

新第三紀層泥岩の生化学的 風化現象と被害

陽田 秀道

正会員 榎ヨウタ 代表取締役社長 (〒970-8045 福島県いわき市郷ヶ丘1-16-1)

新第三紀層泥岩の盤膨れ現象による被害が日本の各地に発生している。この現象は化学的風化作用によるものと考えられ、硫酸イオンを含む土中水が、地表面の乾燥に伴う毛細管現象で、硫酸イオンが濃集し、集積された硫酸イオンは土中のカルシウムと化合して、石膏晶出が起り膨張するとされていた。しかし、被害発生状況や現象が普遍的でないことから、著者は、細菌の協調作用によって硫酸イオンが作り出されることに着目した。さらに、この現象は、第三紀層泥岩と関わりをもつ土木構造物にも影響を与えるものと考え調査および考察を行った。

Key Words : *biochemical weathering, heaving of mudstone, gypsum, jarosite, bacteria*

1. まえがき

福島県いわき市を中心とする新第三紀層の未風化泥岩からなる地盤地域において、未風化泥岩上に直接建設した住宅の床下や工場の床版下の地盤が隆起する盤膨れ現象が発生し、原因が明確でないことから一種の社会問題となった。

上記地域では、以前から軟弱地盤や盛土地盤での沈下による被害を少なからず受けていたことや、1960年頃から機械化土工の発達で大型造成工事が行われるようになって、第三紀層地域の切土地盤が好んで選定された。その切土地盤で盤膨れによる多くの被害が出たのである。隆起の高さは最大48cm、建物総数に対する被害件数の割合は切土部で最大22.5%、盛土部で7.2%にも及んでいる¹⁾。しかし、この被害は当時は建築施工上の問題と判断され、建築物の補修を何度となく続けたが被害が止まることはなかった。著者がこの現象について、原因が地盤にあるのではないかと疑問視したのは1975年である。

福岡市近郊の造成地で発生した建物基礎劣化の被害は、石炭採掘に伴う廃棄物ボタで造成したことによるもので、建物の基礎コンクリートが硫酸イオンによって破壊されたことは高谷(1983)²⁾および松下ら^{3),4)}が発表した。また、宮崎県下の

団地に起きた被害の現象について、造成のため切土された新第三紀層の堆積岩が吸水・応力解放作用により膨れ上がることと、堆積岩がモンモリロナイトを多く含む頁岩の場合、その現象も著しくなることを高森(1992)⁵⁾が示している。

外国の事例としては、住宅の基礎の岩盤に硫酸塩が析出し、その結果、基礎が膨れて住宅に被害を与えることが、1970年代⁶⁾から明確に認識されるようになった。

著者はこの現象についての機構や対策に関する研究がまだ少なかった1977年から幾つかの対策工法を試行し、その成果とその後の被害状況の調査と、環境条件ごとの泥岩の風化進行を観測して比較検討を行った。その結果、微生物の活動にかかわりがあることに着目した。

従来、岩の風化作用は物理的風化作用と化学的風化作用で説明されてきたが、微生物の関わりについては『(生)化学的風化』として簡単に説明されているだけで⁷⁾、事例報告も少なかった⁸⁾。しかし、本研究に関する実験の結果^{1),9),10)}、3種類の微生物の協調作用¹¹⁾による生化学的風化作用であることが明らかとなった。

