

# 論文 ぼた造成地における住宅コンクリート基礎の劣化崩壊について

佐藤 俊幸<sup>\*1</sup>・松下 博通<sup>\*2</sup>・徳永 雄司<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリートの劣化を促進するものに硫酸イオンがあり, これを含む土のひとつにぼたがあるが, このぼたを宅地造成用土壌として用いた地域での住宅コンクリート基礎が, 建築後十数年で異常に劣化していた。その原因を調べるために, 現地家屋から試料を採取し分析を行った。調査の結果, 家屋の床下という特殊な環境下ではコンクリート中の硫酸イオン濃度が増加し, コンクリートの劣化にはエトリンガイトの生成に伴う膨張圧だけでなく, コンクリートの表面に析出した硫酸ナトリウムの結晶析出圧が大きく影響していることがわかった。

**キーワード:** 硫酸イオン, テナルド石, ミラピル石, ぼた, 東石, 布基礎,

## 1. 調査対象地域の状況

硫酸イオンを含む地盤における住宅コンクリート基礎の劣化崩壊が数多く報告されている。そのような地盤のひとつにぼたがあり, 本論文では, 福岡市のぼた造成地における住宅コンクリート基礎の劣化崩壊実例について報告する。

この造成地は, 図-1 のように地区内のぼた山を切り崩して海面を埋め立てたものであり, その表面にはマサ土が客土されている。また, ボーリング調査による当地区の地層構成は図-2 に示す通りである。各層の平均厚さは客土層で 0.70m (0.5~1.1m), ぼた層で 7.0m (4.0~11.10m) であった。調査対象地域の住宅は木造家屋であり, 住宅基礎は通常の木造家屋にある通り東石, 独立基礎, 布基礎から成っている。これら住宅コンクリート基礎の崩壊は, 建築後 15 年前後で発見され, いずれの基礎にも何らかの劣化崩壊現象が見られた。

東石コンクリートの劣化状況は, 地盤との境界部に近い部分ほどより進行し, 損傷が激しくなっていた。またコンクリート表面は白色やベージュ色に変色, 変質しており, 針状ないしは

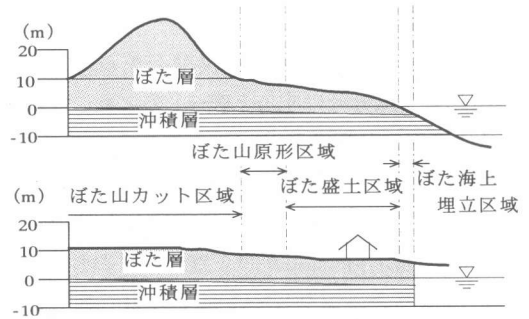


図-1 ぼた山造成状況

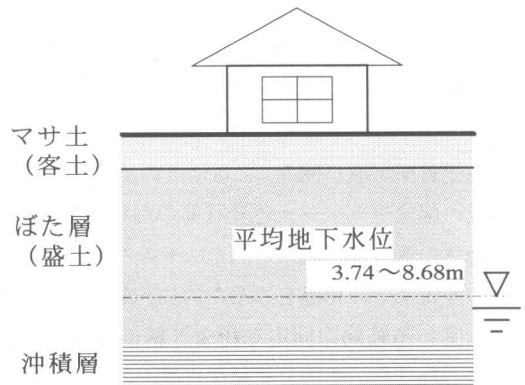


図-2 調査地域の地層構成

粉状の白色結晶の付着も認められた。

一方布基礎の場合, 劣化の程度は東石ほどではないが, 東石同様地盤との境界部分で劣化が

\*1 (株) シーティーアイ新技術 (正会員)

\*2 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻

激しく、コンクリート表面には白色結晶も析出していた。

これらの基礎コンクリートの劣化崩壊状況を見ると、コンクリートの品質、土壌成分や含水比などが劣化に影響をおよぼしているのではないかと考えられた。またコンクリート表面に析出した結晶物も住宅コンクリート基礎の劣化崩壊に大きく関与しているのではないかと考えられた。

