

潜在水硬性による水砕スラグの強度増加過程を反映した土構造物の設計体系の構築

横浜国立大学 都市イノベーション研究院 准教授 菊本 統

1. 背景

高炉水砕スラグは軽量で、内部摩擦角と透水性が大きいので、天然砂の代替品として港湾でも使われている。高炉水砕スラグの化学組成はポルトランドセメントに類似しており、水と反応して固まり、時間とともに強度増加する潜在水硬性をもつ。現状、水砕スラグの多くはセメントおよびコンクリート骨材に使用されており、地盤材料としての利用は少ない。これは水砕スラグの潜在水硬性の発現メカニズムが複雑で、安定的な発現条件が把握されていないことが原因といえる。そこで本研究では、化学と力学の両面から水砕スラグの潜在水硬性の発現機構の解明を試みるとともに、強度予測モデルと土構造物の設計法を提案した。

2. 高炉水砕スラグの潜在水硬性の発現メカニズム

a) 試験の概要

養生水として人工海水、純水、塩水、硬水、水酸化ナトリウム溶液、水酸化カルシウム溶液の6種類を用いて、水硬性の発現挙動を観察した。人工海水は塩化物イオンやナトリウム、カルシウム、マグネシウムイオンを含む。高炉水砕スラグを海水で養生すると早期に硬化する。硬水はカルシウムイオンやマグネシウムイオンを多く含む。水酸化ナトリウム溶液は初期 pH と潜在水硬性の関係を確認するため pH を3通りに調整した。水酸化カルシウムは添加剤として硬化促進の効果をもつ。養生水の pH を高く保つことは高炉水砕スラグを硬化させるために必要な条件であるため、本研究でも養生水の pH を計測した。潜在水硬性は、水砕スラグに含まれるイオンが養生水へ溶出した後、水和物として析出することで発現する。つまり養生水中に含まれるイオン濃度の測定は、潜在水硬性を研究する上で重要である。そこでカルシウム、ケイ素、アルミニウムイオンに着目して測定を行い、各養生条件における溶出状況の違いを調べた。

析出する水和物は粉末X線回折により特定した。試験では内標準物質を添加し、Rietveld法を用いて析出された水和物を定量した。また、水砕スラグを養生すると間隙を充填するように水和物が析出することから、アルキメデス法を用いて空隙率を測定した。さらに、水砕スラグの反応量は強熱減量試験により確認した。試料は40℃で乾燥させた後、700±25℃で3時間強熱した。

水砕スラグの粒径加積曲線を図1に示す。SEM-EDSより得た水砕スラグと微粉末の化学成分を図2に示す。両者の成分はほぼ同じである。微粉末は高炉スラグ微粉末4000（比表面積：3500～5500cm²/g）、6000（比表面積：5000～7000cm²/g）、8000（比表面積：7000～10000cm²/g）、10000（比表面積：10000cm²/g以上）の4種類である。

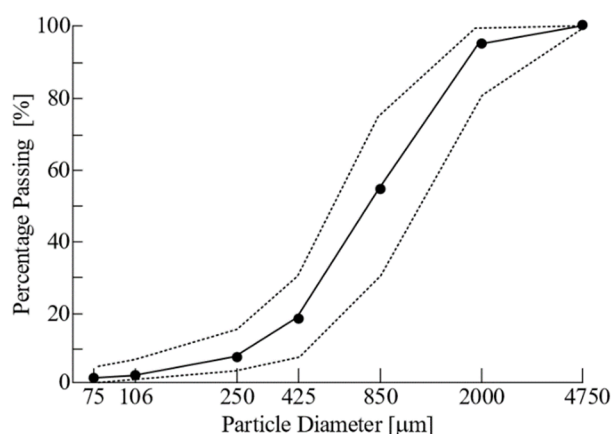


図1 高炉水砕スラグの粒径加積曲線

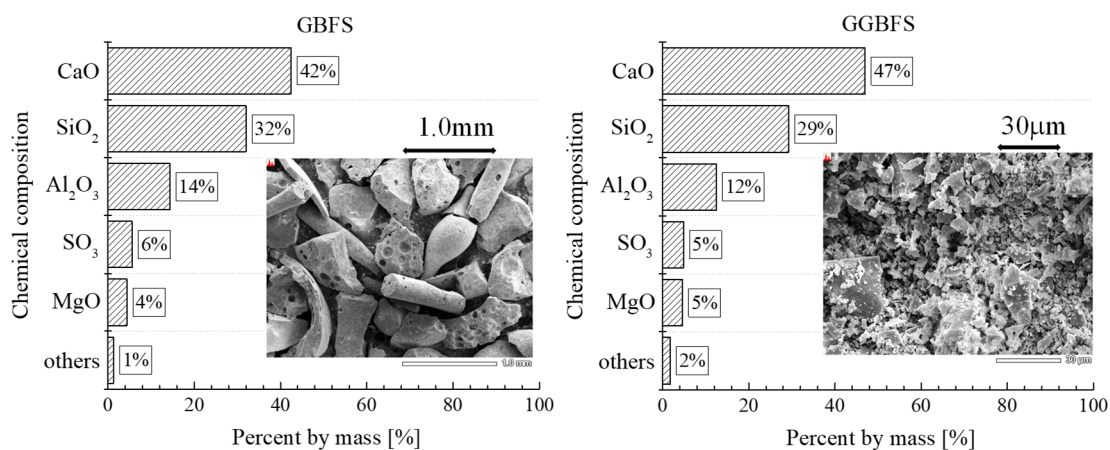


図2 高炉水砕スラグおよび高炉スラグ微粉末の化学成分

養生水について、人工海水は試験研究用人工海水（マリンアート SF-1）を蒸留水に溶かして使用した。硬水は人工海水と同程度のカルシウムを含むミネラルウォーターを使用した。水酸化ナトリウム溶液は 0.1mol/L の溶液を使用した。水酸化カルシウム溶液は石灰水を蒸留水に溶かして使用した。養生は、高炉水砕スラグを投入したモールドに養生水をスポイトで注水した後、完全に飽和させるために真空ポンプで 20 分間脱気した。その後、ラップと輪ゴムでモールドの口を密閉して、20℃で養生する場合はエアコンで温度を一定に保った室内で安置し、40℃で養生する場合は炉乾燥機の温度を 40℃に設定して安置した。日数が経過してモールド内の養生水が蒸発により減少した場合は蒸留水を注ぎ足した。養生条件を表 1 に示す。高炉スラグ微粉末は微粉末 4000 を使用した。