この酸化および風化現象は泥岩を基盤とする土木構造物の耐久性や安全性にも影響するものと推察し、その問題点と調査結果を報告する。

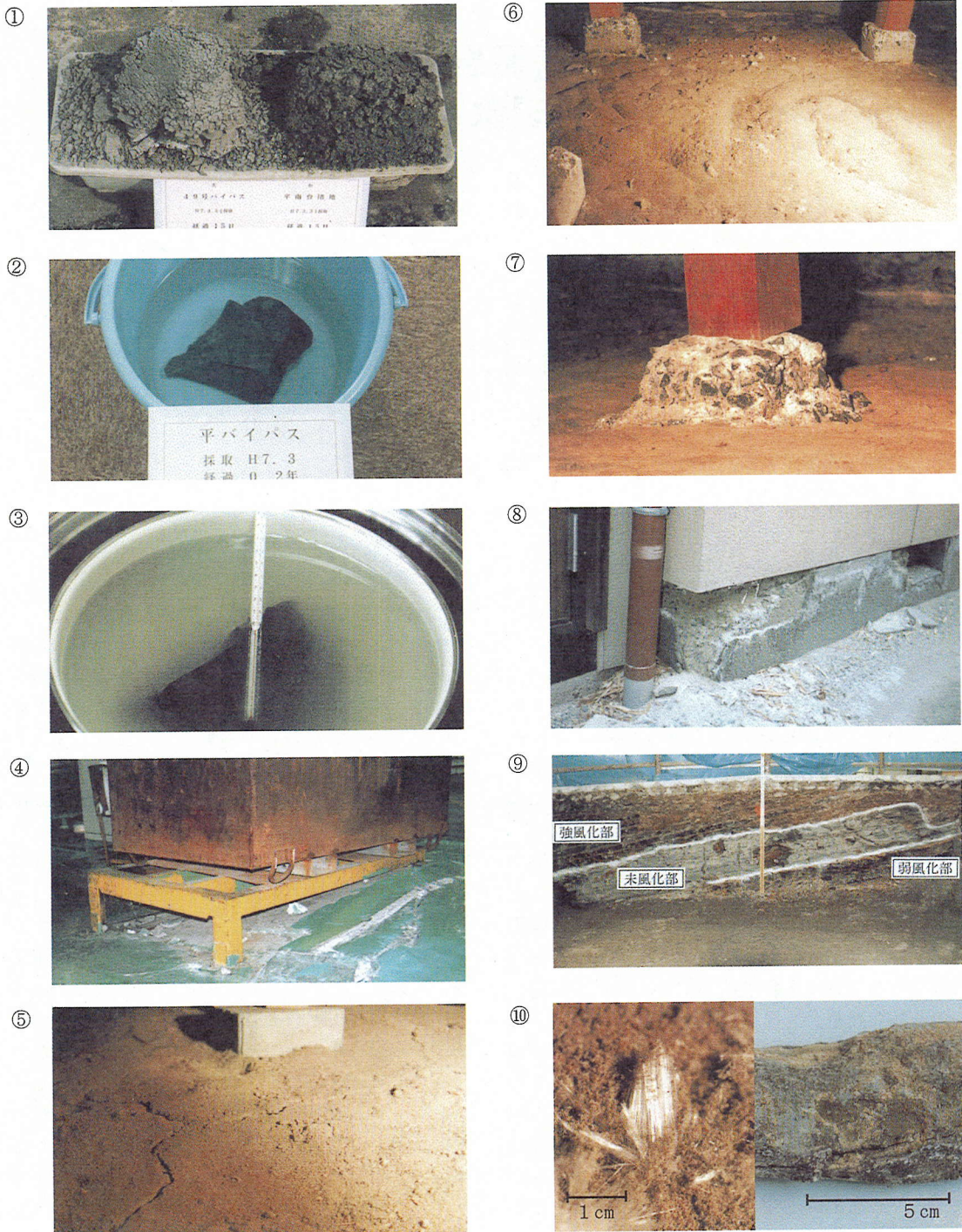


写真-1 風化と被害の状況

2. 風化と被害の状況

泥岩の風化と主な被害状況を写真-1の①～⑩に示す。

①屋外に曝露した泥岩のスレーキング現象 49号バイパス（いわき市内郷地内亀ノ尾層）・平南台団地（いわき市中山地内中山層）各現場の未風化泥岩を屋外に15日間放置，主にスレーキングによる崩壊。

②水中常温浸漬で観察

平バイパス（いわき市内郷地内，亀ノ尾層）の未風化泥岩を常温の水中に完全浸漬して観察した。写真は2ヶ月間経過の状態である。全く変化がないことから，膨潤性堆積軟岩でないことがわかる。

③水中加熱で観察

平バイパス（同上）の未風化泥岩を完全浸漬し，常温から90℃まで加熱したのち，常温まで放冷する実験を，朝夕で2回，6ヶ月間継続した結果，泥岩に変化はなかった。温水の濁りは泥岩に付着していた微粒子が，上昇流で浮遊したもの。

④工場床版の破壊と隆起

K工場（いわき市常磐鹿島工業団地，亀ノ尾層）の床版が隆起し，鉄製水槽に架台を設けている状況。

⑤床下地盤に亀裂発生（被害発生の初期）

N邸床下（いわきニュータウン鹿島地内，本谷層）盤膨れの変状を感じ，床下の地面を見ると，地面に亀裂発生。乾燥収縮によるものと思われるが，床が押し上げられているため，膨張であることがわかる。色調も濃灰色から薄茶色に変色している。

⑥風化が進行した床下の状態

W邸床下（いわき市明治団地内，平層）被害が進んだ床下は地表面に白色透明にして針状の石膏晶出（乾燥季）がある。亀裂は全く消失，絨毯のようにソフトな感じとなる。表面5cm程度までは指で掘れる。

⑦束石（コンクリートブロック）が中和作用で崩壊

W邸床下（いわき市明治団地内，平層）一般にコンクリートブロックを束石に使用しているが，土中から上昇する硫酸イオンでセメントが劣化崩壊している²⁾。布基礎の表面が中和によりはく離して骨材が黒く露出している（写真の上部）。

⑧布基礎外側の崩壊

K邸西側（いわき市郷ヶ丘2丁目地内，平層）一般に外周布基礎まで崩壊の被害が及ぶ事例は少ない。被害が生じて亀裂程度である。

⑨工場床版下の風化状況（被害面積A≒2,000㎡）

K工場（いわき市常磐鹿島工業団地，亀ノ尾層）の地盤は泥岩と砂岩が互層になっている。上位にある泥岩層は強風化している。中位の砂岩層は全く風化していない。下位の泥岩は弱風化の状態にある。

砂岩層は破砕機を使用して掘削した。堅固で全

く風化・変色はみられなかった。

掘削開始後，2日目に硫化水素が作業現場にたちこめ臭気を感じた。住宅の場合，規模が小さいためか，硫化水素臭を感じることはない。

⑩石膏とジャロサイトの晶出

左の石膏（白色透明）は⑥W邸床下の結晶である。雨期には結晶消失。右のジャロサイト（黄褐色）は⑨K工場の被害地盤より採取。石膏晶出の少ない被害地ではジャロサイトが晶出している。岩塊の表面や亀裂部に晶出しているが，芯部には見ることが出来ない。

3. 微生物の協調作用^{(10),(11)}

著者がいわき地方に於ける盤膨れの被害を知ったのは1975年である。市内の既造成の住宅団地である，玉川団地（亀ノ尾層，A=57.8ha），高坂団地（白坂層，A=38.0ha），明治団地（平層，A=43.6ha），屋津団地（平層，A=20.9ha），第一釜の前団地（水野谷層，A=8ha）に数多い被害が発生した。聞き取り調査の結果，被害率は盛土地盤より切土地盤の未風化泥岩上に建築した建物に圧倒的に多いことがわかった。そこで著者は造成計画を担当した第二釜の前団地（水野谷層，A=14.7ha），ニュータウン石森（水野谷層，A=39.7ha），湘南台（平層，A=24.7ha）など全ての団地の切土部全面にオーバーカッティング工法と名付けて，現場実験を試工した。オーバーカッティング工法とは，未風化泥岩の物性を盛土地盤の物性と同じくする考え方で，計画地盤面より更に1~2m深く掘削，粉碎して再度転圧して宅盤を仕上げるものである。第二釜の前団地で2m，その他の団地で1mまで行った。平成5年に行った被害調査結果では，第二釜の前団地と湘南台で被害は皆無，ニュータウン石森には対策が不十分であったと思われる部分の2戸に被害があった。

また，いわき市内に造成中の，大規模な造成地（A=530.0ha）の第1期工事（A=12.0ha）では前述したような建物総数に対する被害件数の割合が切土部で22.5%，盛土部で7.2%であった¹⁾。そこで，第2期工事にオーバーカッティング工法を採用したところ，被害が極端に減少した。しかし，泥岩の破砕が不十分で大塊の状態では，転圧仕上げた部分は効果がなかった。