表一 住宅コンクリート基礎の損傷度

区分	束石の損傷の程度
Aランク	家屋内の殆どの束石が崩壊
Bランク	家屋内のある程度の束石は正常で、他は崩壊
Cランク	家屋内の束石はおおむね正常

## 2. 束石調査

当地区の戸別の基礎の損傷度を束石の損傷程度により区分分けすると表一のようなになる。

### 2.1 束石の分析結果

調査地の束石分析によると、束石の中性化の見られる箇所はベージュ色に変質した箇所であり、外周から内部にかけて進行しており、内部の健全部のコンクリートはアルカリ性を呈していた。硫酸イオン濃度は一般に束石の下部で低く、上部で高い傾向を有しており、束石の上部への濃集過程が明瞭である。

崩壊した束石を縦断してみると、中央部は未変質コンクリートからなり、その周縁をベージュ色変質部が取り囲み、さらにその外側の表面に近い部分やベージュ色変質部の割れ目に、白色粉状の変質部が観察された。そのため、これらの変質部分の相違をみるために、変質部に晶出している鉱物の同定を粉末X線回折分析にておこなった。その分析結果を表二に示す。固相の結晶として認められたのは7種類であ

るが、このうち石英と長石はセメントモルタル部の細骨材に由来するものと考えられる。また水酸化カルシウムとC-A-H (Calcium Aluminate Hydrates) は、セメント水和物そのものである。よって変質鉱物は、エトリンガイトまたは石膏およびカルサイトからなると判断される。いいかえれば、白色変質部はエトリンガイト、ベージュ色変質部は石膏およびカルサイトの生成によって特徴づけられるといえる。

### 2.2 地下水の水質分析

地下水位の平均深さは3.74~8.68mであり、地下水位は、ぼた層下面近くのぼた層中にある。

水質分析の結果、地下水には0.015~0.265%もの高濃度の硫酸イオンが含まれていることがわかった。また地下水中にはその他に、ナトリウム、カルシウム、マグネシウム、塩素などのイオンが存在しているが、ナトリウム、カルシウムイオンは客土層中の長石、マグネシウム、塩化物イオンは海水に由来しているものと考えられる。

基礎コンクリートの劣化と硫酸イオンとは密接な関係があるが、その硫酸イオンと地下水中の硫酸イオンに関連があるかどうか調べるため、住宅コンクリート基礎の損傷度別に地下水位と硫酸イオン濃度との関係を求めた。この結果を図一3に示す。

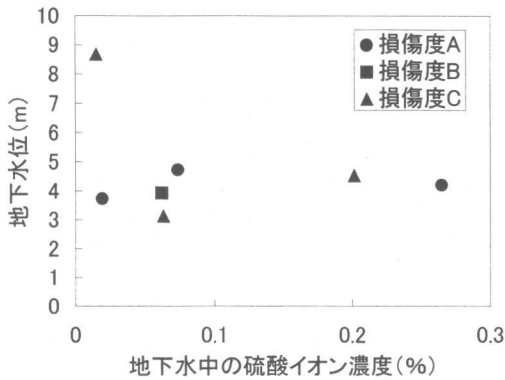
この結果より、住宅コンクリート基礎の損傷度、地下水位および硫酸イオン濃度との間には相関は認められない。すなわち、住宅コンクリート基礎の硫酸イオンによる劣化は、地下水位や地下水中の硫酸イオンとは関連がなく、むしろぼた層中の硫酸イオンが関連しているものと考えられる。

### 2.3 土壌分析結果

表二 崩壊束石変質部のX線回折分析試験結果

試験	エトリンガイト C <sub>6</sub> AS <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	石膏 CaSO <sub>4</sub>	カルサイト CaCO <sub>3</sub>	石英 SiO <sub>2</sub>	長石	水酸化カルシウム	C-A-H
白色部	◎			△	△		
ベージュ色部		○	○	○	△		△
未変質部			△	◎	◎	○	△

