

## 中国地方の軟弱地盤と工学的問題

Characteristic and Geotechnical Problems of Soft Ground in Chugoku Region

土田 孝 (つちだ たかし)

広島大学大学院教授 工学研究科

山本 春行 (やまもと はるゆき)

広島大学大学院教授 国際協力研究科

向井 雅司 (むかい まさし)

復建調査設計(株)地盤環境部 部長

## 1. はじめに

中国地方では、沿岸域を中心として広範囲に軟弱地盤が分布している。特に瀬戸内沿岸一帯には軟弱な沖積粘性土が厚く堆積している。これは、7~1万年前と言われるウルム氷期に、瀬戸内海の水位が最大80 m低下し、陸化していた古い瀬戸内海の洪積層や基盤層の一部が浸食され、その上に堆積して形成されたものである<sup>1)</sup>。

瀬戸内沿岸域では、昭和30年代後半から主要都市周辺で重化学工業の生産拠点が次々に建設され、併せて陸海の交通網も整備されていったが、これらのほとんどが沖積粘性土地盤上に立地していた。この沖積粘性土は非常に軟弱であり、建設工事において地盤の安定・沈下などの多くの問題を発生する原因となり、その対策が重要な課題となっていた。そして、この課題に対処するためにこれまで様々な軟弱地盤対策が試みられ、多くの成果を上げている。

一方、山陰側でも河川の河口閉塞によって発達した砂丘背後地の湿原地帯などに軟弱地盤が多く存在している。これらが地盤工学的な問題として取り上げられるのは瀬戸内沿岸よりかなり後になるが、近年では多くの建設工事現場で遭遇する課題となっている。

本報告では、中国地方における軟弱地盤の土質工学的特性を示すとともに、広島県沿岸域を対象に軟弱地盤上の埋立工事、建築工事の特徴と課題を述べる。

## 2. 軟弱地盤の分布と土質工学的特性

## 2.1 軟弱地盤の分布

図-1に中国地方において軟弱地盤(沖積粘性土層)が堆積している主要な区域を示す。この図に示すように、瀬戸内沿岸を中心として軟弱な粘性土層が広範囲に堆積している。

中国地方における沖積粘性土を構成する粘土鉱物は、カオリナイトを主体(40~60%)とし、イライト、スメクタイト、パーミキュライトなどである。山陰側でカオリナイトの比率が多少低い傾向はあるが中国地方全体で大きな違いはないようである。

山陰側では、河口の三角州や扇状地、埋積谷などで、軟弱粘性土層が発達しており、特に島根県出雲市・斐川町の斐伊川河口部(宍道湖西岸部)や鳥取県鳥取市の千代川河口部では軟弱粘性土層の厚さが20~30 mに及ぶ区域もある。また、埋積谷などでは有機質土を含有した非常に軟弱な粘性土層が局所的に堆積している場所も多く見られる。

一方、瀬戸内側では山口県宇部市、周南市、岩国市、広島県広島市、呉市、三原市、福山市、岡山県倉敷市玉島地区、岡山市と主要都市のある沿岸域の平野部ではほとんどの区域で軟弱な沖積粘性土層が厚く堆積している。多くは河川の河口部に発達した三角州や浅海成低地として形成されており、軟弱粘性土層は海岸線に向かって厚くなり、層厚が30~40 mに達する区域も見られる。

## 2.2 軟弱地盤の土質工学的特性

中国地方においてはこれまでに相当数の土質調査が行われ、軟弱粘性土層に関するデータも蓄積され、データベース化も進められている<sup>2)~4)</sup>。それらの代表例として瀬戸内側の広島地域・岡山地域および山陰側の出雲地域(宍道湖西岸)の土質特性を比較した一例が図-2、3である。下層部、特に山陰側の下層部では多少砂分を混入しているが、全体としては比較的均質な粘性土が厚く堆積していることが大きな特徴と言える。

