

論文 硫黄高炉スラグ固化体を用いた合成梁の曲げ挙動に関する研究

大島 義信*¹, 佐藤 昌宏*², 小笠原 哲也*³, 茶谷 正明*⁴

Bending behavior of the composite beam of concrete and Sulfur-Slag Concrete

Yoshinobu OSHIMA*¹, Masahiro SATOU*², Tetsuya OGASAWARA*³ and Masaaki CHATANI*⁴

要旨: 硫黄高炉スラグ固化体 (以下 SSC) をコンクリートの補修材として適用するためには, コンクリートと SSC の合成挙動を把握する必要がある. よって本研究では, 主にコンクリートと SSC の合成梁に対して曲げ試験を行い, 両者の合成挙動を検討した. その結果, SSC とコンクリートの合成梁は一体化して挙動することが明らかとなった. また, 簡易的な付着試験の結果からも, コンクリートとの付着特性が良好である結果が得られており, 補修材として十分適用できる可能性がある.

キーワード: 補修材, 硫黄, 高炉スラグ, フライアッシュ, 合成構造

1. はじめに

余剰傾向にある硫黄の有効活用を目指し, 硫黄高炉スラグ固化体 (以下 SSC) が開発され, 研究が進められている¹⁾. SSC は, 従来の硫黄モルタル²⁾³⁾とは異なり, 硫黄に添加剤を加えることで 80MPa 程度の高強度を実現している. また遮水性や耐酸性が高く, 10%塩酸溶液に3ヶ月浸漬した場合でも, ほとんど強度低下することがない⁴⁾. さらに硬化原理として, 加熱による硫黄の液化と冷却固化を利用するため, 打設後温度低下とともに急速に硬化し, 通常数時間で目標の強度に達する. ただしワーカビリティは固練りのコンクリートに近く, バイブレータ等による締固めが必要である. また高熱では再融解する可能性があるため, 海洋構造など火災の可能性が低い構造物に適している.

以上の特徴を有する SSC を, コンクリートの補修材として適用すれば, 補修施工期間を短縮できるのみならず, 十分な補強効果も期待でき

る. また加熱により SSC を撤去できるため, 撤去が容易であり騒音の低減も期待できる.

よって本研究では, SSC をコンクリートの補修材として適用することを目標に, コンクリートと SSC の合成梁に対して曲げ試験を行い, 後打ち SSC と既設コンクリートとの合成挙動を把握する. また一方で, SSC とコンクリートの簡易的な付着試験を行い, SSC の付着特性についての評価を行う.

2. SSC の基本特性

2.1 SSC の製造

SSC の配合比を表-1 に示す. SSC はセメントを一切使用せず, 硫黄を結合材として用いている. そのため原理的に水分は含まれておらず, 高い遮水性や電気絶縁性に優れた中性材料である. SSC の製造プロセスを図-1 に示す. 初めに, 150℃程度に加熱し液化した硫黄に添加剤を加え, 硫黄の改質を行う. そこへ同程度に加熱し

*1 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 助手

*2 五洋建設土木部門土木本部環境事業部 主任

*3 五洋建設技術研究所 係長

*4 新日本石油研究開発本部開発部硫黄利用プロジェクトグループ マネージャー

表-1 SSCの配合 (重量比 %)

硫黄	高炉 スラグ*	フライ アッシュ**	添加剤***
19.83	65.46	13.88	0.83

*: 5mm 細骨材 (篩分け), **: II種, ***: オレフィン系材料

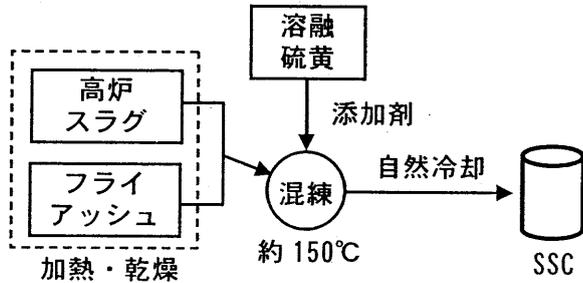


図-1 SSCの製造過程

表-2 SSCの諸特性

圧縮強度	75MPa	線膨張係数	10.5 μ / $^{\circ}$ C
曲げ強度	8 MPa	密度	2500kg/m ³
引張強度	5 MPa	吸水率	<0.1%
弾性係数	28 GPa	透水係数*	測定不可
ポアソン比	0.28	熱伝導率	0.5W/mK