◎—多い ○—中位 △—少ない



図—3 損傷度別の地下水水位と

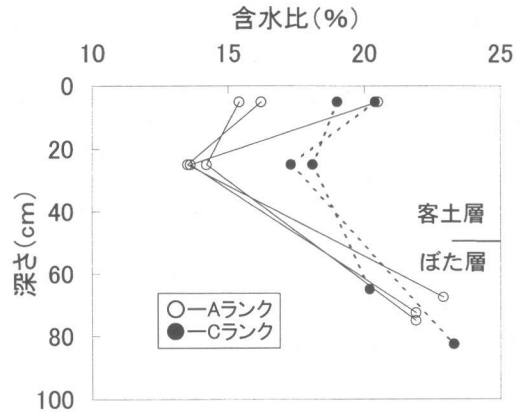
硫酸イオン濃度の関係

2.2より住宅コンクリート基礎の劣化には比較的浅い位置の硫酸イオンが関連しているものと推測されたため、床下土の分析を行った。分析の結果として、床下土の深さ方向の含水比分布を図—4に、硫酸イオン濃度、ナトリウムイオン濃度の分布をそれぞれ図—5、図—6に示す。図—4を見ると、地表面近くで含水比が高くなっている。これは、後述するように地表面には多量の硫酸ナトリウムが濃集されているため、その結晶水が含水比として測定されたためと考えられる。

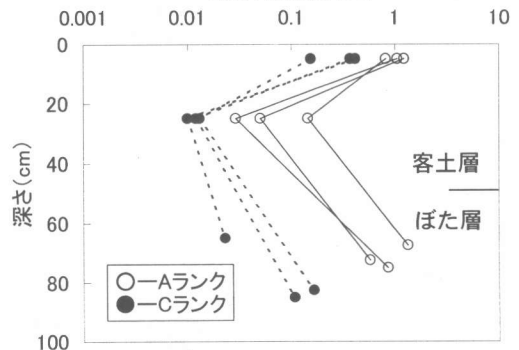
図—5、図—6に示すように、硫酸イオン濃度、ナトリウムイオン濃度ともに床下土表面で高くなっている。これらの濃度分布はぼた層では高濃度であり、地表面にむかうにしたがい減少しているが、表層部で再び増加している。このイオン濃度分布は図—4の含水比分布と類似しており、床下土表面に濃集されたイオンは、土中水によってぼた層から運ばれてきたことがわかった。2.2の結果も含めこれらの図より、コンクリートを劣化させる硫酸イオンは、比較的浅い位置のぼた層中にあるイオンが、土中水によって床下土表層部に運ばれてきたものであることが裏付けられた。

2.4 白色結晶の分析結果

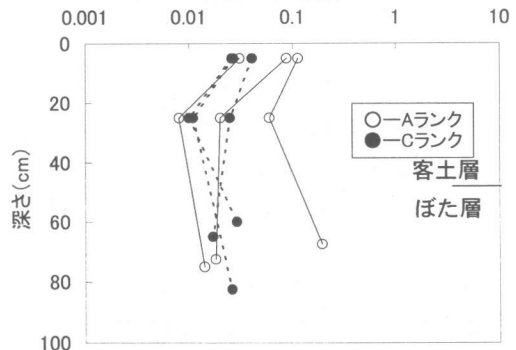
住宅コンクリート基礎の劣化に影響していると予想された、基礎表面および床下土表面に析出した白色結晶物を採取し、X線回折により分析した。試料A、Dはぼた山カット地域、試



図—4 床下土深さ方向の含水比分布  
硫酸イオン濃度 (%)



図—5 床下土の硫酸イオン濃度分布  
ナトリウムイオン濃度 (%)



図—6 床下土のナトリウムイオン分布

料Bはぼた盛土地域、試料Cはぼた海上埋立地域より採取したものであるが、この結果を表—3に示す。

これらの結果より付着白色結晶は2つのグループに分けることができる。ひとつはテナルド石 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) とミラビル石 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) の組み合わせで、もうひとつはカルサイト ( $\text{CaCO}_3$ ) と  $6.4\text{\AA}$  相の組み合わせである。