表 1 養生条件

No.	Additive	Addition rate	Temperature	Curing water	Initial pH
No.1	GGBFS 4000	15	40	Artificial seawater	8.25
No.2		0	40		
No.3		15	20		
No.4		15	40	Distilled water	7
No.5		15	40	Salt water	6.3
No.6		15	40	Hard water	7.68
No.7		15	40	Aqueous sodium hydroxide	10, 11, 13
No.8		15	40		11

b) 試験結果

各養生条件の pH の経時変化を図 3 に示す。既往研究では高炉水砕スラグの養生水にアルカリ添加剤を加えて pH を 11 以上に保つことが硬化の条件とされていたが、養生条件によらず養生開始後すぐに pH の数値が 11.5～12.2 に落ち着いた。人工海水に限らず、蒸留水でも養生開始直後から pH が上昇し、7 日後には pH=11 を超えた。pH=13 に調整した水酸化ナトリウム溶液では、pH が減少して一定値に落ち着いた。また、高炉スラグ微粉末を添加していない No.2 や養生温度が低い No.3 でも、7 日後には pH の数値が 11 を超えた。つまり、養生条件によらず養生水の pH はすぐに増加して、既往の研究で報告されている好適な条件を満たした。よって、水砕スラグを養生する際にアルカリ添加剤等を加えて pH を調整する必要は必ずしもない。

図 4 に示す Ca^{2+} 濃度の経時変化について、No.1 では 7 日目で多量の Ca^{2+} が溶出しており、14 日目以降は Ca^{2+} が約 450mg/L に落ち着いた。これは人工海水に緩衝作用があり、養生初期は pH が増加しにくく Ca^{2+} が多量に溶出したためと推測する。図 5 に示す Si^{4+} 濃度の変化について、No.1 に着目すると 7 日目で最も Si^{4+} が溶出し、14 日目以降は徐々に減少している。これは液相中の濃度が C-S-H の溶解度に達したためと考える。各養生条件の 30 日目の Si^{4+} 濃度を比較すると、

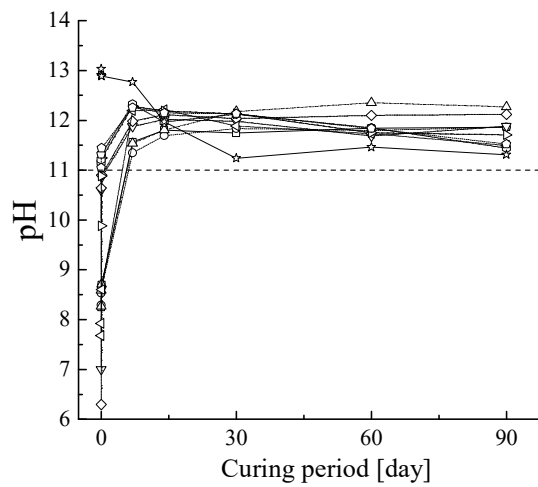
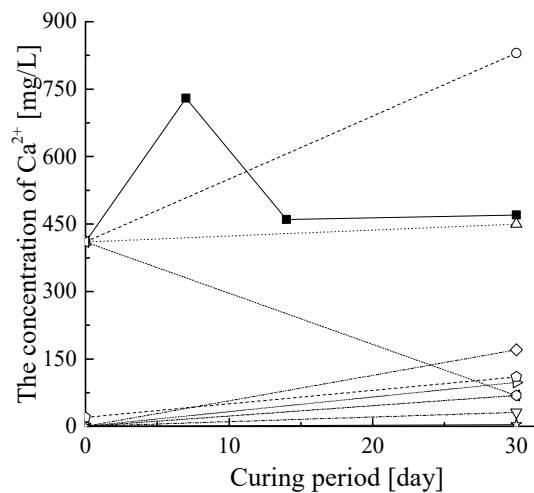


図 3 各養生条件の pH の経時変化

図 4 Ca^{2+} 濃度の経時変化

No.7(pH=13)で多量の Si^{4+} が溶出した．その他の条件では Si^{4+} 濃度到大差なかった．図 6 に示す Al^{3+} 濃度では, No.1 では 7 日目の溶出量からほとんど変化していない．各養生条件の 30 日目の Al^{3+} 濃度を比較すると, No.4 や No.7 で多量の Al^{3+} が溶出した．

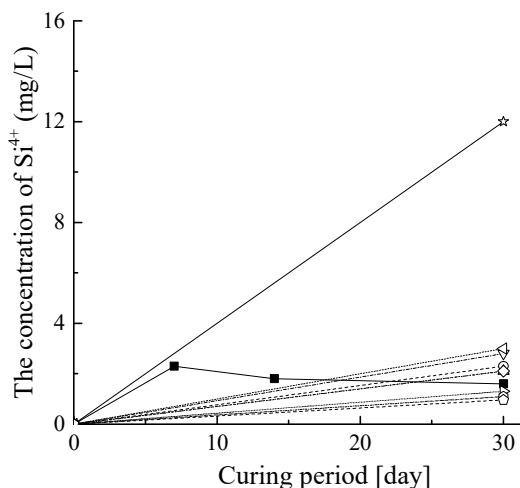


図 5 Si^{4+} 濃度の経時変化

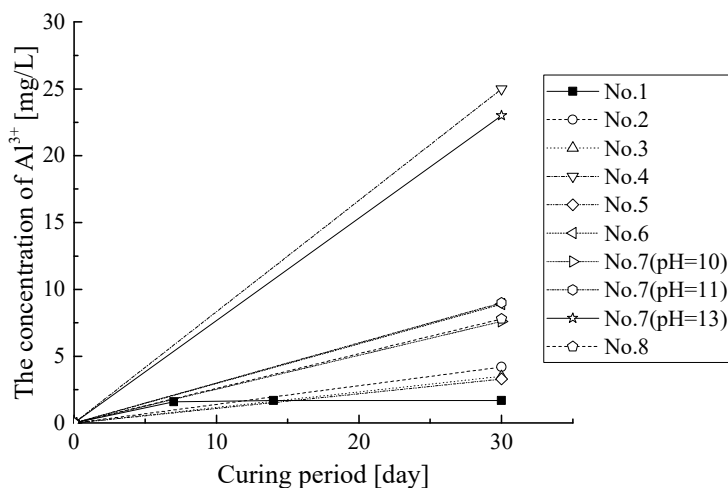


図 6 Al^{3+} 濃度の経時変化

C-S-H を調整して液相中の CaO および SiO_2 濃度を測定した既往研究では, 図 7 のような溶解度曲線に基づいて 2 種類の C-S-H の存在形態が指摘されている．図中の実線は, 水酸化カルシウムや酸化カルシウムをケイ酸やケイ酸ナトリウムを混合した試料で求めた溶解度曲線で, トバモライトと構造的に関連した Ca/Si 比 0.8~1.3 の C-S-H (I) の析出条件を示している．一方, 破線は C_3S と水の反応に関する溶解度曲線で, C-S-H (I) およびジェナイトと構造的に関連した C-S-H (II) の Ca/Si 比 1.5 以上の混合物の析出条件を示す．これを参考