被害地盤を掘削して調査した結果は，泥岩が風化し，色調は茶褐色を呈し明らかに化学的風化に

表-1 盤膨れに関わる微生物の生育条件と作用

	増殖最適pH (生育可能値)	増殖最適温度℃ (生育可能値)	活動に適 する含水率	生育条件と作用	環境変化
¹¹⁾ 硫酸還元菌 (嫌気性)	¹²⁾ 7.5	¹²⁾ 34~37℃ (28~37℃)	40~50%	含水率が高く嫌気性環境で地中温度の上昇に伴い、硫酸還元菌が活動する。有機質を食して硫酸塩 ^{14), 16), 23)} を還元しH ₂ Sを発生する。	pHは低下しない。
¹¹⁾ 硫黄酸化細菌 (好気性)	¹³⁾ 2.5~3.0 (1.5~5.5)	¹³⁾ 27~30℃ (25~37℃)	25%以下	乾燥が進んで地盤に空気が進入すると硫酸還元菌の活動が止まり硫黄酸化細菌が活動を始める。H ₂ Sが酸化されてSO ₄ ²⁻ を生じる。	pHが急激に低下して5以下になる。
¹¹⁾ 好酸性 鉄酸化細菌 (好気性)	¹³⁾ 2.5 (1.3~4.5)	¹³⁾ 30~35℃ (10~37℃)	25%以下	湿度・空気・pHが生育可能値に達し活動する。黄鉄鉱を酸化して大量のSO ₄ ²⁻ を生成する。SO ₄ ²⁻ とCa ²⁺ が化合して石膏、Ca ²⁺ 以外の鉱物とSO ₄ ²⁻ が反応して、ジャロサイトができる。	pHが更に低下して4~3以下になる。

よるものと判明した。

土壌学の分野では、堆積物に含まれる黄鉄鉱が酸化されて硫酸が生成し、これが酸性土壌の主原因の一つであることが比較的早くから認識されており、すでにそれに関する国際シンポジウムが何回か開かれて来た⁹⁾。

地質工学の分野では、堆積岩の上に建設された中小の建物が地盤の盤膨れにより破損するという現象が各地で生じていることが1970年頃から明確に認識され始めた。この大きな原因が地盤中に硫酸塩が晶出することであること、また、これらの硫酸塩は主に黄鉄鉱の酸化によって生成されたものであることが次々に明らかになってきたことを千木良が報告している⁸⁾。また彼は、黄鉄鉱の酸化反応は実際にはバクテリア(鉄酸化細菌)も関与する複雑な反応で、現在のところ岩石中の黄鉄鉱の酸化がどの程度の速さで進むのかは明らかでない、と報告している⁸⁾。

1994年11月被害者宅N邸(いわき市常磐屋津団地)の床下地盤と屋外地盤について電力中央研究所の、千木良、大山、渡部、大村らと共同で調査を行った結果^{9), 10), 15)}、床下地盤では-32~-55cmに、屋外地盤では-250cmの岩中に鉄酸化細菌の生息が確認された。

著者は好気性好酸性の鉄酸化細菌の関与について、次の2点に疑問をもった。第1の疑問は、現場実験のオーバーカッティング工法は泥岩を粉碎して、空気によく触れさせており、それは好気性鉄酸化細菌の好む環境であるのに、何故か被害が発生しなくなる。第2の疑問は、鉄酸化細菌の生育可能値pH1.3~4.5¹³⁾の環境がどのようにして作り

出されるのか、ということであった。というのも、いわき地方の未風化泥岩は一般にpHが7以上であるからである。

著者は現場実験の結果と被害発生状況¹¹⁾・泥岩の環境条件に左右される風化状況の違い¹⁾・好酸性鉄酸化細菌の生育条件¹³⁾から、次の機構を考察した、すなわち、切土した未風化の泥岩上に住宅や工場を建築することにより、床下温度が上昇し、それに伴い床下泥岩の温度も上昇すると、未乾燥の嫌気的条件下で硫酸還元菌が有機物を食して硫酸塩を還元してH₂Sを発生する^{14), 16)}。泥岩の乾燥が進むにつれて空気が浸入する。空気に触れた硫酸還元菌は活動を停止し、空気に触れた好気性硫黄酸化細菌の作用により、H₂SO₄が生じpHが4付近まで低下する。次の段階で好酸性鉄酸化細菌が活動を始め、土中のパイライト(FeS₂)を酸化してH₂SO₄を大量に生成する。このH₂SO₄がカルシウムと反応してCaSO₄を、また、他の鉱物と反応してジャロサイトを生成する。このように微生物の活動による生化学的風化作用の過程で、泥岩の破砕や粉化が起こり泥岩の体積が膨張すると考えた。

被害現場の泥岩(未風化岩)を採取し、培養実験の結果それぞれの細菌の生息を確認した^{11), 10), 11)}。さらに、パイライトを加えた硫黄酸化細菌用培地にその泥岩を加えて通気培養すると、培養液のpHが4以下になったところで、急激にパイライトの酸化が起こることが分かった¹⁰⁾。これらの細菌の生育条件と協調作用¹¹⁾の順序を表-1に示す。

これらの細菌は岩中で、均一に生息しているものではないことが、被害調査から推察された。それは環境条件がほぼ同一の場合前後両隣りの住宅

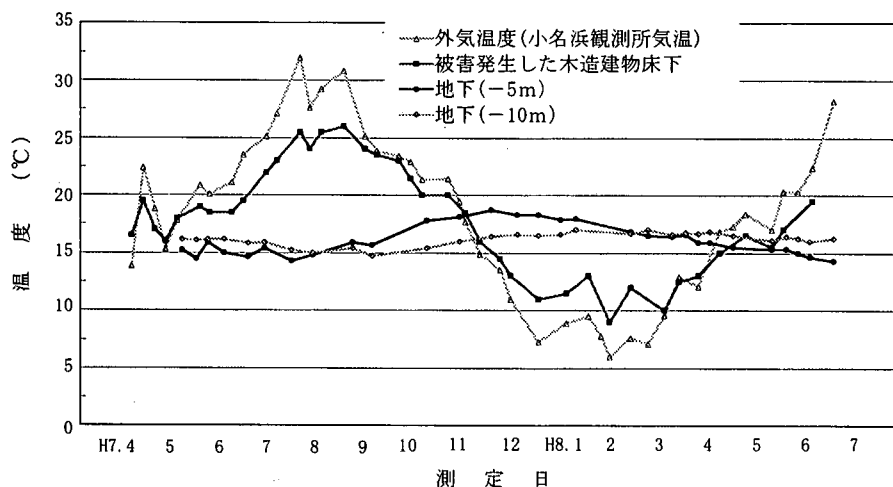


図-1 外気温度-床下温度-地中温度

に被害が発生しても、その中央に位置している家屋に発生していないことや、近隣の被害発生に時間差がある。このことは、被害家屋（常磐・屋津団地のN邸）の調査結果¹⁶⁾でも明らかである。全ての条件が満たされて細菌が活動するため、被害発生のは早いものは建築後数ヶ月^{11, 21)}で発生し、遅いものでは建築後14年¹¹⁾で発生するものもある。長時間経過後に発生しているものは、近隣で土取り工事や道路の開削工事（いわき市郷ヶ丘1丁目K宅の東側に県道のバイパス工事で巾25m、深さ2.5mの切土工事を行った）で地下水位の低下が被害発生誘因となっている^{11, 14)}。