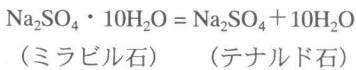
表一3 附着結晶の分析結果

附着白色結晶	テナルド石 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ミラビル石 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ・10H <sub>2</sub> O	カルサイト CaCO <sub>3</sub>	6.4 Å 相	石英 SiO <sub>2</sub>
A(皮殻状)			◎	△	
B(針状～粉状)	○	◎			
C(針状～粉状)	○	◎			
D(皮殻状)			◎	○	△

◎—多い ○—中位 △—少ない

この両グループのうち前者は、束石表面から針状に発達したり、その周辺に粉状に析出する白色結晶に相当し、床下土に濃集したイオンにより生成されたと考えられる。後者は、束石表面に皮殻状ないし苔状に発達し、ナイフで削るように試料を採取した。その結果コンクリート表面も同時に削れてしまい、カルサイトが多く検出されたものと考えられる。また 6.4 Å 相は、コンクリート分解産物のうち、ある種の特殊な成分を混合した結果生じた 1 変種と考えられる。一部に石英が検出されたが、これは骨材に由来するものと考えられる。

テナルド石とミラビル石は厳密な温度と湿度との関係は明らかではないが、周囲の温度・湿度条件に左右され、その結晶状態が異なる。この可逆反応は



のように表される。このとき右への反応は体積が 1/4 に縮小し、左への反応は体積が 4 倍に膨張する。この反応が基礎コンクリート表面の細孔中で繰り返されると、基礎コンクリート表面に剥離やひびわれが生じ、住宅基礎の耐久性にも影響を及ぼすものと考えられる。

### 3. 布基礎調査

#### 3.1 調査概要

調査は、束石調査と同一のぼた造成地より 9 つの家屋を選定して行なった。目視調査により損傷ないし白色結晶の有無を確認し、各箇所上、中、下についてコア試料を抜き取った。コア抜き取り後の孔については中性化深さ試験を行

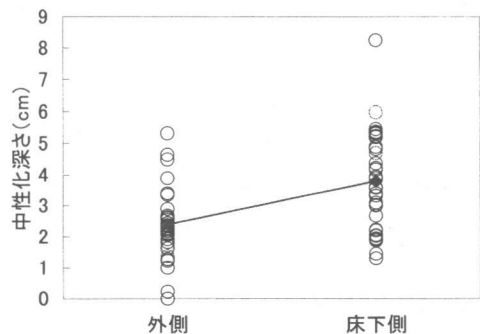
い、このコア試料を用いて一軸圧縮試験を行った。次に一軸圧縮試験に用いたコアを床下側、中央、外側に 3 分割したのちこれらを粉碎し、粉末試料として化学分析に用いた。なお、損傷が著しく 3 分割できない箇所では、2 分割した粉末試料として用いた。

#### 3.2 布基礎状況

布基礎外側は、全ての家屋とも損傷は認められなかったが、地表より 5~15cm 高さまでではあるが変色している家屋もあった。また一部の家屋では、薄い白色の粉状結晶も認められた。

布基礎床下側は、外側に比べ全体に変色しているものが多く、白色の粉状結晶が認められた。ひびわれと変質が顕著なものや、地盤面に接する付近で表面剥離や表面粒子の脱落が認められる家屋もあったが、他はほぼ健全であった。また換気口に近い箇所の損傷、変質の程度は、換気口から離れた箇所のそれより大きい傾向にあった。

中性化試験の結果を図一7 に示す。図の実線は各位置の平均中性化深さを結んだものであるが、中性化深さは概ね 2~6cm であり、通常のコンクリートに見られる炭酸ガスによる中