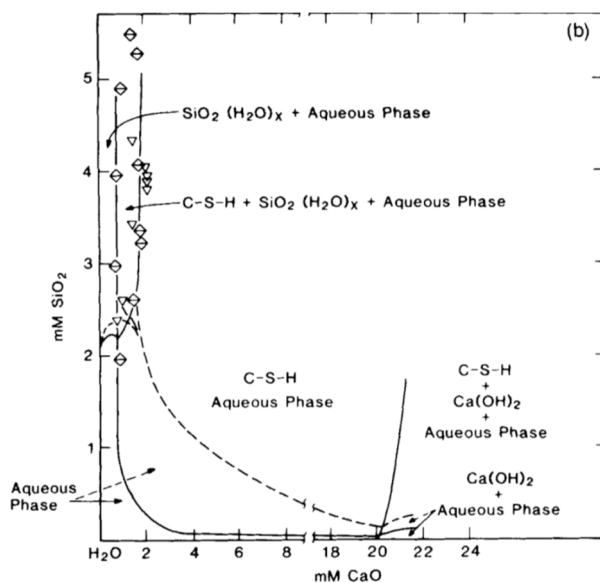


図 7 2 種類の C-S-H の飽和溶解度曲線

に本実験の Ca^{2+} と Si^{4+} の関係を図 8 に示す．図 7 と比較すると, 養生条件によって 3 つの析出形態があることが推察される．人工海水で養生した No.1~3 は Ca^{2+} リッチな液相で, C-S-H に加えてカルシウムの化合物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が析出しているものと推察される．強アルカリの NaOH で養生した No.7 は Si^{4+} リッチな液相で, C-S-H に加えて水酸化物 SiO_2 が析出したと考えられる．その他の養生条件では Ca^{2+} や Si^{4+} が程よく液相中に溶解して C-

S-H が析出されたと考える。

このように元素濃度分析結果から、養生条件により液相中の各成分濃度が異なり、析出される水和物に違いがあることが示された。

析出物について、No.1 で 30, 60, 90 日養生後の X 線回折の結果を図 9 に示す。同定した結晶はトバモライト $\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_5$ 、ハイドロカルマイト $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_2$ 、カルサイト CaCO_3 であった。なお、コランダム Al_2O_3 は非晶質量を定量するために混合した試料である。トバモライトは結晶質となったケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) で、非晶質のケイ酸カルシウム水和物が析出した後、結晶質になったと考えられる。ハイドロカルマイトは塩化物イオンを含んだカルシウムアルミニウム水和物であり、塩化物イオンを含むことからフリーデル氏塩と推測する。人工海水で養生することで潜在水硬性が促進されるのは、人工海水中に塩化物イオンが含まれているためと考える。カルサイトはスラグが空気中の二酸化炭素と反応して生成されたと考えられる。

次に各養生条件での空隙率の変化を図 10 に示す。養生条件によらず空隙は充填されており、微粉末を添加したケースの 90 日後の空隙率は約 3%程度で、どの条件においても水硬性は安定的に発現した。また、微粉末を添加しない No.2 では、30 日後の試験体は固化が十分ではなかったため空隙率の測定を実施できなかったが、90 日後の空隙率は初期空隙率より小さくなった。

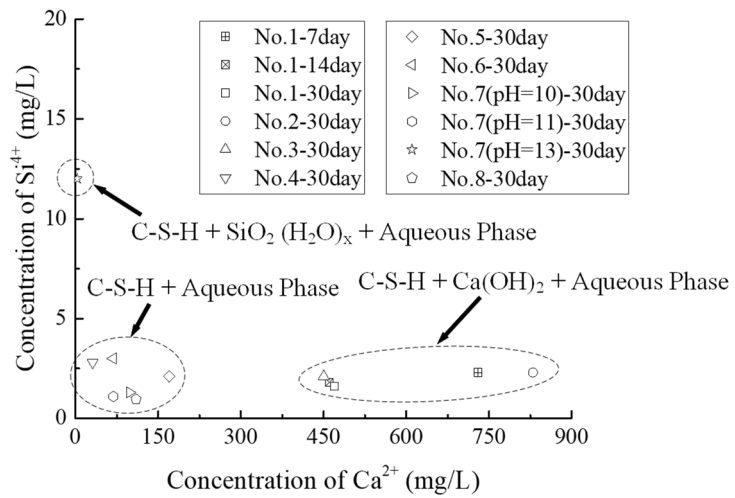


図 8 Ca^{2+} 濃度と Si^{4+} 濃度の関係

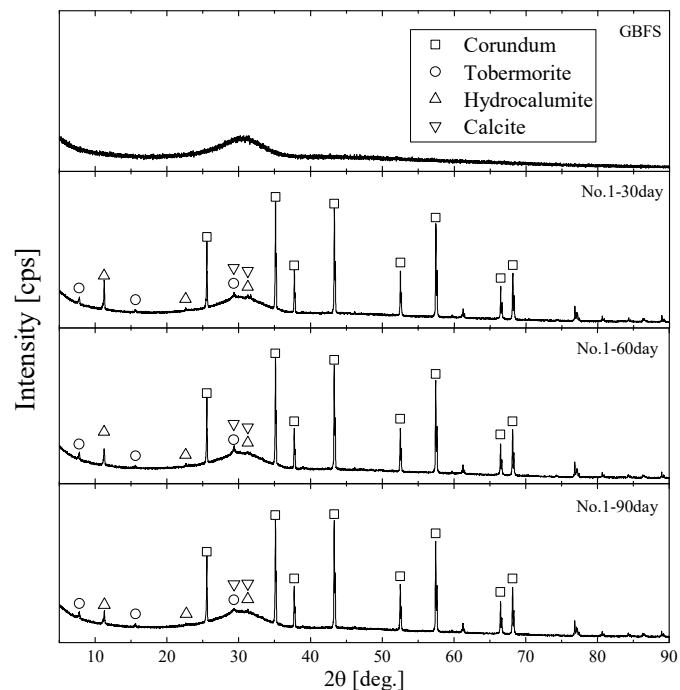


図 9 粉末 X 線回折分析の結果

結合水量の経時変化を図 11 に示す。No.1 に着目すると結合水量は 7 日目には明瞭に増加した後、漸増しており、人工海水では養生初期から潜在水硬性が促進されていることを示している。養生温度が異なる No.1 と No.3 を比較すると、温度が高い No.1 のほうが結合水量は大きい。これは温度が高くなることで潜在水硬性が早期に発現され、水和物の析出量が多くなったためと考える。No.1 と No.4 の比較からは、蒸留水よりも人工海水で養生したほうが結合水量は大きくなることを示している。No.1 と No.2 を比較すると、高炉スラグ微粉末が添加された No.1 の方が結合水量は大きく、微粉末の添加により化学反応速度が速くなり、潜在水硬性が促進されたためと推察する。