## (1) 物理特性

物理特性としては、下層部の砂分を混

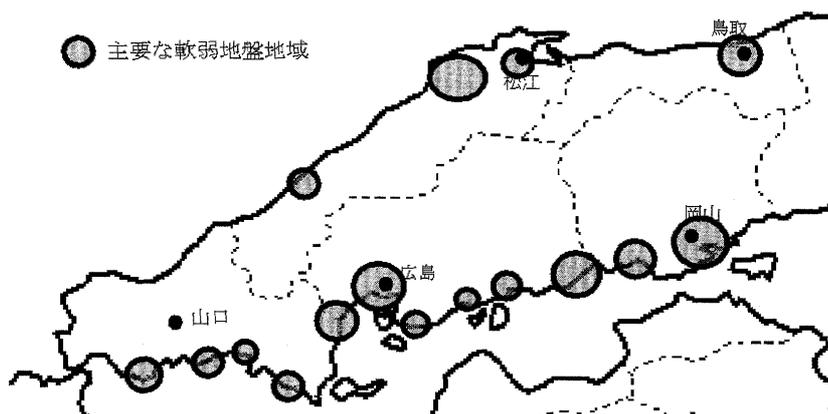


図-1 主要な軟弱地盤地域

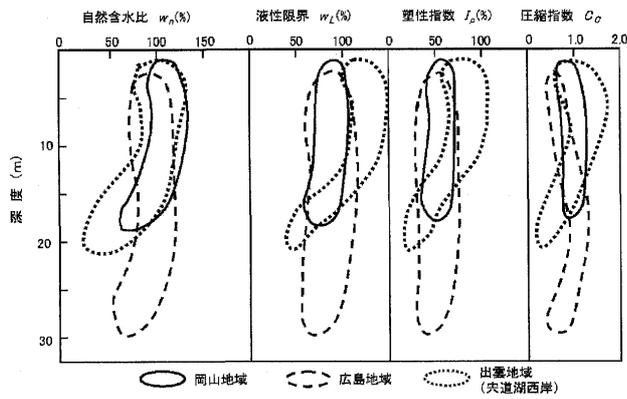


図-2 沖積粘性土の土質特性

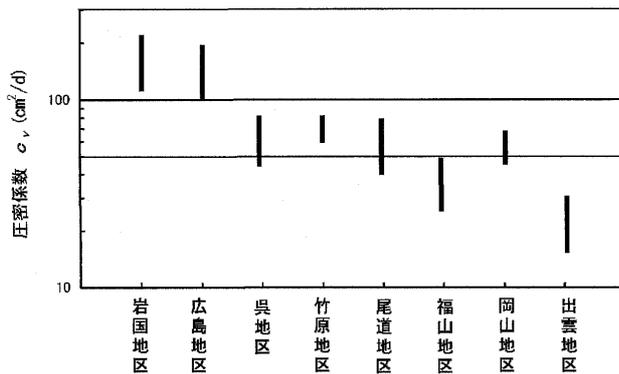


図-3 圧密係数の分布<sup>1)</sup>に加筆

入している層を除けば、おおむね自然含水比  $w_n = 50 \sim 130\%$ 、液性限界  $w_L = 50 \sim 150\%$ 、塑性指数  $I_p = 20 \sim 100$  である。いずれも塑性図上ではほぼ A 線に沿って分布しているが、広島地域では A 線の下位に、岡山地域や出雲地域では A 線の上位に分布する傾向にあり、粘性土の物性の違いが見られる。

(2) 強度特性

強度特性としては、いずれの地域も一軸圧縮強度  $q_u$  は大半が  $100 \text{ kN/m}^2$  以下である。有効土被り圧との関係を見るとおおむね

$$q_u \approx 0.6 \gamma' z \dots\dots\dots (1)$$

の関係が見られ、沖積粘性土の強度増加率は  $c_u/p \approx 0.3$  程度と評価される。

(3) 圧密特性

圧密特性として、圧密降伏応力はいずれの地域も  $p_c \approx \gamma' z$  となっており、おおむね正規圧密状態にある。圧縮指数は  $C_c = 0.4 \sim 1.6$  の範囲に分布しており、全体的に圧縮性の高い粘性土である。また、圧縮指数は液性限界との間に相関が見られ、Skempton (スケンプトン) の提案式

$$C_c = 0.009(w_L - 10) \dots\dots\dots (2)$$

よりも全体の圧縮指数が大きい傾向にある。

圧密係数  $c_v$  は、広島地区で  $c_v = 100 \sim 200 \text{ cm}^2/\text{day}$ 、岡山地区で  $c_v = 40 \sim 70 \text{ cm}^2/\text{day}$  と差が見られる。岡山県に隣接する福山地区ではさらに小さく、 $c_v = 20 \sim 50 \text{ cm}^2/\text{day}$  となっている。また、宍道湖西岸区域では砂分の含有率によって差があるが、比較的均質な粘性土で

