

地 盤 沈 下

くわ はら とおる
桑 原 徹*

1. 地盤沈下とは

地盤沈下とは文字どおり、地表面の相対的沈降現象を指しているが、原因からみて、地球内部の運動によってもたらされるいわゆる地殻変動に含まれるものと、人工的または自然的原因によって地球表層部の物質の出入りによってもたらされるものがある。

前者の地殻変動には、数100万年以上の地質時代にわたって緩慢に進行する造盆地運動や大陸域の全般的な沈降運動が含まれる。日本の大型チュウ積平野である関東平野・大阪平野・濃尾平野・新潟平野を初めとして、大阪湾・伊勢湾・瀬戸内海・琵琶湖などもこうした沈降運動の産物にほかならない。しかし、これらの沈降速度はいずれも1mm/年前後のオーダー¹⁾で工学的な影響はほとんどない。一方、地殻変動の中には、地震の前後や火山活動に伴って生ずる急性的な運動もある。地震の前駆的な現象としては10mm/年以上の速度をもつものもあり、地震時の急性的変動には、数10から数100cmに達するものがある²⁾。

後者の、地球表層部の物質の出入りによってもたらされる地表面の沈降現象には、表-1に示すような種々の原因によるものがある。今日、一般に地盤沈下とは、これらの現象を指しており、前者は地殻変動として区別される。地盤沈下を示す外国語としては、いろいろな表現があったが、1969年の地盤沈下の国際会議以降 Land Subsidence(英)、Affaissement du Sol(仏)に統一されつつある。

2. 沈下機構からみた地盤沈下現象

さまざまな原因によって生ずる地盤沈下現象を、主要な発生機構別に整理してみるとつぎの5つの型に分類することができる。

2.1 液体の抽出による地盤沈下

未固結のタイ積物中から、種々の開発目的で地下水や石油などの間ゲキ流体を抽出することによって、間ゲキ圧が著しく低下し、有効応力が増大し、圧密が促進される場合。この種の地盤沈下で、最初に文献上に現われるのは、石油開発に伴うもので、北米テキサス州の各油田^{3),4)}、カリフォルニアの油田地帯^{5),6)}、ベネズエラの油田地帯⁷⁾で盆状の沈下が認められている。カリフォルニア、ウイルミント

表-1 さまざまな原因による地盤沈下

原 因		沈 下 の 機 構
地下資源開発	地下水資源の開発 水溶性天然ガスの開発 石油資源の開発	未固結タイ積物中の間ゲキ圧の低下による地層の圧密収縮
	金属鉱床 石炭鉱床 岩塩鉱床	鉱床開発に伴う地下水の排出により被ふく層の圧密収縮による場合と固体物質の除去による地表の沈下、一部にシンクホールの発生
農地開発	干拓地の排水による沈下 乾燥地域のかんがい	有機質土の脱水収縮と酸化分解 レス土、特殊な泥流タイ積物のハイドロコンパクション
土木開発	トンネル建設 深礎工事	深いトンネル中への地下水の漏水や工事に伴う地下水の排出による表層タイ積物の圧密収縮
浸食作用	石灰岩・ドロマイト地域での地下洞の形成、えん蓋物パイピングによる破壊	表層物質の空洞中への崩落による陥没孔(シンク・ホール)の形成

ン油田(1973年開発)のロング・ビーチでは、60cm以上の沈下域が1962年には65km²にも達し、中心部では8m以上の沈下が記録された⁵⁾。これらの油田地帯は数100mから2,000m近い深さの第三紀層の産油層中の泥質層や砂層の圧密収縮に基づいており、多くの場合、小断層や地表部でのき裂を生じており、ロング・ビーチではこれらに伴って最大3m近い水平変位をもたらしている。

水溶性ガス開発に伴うものは、イタリアのポー川河口部⁸⁾、オランダのグローニンゲン地区⁹⁾、日本では千葉^{10),11)}、新潟地区¹²⁾の例がある。

チュウ積平地などで地下水を過剰に揚水することによって生ずる地盤沈下は、東京¹³⁾、横浜¹⁴⁾、大阪^{15),16)}、新潟¹²⁾、濃尾平野¹⁷⁾、佐賀平野¹⁸⁾など日本の各地^{19),20)}で発生している。海外でも、北米(カリフォルニア²¹⁾、ガルフコースト^{8),22)}、コロラド、アリゾナ、ネバタ)、北ドイツ北海沿岸²³⁾、オランダ、ベニス²⁴⁾、バンコック²⁵⁾、台北²⁶⁾、香港、パキスタン(ガンジス河口)などの各地で発生している。乾燥気候下のカリフォルニアのサン・オークイン・バレーではかんがい用水の汲み上げによって13,500km²もの広大な沈下域を生じ、1926年以降、最大8.84mもの沈下を記録している⁶⁾。メキシコ・シティは200~500%という高含水比を示すモンモリロナイト質の粘土の圧密によって、1880年以来9mもの沈下を記録し建築物や揚水施設に大き

