

スチールチップ補強セメント系複合材料の開発 (その 1 スチールチップの種類の検討と予備材料実験)

2. 構造—8. 鉄筋コンクリート構造

繊維補強セメント系複合材料, 切削屑, リユース

正会員 ○金田学*1 同 金子佳生*2 同 佐藤裕一*3

1. はじめに

コンクリート材料分野では, 強度・靱性向上を意図して各種繊維を混入した繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) の開発が進められている^{1)~3)}。混入される繊維は, モルタルとの調合・付着を考慮して様々な加工が施されているが, それゆえコスト増につながりやすい。そのため, 低コストに抑える必要のある部分への利用には不向きである。切削屑を利用した研究としては, 高槻らによる形状記憶合金屑を用いた実験⁴⁾があるが, やはり建築構造物ではコスト的な困難がある。そこで, 工場等で切削加工により発生する切削屑 (以下, スチールチップと呼ぶ) を繊維の代替材料として利用できれば, 産業廃棄物の減少とコスト低減に寄与できる。

本研究はその実現性を検証するため, スチールチップ補強セメント系複合材料の基礎的材料実験を行った。

2. スチールチップ

今回使用したスチールチップは一般鋼材切削加工時に発生するもの (S1) および精工鋼板の表面切削時に生じたもの (S2) の 2 種類であり, 写真 1 に示す。一般鋼材切削加工時に発生するスチールチップは, 形状が不均質であり, 潤滑油も使用されている。一方で, 精工鋼板スチールチップは, 一般のスチールチップに比べ, 形状が比較的均質で, 鋼種もほとんど SS400 に限定され, 潤滑油も使用されていないため清潔である。精工鋼板は NC 旋盤で精密加工した鋼製品であり, 機械部品をはじめ各種用途に堅調な需要がある。しかしながらその加工過程で発生するスチールチップは産業廃棄物となり, 再生鋼材としての需要は皆無であり, 全て埋め立て処

分されている。

3. 実験概要

3.1 使用材料および調合

使用材料は, セメントには早強ポルトランドセメント (比重 3.14), 混和材にはシリカフューム (比重 2.26), 細骨材には川砂 (絶乾状態の比重 2.51 g/cm^3) と 7 号珪砂 (表乾状態の比重 2.61 g/cm^3), 混和剤には高性能 AE 減水剤 (比重 1.0 g/cm^3), S1 と S2 のスチールチップを用いた。ここで, S2 のスチールチップは, $\phi 100 \text{ mm} \times h 200 \text{ mm}$ の円柱試験体内に 0.634 kg で体積比 5.2% 混入可能である。それぞれのスチールチップの切削加工による形状の違いを確認するため, スチールチップをランダムに取り出し, 統計調査を行った。図 1 に測定箇所および統計結果を示す。S1 のスチールチップの場合は, 質量, 長さおよび径を測定した。一方, S2 のスチールチップの場合はランダムに 100 個取り出し, 質量, 長さ, 径, 厚み, 幅, 巻き数をそれぞれ調査した。調合を表 1 に示す。

3.2 試験体製作

練り混ぜ方法は手練りで実施し, 1 回あたりの製造量は 200 とした。練り混ぜ方法は, 表乾状態のセメント, シリカフューム, 細骨材を空練り, 水および減水剤を数回に分けて加えて, スチールチップを少しずつ加えながら練り混ぜを行った。試験体は, $\phi 100 \text{ mm} \times h 200 \text{ mm}$ の円柱試験体と $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ の角柱試験体をそれぞれ 3 体製作した。打設は, スチールチップが絡み合うため, バイブレーターおよび突き棒を使用

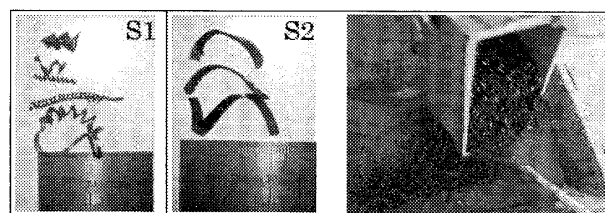


写真 1 スチールチップ

Development of Steel Chip Reinforced Cementitious Composite

(Part1: Feasibility Study of Kinds of Steel Chips and Fundamental Material Tests)