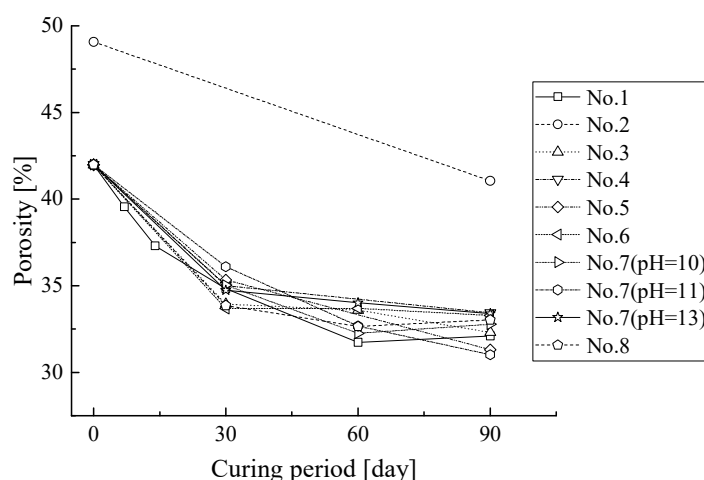


図 10 空隙率の経時変化

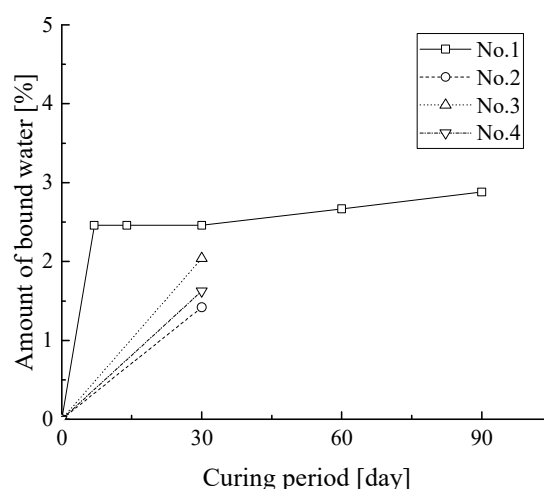


図 11 強熱減量値の経時変化

養生水や養生温度、微粉末の添加率が強度特性に及ぼす影響を一軸圧縮試験により検討した。供試体は所定の期間、養生した後、5 日間、40℃で炉乾燥させた。表 2 に試験ケースを示す。また、養生 30、90 日の供試体の破壊形態を図 12 に示す。養生 30 日の供試体は供試体上部にひび割れを生じつつ、樽型に破壊したのに対して、養生 90 日の供試体は最大主応力の方向に対して概ね 60 度の角度で明瞭にせん断面が形成されて、脆性的にせん断破壊した。これは養生時間の経過によって水和物が緻密に形成され、高炉水砕スラグの間隙を充填、固化することで強度増加したためと考える。

表 2 実験ケースと実施回数

Case	7 days	14 days	30 days	60 days	90 days
No.1	2	2	2	2	2
No.1-6000	1	1	1		
No.1-8000	1	1	1		
No.1-10000	1	1	1		
No.2			2		1
No.3	2	2	2	2	2
No.4			2		1
No.5			2		1
No.6			2	2	1
No.7			2	2	2
No.8			2	2	2



図 12 高炉水砕スラグの破壊形態（左：30 日養生後，右：90 日養生後）

各養生条件における最大一軸圧縮強度の平均値の経時変化を図 13 に示す。図のように、養生日数が 60 日程度までは養生条件によって強度が明瞭に異なった。例えば養生時の温度について No.1 と No.3 では、養生時の温度が低い No.3 では 7 日と 14 日に供試体は自立せず強度がゼロであったのに対して、温度が高い No.1 は明瞭に強度が発揮された。また、養生水の性質については、純水で養生した No.4 の強度 1200kN/m^2 に対して、人工海水で養生した No.1 の強度は 1750kN/m^2 であり、海水で養生した条件により強度は高くなった。一方、養生日数が 90 日になると純水で養生をした No.4 を除いて、全ての養生条件で強度が 2000kN/m^2 に達して概ね似た値になった。すなわち、養生条件により化学反応速度に違いがあるものの、90 日程度の養生を行えば、純水で養生する場合を除いて潜在水硬性は発現され、所定の強度に収束すると言える。一方、微粉末を添加しない No.2 は養生 30 日の供試体は自立せず、養生 90 日で辛うじて自立する程度であった。よって、比表面積の大きい微粉末を添加しない場合は 90 日程度の養生条件ではほとんど硬化作用を見込めない。

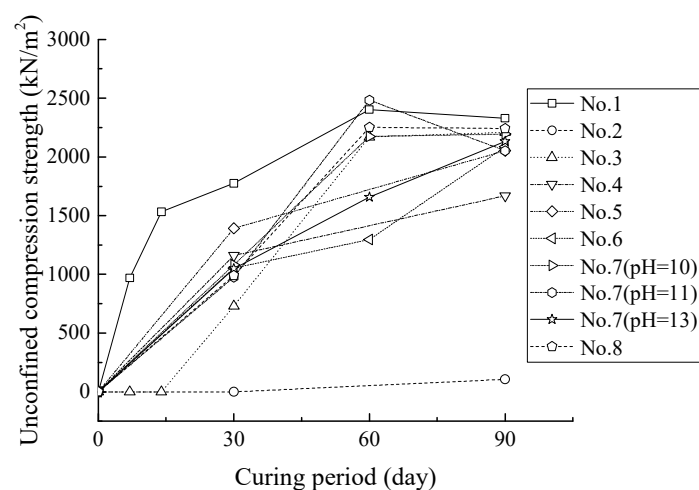


図 13 強度の経時変化

空隙率の減少量と最大一軸圧縮強度の関係を図 14 に示す。微粉末を添加したケースでも、空隙率の減少が 8%以下の場合には養生条件によるバラつきが出ており、減少量と強度に相関がない。よって、間隙充填しても養生条件により強度の増加傾向が異なり、養生初期段階では高炉水砕スラグの強度はばらつく。一方、空隙の減少量が 8%を超えると、養生条件によらず明瞭に強度増加する。よって、所定の期間、養生をすることで水和物が間隙を十分に充填し、安定的に強度を発揮すると言える。