* 理博 名城大学教授 理工学部

技術手帳

な被害を与えている^{27), 8)}。

金属・非金属鉱床の開発に際して鉱内水を排水するために、鉱床付近の未固結タイ積物の圧密沈下をもたらす例もある。石炭採掘ではオーストラリア^{28), 29)}、ドイツ³⁰⁾、や日本の常磐炭田、筑豊炭田³¹⁾にその例が知られている。南ア連邦のヨハネスブルグ西南の世界有数の金鉱床は上位の厚いドロマイト層中の多量の洞穴水を排出することになり、地盤沈下をもたらしている。この場合、ドロマイトをおおう風化帯や風成層の圧密沈下以外に、地下水位の低下に伴ってシンク・ホールの発生も認められる。水位低下によるシンク・ホールの発生は筑豊炭田周辺の石灰岩分布域でも報告されている³²⁾。

トンネルや深礎工事に伴う地下水の排出によって周辺地域の圧密沈下を起こした例もある³³⁾。

この種の地盤沈下の場合、流体排出の中止、抑制または注水によって間ゲキ圧を回復させると、全沈下量中の一部の弾性圧縮部分は回復し、地表のリバウンド現象が現われる。リバウンド現象は、砂質層や第三紀層のような弾性圧縮部分の大きい地層中で比較的大きく現われる。

2.2 固体物質のとりだしによる地表の沈下

地下の岩塩層を地下水に溶出させて、これを揚水して岩塩を採取する場合があります。岩塩の溶出分に応じて地盤の沈下が生じている^{34), 35)}。

2.3 ハイドロコンパクション

北米や中央アジアからヨーロッパ東部にかけて、半乾燥気候下に広く分布する風成のレス土やレス状土は、高間ゲキ比を持ち乾燥状態で十分な粒子間力をもっている。しかし、一度、含水すると乾燥時の粒子間結合力が失われ急激な圧縮が生じる。カリフォルニアには乾燥気候下の特殊な泥流タイ積物で同様な性質を示すものがある⁸⁾。

これらのタイ積物は、かんがいによって含水した部分がたちまち圧縮されて、水路や構造物に被害を与え、かんがいされた農地は不均等な沈下によってゆるやかに波打ってしまう。レス土地帯では沈下量が1~2mに達することがあり、カリフォルニアの泥流タイ積物では5m以上もの沈下を生じている。沈下の著しい所では地表面にき裂や陥没が現われる。

2.4 腐植土、泥炭の酸化分解による沈下

腐植土や泥炭などを含む有機質土地帯の農地化に当たって地下水位を下げると、初期の急速な脱水による収縮や圧密沈下に続いて微生物による酸化分解作用による継続的な沈下が生ずる。

カリフォルニアのデルタ地帯では、有機質土の分解を含めて沈下が7cm/年の速度で進行し、フロリダでは数百平方マイルの農地が年々3cm前後の割合で沈下し、最大沈下量は2.4mにも達しているという³⁶⁾。ソ連の白ロシア共和国は全土の約1/4が泥炭湿地でおおわれ、毎年7~8万ヘクタールの泥炭地が排水され農地化されている。排水によ

って年間12.4ton/エーカーの割合で有機物が分解して行き、今世紀の初めには2mの厚さの泥炭層が、今日では1mにも満たなくなっているという³⁷⁾。オランダの干拓地でも、排水による沈下量のうち、有機質の分解によるものが20%近くを占めていると報告されている。

2.5 シンク・ホール

石灰岩、ドロマイト地域では地下水によって溶食された空洞が地下に発達する。この空洞の入口が不安定なアーチ構造などによってふたがされ、その上に軟かいタイ積物が被っていたりする。こうした条件のところ異常な地下浸透流が、たとえば洪水、かんがい水路や上・下水道からの漏水などによって起きると、空洞の不安定なふたが壊されて、表層が空洞中に崩落して生ずる陥没孔を、シンク・ホールという。表層の厚さは一般に15m以浅の場合に生じやすい。シンク・ホールは地下水流の一種のパイピング現象によって引き起こされるもので、北米のアリゾナ、アラバマ、カリフォルニアや南ア連邦などの乾燥地帯で発生する。