KANADA Manabu, KANEKO Yoshio and SATO Yuichi

した。翌日に脱型した後、気温 20℃、湿度 60℃に保ち、養生した。

3.3 試験方法

円柱試験体の圧縮試験は、材齢 2 週に 2000kN 万能試験機を用いて行った。変位計もしくはひずみゲージにより縦の変形量を測定し、圧縮強度の 1/3 応力度を示す点とひずみが 5.0×10^5 を示す点とを結ぶ直線の勾配を静弾性係数 E_c とした。角柱試験体の 3 点曲げ試験は、中央にコンクリートカッターで深さが梁せいの 1/5 (20mm)、幅 3mm の切欠きを入れ、スパン 200mm で単調および

繰返し载荷を行った。繰返し载荷における除荷変位は、原則として 0.33mm→0.67mm→1mm→2mm→3mm→5mm→7mm→9mm の順としたが、剛性急変時は若干の調整を行った。その結果から、多曲線近似法に基づく逆解析⁵⁾により、引張強度 f_t および破壊エネルギー G_F を求めた。ここで、繰返し载荷の場合は、実験結果の包絡線から求めた。計算の精度と安定性を考慮して、引張応力の許容誤差は 5% とし、破壊エネルギー G_F の算出においてはひび割れ開口変位 1mm までを求めた¹⁾。