4. 地中温度と被害深度

(1) 地中温度

生化学的風化の活動を左右する温度の調査観測を行った。被害住宅（いわき市常磐屋津団地内、N邸）の床下の温度は床下地面に（株）安藤計器製工所製・U字型最高最低温度計を置いた状態で、地中温度（いわき市郷ヶ丘1丁目）は住宅団地の空地に-10mまでの（地下水位なし）ボーリングを行って、その孔底の-10mと中位の-5mに（株）チノ製・ハンディタイプデジタル温度計ND5000をセットし、砂充填を行って、それぞれ1週間ごとの温度を午後2時前後に測定した。図-1は通年で測定した結果である。地中-5m、-10mの温度は最高値でそれぞれ18.7°C、17°Cで、前述の微生物類が活動するのに十分な環境に至っていない。た

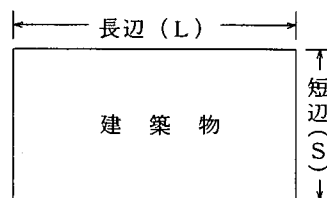


図-2 建築物の長短辺

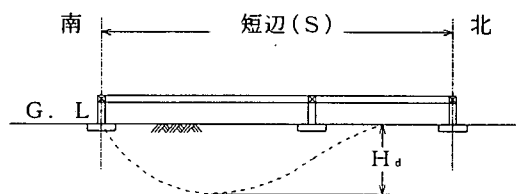


図-3 住宅の一般的な被害深度

だし、夏期には建物の床下温度が上昇、20°Cを越えて生育可能な温度に達する。また、掘炬燵の周辺は細菌の活動が活発になる。特に床暖房を行っている住宅の床下は、冬期においても被害が進行した（鹿島地区、N邸）。

(2) 被害深度

被害が発生した地盤で、全く被害を受けていない新鮮な未風化泥岩のpH7の部分まで掘削して、補修工事をするには費用が莫大となり不経済であることから、被害が発生しない深度の目安が必要であった。pH6.5程度になっている状態の領域は写真⑨の最底部（弱風化部）のような淡黄色を

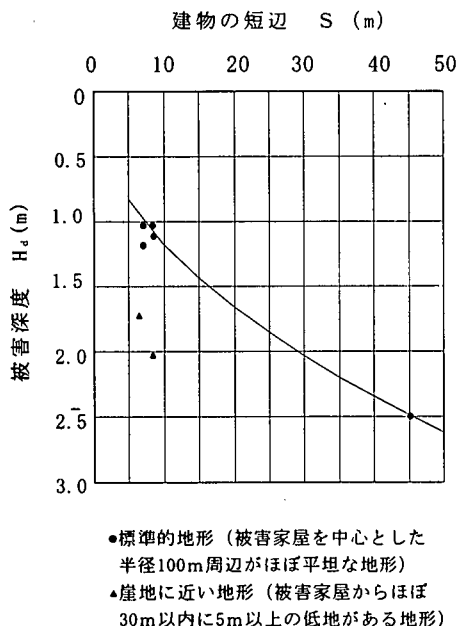


図-4 建物短辺Sと被害深度H_d

示し、ヘアクラックが発生していて、掘削が容易である。pH6.5の領域に達するところまで対策を行って、被害が再発しないことが確認出来たので、pH6.5までの深さを被害深度として、その値を計測した。そして、被害深度H_dを建物短辺のスパンS (m) の平方根に比例する式で近似した。

(図-2, 図-3, 図-4)。

$$H_d = \frac{1}{2.7} \sqrt{S} \quad (1)$$

H_d; 被害深度（酸化深度）(m)

S; 建物の短辺のスパン (m)

ただし、宅地の周辺地形が100m四方平坦であること、および床暖房で床下温度に強い影響を与えているような特殊な条件の個所は含まない。また、住宅の被害深度H_dは一般に図-3に示すように、地盤の温度上昇と乾燥の進みやすい南側が顕著となる。

5. 被害地盤の鉱物分析

盤膨れの被害（H_d=48cm）が発生した工場の床下地盤の鉱物分析結果を表-2に示す。岩塊の状態で採取出来たものについては、塊の表面部分と芯部のそれぞれについて分析測定を行った。表面部分の方が芯部よりも石膏（CaSO₄・2H₂O）やNa-ジャ

表-2 被害地盤の鉱物分析（埼玉大学工学部実施）

深度 (mm)	岩種	黄鉄鉱	ジャロサイト (二次鉱物)	石膏	pH
-300	砂岩 表面	-----	-----	●●●●	4.3
-300	砂岩 芯部	-----	-----	●●●●	4.3
-400	砂岩 表面	-----	●●●	●●●●●	4.3
-400	砂岩 芯部	●	-----	●	-----
-500	風化泥岩 表面	-----	●●●●	●●●●●	3.7
-500	風化泥岩 芯部	●	●●●	●●●	-----
-600	風化泥岩 表面	-----	-----	●●●●●	3.7
-600	風化泥岩 芯部	-----	-----	●●	-----
-800	砂岩 表面	-----	●●	●●●	-----
-800	砂岩 芯部	-----	-----	●	-----
-1,300	風化泥岩 表面	-----	●●●●●	●●●●●	3.9
-1,300	風化泥岩 芯部	●	-----	●●●	-----
-1,370	泥岩 表面	-----	●●●●	●●●●	4.0
-1,370	泥岩 芯部	●●●	-----	●	-----
-1,400	風化泥岩 表面	-----	●●●●	●●●●	-----
-1,400	風化泥岩 芯部	●●	-----	-----	-----
-1,500	泥岩 表面	●●●	-----	●●●	-----
-1,500	泥岩 芯部	●●	-----	●	-----