図一7 位置別中性化深さ

性化深さより大きい傾向にあった。また中性化深さは、外側より床下側が大きい傾向にあった。

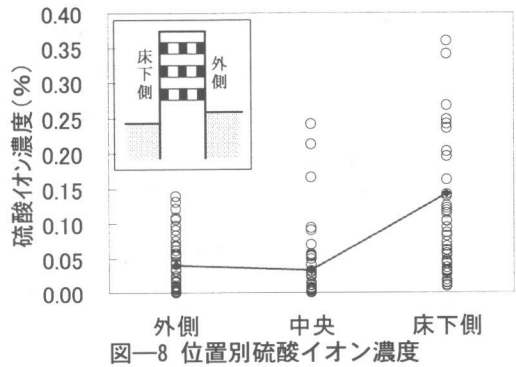
一軸圧縮試験の結果、一軸圧縮強度は健全部で概ね  $12\sim 28\text{N/mm}^2$  であり、束石よりも高い強度を示していた

### 3.3 布基礎化学分析結果

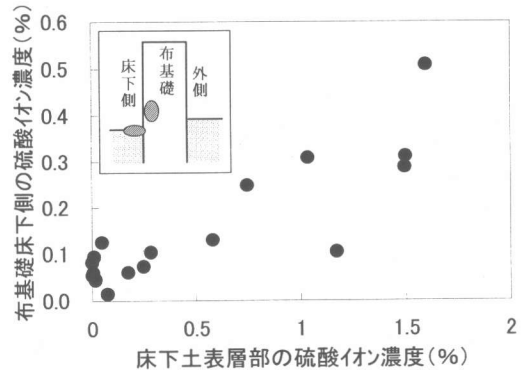
コンクリートの劣化の要因となる硫酸イオンが布基礎中にどの程度含まれるか調べるため、コア試料を用いて化学分析を行った。分析に際しては、まず粉末試料を土質工学会基準 JSF T10「土の水溶性成分試験のための試料液調整法」に従って試料調整を行った後、土質工学会基準 JSF T13「土の硫酸塩含有量試験方法」に従って硫酸イオン濃度を求めた。位置別の硫酸イオン濃度を図—8 に示す。図中の実線は各位置の平均硫酸イオン濃度を結んだ線であるが、外側と中央より床下側で高くなっていることがわかる。

次に、コア抜きをおこなった箇所に接する床下土の、地盤表面より深さ 5cm の表層部から採取した試料を用いて硫酸イオン濃度を求めた。分析に際しての試料調整と試験方法は抜き取りコアの場合と同様である。床下表層土の硫酸イオン濃度と布基礎床下側下部（床下地表から 4.5~30cm）の硫酸イオン濃度との関係を図—9 に示す。この図より、布基礎床下側の硫酸イオンと床下土表層部の硫酸イオンとに相関が認められる。

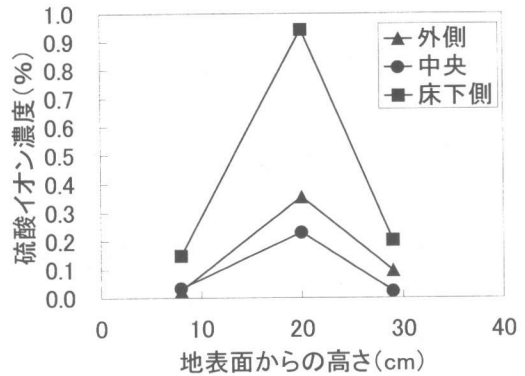
これらの結果より布基礎床下側の硫酸イオンの濃集現象は次のように考えることができる。比較的浅い位置のばた層中の高濃度の硫酸イオンは土中水によって表層部に運ばれるが、この硫酸イオンは通常、地表面から浸透してくる雨水などの流れにより希釈されていくはずである。しかし住宅床下などでは、地表面から浸透する雨水などの流れが形成しづらく、地表面からの水分の蒸発や土中の毛細管現象による水分の上昇が卓越する。その結果床下環境下では、表層土付近に硫酸イオンが濃集する。そして濃集された硫酸イオンは土に接している