は、 $c_v = 10 \sim 30 \text{ cm}^2/\text{day}$  と非常に小さい。山陰側ではおおむねこのような傾向を示しており、これらの地域では、圧密係数の設定にあたっては留意が必要である。

3. 埋立工事

本章では、特に広島県沿岸を対象に埋立工事の変遷と地盤改良工法の特徴について述べる。

3.1 埋立工事の変遷

広島県における沿岸部の埋立は、昭和30年代の前年から主に工業構造を高度化、多角化することを目的としてスタートした。この時期に造成された埋立地は、半世紀を経過した現在でも主要な工業地帯として多くの資産・設備が集積している。その後も産業の活性化を図るために臨海工業用地の造成は進められているが、埋立地の用途としては、昭和40年代後半から下水処理場のほか産業廃棄物、建設残土等の広域的処分地としての利用が多くなってきた。

特に広島都市圏においては、人口増加に伴う都市環境、生活環境の改善および都市基盤の整備促進に資するため、内外貿易埠頭用地、廃棄物処理用地等の整備とあわせて住宅用地等の都市再開発用地が造成されている。

最近の埋立の計画としては、コンテナ船の大型化に対応した港湾施設の整備や都市機能の整備を目的としたものが多。また、沿岸域に産業廃棄物などを対象にした管理型廃棄物処分場を立地するニーズも高まっている。これは、沿岸域の方が容量の大きい処分場を建設しやすいこと、処分場内の水位を管理しやすいこと、内陸部での立地が困難になっていることなどが大きな理由である。さらに、港湾機能を維持するために発生した浚渫土砂を従来のように土砂処分場に埋めるのではなく、干潟や人工海浜、藻場の造成に利用するケースも増えてきている。これらは、沿岸部の新たな利用の方法であり、今後は大規模緑地の整備も含め、沿岸環境や海洋環境の整備が一層重要になると考えられる。

広島沿岸域における埋立は、昭和30年代では水深が  $\pm 0 \text{ m}$  前後の比較的浅い箇所が多く、造成費も安価であったが、昭和40年代後半から水深が  $-10 \text{ m}$  前後の区域での埋立が多くなってきている。

また、埋立地の沖積粘土層厚は昭和30年代最初の埋立地である広島港東部地区ですでに平均で  $26 \text{ m}$  もあり、当初から粘土層の非常に厚い区域での埋立工事であった。臨海部の土地造成が活発であった東京湾や大阪湾における昭和30年代の埋立工事は軟弱粘土層厚が  $10 \text{ m}$  以下の区域がほとんどであり、 $20 \text{ m}$  を超えるのはおおむね昭和50年代以降であることを考えると、広島沿岸域は我が国でも軟弱地盤対策の必要性が最も高かった地域の一つと言えよう。

3.2 埋立工事における地盤改良

広島県沿岸域の人工地盤は、いずれも軟弱な沖積粘土層の上に構築されていることが大きな特徴である<sup>5)</sup>。このため、埋立造成にあたっては、早くから先端的な軟弱地盤対策技術が用いられてきた。