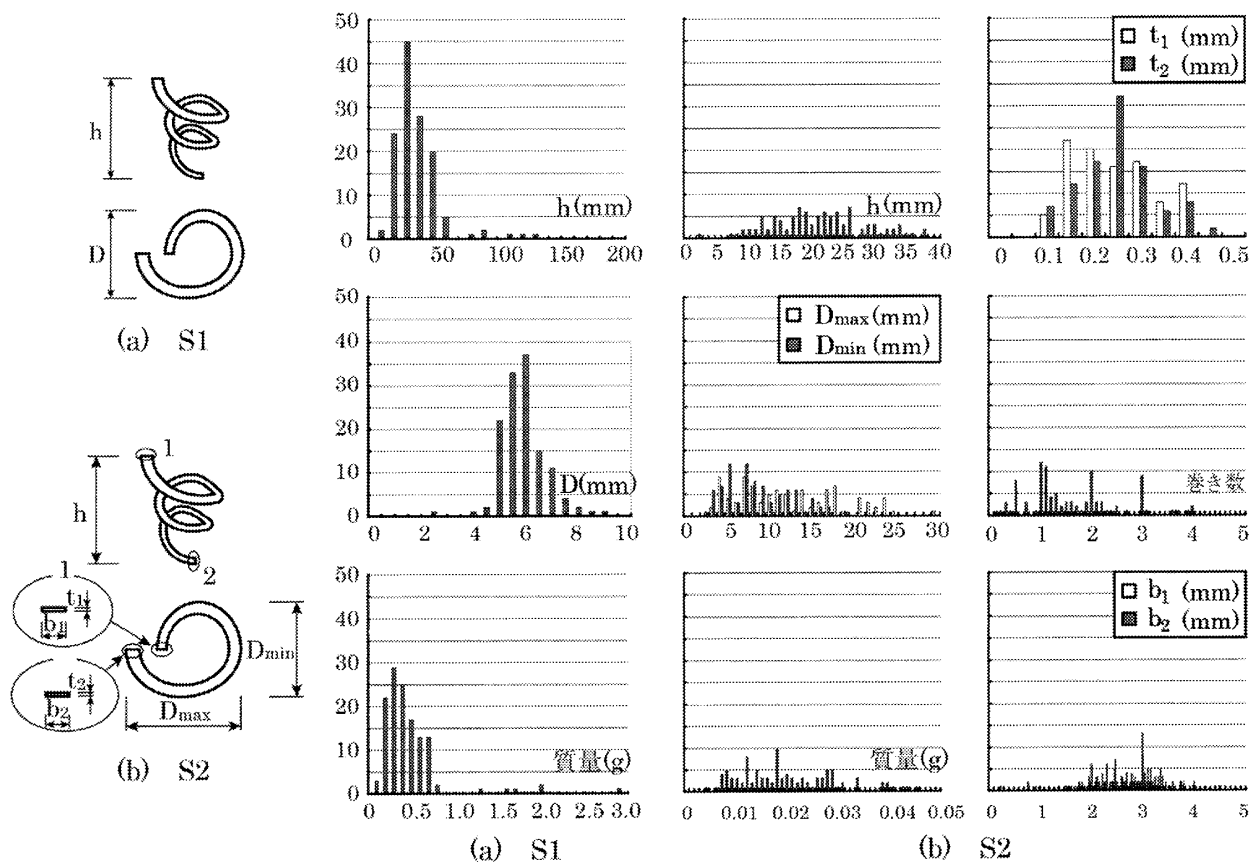


図1 スチールチップの測定箇所および統計結果

表1 調合

試験体 シリーズ	W/B	水 (g/l)	セメント (g/l)	細骨材 (g/l)	シリカフューム (g/l)	減水剤 (g/l)	スチールチップ (g/l)	Vf (%)
S0_25_0	0.25	189	755	1276	189	21	-	0
S1_56_2_K	0.56	441	784	392	196	21.6	157	2
S1_25_2	0.25	189	755	1276	189	21	170	2
S2_25_2	0.25	189	755	1276	189	21	170	2
S2_25_3	0.25	189	755	1276	189	21	255	3
S2_25_4	0.25	189	755	1276	189	21	339	4
S2_25_5	0.25	189	755	1276	189	21	432	5
S2_25_6	0.25	189	755	1276	189	21	527	6

※ K は、7 号珪砂（表乾状態の比重 2.61 g/cm³）、それ以外は川砂（絶乾状態の比重 2.51 g/cm³）を使用

4. 実験結果および考察

4.1 練混ぜおよび打設状況

表2に全試験結果を示す。表の値は各調合の3つの試験体の平均値である。フロー試験の結果から川砂を用いた試験体では、スチールチップの体積比 $V_f=2\%$ までは170mm以上を確保しているが、 $V_f=4\%$ を超えるとスチールチップの結合が強くなり、 $V_f=6\%$ では、スチールチップが塊となり、その隙間からセメントが流れ出た。一方で、珪砂を用いた試験体では、スチールチップの沈降が見られた。型枠への打設状況は、 $V_f=5\%$ までは問題なかったが、 $V_f=6\%$ ではモルタルが充填されない部分が多く見られた。

4.2 圧縮試験結果

図2に圧縮試験における圧縮応力 - ひずみ関係を示す。スチールチップを混入していないS0_25_0で圧縮強度が60~80 N/mm²で爆裂破壊が生じた。S1シリーズでは、スチールチップが欠陥となり、S0_25_0と比較して圧縮強度が約1/3~1/4程度に低下した。それは、スチールチップが短いことや切削加工時に使用した潤滑油が原因で十分な付着効果が得られなかったことが考えられる。S2_25シリーズにおいて、スチールチップの体積比の増加に伴い、圧縮強度がS0_25_0の圧縮強度の約1.2~1.5倍に増加した。これは、スチールチップが繊維でありながら骨材に似た機能

表2 全試験結果

試験体 シリーズ	密度 ρ (g/cm ³)	フロー値 (mm)	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	破壊エネルギー G_F (N/mm)	静弾性係数 E_c (kN/mm ²)
S0_25_0	2.13	230×240	67.6	5.0	0.10	12.5
S1_56_2_K	-	-	19.8	1.7	0.57	5.2
S1_25_2	-	200×170	18.8	2.1	0.40	14.6
S2_25_2	2.31	185×195	88.0	6.3	0.95	15.3
S2_25_3	2.40	120×110	91.7	6.9	1.68	17.3
S2_25_4	2.49	120×115	93.5	7.0	2.11	17.5
S2_25_5	2.51	110×105	93.9	6.7	2.12	17.2
S2_25_6	2.40	90×95	62.8	4.8	2.87	12.3