●微量 1%以下 ●●●少量 5~10%
●●ごく少量 1~5% ●●●●中量 10~30%
●●●●●かなり多量 30~50%

ロサイト (NaFe₃(OH)₆(SO₄)₂) などの鉱物が風化に伴って成長している¹¹⁾。反面、黄鉄鉱 (FeS₂) は浅くなるにつれて減少する傾向があり、この傾向は、被害住宅の床下地盤¹⁰⁾ においても同じ結果であった。

ただし、新鮮な未風化泥岩の試料には、石膏やジャロサイトは検出されず、黄鉄鉱が数%の範囲で検出される。

互層で存在する砂岩層にも石膏やジャロサイトが晶出しているが、崩壊に至らない違いの原因は、鉄の挙動の差にある。即ち、千木良¹⁰⁾によると、細粒の粘土分が多い場合には、3価の鉄は遊離した形で析出しにくく、また析出したとしても膠結すべき粒子の表面積が大きいために、岩石の強度・剛性を増大させることが出来ない。それに対して、砂岩・礫岩などの粗粒岩石では、3価の鉄は遊離した酸化物、或いは水酸化物として析出して粒子相互を膠結するために、岩石の強度・剛性が増加する。

6. 盤膨れの膨張力

大山¹⁵⁾によると、石膏の結晶圧で膨張が生じ、床の盤膨れを生じ、その結晶圧は、理論式・実験・現地調査などに基づく、石膏の晶出実験では20kPa程度、盤膨れを起こした地盤の上載圧からは70kPa程度、理論式では95MPaの値が求められる

が、値にかなりの幅があるという。

しかし、著者が被害状況観察の中に、K工場の中柱(400mm×200mmのH鋼)は撓みが発生していた。この揚圧力は相当なもので、石膏の結晶圧によるだけではなく、細菌が活動することで軟岩が風化破碎されて、見かけの体積が膨張することにもよるものと判断した。その理由を(1)～(4)に説明する。

(1) 写真1-⑤でわかるように隆起が発生しても、石膏晶出は目視できない。東石ブロックも健全である。石膏晶出より地盤面隆起が先行している。

(2) 被害(風化)が進行した地盤には、無数の亀裂が発生、それらの亀裂の空隙には、(写真1-⑩右)石膏やジャロサイトが、付着した状態で存在し、空隙を完全に埋めつくしていないことから、結晶圧が作用するとは考えにくい。

(3) 凍上作用と比較してみても、凍上作用は、鉛直方向に空隙を作らない。石膏の晶出は部分的で、泥岩がブロック化したそれぞれの間にかなりの空隙を有している。

(4) 被害発生地の地盤に注水すると、隆起した地面が、幾分下がる。この現象は石膏の溶解によるものではなく、ブロック間の摩擦抵抗力の減少によるもので、砂地盤の水締めと同じ現象である。

なお、膨張力については今後、盤膨れを起こした地盤の上載荷重を調査して明らかにするとともに被害深度との関係をも調査する。

7. 空気の侵入と被害

被害深度は周辺地形の影響を受ける。式(1)の被害深度 H_0 は標準的地形(被害家屋を中心とした半径100m周辺がほぼ平坦な地形)の値でこの値より大きかった家屋は、周辺に宅地の地盤より低い地形があることが分かった。このことは、標準的地形の地盤に比べて地下水が比較的排水され易く地盤の含水率が低下(地盤が乾燥)するためである。その反面、近隣に高台などの山林がある地形の建築物には被害が起きにくい¹⁾。その関係は高地より地下水の流下供給があつて、地盤の含水率が高く維持(例えば含水率40%以上)されれ

ば空気の侵入が阻止されて、好気性細菌(硫黄酸化細菌・好酸性鉄酸化細菌)の活動が困難になるためである。

一般的地形(四方が平坦な地形条件)にあつて、被害深度($H_0 = \frac{1}{2.7} \sqrt{S}$)より浅い位置に床付けした建築物の基礎や機械基礎に被害が発生していない事例は、次のようなものである。

(1) 油膜で空気侵入を遮断した場合¹⁾

機械ピット底面に機械油が漏れ、さらに軟岩にまで浸透している状態で、空気が透過できないため全く被害が発生していない。

(2) 不透水性底版の設置¹⁾

被害発生地盤の区域内にあつて、底版の床付け面が前述の被害深度の約 $\frac{1}{2}$ の深さの位置にあつた基礎地盤に被害を受けていなかった。このことは、底版それ自体が空気を遮断するばかりでなく、底版下面(ただし、底版の面積がある程度の大きさ2m四方を有するとき)の岩の含水率の増加¹⁰⁾によって、空気の侵入が阻止されるためである。ただし、底版の下面に碎石地業を施工して間隙を作った場合や、微少でも通気可能な環境条件のもとでは、その効果はなく、被害が発生する。

8. 主な対策工法

盤膨れ発生の主因は黄鉄鉱を数%含有する未風化泥岩中に生息する3種類の細菌の協調作用^{11), 10), 11)}によることが分かった。これらの細菌の活動を停止することが出来れば、被害を防止することが出来る。それらの細菌の活動の順序と、活動を阻止すると考えられる工法とその効果・実績を表-3にまとめ説明する。

(1) オーバーカッティング工法¹⁾

盛土地盤は切土地盤より被害が極端に少ないことが調査でわかった。この工法は、盛土地盤と同じ物理的条件を作る目的で、計画宅盤面より1m程度(一般の住宅地で標準的地形の場合)の深さまで泥岩を掘削粉碎、再度転圧するものである。粉碎するサイズは、粒径10cm以下までにすることが望ましい。床下の温度上昇で最初に活動する嫌気性硫酸還元菌を、空気に接触させて、活動を阻止するのが狙いである。