3. 観測手段と対策

緩慢に進行する地盤沈下の観測は、繰返し精密水準測量や沿岸地域では検潮儀による方法がある。深部に原因する地殻変動と区別するためには、非収縮性の基盤まで基礎をおろしたパイプの抜け上がりによって表層の収縮量を観測する。浅層部の収縮による場合は、この種の観測が簡便で経済的である。抜け上がり式の沈下計としては、収縮層との摩擦をなくするために、パイプを外管でおおう二重管式のものや、基底にアンカーをとったワイヤーをパイプの中に通して地表に導き一定の張力で引っ張り、このワイヤーによって地層の収縮量を求める方式のものが実用化されている。

油田やガス田などの深部層の収縮を観測する場合には、一定深度ごとに井戸管外に放射性物質を埋め込み、ガイガー管でその埋設深度を測りその後の地層の収縮量を判定する方式もある。

各深度の沈下計を組み合わせることで設置することによって、主要な収縮部分が検出できる。また水平変位を伴う場合には、三角測量や光波測距測量が必要となる。

沈下防止対策としては、その原因の除去が必要で、資源流体の抽出の場合は、抽出の規制や水の注入によって間ゲキ圧の保持がはかられる。ロング・ビーチなどの油田では注水、新潟などの水溶性ガス田では、ガス分離水の地下還元が行なわれ効果をあげている。地下水揚水の場合は、貯水池によるかん養の強化(カリフォルニア)や井戸を用いて地表水の注入(新潟)などの方法が実用化されている。地下水の場合には、揚水とかん養とバランスさせるために、地下水位の観測井網が必要であり、これらを用いて地下水盆の水収支を明らかにする必要がある。この種の解析方法も進歩しつつある^{38), 39)}。

有機質土の分解による沈下の場合も地下水位のコントロールが重要である。一方、ハイドロコンパクションを起こす地域では、あらかじめ十分な冠水や注水を行なってプレコンパクションさせることが効果的とされている。

