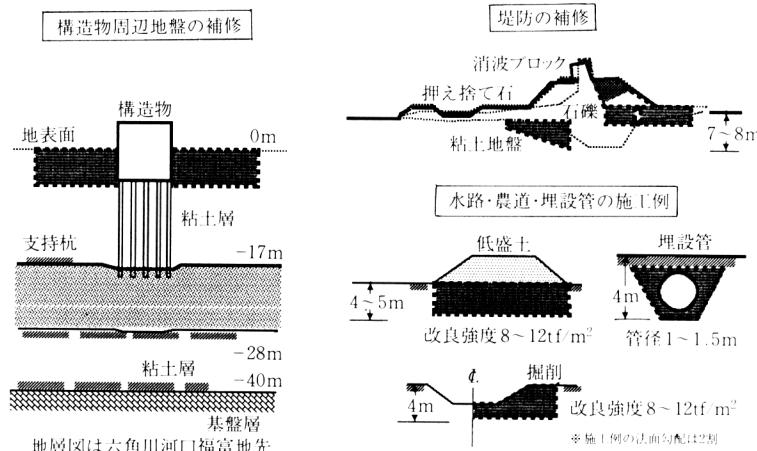


図-6-2 問題箇所と改良域(破線部)

その特徴として①現地土を使用しその改良を行ったため単位重量の軽減が図れる。②改良材の混合で現地土の強度増加が簡単に得られる。③改良体と軟弱土の変形や透水性などなじみを考慮すると改良材の高配合は好ましくない。また、地盤沈下地帯では地盤の変動に追従する構造物が望ましい。これには摩擦杭やセメント系地盤改良材（湿潤土重量比6~7%配合、現地改良率を70%以上）を使用するのがよい。改良材の適用地盤として、深さZ(m)に対し一軸圧縮強度 $q_u(\text{tf}/\text{m}^2) = 0.8 + 0.2 \cdot Z$ より軟弱な地盤に効果を発揮する。この強度以上の地盤では改良材をはじめ、矢板工や杭基礎さらに他の材料による置換工等の比較設計を行う必要がある。

図-6に既存の施設構造物等の問題箇所およびこの結果から得た改良すべき箇所や補修箇所を点線枠で示した。堤防は直立型が多く石礫下の軟弱部や裏盛土部の改良が必要である。

ボックスカルバートや水路、農道、埋設管の場合、少なくとも基礎面から4~6m深さまでの改良域が望ましい。

地盤沈下地帯の構造物では、布基礎等の場合は不同沈下が、支持杭基礎では抜き上がりが多い。これを避けるためには浅層地盤改良工や摩擦杭など地盤変動に追従する基礎処理法が望まれる。

表-1に軟弱地における基礎工および上部工の移り変わりを示した。将来は上部下部一体型で多少補

表-1 対策工法とその効果

そだ床工, いかだ床工 ↓ 押さえ盛土工 ↓ 杭基礎（支持 or 摩擦） ↓ 地盤改良工 ↓ 上部構の軽量化 ↓ 上下部構造の一体化	直接基礎 すべり安定 荷重軽減 or 応力分散 強度増加・圧密促進 強度考慮・沈下軽減 浮き基礎工
--	--

修可能な形式を模索する必要がある。

これらは時代に即応し、構造物の大型化や施工時間の短縮、より深い軟弱層にも適用できる工法へと推移している。

今後も新工法や新材料が提供されるであろうが、環境問題をクリアし、現地地盤を生かし、現地土になじむ工法や素材を選択する必要がある。

V. まとめ

今まで報告されている多くの軟弱地盤対策法や工法は現地で試行錯誤を続けた結果の産物であることを肝に銘じておく必要がある。

地盤の不均一性（時間的空間的）や用途別・機能別に種々に異なる設計条件が存在し、定型化できる対策工法は少ない。時と場所、さらに環境問題をクリアする工法を模索し続けなければならない。

参考資料

- 1) 山口, 宮原, 中村, 高山: 土質工学に関する模型実験—スペリ面の形について—, 土質工学特集号 No. 6, pp. 3~4, (1962)
- 2) 中村六史, 高山昌照, 村岡嘉邦: 軟らかい粘土地盤上の堤防の修復について, 農土誌, 41 (10), pp. 33~39 (1973)
- 3) 中村六史: 有明海における軟弱地盤の問題点—特に有明海北岸部について—14号農業土木材料施工部会報, pp. 75~86 (1976)
- 4) 中村六史, 吉田俊美, 軟弱粘土地における農道の沈下, 農土学会九州支部58回, pp. 271~274 (1971)
- 5) 中村六史: 軟弱粘土地における杭の水平支持力について, 62回農土学会九州支部, pp. 261~264 (1983)
- 6) 中村六史: 有明粘土地盤の工学的特性と調査・施工例, 第3回佐賀県地質調査業協会資料, pp. 1~50 (1983)
- 7) 中村六史: 有明粘土の鋭敏性と塩分濃度について, 66回農土学会九州支部, pp. 221~224 (1985)
- 8) 中村六史: 軟弱粘土地盤の振動特性, 67回農土学会九州支部, pp. 197~198 (1986)
- 9) 中村六史, 三浦哲彦, 松田応作: 有明粘土に対する地盤改良材の適用上の問題と改良地盤についての現地調査, 土と基礎, 35 (5), pp. 9~14 (1987)
- 10) 中村, 三浦他: 軟弱地盤における木杭の支持力について, 68回農土学会九州支部, pp. 183~186, (1987)
- 11) 高山, 中村他: 干拓地盤の土質と堤防の挙動および水路設計, 土と基礎, 36 (3), pp. 37~42 (1988)
- 12) 中村六史: 軟弱地盤上のため池堤防の沈下と老朽化, 69回農土学会九州支部, pp. 129~132 (1988)
- 13) 中村六史: 軟弱地盤中の管路の不同沈下とその対策, 70回農土学会九州支部, pp. 181~184 (1989)
- 14) 中村六史, 高山昌照: 有明北岸地域における“下部粘土層”, 71回農土学会九州支部, pp. 89~90 (1990)
- 15) 中村六史: 軟弱粘土地盤における構造物の基礎処理, 農土学会九州支部シンポジウム, pp. 43~58 (1993)

[1994. 6. 23. 受稿]