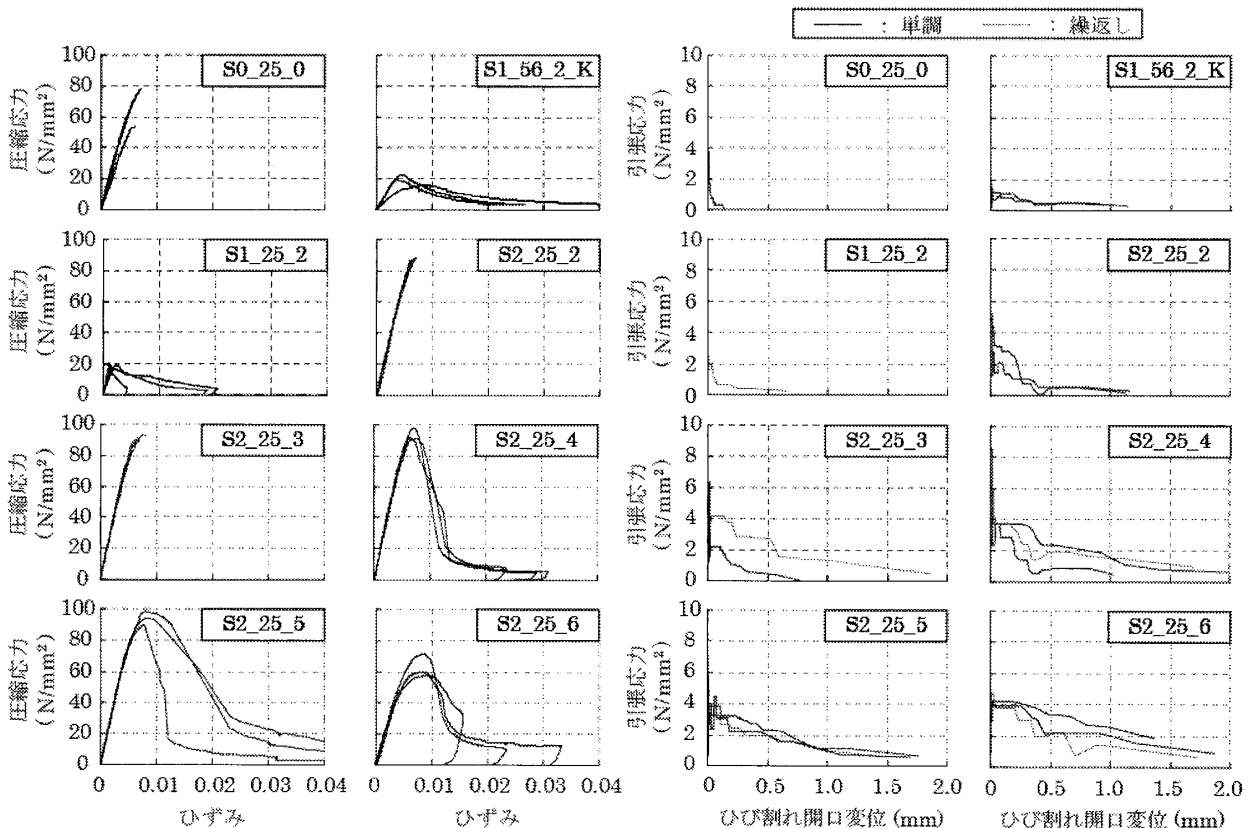


図2 圧縮応力 - ひずみ関係

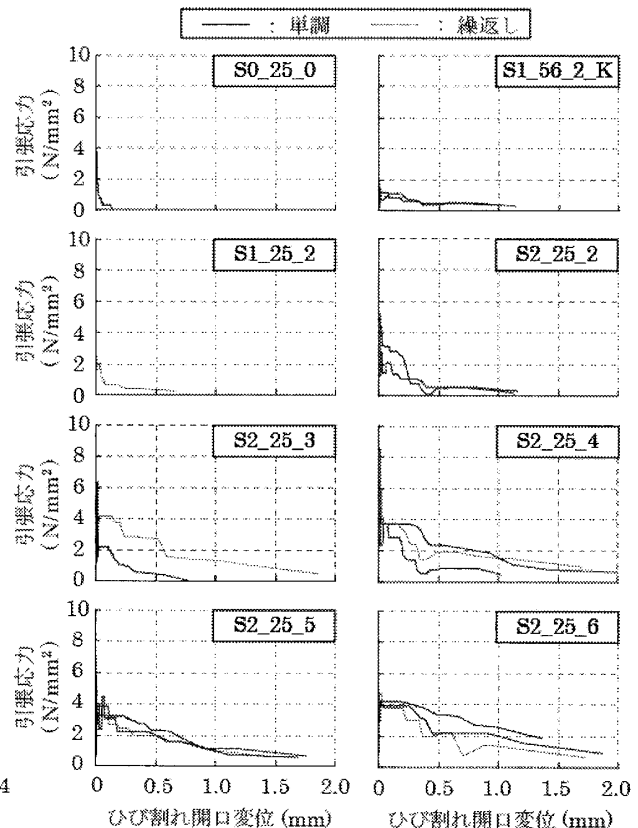


図3 引張軟化曲線

を発揮したためと考えられる。また、高強度コンクリートに特有な圧縮破壊時の爆裂現象も、スチールチップを体積比 3%以上で観察されなくなった。ただし、載荷装置の容量が 2000kN 未満である場合には、 $V_f = 3\%$ 以上でも爆裂を生じる可能性がある。