図—8 位置別硫酸イオン濃度



図—9 床下土硫酸イオン濃度と布基礎硫酸イオン濃度の関係



図—10 硫酸イオン濃度分布

基礎コンクリート中に浸透していくため、布基礎床下側では硫酸イオン濃度が高くなる。このことは硫酸イオンだけでなく、ナトリウムイオンなどの他のイオンについてもあてはまる現象である。

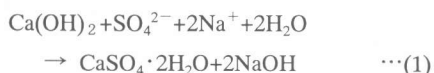
図—10 はある家屋の布基礎における硫酸イオン濃度分布である。一般に布基礎の硫酸イオン濃度も束石同様に下部で低く、上部に行くに従って高くなる傾向にあった。しかし図—10 を

見ると、高さ 20~30cm より上部は減少する傾向にある。これより、地表面に濃集した硫酸イオンは、布基礎コンクリートに浸透または表面をつたって上部へと濃集していくが、そのピーク高さは 20~30cm 前後であると予想される。

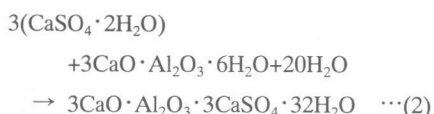
#### 4. 硫酸イオンによるコンクリートの劣化機構

このような地盤における住宅コンクリート基礎劣化崩壊過程は一般的には次のように考えられている。

コンクリートには水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) が多く含まれており、第一段階としてコンクリート表面を土中水と共に上昇してきた硫酸イオンとナトリウムイオンが濃集することにより



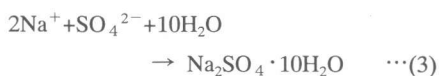
の反応が起こり、石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) を生成する。次に第二段階として、



の反応が起こり、エトリンガイト ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) を生成する。この時第一段階の反応では 1.2 倍に膨張し、第二段階の反応では 2.4 倍に膨張するといわれ、これらの異常な膨張圧によって、コンクリートの周縁部や表層部に膨張性の亀裂を生じさせ、さらに剥離をきたし、ついには崩壊に至らしめる。

しかし今回の調査より、当地区の住宅コンクリート基礎の崩壊は、床下土表層部へ有害な硫酸イオンやナトリウムイオンが異常に濃集していることに起因するものと考えられた。

床下土表層部に濃集した硫酸イオンとナトリウムイオンは、コンクリート表面のある高さまで浸透圧で運搬され、過飽和に達したのち結晶化しミラビル石 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) となる。その関係は次のように示すことができる。



ミラビル石は、周囲の温度、湿度に左右されテナルド石 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) にかわるが、その逆もおこり両者は平衡に達している。

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} \quad \cdots(4)$   
このとき右への反応は体積が 1/4 に収縮、左への反応は体積が 4 倍に膨張する。この変化が基礎表面の細かな気孔中できり返し進行すると、基礎表面にひびわれや剥離が生じるものと考えられる。

これらの劣化崩壊過程は東石等で顕著にみられ、布基礎ではそれほどではなかった。この原因としては東石と布基礎の大きさや配置の違いも考えられるが、布基礎コンクリートの品質が東石コンクリートよりも良好であったために、劣化の程度に差が生じたものと思われる。

#### 5. まとめ

調査の結果次のようなことがわかった。

- (1) コンクリートを劣化させる要因である硫酸イオンは、比較的浅いぼた層から土中水によって表層土に濃集されたものであることがわかった。
- (2) 床下という特殊な環境では、土中への雨水などによる水分の浸透が少なく、地表面からの水分の蒸発が卓越することから表層土に硫酸イオンが濃集し、その結果基礎コンクリート中の硫酸イオン濃度も高くなる。
- (3) 硫酸イオンによるコンクリートの劣化崩壊は、エトリンガイトの生成による膨張圧だけでなく、ミラビル石とテナルド石の可逆反応による結晶析出圧が大きく影響している。

#### 参考文献

- 1) 松下博通, 菅伊三男: 硫酸イオンを含む地盤における住宅コンクリート基礎の劣化崩壊について, 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp159-166, 1993.5