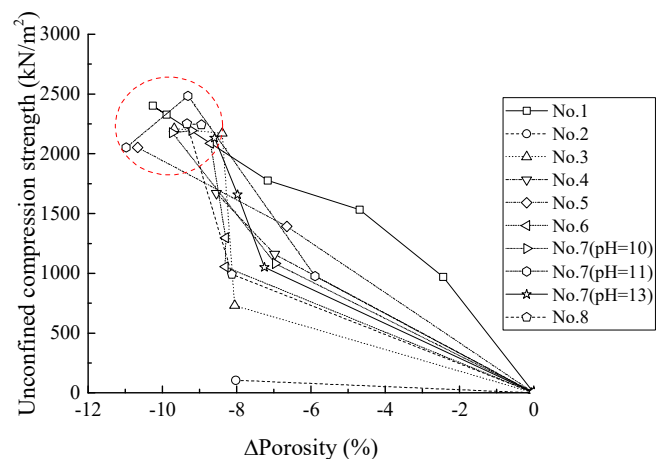


図 14 空隙率の減少量と最大一軸圧縮強度の関係

高炉スラグ微粉末を添加しない No.2 に着目すると、間隙が 8%程度充填されているにも関わらず、高炉スラグ微粉末を添加した条件と比べてほとんど強度を発現していない。既往研究では高炉スラグ微粉末の添加により化学反応が促進されて強度増加するとされていたが、空隙率の減少量を見る限り高炉水砕スラグ単体でも十分に化学反応が進行して空隙が充填されることがわかった。ただし、化学反応が進んで空隙が析出物で充填されるにもかかわらず強度が発現されないのは、高炉スラグ微粉末の添加の有無で粒子間の接触状況

といった骨格構造が異なるためと推測される。図 15 に間隙比を一定にして高炉スラグ微粉末の添加率を変化させた供試体の一軸圧縮強度の経時変化を示す。図のように、強度発現のためには同じ空隙率でも高炉スラグ微粉末の添加が必要である。高炉スラグ微粉末を添加することで高炉水砕スラグの間隙に高炉スラグ微粉末が介在して、スラグ粒子や微粉末の接触点数が増加し、析出物の形成による固結作用が高まると考える。

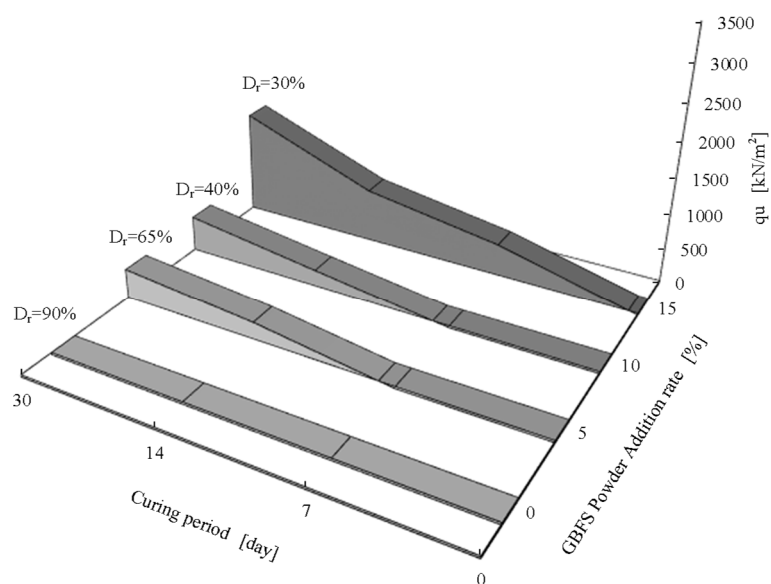


図 15 間隙比が同じで高炉スラグ微粉末の添加量が異なる試料の一軸圧縮強度と時間変化

微粉末の粒径の影響について、日表面積が異なる高炉スラグ微粉末 6000, 8000, 10000 を添加した一軸圧縮試験の結果を図 16 に示す。養生 7 日目の一軸圧縮強度は、試料に添加した微粉末の比表面積が大きいほど強度は高くなった。