表-3 細菌の活動順序と対策工法の効果と実績

対策工法	菌の種類	硫酸還元菌(嫌気性)	硫酸酸化細菌(好気性)	鉄酸化細菌(好気性)
① オーバーカッティング工法 ¹⁾		空気と接触させて活動を停止するので、H ₂ Sが発生しなくなり、硫酸酸化細菌が活動できなくなる。実績多・経過20年以上		
② 良質土置替工法 ^{1), 3)}		有機物を除去すると生育できない。(泥岩の有機物含有量は6~7%, 良質の砂質土は0.5%程度)		原因となる鉱物除去で効果大・工費大・経過15年以上(入替深さをH ₂ とする)
③ シート敷込工法 ^{1), 3)}			シートの敷込みが直ちに空気の浸入を防ぐと、これらの細菌が生育できない。また土中の含水率が高くなるので、空気の浸入を防ぐことができる ¹⁹⁾ 。(シートの耐菌性が明らかになっていない) 実績かなりあり。経過10年未満。	
④ フライアッシュを敷設する工法				環境条件をpH7以上にして菌の活動をさせない。実績少経過4年(K工場に使用)
⑤ コンクリートスラブを打設する工法		地盤の温度上昇で活動する環境条件は、3種の細菌全てに共通することである。よって、地盤の温度を上昇させないために行う(当工法を単独で採用する場合は厚さ50cm以上にすることが望ましい) 実績極少。		
⑥ 複合法 ¹⁾		単独工法採用より効果大である。特に①との組み合わせが多い。嫌気性・好気性の両性に対して効果を発揮することにより、より安全である。		

この工法は、現場の泥岩を直接粉砕処理し、転圧仕上げで効果を発揮することが出来るから、経済的に最も効率が良い。この工法の実績は約20年経過した現場(いわき市常磐第二釜の前住宅団地A=14.6ha)をはじめ、他にも数ヶ所あるが、現在までの調査で被害はでていない。

(2) 良質土置替工法^{1), 3)}

有機質を含まない砂質土で置き替える工法で、最も安全にして効果的である。これは有機物を必要とする硫酸還元菌の生育を抑制するためである。ただし、工費が割高となる。大規模造成工事の場合は、同一現場に良質の発生土があるときは好都合であるが、大量の搬入土は交通および自然環境保全の点で問題となることもある。実績年数は(1)に次ぐが、実績件数においては(3)に次ぐ。

(3) シート敷込み工法^{1), 3)}

好気性の硫酸酸化細菌および好酸性鉄酸化細菌の活動を阻止するため、空気を遮断する目的で、遮水用ゴムシート(ジプロス厚さ0.5mm以上)等を敷き込み、シートが損傷しないよう、その上に押さえコンクリートを10cm程度の厚さで打設する。布基礎底面にも敷設するが、この際注意を要

することは碎石地業は行わず、墨出しのためには直ちにモルタル敷きとする。

また、使用するシートは、特に耐菌性、耐候性、耐酸性のものを使用することが肝要である。この工法は主にハウスメーカーが推奨して実施しているが、耐菌性が問題で保証期間は10年以内となっている。

(4) フライアッシュを敷設する工法

最終的に活動する好酸性鉄酸化細菌は低pHの環境下で活動することから、高いpHの材料、例えばフライアッシュを敷き込むことで菌の活動を阻止できる²⁰⁾。この工法は主として、被害が発生した地盤の修繕に採用している。酸化した泥岩を取り除き、pH6.5の環境部分に30cm厚さ程度に敷設する。

石炭燃焼の火力発電所から排出されるフライアッシュは、有機質を全く含まずpHは9以上のアルカリ性の物質で、非常に有効な材料である。

この対策工法は被害発生後の修繕用に限らず、当初からの防止対策として使用すれば有効である。実績は被害が発生したK工場(常磐鹿島工業団地内)の補修工事に採用した。4年経過した現在、被害発生兆しは見られない。

表-4 切土法面の向きと酸化²¹⁾

路線名 (地層)	法面の向き	岩種	酸化度 (pH)		含水率 (%)		方解石 (%)	岩盤の層	
			強	弱	少	多		受	流の別
高久-鹿島線 (南白土凝灰岩部層)	東向	砂質泥岩		8.3		35.3	1%以下		流
	西	"	5.2		32.2	—	受		
磐城-常磐線 (水野谷層)	南	"		5.2		34.0	1%以下		流
	北	細粒砂岩	3.8		33.1	—	受		
小名浜-平線 (水野谷層)	東	砂泥互層		3.5		54.8	—		流
	西	"	3.3		33.9	1~5%	受		
いわき-石川線 (バイパス) (水野谷層)	東	砂質泥岩		4.8		33.4	—	受	
	西	"	4.2		25.1	—		流	
いわき-石川線 (田場坂) (中山層)	南	泥岩	3.4		12.5	—		流	
	北	"		4.0		18.5	—	受	

(地層・岩種は、常磐炭田地質図並びに説明書より、1957、地質調査所発行)

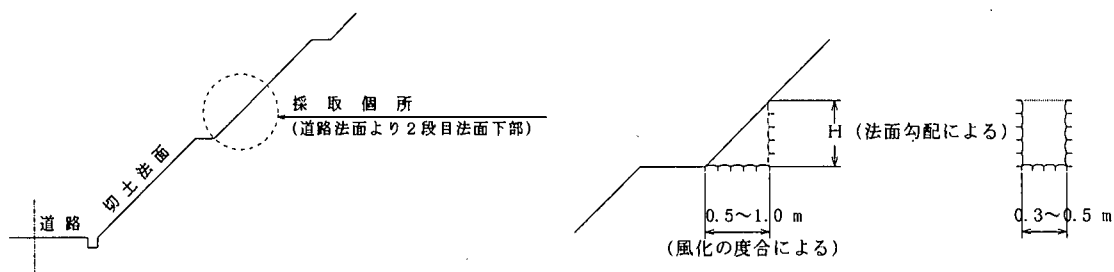


図-5 試料採取位置

(5) コンクリートスラブを打設する工法

コンクリートスラブのみで対策をするとすれば50cm以上の厚さを必要とする。この場合、空気を遮断することはできるが、コンクリートの熱伝導率は密度の小さい物質に比べ不利であるため、一定以上の厚さを必要とする。工費がかさむことから採用されることが少ない。実績は、いわき市常磐上湯長谷湯台堂・O邸、経過3年。

(6) 複合法¹⁾

上記の工法の各効果を活用し、適切に組合せて施工すれば、より効果的である。実績数は増加傾向にある。

(7) 応急処置¹⁾

被害発生を知ったとき、修繕工事着手まで、拡大を防ぐため、床下に注水・散水すると一時的に抑制することができる。いわき市明治団地W邸をはじめ、数戸の実績が効果を示した。

9. 土木構造物への影響

地表近くの岩盤の力学的性質が、割れ目の存在より岩石の風化度合に大きく支配される堆積性軟岩の場合、風化現象に関する基礎的事項の解明および土木構造物への影響の検討が重要である。