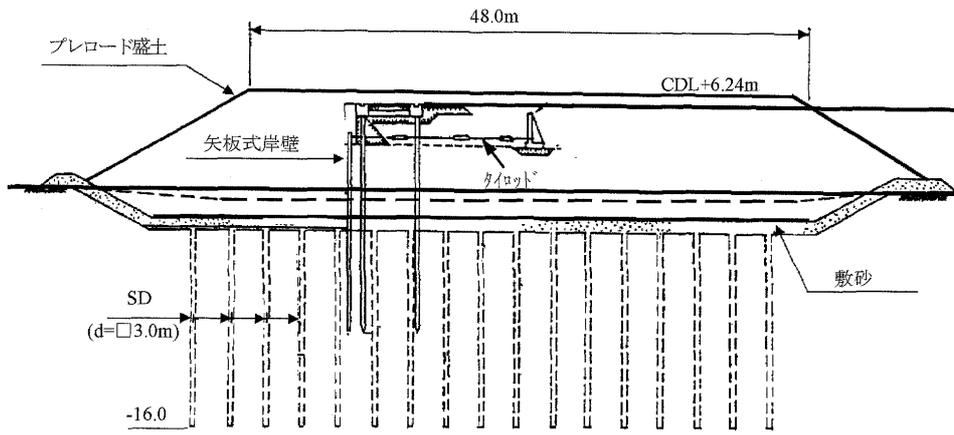


図-4 東洋工業岸壁 (昭和36年建設)

広島沿岸域をはじめとして中国地方における地盤改良工法は、軟弱な沖積粘土層が厚いこと、瀬戸内海で良質の海砂が産出されたことなどから、サンドドレーン (SD) 工法、サンドコンパクションパイル (SCP) 工法が多く用いられてきた。

広島沿岸域では、押し盛土工法や置換工法が一般的であった昭和30年代に早くも SD 工法による岸壁工事が行われている。図-4 は、昭和36年に施工された東洋工業(株) (現在のマツダ(株)) -4 m 岸壁の断面を示したものであるが<sup>6)</sup>、長崎港に続く我が国における同工法の2番目の採用例である。

SD 工法は今日では一般的な工法であるが、当時はその効果を疑問視する意見も多く、特に敷砂およびドレーン材の選定には注意が払われている。あわせて本工事では海上に計測小屋を設置し、工事中に沈下や間隙水圧を測定し、载荷重や圧密の管理を行っている。このような動態観測は我が国で初めての試みであり、それによって工事は成功している。

昭和30~40年代の埋立は、埋立地を全域地盤改良することはなく、護岸・岸壁部のみ改良し、埋立地内は建設物を構築する際に必要に応じて地盤改良を行うことが一般的であった。昭和40年代後半になって、埋立前に海底地盤を SD 工法で改良する手法が採用されるようになった。特に広島市西部開発では330 ha の埋立地の7割を地盤改良しているが<sup>7)</sup>、このような広大な面積を対象とした地盤改良は当時では他に例をみない規模である。

このように、瀬戸内海では良質の海砂が多く産出したことから、SD、SCP 工法は数多く施工されたが、近年では環境への配慮から瀬戸内海での海砂の採取が全面的に禁止されており、代替材として製鋼スラグや石炭灰などの産業副産物の活用も試みられている。

## 4. 地盤と建築物の基礎

### 4.1 地形・地質と建築物基礎の概要

中国地方は、東西350 km、南北140 km の細長い地形であり、中央部を中国山地が東西に貫通し、日本海側の山陰と瀬戸内側の山陽とでは地形・地質的特徴の様相が異なっている<sup>8)</sup>。地勢的には、山陽側は瀬戸内海沿岸から比較的穏やかに中国山地の山頂に向かって高原などを

形成しているが、山陰側では日本海沿岸部から中国山地山頂部までの距離が短く、比較的急峻な地形であることがこの地方の地勢特徴の一つといえる。また、中国地方は可住地面積率が26%と全国平均の約33%に比べかなり低く、他の地域に比較して、居住地の確保に対する制約が多い。すなわち、中国山地脊梁の南北両側に高原状の低い山地が

広がり、その外は瀬戸内側・山陰側ともに、低い丘陵が海まで迫っており、河川が海へ注ぐところに発達する沖積平野は一般に小規模かつ断片的である。例えば、地図上で平野と称せられるものは、山陽側では岡山平野・福山平野、ならびに山陰側では出雲平野・米子平野ぐらゐであり、しかも他の地域に比べてかなり狭小である。したがって、軟弱な沖積平野に建つ建築物基礎の特有の問題のみならず、周辺の丘陵地への都市域の拡大に伴う宅地造成された「まさ土」地盤上の建築物基礎の問題も注目されてきた。

