水熱ホットプレス法によるコンクリート廃材の固化体合成技術の開発と評価に関する研究

中根裕司・佐藤一志・高橋秀明・山崎伸道*・橋田俊之

東北大学工学部附属破壊力学応用研究施設, 980 仙台市青葉区荒巻字青葉

*高知大学理学部附属水熱化学実験所, 780 高知市曙町 2-5-1

Development of Solidification Technique for Recycle of Concrete Wastes by Hydrothermal Hot-Pressing and Its Mechanical Property

Yuji NAKANE, Kazushi SATO, Hideaki TAKAHASHI, Nakamichi YAMASAKI* and Toshiyuki HASHIDA

Research Institute for Fracture Technology, Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi 980

*Research Laboratory of Hydrothermal Chemistry, Faculty of Science, Kochi University, 2-5-1, Akebono-cho, Kochi-shi 780

[Received November 15, 1993; Accepted January 27, 1994]

A new processing method for solidifying pulverized concrete wastes is presented. The objective of this study was to develop a technology to recycle concrete wastes. Concrete wastes were pulverized and then solidified by a hydrothermal hot-pressing method, which is a press-forming technique under hydrothermal conditions using an autoclave. The reaction temperature was in the range of 120 to 300°C, and the reaction time was in the range of 10 to 40 min. The tensile strength of the solidified concrete waste was determined by a Brazilian test. It was shown that concrete waste can be solidified under the above reaction conditions. The measured tensile strength increased with increasing temperature, and a steep increase was observed at the reaction temperatures of 150 to 200°C. The tensile strength of 5 MPa was achieved above 200°C. The steep increase in the tensile strength was shown to be due to the formation of tobermorite.

Key-words : Hydrothermal hot-pressing, Concrete wastes, Reuse, Solidification, Strength, Tobermorite

1. 緒 言

近年、コンクリート構造物の老朽化などに伴う取り壊しにより、コンクリート廃材が量的に増大する傾向にある。これまでは、埋め立てに用いるなどして処分されてきたが、都市周辺の環境の変化により適当な地域に処分地を得ることが困難になっている。一方、コンクリート廃材を粉砕し、コンクリートの粗骨材として再利用する場合もある。以上の状況を踏まえると、コンクリート廃材を資源として積極的に再利用する技術の開発は、省資源の観点からも大変有意義なことで予想される¹⁾。本研究では、水熱ホットプレス法によりコンクリート廃材の固化合成を試み、新しい再利用技術の開発を目指す。水熱ホットプレス法²⁾は、水を含む無機化合物粉末を水熱条件下で加圧することにより粒子間隙に存在する水を搾り出すと同時に粒子を連結し、機械的強度の高い緻密化した固化体を作製する方法である。この固化反応は通常の焼結反応に類似してい

るが、適量の水の介在下で溶解-析出や新たな結晶物質の生成などが起こる。この新しい固化方法を用いて、コンクリートの廃棄物の固化を検討し、生成した固化体の観察及び機械的特性の評価を行う。

2. 実験装置

実験に使用した水熱ホットプレス用オートクレーブの断面図を図1に示す。オートクレーブ本体は、内径30 mmのピストンシリンダー型構造である。シリンダー内部に蒸留水を混ぜた試料を充填した後、上下方向からピストンに圧力を加えることにより試料を一軸加圧することができる。また、ピストンには、試料から搾り出された高圧蒸気のための逃げ空間があり、この空間によって試料中の水分が調節される。更に、ピストンと押し棒の間には、テフロン製グランドパッキングがあり、上下方向からの圧力により変形して固化反応中の試料を水熱状態に保つことができる。試料への加圧は、インストロン万能試験機を用い、オートクレーブの加熱はシース型ヒーターで行った。その昇温速度は約9°C/minとした。

Fig. 1. Autoclave for hydrothermal hot-pressing.
1: Push rod, 2: Gland packing, 3: Cast rod, 4: Heater, 5: Thermocouple, 6: Sample, 7: Space for water retreat.

3. 供試材及び実験方法

本実験に供した材料は、コンクリート工場に約1年間放置されていたコンクリート廃材を、骨材が混入している状態のままボールミルにより平均粒度 $35\mu\text{m}$ に粉砕したものをを用いた。蛍光X線による定量分析結果を表1に示す。出発材料は、このコンクリート廃材に蒸留水を混ぜたものをを用いる。固化体の合成条件は、上下方向からピストンに加える圧力を20 MPa、コンクリート廃材に加える水分量を10 wt%とし、反応温度 $120\sim 300^\circ\text{C}$ で、所定の反応温度に達してから10～40分間保持した。得られた円盤状固化体をエメリー紙#600にて研磨したのち圧裂試験³⁾を行い、求めた破断荷重（最大荷重）を次式に代入して引張り強度 σ_f を算出した。

$$\sigma_f = 2P_{\max} / \pi dt$$

ここで、 $P_{\max}$ は最大荷重、 $d(=30\text{ mm})$ は試験片直径、 t は試験片板厚、 π は円周率である。

比較のため、前述のコンクリート廃材と同一の骨材を粉砕し、セメントと混合して作製したモルタルを水中養生した後、同様の強度評価を実施した。ここで、水-セメント比は30 wt%であり、養生時間は28日である。