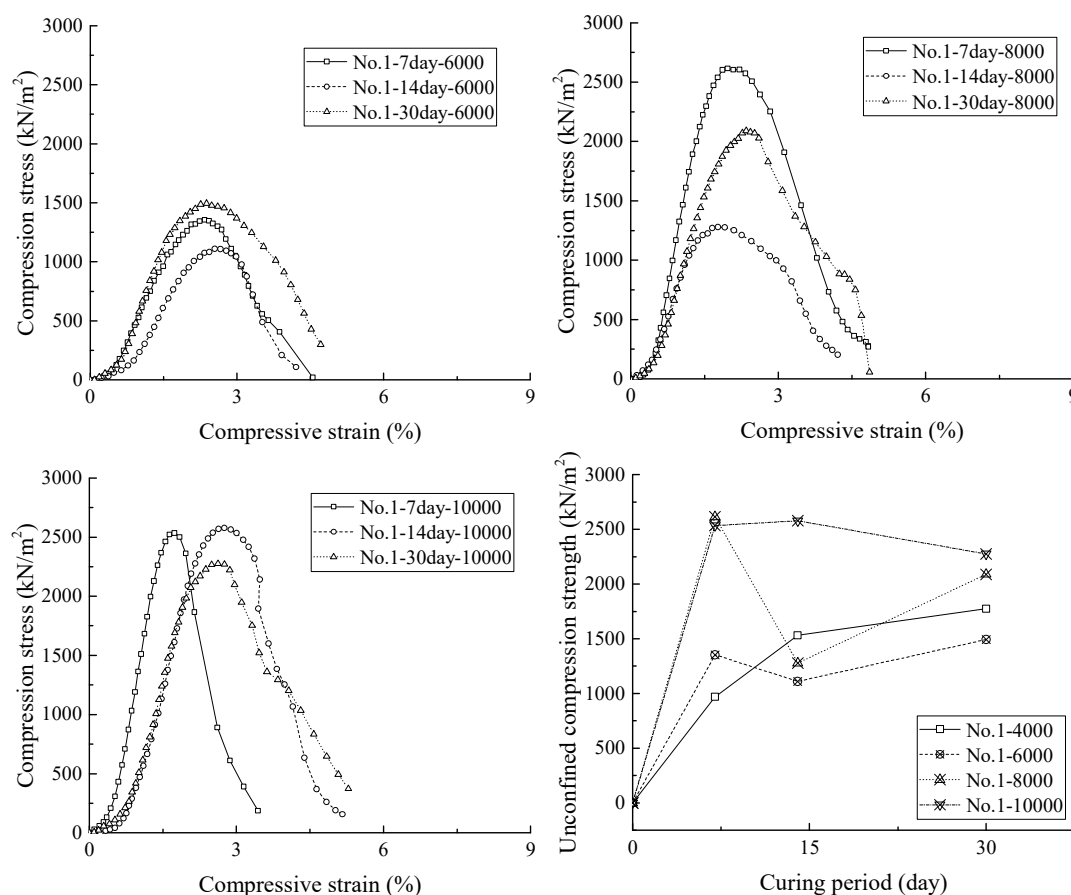


図 16 粉末度が異なる微粉末を添加した試料の一軸試験と強度特性

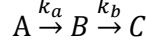
3. 高炉水砕スラグの力学モデルと土構造物の設計法の提案

2 章で示した強度試験をもとに、高炉水砕スラグの強度予測モデルを開発し、浅い基礎の支持力問題を例として水砕スラグの水硬性による強度変化の効果について考察する。

高炉水砕スラグをアルカリ雰囲気中で養生するとガラス構造をもつ $[\text{SiO}_4]$ の結合が切断されて、 CaO や MgO といったアルカリ性の含有物質が溶出する。これによりアルカリ雰囲気が保たれて、 CaO や SiO_2 の溶出が継続し、 Al_2O_3 とも反応して $\text{CaO-SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ （ケイ酸カルシウム水和物）および $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ （カルシウム・アルミネート水和物）が生成されて硬化する。つまり、水砕スラグの潜在水硬性はいったん養生水中に成分が溶出した後、水和物として析出して強度を発揮するという二段階の反応過程になるため、高炉水砕スラグが水と接して硬化するまでに時間遅れを生じる。そして時間遅れの程度は、養生水の種類や養生温度、高炉スラグ微粉末添加の有無によって異なる。2 章で示した試験で観測した pH の経時変化や既往研究で示された SiO_2 溶出量の経時変化は養生 1 ヶ月程度でピークに達し、その後は減少することが示されている。カルシウムイオンが飽和状態にある液相中にケイ素イオンが溶出し、ケイ素イオン濃度の増加に伴って C-S-H も溶出する。やがて C-S-H が飽和濃度に達すると固体として析出する。以上のことから、強度増加を決定づ

ける要因であるケイ素イオン濃度に着目して力学モデルを提案する。

高炉水砕スラグの水硬性の発現過程は物質 A（水砕スラグ）、B（SiO₂）、C（C-S-H（珪酸カルシウム水和物））の逐次反応としてモデル化する。



k_a , k_b はそれぞれ A から B, B から C への反応速度定数である。時間 t での溶液中の物質 A, B, C の濃度を $x_A(t)$, $x_B(t)$, $x_C(t)$ とすると次の速度式が得られる。

$$-\frac{dx_A}{dt} = k_a x_A, \quad \frac{dx_B}{dt} = k_a x_A - k_b x_B, \quad \frac{dx_C}{dt} = k_b x_B \quad (1)$$

初期濃度を $x_A(0) = [A]_0$, $x_B(0) = 0$, $x_C(0) = 0$ とすると式(2)になる。

$$\begin{aligned} x_A(t) &= [A]_0 e^{-k_a t}, & x_B(t) &= [A]_0 \left(\frac{k_a}{k_b - k_a} \right) (e^{-k_a t} - e^{-k_b t}) \\ x_C(t) &= [A]_0 \left\{ 1 + \frac{1}{k_a - k_b} (k_b e^{-k_a t} - k_a e^{-k_b t}) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$x_A(t)$, $x_B(t)$, $x_C(t)$ の変化を図 17 に示す。C-S-H が析出されるにつれて高炉水砕スラグの間隙は充填されるので、 $x_C(t)$ と空隙率の減少量に比例関係を仮定する。

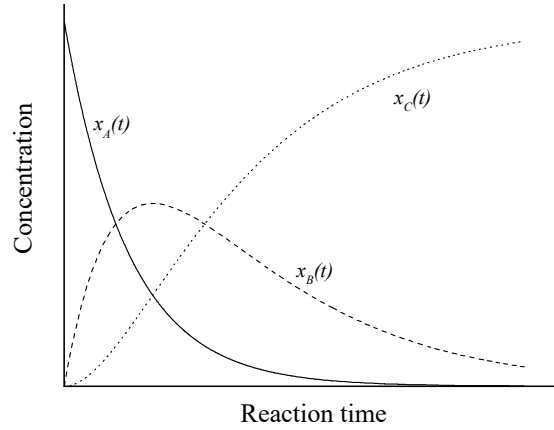


図 17 逐次反応による各成分の濃度変化

$$\Delta n = k_1 x_C(t) = k_1 [A]_0 \left\{ 1 + \frac{1}{k_a - k_b} (k_b e^{-k_a t} - k_a e^{-k_b t}) \right\} \quad (3)$$

図 14 に示した空隙率の減少量と最大一軸圧縮強度の関係に着目すると、養生初期は一軸圧縮強度がややばらつくものの、空隙率の減少に対して単調増加するユニークな関係をもつ。間隙の減少量と一軸圧縮強度の間に線形関係を仮定すると、 $x_C(t)$ と最大一軸圧縮強度の関係は次式になる。

$$q_u = k_2 \Delta n = k_1 k_2 [A]_0 \left\{ 1 + \frac{1}{k_a - k_b} (k_b e^{-k_a t} - k_a e^{-k_b t}) \right\} \quad (4)$$

水砕スラグに微粉末を添加した条件が 9 ケース，高炉水砕スラグ単体の条件が 1 ケースあるが，ケイ素イオンの初期濃度 $[A]_0$ は同一と仮定した．水砕スラグが最終的に到達する強度を q_{max} とすると，

$$q_u = q_{max} \left\{ 1 + \frac{1}{k_a - k_b} (k_b e^{-k_a t} - k_a e^{-k_b t}) \right\} \quad (5)$$

と変形できる．図 14 に示すように高炉水砕スラグの一軸圧縮強度は養生条件によらず最終的には概ね 2300 [kN/m²]に達するので $q_{max} = 2300$ [kN/m²]とした． k_a は高炉水砕スラグからのケイ素イオンの溶出速度の定数であり，養生水の種類や温度，スラグ微粉末の添加の有無といった試験条件に影響を受けるので，最小二乗法により試験ケースごとの値を設定した．設定した値を表 3 に示す．一方， k_b は SiO₂濃度に対する C-S-H の析出速度の定数であるため，実験値との比較をもとに養生条件によらず 0.1 とした．

水砕スラグの一軸圧縮強度の変化と提案モデルによる予測値の比較を図 18 に示す．

表 3 各養生条件の k_a 値

Case	k_a	Case	k_a
No.1	0.449	No.6	0.022
No.2	0.001	No.7 (pH=10)	0.040
No.3	0.030	No.7 (pH=11)	0.042
No.4	0.030	No.7 (pH=13)	0.029
No.5	0.047	No.8	0.040