4.3 3点曲げ試験結果

図3に3点曲げ試験の逆解析から求めた引張軟化曲線を示す。スチールチップを混入していない S0_25_0 では、ピーク荷重に到達後、ひび割れが生じ、急激に荷重が低下した。S1 のスチールチップを混入することで、軟化勾配がやや緩やかになるものの、大きな変化は見られなかった。一方、S2 のスチールチップを混入することで、軟化勾配が緩やかになるだけでなく、引張応力の増加も確認できた。このことから、スチールチップを混入することで、ひび割れに対する抵抗力の向上に繋がることがわかった。ただし、スチールチップの混入率が 4%を超えると、引張応力が減少に転じる。これは、スチールチップの混入率の上限 5.2%未満であっても混入率 4%を上回ると、スチールチップの隙間にセメントが浸透せず、欠陥が多くなるためと考えられる。

5. まとめ

本研究は、スチールチップ補強セメント系複合材料の有用性を実験的に検証した。これらの実験から得られた知見を以下に示す。

1. スチールチップの製造・発生過程により、スチールチップ補強セメント系複合材料の材料特性に大きな違いが見られた。NC 旋盤で精密加工により発生するスチールチップであれば、圧縮・引張性状の改善が見られた。
2. スチールチップを混入することで、圧縮強度が無補強に比べて約 1.2~1.5 倍に増加した。本実験で用いた 2000kN 万能試験機の場合、圧縮破壊時の爆裂現象は体積比 3%以上で発生しなくなった。
3. 引張強度は、通常使用される鋼繊維補強セメント

系複合材料と同程度であった。一方、破壊エネルギー G_F は、2.0~3.0 N/mm であり、鋼繊維補強セメント系複合材料(8.0~9.0 N/mm)には及ばないものの、無補強のモルタル(0.1~0.2 N/mm)に比べれば大幅に増加することが確認された。

4. 今回の実験の範囲では、施工性、圧縮強度、引張強度および破壊エネルギーの点から $V_f = 4\%$ が最も良好であると考えられる。

今後の課題としては、スチールチップを普通コンクリートに混入することで、より安価な材料を開発する必要がある。またスチールチップによる圧縮性状の改善が、どのようなメカニズムで起きているのか検証する必要がある。

謝辞

スチールチップを御提供頂いた株式会社奥田および藤巻鋼材大阪株式会社に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 金子佳生, 三橋博三, 桐越一紀, 阿部孝仁: 鋼繊維補強セメント系複合材料の単純化した一軸構成モデル, 日本建築学会技術報告書, 第 11 号, 5-8, 2000.12
- 2) 金子佳生, 三橋博三, 桐越一紀, 下川博之: 鋼繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性 - 繊維混入率と試験体寸法をパラメータとした圧縮試験と数値解析 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 592 号, 19-26, 2005.6
- 3) 佐々木勇氣, 金子佳生, 桐越一紀, : 新構法に用いられる繊維補強セメント系複合材料の材料特性および構成則, 日本建築学会東北支部研究報告集. 構造系, 第 71 号, 115-118, 2008.6
- 4) 高槻哲平, 佐藤尚, 渡辺義見, 丸山忠克: Fe-Mn-Si-Cr 形状記憶合金切削屑を利用したスマート複合材料の開発, 鉄と鋼, vol.92, pp.24-28, 2006.9
- 5) 土木学会: コンクリート技術シリーズ, コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, 3 章: 引張軟化曲線の求め方, 1998

*1 京都大学大学院工学研究科 修士課程

Graduate Student, Kyoto University, Graduate School of Engineering

*2 京都大学大学院工学研究科 教授・Ph.D.

Professor, Kyoto University, Graduate School of Engineering, Ph.D.

*3 京都大学大学院工学研究科 助教・博(工)

Assistant Professor, Kyoto University, Graduate School of Engineering, Dr. Eng.