もう一つの重要性は、軟岩の中には比較的速く風化が進行するものがあるために人工法面、構造物基礎、トンネルなどについて長期的安定性を評価する際に、場合によっては建設時や現状での力学的性質だけでなく風化過程を踏まえた変化を評価する必要があることを千木良⁸⁾は説いている。我が国でもっとも広く分布する堆積性軟岩、特に新第三紀層泥岩が機械化土工の普及により容易に曝露されやすくなったため、その上に構築される構造物等への影響を詳細に観測調査し、その対策工法を導き出すための考究が急務の課題となっている。以下にいくつかの事例を挙げる。

表-5 軟岩の酸化度の変化 (いわき市中部工業団地=湯長谷層群・亀ノ尾層)

試料採取 1995年10月 4日

試料番号 (No.)	深 度 (m)	岩 種	pH			
			10月 5日	10月12日	10月19日	10月26日
1	-0.5	泥 岩	6.0	3.9	3.3	3.2
2	-1.0	"	6.3	6.2	4.9	4.8
3	-1.5	"	6.3	6.1	5.1	5.1
4	-2.0	"	7.5	6.4	5.7	5.6
5	-2.5	"	6.6	6.2	5.9	5.7
6	-3.5	"	6.7	5.6	5.8	5.6
7	-4.0	砂 岩	6.7	5.4	5.2	5.3
8	-4.5	砂質泥岩	6.4	4.8	5.4	5.4
9	-5.0	"	5.5	5.0	4.5	4.0
10	-5.2	砂 岩	4.3	4.5	4.5	4.6

(1) 切土法面の酸化の進行¹⁶⁾

両側に相対する切土法面を有する道路で、垂直高さ30m以上の長大法面の酸化状況を調査した。

pH測定には、堀場製カスターACT pHメーターD24を使用、pH校正にはpH7、pH4の両標準液を使用した。測定方法は土質工学会基準(JSF.T.211-1990)に則り行った。採取試料は直ちにナイロン袋に密閉保存、試料の大きさは10mm以下に粉碎。約150gを蒸留水(300~400g)を加えて攪拌し、約2時間経過後pHを測定した(表-4、図-5)。その結果、日照を受けて法面の表面温度が上昇する南向きと西向きの法面の方がpHの低下が進んでいることがわかった。表-4の中で例外となった、北向きでpHの低下が進んでいる磐城一常磐線は、受け盤で地下水の補給がないため、乾燥が進み好気性の硫酸化細菌の活動が活発化したものと考えられる。

次に工場団地造成中の法先の未風化岩のボーリングコアの酸化によるpH低下の速度を調べた結果を表-5に示す。室内でボーリングコアをコア箱に収納した常温状態で一週間毎にpHを測定した結果、-50cmの位置の泥岩の酸化速度が極端に早い値を示した。このことは、試料採取位置は粗造成工事が数ヶ月前に完了、7~9月の間の気温上昇が地盤表面の温度を上昇させたため、硫酸還元菌が活動し、コア箱の中に収納した時点から、好気性環境条件が整って硫酸化細菌・鉄酸化細菌が活動して酸化速度が大きくなったと考えられる。

(2) 泥岩の酸化で影響を受けると考えられる土木構造物

地表に永年にわたって堆積した通常「表土」と呼ばれているものや、植物の耕土などのpHは一般に安定している。しかし、地表から10数m深部の未風化泥岩が開発などで曝露されると、その表面より0.5m~1.0m位の範囲の酸化は比較的短時間の内に強酸の環境まで進むことがある。その場合、次のような影響をもたらす。

a) アースアンカー工法

アンカー部材の耐酸性、耐アルカリ性は、pH5~12の範囲で、耐用年数は50年+余裕20年=70年でほぼ設計されている。地すべりの発生しやすい地域の軟岩では概して生化学的風化作用が促進されている。特に表面に近い部分が強酸化することは応力の大きい部分の酸化・腐食が進むため危険性ははらんでいる。

b) 補強土工法のメタル補強材

補強土工法の埋戻し土に泥岩を採用することは前述の危険性と同じことが想定される。

c) 切土法面勾配と安定勾配の関係

切土法面勾配の決定に当って軟岩として扱って求めた安定勾配が、恒久的に安定性を確保するかどうかは重要な問題である。特に日照で法面温度が上昇する南向き、西向きの法面は岩層の勾配に加えて生化学的風化進行の程度を考慮する必要があると考えられる。

千里ニュータウン(万博会場)の法面が数ヶ月後に崩壊した事例²¹⁾は、生化学的風化作用によるものと報告されている。ただし、定量的把握はまだ十分にできていない。

表-6 すべり発生地のpHと地表勾配

路線名および地区			pH	地表勾配		すべりの有無	対策工
道路法面	いわき・石川線	田場坂トンネル	3.4	1:7.5	7° 34′	有	アンカー工法
	磐城・常磐線		3.8	1:3.1	17° 54′	有	アンカー工法
	内郷・平線	花輪	4.5	1:5.5	10° 19′	有	アンカー工法
	平バス交差点	内郷・平線	4.5	1:3.7	15° 10′	有	排土工+コンクリート法砕工
	内郷・平線	共立病院裏	4.5	1:3.0	18° 13′	有	アンカー工法
造成法面	いわき中央卸市場	南側斜面	3.7	1:4.5	12° 31′	有	抑止杭工法
	泉ヶ丘ハイタウン		3.3	1:2.6	21° 03′	有	排土工および抑止杭工法
	常磐配水池	桜ヶ丘	3.8	1:3.0	18° 13′	有	排土工
	キクモク工場	下船尾	3.4	1:2.6	21° 03′	有	押え盛土工法

有 はすべり面目視

d) 法面保護植生の枯化

法面植生の突然の枯化や、発芽直後の枯化は、酸性土に起因することを多くの現場で経験している。

e) コンクリートの腐食^{2), 3), 4), 15)}

地中1m以上深く埋設される部分のコンクリートは腐食の影響を受けにくいですが、地表面に近い部分は土壌中に多量に含まれる硫酸イオンで、地表面附近ではコンクリートの劣化速度が大きいことを落合ら²⁾が報告している。