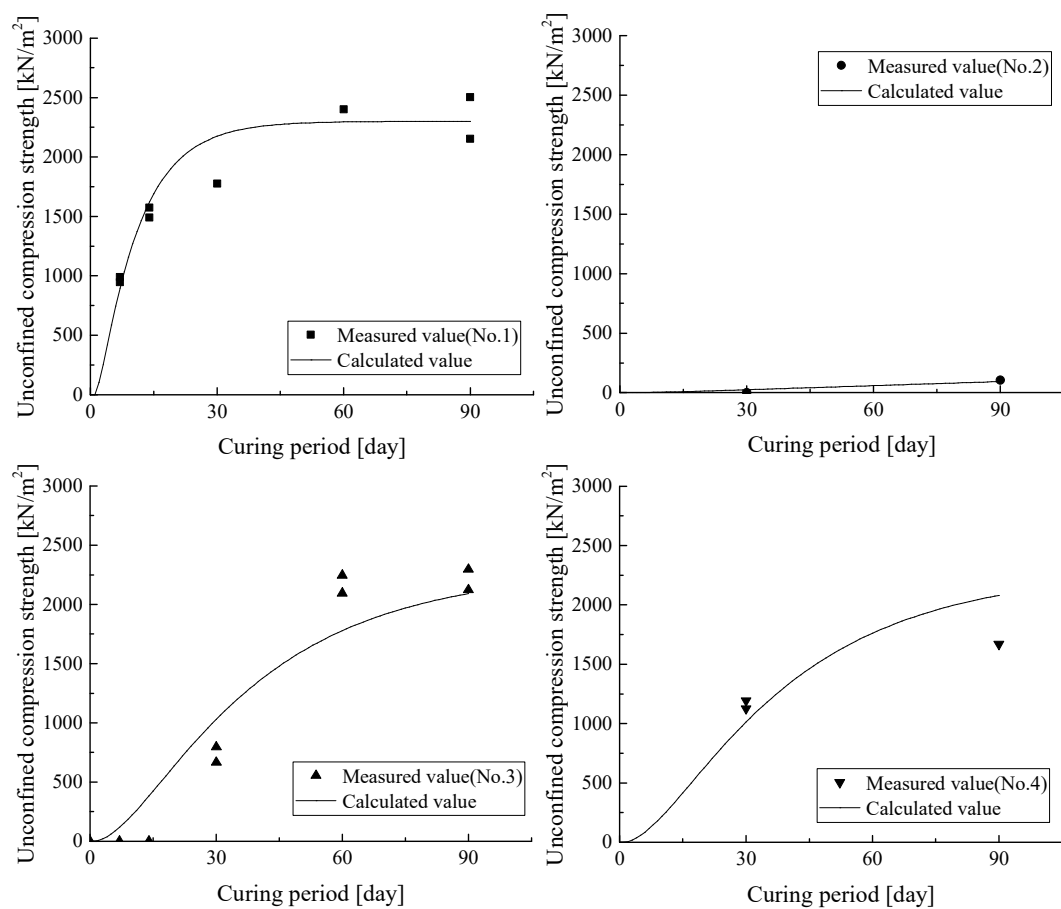


図 18a 養生条件ごとの水砕スラグの強度の経時変化と提案モデルによる予測値
(No. 1～4)

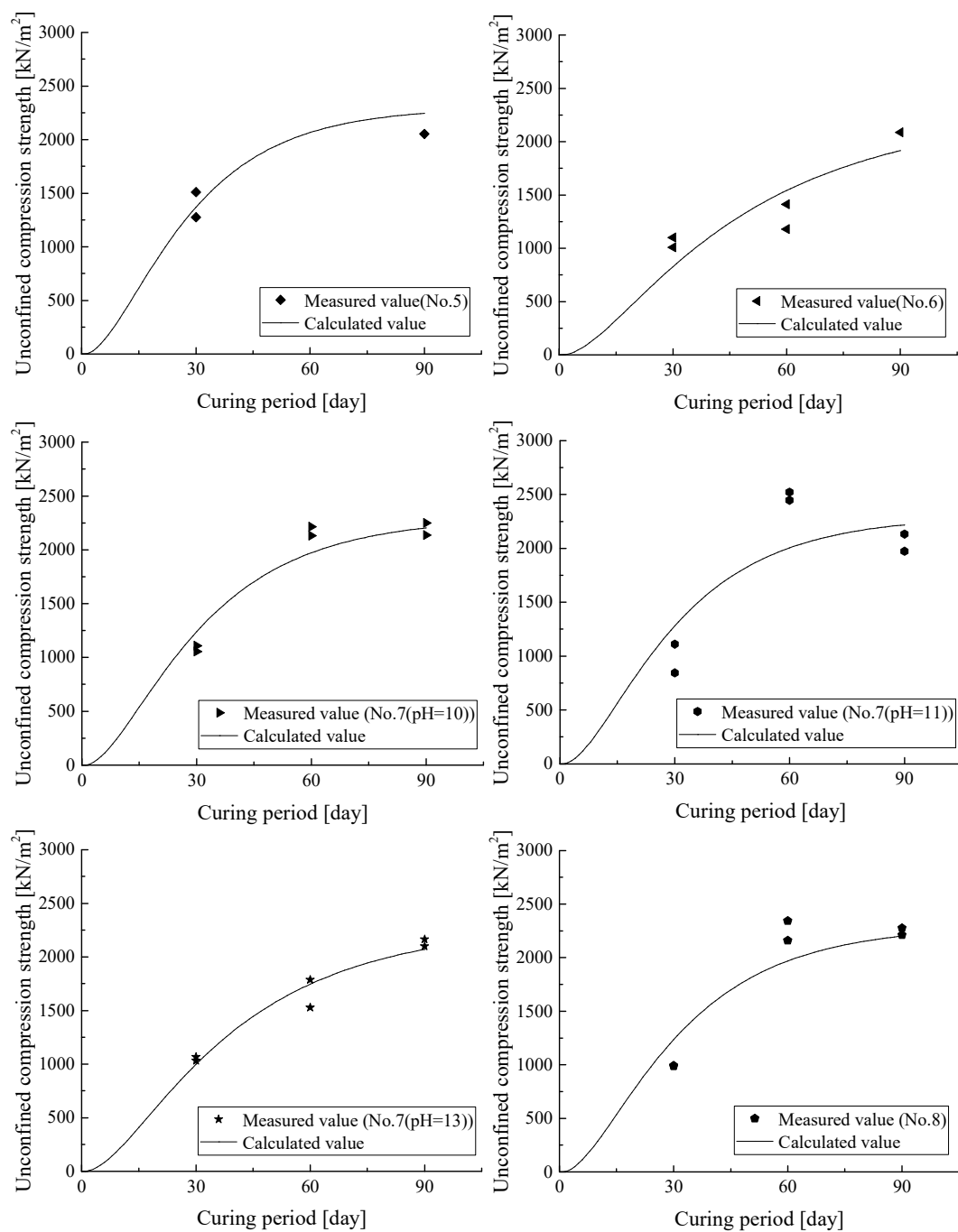


図 18b 養生条件ごとの水砕スラグの強度の経時変化と提案モデルによる予測値
(No. 5～8)

実験について、養生初期は供試体が自立して強度が増加するまでに一定の期間を要したが、30 日程度の養生で 1MPa 程度の強度に達した後、60 日程度で概ね所定の強度に達するケースが多かった。強度増加の発現速さはケースによって異なり、最も潜在水硬性が期待される養生条件の No.1 では養生初期から明瞭に強度増加が見られる一方で、低温度下で養生した No.3 は 14 日目まで自立せず、30 日目 dengan ようやく自立し、その後、強度増加

する結果となった。2 段階の逐次反応を考慮した提案モデルは養生初期は強度増加が緩やかで、その後、数日経過してから強度増加が明瞭に増加する様子や、60 日程度経過した後は強度増加が緩やかになって所定の強度に収束する様子をよく再現した。また、養生条件による水硬性の発現時期や速さの違いは、パラメータ k_a を変化させることで考慮できた。