シンク・ホール地帯では、重力探査による空洞などの低密度地帯や危険箇所の子知や、地表漏水の防止、地下水位のコントロールが行なわれている。

最近、ベニスでは沈下した地盤中に泥土を圧入して、地盤を隆起させるという興味深い実験が行なわれている⁴⁰⁾。

参考文献

- 1) 吉川虎雄・杉村 新・貝塚爽平・太田陽子・阪口 豊・新編日本地形論, 東大出版会, pp. 1-415, 1973.
- 2) 力武常次: 地震予知論入門, 共立全書, 209 共立出版, pp. 1-230, 1976.
- 3) Minor, H.E.: Goose Creek oil field, Harris County, Texas, Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull., Vol. 9, No. 2, pp. 285-297, 1925.
- 4) Pratt, W.E., and Johnson, D.W.: Local subsidence of the Goose Creek field, Jour. Geology, Vol. 34, No. 7, pp. 577-590, 1926.
- 5) Mayuga, M.N., and Allen, D.R.: Subsidence in the Wilmington oil field, Long Beach, California, U.S.A., Land Subsidence, IASH Publ. No. 89, pp. 66-79, 1969.
- 6) Poland, J.F., Lofgren, B.E., Ireland, R.L., and Pugh, R.G.: Land subsidence in the San Joaquin Valley as of 1972; U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 437-H, pp. 1-78, 1975.
- 7) Núñez, O., and Escajido, D.: Subsidence in the Bolivar Coast, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, Calif., U.S.A. 1976 (in press).
- 8) Poland, J.F., and Davis, G.H.: Land subsidence due to withdrawal of fluids, Reviews in Engineering Geology II, Geol. Soc. Am., pp. 187-269, 1969.
- 9) Schoonbeek, J.B.: Land subsidence as of result of Gas-extraction in Groningen, the Netherlands, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, Calif., U.S.A. 1976 (in press).
- 10) 石井 皓: 関東平野(その2)千葉の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 37-44, 1977.
- 11) 千葉県公害研究所: 深層地盤沈下のメカニズム研究, 千葉県公害研地盤沈下研究事業報告書, No. 1, pp. 1-129, 1973.
- 12) 青木 滋: 新潟平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 21-28, 1977.
- 13) 石井 求: 関東平野(その1)東京の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 29-36, 1977.
- 14) 片山雅之: 関東平野(その3)横浜の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 45-51, 1977.
- 15) 中町弘伸: 大阪平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 61-67, 1977.
- 16) Murayama, S.: Land subsidence in Osaka, Land Subsidence, IASH Publ. No. 89, pp. 105-130, 1969.
- 17) 桑原 徹・植下 協・板橋一雄: 濃尾平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 53-60, 1977.
- 18) 大島恒彦: 佐賀平野の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 26, No. 6, pp. 69-74, 1977.
- 19) 土質工学会ニュース部会: 地下水問題の実態と課題, 土と基礎, Vol. 23, No. 8, pp. 83-85, 1975.
- 20) 山本荘毅: 日本の地盤沈下, 土と基礎, Vol. 25, No. 6, pp. 13-19, 1977.
- 21) Thomas, H.E., and Phoenix, D.A.: Summary Appraisals of the Nation's Ground-Water Resources—California Region, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 813-E, pp. 1-51, 1976.
- 22) Gabrysh, R.K.: Land-Surface subsidence in the Houston-Galveston region Texas, Land Subsidence, IASH Publ. No. 88, pp. 43-54, 1969.
- 23) Dolezal, R., and Peterson, M.: Subsidence in the North German coastal region, Land Subsidence, IASH Publ. No. 88, pp. 35-42, 1969.
- 24) Carbognin, L., Gatto, P., Gambolati, G., and Ricceri, G.: New trend in the subsidence of Venice, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, Calif, USA, 1976, (in press).
- 25) Piancharoen, C.: Ground water and land subsidence in Bangkok, Thailand, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, Calif, USA, 1976, (in press).
- 26) Hwang, J.M., and Wu, C.M.: Land subsidence problems in Taipei Basin, Land Subsidence, IASH Publ. No. 88, pp. 21-34, 1969.
- 27) Vega, F., and Germán, E.: Subsidence of the City of México: A historical review, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, Calif., USA, 1969, (in press).
- 28) Glee, C.S.: Land subsidence related to brown coal open cut operations.—Latrobe Valley, Victoria, Australia, *ibid.*
- 29) Kapp, W.A.: The characteristics of a subsidence trough over an area of underground coal mining, *ibid.*
- 30) Wohlrab, B.: Effect of mining subsidences on the ground water and remedial measures, Land Subsidence, IASH Publ. No. 89, pp. 502-512, 1969.
- 31) Noguchi, T., Takahashi, R., and Tokumitsu, Y.: Consolidation phenomenon caused by mine drainage in the area outlying from working place, Land Subsidence, IASH, Publ. No. 89, pp. 475-481.
- 32) Noguchi, T., Tokumitsu, Y., and Takahashi, R.: Small sinking holes in limestone area, with special reference to drainage of coal mines, *ibid.*, pp. 467-474, 1969.
- 33) Broms, B., Carlson, L., and Fredriksson, A.: Land subsidence in Sweden due to water-leakage into deep-laying tunnels and its effect on pile supporting structures, Proc. 2nd Int. Symp. on Land subsidence, Anaheim, Calif., USA, 1969, (in press).
- 34) Howell, F.T., and Jenkins, P.L.: Some aspects of the subsidences in the rock-salt districts of Cheshire, England, *ibid.*
- 35) Osmanagic, M., and Jasarevic, I.: Land subsidence in the town of Tuzla due to uncontrolled salt extracting through boreholes, *ibid.*
- 36) Stephens, J.C., and Speir, W.H.: Subsidence of organic soils in the U.S.A., Land Subsidence, IASH Publ. No. 89, pp. 529-534, 1969.
- 37) Skoropanov, S.G.: State of cultivation and fertility of peat-bog soils, in Reclamation and cultivation of peat-bog soils, Minsk, pp. 142-154, 1961, (Translated from Russian for USDA and NSF in Jerusalem, Israel, 1968)
- 38) 柴崎達雄編: 地下水盆の管理, 東海大出版会, pp. 1-242, 1976.
- 39) Ueshita, K., Itabashi, K., Tanahashi, H., and Sato, T.: Modeling of the Nōbi ground water basin to solve the subsidence problem, Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977, (in press).
- 40) Marchini, S.: The use of mud-jacking for the up heaving of urban zones; Computer control of the works; Experimental application to the problem of Venice, Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, Calif. USA, 1969, (in press).

(原稿受理 1977. 10. 6)