(3) 地すべり現場の地形と酸化について

いわき市地方の新第三紀層は泥岩と砂岩の互層からなり、泥岩層に起因する地すべりが数多く発生している。地すべりが発生する可能性については、従来は主に地形勾配や地盤構成などから大方の見当をつけ調査や対策を進めてきた。その調査方法を簡略化できないものかと考え、地すべりが発生した現場の泥岩のpHと工事前の地形勾配を調査した。その結果は表-6に示す通りで、大方がpHの低下²⁾を示していることがわかった。

現在までに、泥岩の酸化によるpH低下の速度と地形勾配との関係を導き出すことはできなかったが、今後の調査研究で、緩勾配ながら地すべりが発生する個所の地形と泥岩のpH低下速度との詳細な関係を導き出したいと考えている。

10. おわりに

本実証的研究は、微生物による堆積性泥岩の生化学的風化作用を明らかにした。大型機械化土工の進展により、我が国に広く分布する泥岩層との関わりが多くなることは避けられない。

土木構造物の耐用年数は、大方のものが長期に計画されている。予期しない腐食で強度低下や耐用年数の縮少が事故に至らないよう配慮しなければならない。特に近年発生している緩傾斜地における地すべり発生の誘因は、人為的によるものが少なくない。これらを未然に防止するため、地形勾配、地下水のpH、岩の鉱物組成、岩の破碎深度などの関係から、潜在的すべり層の介在を予測出来る手法を導き出すこと、並びに、地すべりに微生物の作用が関係しているかどうかを調べることが重要である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、埼玉大学関陽太郎名誉教授には被害現場の観察から鉱物分析および論文の資料収集まで、日本大学理工学部工業化学科山中健生教授には被害現場の観察から室内実験において懇切な御指導を賜りました。日本大学理工学部森芳信教授には調査研究の手法について御指導を賜り、厚く御礼申し上げます。また、平成8年度地盤工学会東北支部より本研究に対し研究助成金を助成頂きましたことに対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 陽田秀道：泥岩の微生物および化学的風化による地盤の隆起とその被害について，第40回地盤工学シンポジウム，pp. 99-104，1995.
- 2) 高谷精二：東石崩壊の発生した地域に見られる塩類集積現象について，土と基礎，Vol. 1，pp. 101-104，1983.
- 3) 落合英俊，松下博通，林 重徳：硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎，土と基礎，34-6，pp. 45-47，1986.
- 4) 菅伊三男，松下博通：硫酸塩地盤における建物基礎コンクリートの劣化崩壊について，日本応用地質学会平成6年度研究発表会論文集，96p，1994.
- 5) 高森洋：戸建住宅における基礎の事故と対策，基礎工，Vol. 20，pp. 55-56，1992.
- 6) 千木良雅弘：住宅基礎の盤膨れ，風化と崩壊，近來社，pp. 139-140，1995.
- 7) 土質工学会編：土質工学における化学の基礎と応用，土質工学会，5p，1978.
- 8) 千木良雅弘：建設工事における風化・変質作用の取り扱い方，土と基礎，40-8，pp. 71-79，1992.
- 9) 大山隆弘，千木良雅弘，大村直也，渡部良朋，陽田秀道：泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ，日本地質学会第102年学術大会講演要旨，304p，1995.
- 10) 山中健生，宮坂秀一，庄子和夫，陽田秀道：微生物が地盤の隆起の原因になっていることを探る実験的研究，鉱物学雑誌，第26巻第2号，pp. 77-80，1997.
- 11) 宮坂秀一，阿曾巖，陽田秀道，庄子和夫，山中健生：微生物によって引き起こされる盤膨れ，平成9年度日本大学理工学部学術講演会論文集，pp. 1126-1127，1997.
- 12) Bergey's Manual of Systematic Bacteriology Vol. 1 (Krieg, N.R. & Holt, J.G. 編) Williams & Wilkins, U.S.A., pp. 666-672, 1984.
- 13) Bergey's Manual of Systematic Bacteriology Vol. 3 (Stanley, J.T., Bryant, M.P., Pfennig, N. & Holt, J.G. 編) Williams & Wilkins, U.S.A., pp. 1853-1858, 1989.
- 14) 大山隆弘，千木良雅弘，大村直也，渡辺良朋：泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ，応用地質，第39巻第3号，pp. 261-272，1998.
- 15) 大山隆弘，志田原巧：堆積岩の化学的風化作用の土木構造物への影響，電力土木，No. 272，3p，1997.
- 16) 高谷精二：のり面の基盤，のり面保護工の基礎と応用，山海堂，pp. 75-76，1987.
- 17) 千木良雅弘：軟岩の風化作用，土と基礎，40-8，77p，1992.
- 18) 千木良雅弘，曾根賢二：岩石劣化試験装置を用いた酸化実験，泥岩の化学的風化のメカニズム，電力中央研究所・研究報告：U87040，p7，1987.
- 19) 三木幸蔵：岩石の膨張，膨潤測定試験，わかりやすい岩石と岩盤の知識，鹿島出版会，pp. 175-176，1990.
- 20) 久馬一剛，村上英行，加村崇雄，川崎弘：酸性硫酸塩土壌をめぐる，アーバンクボタ，No. 25，51p，1986.
- 21) 林 久人：地中の還元状物質と地下掘削工事，アーバンクボタ，No. 23，31p，1984.
- 22) 落合英俊，松下博通，江頭和彦，瀬久光：温泉余土地帯におけるコンクリートの劣化と一般的な対策工，温泉余土と基礎工，土と基礎，36-3，pp. 63-64，1998.
- 23) 安藤武：地すべりにおける泥岩の風化機構，応用地質，4-1，pp. 3-17，1963.

(1998. 4. 22受付)

BIOCHEMICAL WEATHERING OF THE NEOGENE MUDSTONE AND ITS DAMAGES TO FOUNDATIONS

Hidemichi YOHTA

Damages of houses and buildings by the upheaval of the Neogene mudstone foundation are observed in many regions in Japan. The upheaval of the ground was previously attributed to the expansion of the soils caused by the appearance of crystals of gypsum by the chemical weathering; the ground water containing sulfate ions goes up by the capillarity caused by the drying of the ground surface resulting in the concentration of sulfate ions. The concentrated ions react with calcium ions to produce gypsum crystals. However, as the damages were not universally observed through Japan, the author perceived a participation of some bacteria in producing sulfate ions.

Further, the author investigated the effects of the upheaval of the ground on the wooden and concrete constructions on the Neogene mudstone, and discussed the results thus obtained.