### 4.2 沖積地盤上の建築物基礎

沿岸部の沖積地の生成過程は河川毎の土砂の搬送・堆積環境がそれぞれに異なっているため、その地盤特性は一様ではないが、瀬戸内側と山陰側で明確に分類される。すなわち、瀬戸内側の沖積土の成分は、シルト質砂、砂質シルト、シルト、粘土と多様であるが、その多くはシルト以上の粒径のものを70%程度含んでおり、山陰側の沖積土では砂分・シルト分がさらに多くなる。さらに、 $N$  値が小さく、また砂分が多いところでは建築物基礎の設計に際して、液状化の検討が必要となる<sup>9)</sup>。これらの沖積層の下限深度は20~30 m 程度であるが、40 m に達するものもある。この内、広島市の基礎をなす太田川三角州は砂、粘土、礫よりなる沖積層で、下部の砂礫層はよく連続している。また、地表から約5 m の深度あたりにも砂礫層が存在しているが、これについてはそれほど厚くなく連続性は悪い。この沖積層の基盤は花崗岩であるが、旧太田川流域の埋没谷や三角州形成以前の湾内にあった島が地表に露出している部分もあり、相当に複雑であるため建築物基礎の設計に際して、注意を要する。広島市デルタの横断面図によれば<sup>10)</sup>、砂礫層上端面はかなりの落差で凹凸しており、旧太田川の流路が埋没していることが分かる。図-5 は広島市市庁舎 (広島市中区国泰寺1丁目) の建設に伴い実施された長尺のボーリング結果である。-30~-60 m あたりまで玉石を数多く含んだ砂礫層が堆積しており、この玉石は現在の太田川の中流域で多く見られる20~30 cm 程度のかなり大きなものである。このように下部の砂礫層が連続して広がっている地盤で、建築基礎工事に伴う過度の揚水は遠くの思わぬところの地下水にまで影響を与えること

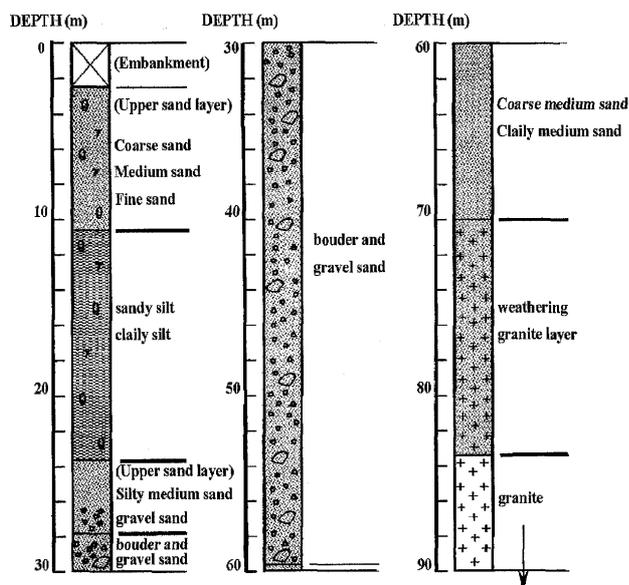


図-5 長尺ボーリング (広島市中区国泰寺1丁目)