更に、圧裂試験後の固化体の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。

4. 結果及び考察

比較的低温かつ短時間の条件で、水熱ホットプレス法によりコンクリート廃材の固化体が得られることを見いだした。図2に、固化体合成時の反応温度と、圧裂試験の結果より評価された引張り強度の関係を示す。比較のため試験した水中養生モルタルの引張り強度は0.26 MPaであり、図中に破線で示してある。この値は、通常モルタルに経験される強度値と同等の値を与えている。水熱ホットプレス法で得られた廃材の固化体の方が、水中養生モルタルの引張り強度に比べ高い値を示している。固化体の引張り強度は、反応温度の上昇に伴い、増加の傾向にある。反応時間10～30分では反応温度 $180\sim 200^\circ\text{C}$ の間、反応時間40分では反応温度 $150\sim 180^\circ\text{C}$ の間で引張り強度が急増していることが分かる。

図3に、圧裂試験後の固化体の破面のSEM写真を示す。これらの合成条件は、反応時間20分、圧力20 MPa、水分量10 wt%で、反応温度がそれぞれ $150, 180, 200, 250^\circ\text{C}$ において得られたものである。反応温度 180°C の写真(b)では、反応温度 150°C の場合に見られない針状の結晶が生成している。更に、反応温度 200°C になると、その

Fig. 2. Relation of tensile strength vs reaction temperature. The tensile strength increases rapidly at the reaction temperatures of $150\sim 200^\circ\text{C}$.

Fig. 3. SEM observation of fracture surfaces. Reaction temperatures are : (a) 150°C , (b) 180°C , (c) 200°C , (d) 250°C .

Fig. 4. X-ray diffraction profiles. (a) After solidification, (b) Before solidification. Tobermorite ($2\theta=28.9^\circ$) appears after solidification (○), Quartz (△), Feldspar (▲), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (□), CaO (■).

Table 1. X-Ray Fluorescence Analysis Value

Material	Element	(wt%)									
		SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Balance
Fresh Concrete		50.92	13.36	0.87	7.86	12.91	4.36	1.38	1.21	1.77	2.43
Concrete Waste		50.64	12.49	0.76	7.29	11.60	3.58	1.48	1.29	1.77	7.59

結晶は板状に成長し、反応温度250°Cでは数 μm の大きさの結晶が群生していた。このように反応温度の上昇により成長する結晶が、固化体の引張り強度に影響を及ぼしているものと考えられる。この結晶を分析するために、反応温度200°Cで合成した固化体の粉末X線回折図形を図4に示す。固化前の廃材には見られないトバモライトに対応する $2\theta=28.9^\circ$ の回折ピークが水熱ホットプレス法で固化合成した後の固化体では現れている。表1に示した SiO_2 は、コンクリート中の骨材として多く存在するが、本実験で試料として用いたコンクリート廃材は骨材も含め粉碎されているため、 SiO_2 は微粒子で存在し、その表面は再び反応性に富むものとなる。そのため、固化合成反応は SiO_2 過多の条件下で進み、その結果、トバモライトが生成する可能性が大きいと考えられる^{4),5)}。トバモライトは、オートクレーブ処理において、通常180°C前後で、4~16時間養生することにより、安定に析出することが知られている^{5),6)}。しかしながら、本実験の水熱ホットプレス法では数十分程度の処理でトバモライトが析出したという事実は、水熱ホットプレス法が、水熱反応のみならず機械的圧搾の効果を同時に利用しているためと判断される。このトバモライトの析出による機械的強度の増加はすでに知られており^{6),7)}、図2で観察された引張り強度の不連続な上昇は、トバモライトの析出とその成長によるものと考えられる。

一般には、コンクリート廃材の状態は経年変化や、用途の違いによる成分が種々異なる場合が多いが、それらのコンクリート廃材も本実験で用いたものと同様に粉碎し、新たな活性な面を出すことで、水熱ホットプレス法の反応過

程における機械的圧搾と水熱反応により、再び物質の移動、変質、析出がおこり、高強度の固化体を合成できるものとする。

5. 結 言

(1) 水熱ホットプレス法を用いることにより、比較的低温かつ短時間の条件(120~250°Cで数十分)でコンクリート廃材の固化体を合成できることを見いだした。その引張り強度の範囲は、1~5 MPaであった。

(2) 200°C以上の合成温度では、トバモライトの析出、成長により、引張り強度5 MPa程度の高強度固化体を合成できる。

謝 辞 本研究を遂行するに当たり、有益な討論を頂戴した、高知大学理学部附属水熱化学実験所の西岡 守技官に深く感謝申し上げます。また、前田製管株式会社には、廃コンクリート材料の提供をして頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 1) 西岡 守, 山崎 伸道, ウェイストリソース, 24, 7-11 (1991).
- 2) 山崎 伸道, 柳沢和道, 西岡 守, ニューセラミックス, 10, 81-86 (1989).
- 3) 例えば, 丹羽義次監修, “岩石力学入門”, 東京大学出版会 (1977) p. 124.
- 4) 光田 武, セメント技術年報, 41, 9-17 (1987).
- 5) 光田 武, セメント技術年報, 30, 45-49 (1976).
- 6) 鈴木一孝, 浅川邦治, 土田幸宏, 伊藤祐敏, 福尾寿一, 窯協, 85, 440-47 (1977).
- 7) 井須紀文, 寺村敏史, 佐々木 香, 石田秀輝, 光田 武, 日本セラミックス協会年会講演予稿集 (1993) pp. 504-05.