次に、提案した水砕スラグの強度変化の予測モデルの適用の一例として、基礎の極限支持力の経時変化を算定する。プラントルは粘性土地盤 ($c > 0, \phi = 0$) の極限支持力を次式で算定した。

$$q_d = (2 + \pi)c, c = \frac{q_u}{2} \quad (6)$$

ここで q_d は極限支持力、 c は粘着力、 q_u は一軸圧縮強度である。養生条件ごとに算定した極限支持力の経時変化を図 19 に示す。式(6)は粘着力が一軸強度の 1/2 倍で、極限支持力は粘着力に比例するので、言うまでもなく極限支持力の経時変化は一軸圧縮強度と同じ形になる。いずれにしても提案した水砕スラグの強度予測モデルを用いることで、水砕スラグ上の基礎の支持力問題や裏込め材料として水砕スラグを用いた土構造物の土圧問題に対して、時間経過に伴う極限荷重や主働・受働土圧の変化を算定できる。

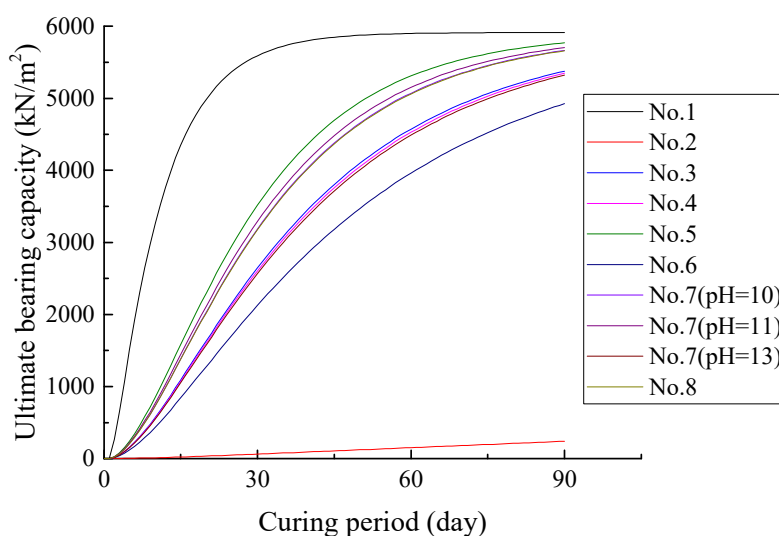


図 19 水砕スラグで造成した地盤上の直接基礎の極限支持力の経時変化

4. 結論

高炉スラグの潜在水硬性に及ぼす微粉末の影響について、養生中の高炉水砕スラグの pH はアルカリ添加剤として微粉末の添加がない場合でも早期から 11 を超え、養生 90 日経過後も pH が 11 を下回ることにはなかった。既往研究では、ケイ素イオンやアルミニウムイオンといった成分の溶出を促すためにアルカリ添加剤を添加して養生水の pH を 11 以上に保つ必要性が指摘されてきたが、アルカリ環境を与える目的でアルカリ添加剤を養生

水に添加する必要は必ずしもないことがわかった。また、既往研究では、高炉スラグ微粉末の添加によりスラグの比表面積が増加して潜在水硬性が促進されたと考えられてきたが、高炉スラグ微粉末の有無によらず、粒子間隙は析出物で充填された。ただし、微粉末を添加したケースのほうが強熱減量値は大きく、潜在水硬性はより早期から発現されるものと考えた。

養生水の種類によって析出する水和物や析出過程は異なり、 Ca^{2+} を豊富に含む人工海水では C-S-H が析出されやすく、強アルカリ性の NaOH 溶液は Si^{4+} リッチな液相で C-S-H に加えて SiO_2 も析出されやすい環境であることがわかった。人工海水で養生したケースでは、養生初期から hidroカルマイトが明瞭に析出し、その後、結晶質の C-S-H である トバモライトが養生日数の経過につれて増加した。また、カルシウムが空気中の二酸化炭素と反応してカルサイトが析出した。hidroカルマイトは塩化物イオンにより生成された水和物であり、既往研究では塩化物イオンが液相中に存在することで粒子表面の緻密な水和物相の形成を妨げる効果があると報告されていることから、人工海水の養生において潜在水硬性の発現を促進する物質と判断した。一方、蒸留水や塩水での養生では Ca^{2+} や Si^{4+} が液相中に溶解することで、C-S-H が析出される環境に移行すると考えられるが、人工海水に比べて強熱減量値は小さく、人工海水での養生に比べて潜在水硬性の発現は遅れることが分かった。

高炉水砕スラグの強度特性について、微粉末を添加したケースでは養生により水和物が緻密に形成され、スラグ粒子の間隙を充填することや粒子間を固結することで剛性や強度が高まることが示唆された。

養生初期段階では、潜在水硬性の発現速さが異なるため、養生水や温度によって強度増加の程度に差が見られた。ただし、養生日数が 90 日程度になると養生条件による強度の違いはあまり見られなくなり、所定の強度に落ち着くことが分かった。高炉水砕スラグが最終的に発揮する一軸圧縮強度は、セメント系固化材により改良された各対象土と同等かそれ以上であり、養生条件によっては一週間程度の養生でも改良砂質土に相当する強度を期待できることがわかった。一方、高炉スラグ微粉末を添加しないケースでは、間隙の充填効果は確認されたものの、養生 90 日経過時点でも強度増加はほとんどなかった。よって、スラグ微粉末の添加の有無によらず養生期間の経過に伴う水和物の形成や間隙の充填効果は見込めるものの、高炉水砕スラグに微粉末を添加して粒子間の接触点数を増やすことで接触点の結合効果が高まり強度増加するのではないかと推察した。

一連の試験結果から、高炉水砕スラグの強度発現過程は C-S-H の析出に依存し、C-S-H の析出はケイ素イオン濃度に支配されると考え、高炉水砕スラグからケイ素イオンが溶出した後、ケイ素イオンが C-S-H となって析出する二段階の逐次反応を考慮した強度予測モデルを開発した。提案モデルを用いて、各種養生条件に対して最小二乗法によりケイ素イオンの溶出速度のパラメータを決定し、各養生条件での水砕スラグの強度変化を予測したところ、提案モデルは水砕スラグの強度の経時変化を精度良く予測した。最後に、提案モ

デルの適用の一例として、水砕スラグ上の直接基礎の支持力問題を取り上げ、極限支持力の経時変化を示した。

謝辞

この研究は公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を受けて実施したものです。室内試験に際しては、関係者から水砕スラグ試料の提供を頂きました。室内試験は長期間を要する試験もありましたが、JFE21 世紀財団には研究期間の延長もお許しいただき、目標としていた成果を概ね得ることができました。財団および関係者の皆様のご支援に深く感謝いたします。