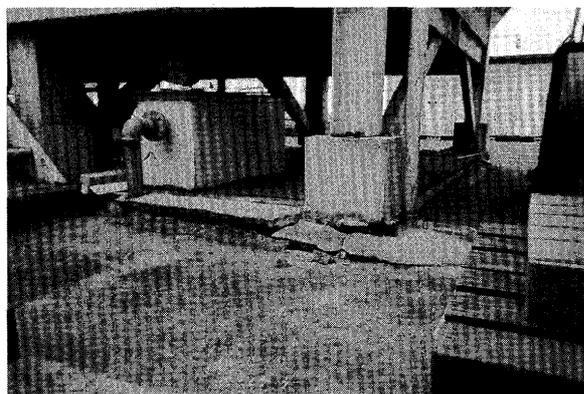


写真-1 約20 cm 抜け上がった先端支持杭基礎を有する大型貯水槽

が多く、細心の注意を要する。さらに広島デルタのほぼ全域において地下水位が高いため、低層で地下空間の深い建物は浮き上がりに対処するために、永久アンカーを用いて固定している例もある。加えて沖積の軟弱地盤には地盤沈下の問題があり、建築物構造体の不同沈下や写真-1に示すような先端支持杭基礎を有する構造物の「抜け上がり」の問題についても十分な配慮が必要となる。この「抜け上がり」は、構造物の美観や機能的な障害はもちろん、支持杭へ作用する負の摩擦力や杭頭の突出による杭の水平抵抗力低下等のシビアな問題も発生させる。

#### 4.3 「まさ土」造成地盤上の建築物基礎

前述したように、中国地方における沖積平野は狭小であることから周辺の丘陵地に住居地が拡大する傾向にあり、また、本地域の大部分を覆っている花崗岩地帯はかなりの深さまで風化しており、マサ土化したところでは

造成の容易さから宅地造成の対象地域となり、多くのところで開発が進んでいる。この風化の程度には、局所性があり、豪雨時の自然斜面や人工斜面の崩壊のみならず、地震時の挙動についても注意を要する。本地域においては、1978年の宮城県沖地震や1995年の兵庫県南部地震で発生したような丘陵造成地の大規模崩壊被害の経験はないが、長大斜面を有する高盛土地も多く存在し、それなりの検討と対策が必要となろう。宅地造成地上の個々の家屋の被害との関連においても盛土側にある家屋ほど被害程度が大きく、また切盛境界付近においても被害が多いことも明らかにされている<sup>11)</sup>。2001年芸予地震による本地域内のある宅地造成地における瓦屋根被害分布と切土・盛土地との調査結果<sup>12)</sup>においても、やはり盛土地上の家屋の瓦屋根被害が多くなっていることが伺える。切・盛境界をまたいで建てられた建築構造物の不同沈下の問題が顕在化するの当然としても、切土マサ地盤を地山と見なして安易に基礎設計がなされたものもある。このような場合、風化の程度は局所的に異なり地盤の地耐力もかなり変動しているため、学校建築や共同住宅のように横に長い建物では、約3割に不同沈下によるひび割れが発生し、さらにこの内の1/3が不同沈下障害に至っているとの判定がなされており<sup>13)</sup>、建物の形態によっては、たとえ切土側のマサ地盤といえども建物基礎の設計には十分な注意が必要となる。

#### 参考文献

- 1) 宮原健二：中国地方におけるローカルな土、土と基礎、Vol. 31, No. 1, pp. 49~56, 1983.
- 2) 中国地方基礎地盤研究会編：山陰臨海平野地盤図, 1995.
- 3) 中国地方基礎地盤研究会編：広島県地盤図, 1997.
- 4) 中国地方基礎地盤研究会編：岡山県地盤図, 1995.
- 5) 網干寿夫：広島県の埋立史、土と基礎、Vol. 39, No. 1, pp. 46~50, 1991.
- 6) 広島県臨海工業地帯整備局：広島県臨海工業整備工事報告(第1報), 1963.
- 7) 広島市西部開発局：西部開発事業工事報告書, 1982.
- 8) 中国地方土木地質図編纂委員会編：中国地方土木地質図解説書, (財)国土開発技術研究センター, 1984.
- 9) 土質工学会：中国地方の土質と基礎, 土と基礎, Vol. 38, No. 3, 1990.
- 10) 日本建築学会中国支部基礎地盤委員会編：広島県西部地盤図, 1987.
- 11) 菅野英幸ほか：GISを用いた1993年釧路沖地震における家屋被害の分布(人工的地形改変の影響について), 第30回土質工学研究発表会, 第1分冊, p. 137~140, 1995.
- 12) 岩井 哲：切土・盛土と木造瓦屋根被害の関係一広島市西区の住宅団地の場合一, 平成13年度科学研究費補助金(特別研究促進費(1))研究成果報告書, pp. 112~113, 2002.
- 13) 日本建築学会中国支部基礎地盤委員会編：マサ土地盤の圧縮性状に関する研究, 1983.

(原稿受理 2010.12.20)