*: 水圧 0.5MPa で 42 日間注水した場合でも水の流出は認められない。

たフライアッシュおよび高炉スラグを加え混練し、型枠に打設する。打設後気中において自然冷却させ、通常数時間で目標の強度に達する。ただし温度低下とともに硬化するため、硬化時間は放熱の効率に依存する。

2.2 SSCの力学特性

25 $^{\circ}$ CにおけるSSCの圧縮強度、引張強度、曲げ強度を表-2に示す。また25 $^{\circ}$ Cにおける典型的な応力ひずみ関係を図-2に示す。圧縮強度は75MPa程度であり、終局ひずみは10000 μ 程度まで達している。また圧縮強度および弾性係数と供試体温度との関係を図-3に示す。SSCは硫黄の冷却固化により硬化するため、圧縮強度や弾性係数は温度に依存する。ただし60 $^{\circ}$ C程度の温度が発生している場合でも、依然40MPa程度の圧縮強度を有しており、海洋構造物などの高熱が発生しにくい構造物への利用が期待できる。

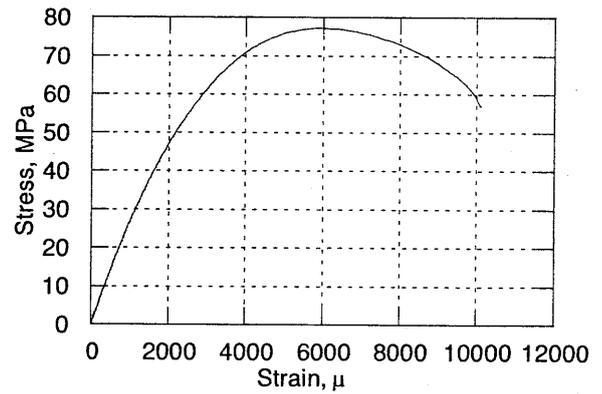


図-2 典型的な応力ひずみ曲線

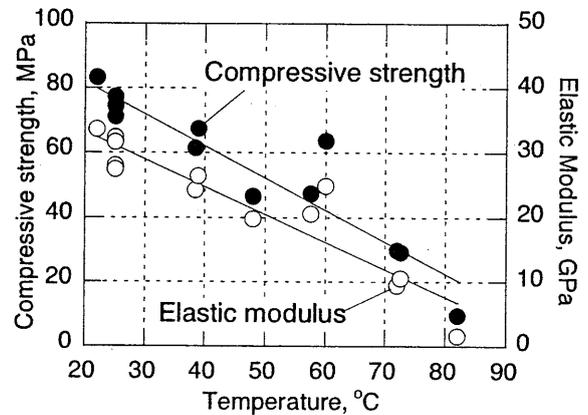


図-3 圧縮強度および弾性係数と温度との関係

また線膨張係数は10 μ / $^{\circ}$ C程度であり、鉄筋との複合化も可能である。ただし、埋設鉄筋の腐食抵抗性に関しては検討していない。

3. 合成梁の曲げ載荷試験

SSCを補修材として用いるには、後打ち(打継ぎ)のSSCが既設コンクリートと一体化して挙動する必要がある。よって以下では、SSCとコンクリートとの合成梁の曲げ試験を実施し、合成構造としての曲げ挙動に関する検討を行う。

3.1 実験概要

打継ぎ部のSSCが圧縮および引張を受ける場合を考慮し、表-3のようにケースを想定した。比較のため、打継ぎ部にもコンクリートを用いた場合と、全断面SSCとして一度に打設した場合も想定している。既設コンクリートおよび後打ちコンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比は50%、設計基準強度

表-3 実験要因およびケース

ケース	既設/打継	せん断キー	圧縮側
1-1	C/S	なし	S
1-2			C
2-1	C/S	あり	S
2-2			C
3-1	C/C	なし	C
4-1	S	なし	S

C: コンクリート, S: SSC

表-4 材料試験結果

材料名	19日* 圧縮強度	29日** 圧縮強度	平均*** 圧縮強度
SSC	82.3MPa		82.3MPa
既設コンクリート	27.0MPa	30.2MPa	28.6MPa
打継コンクリート	42.5MPa	44.5MPa	43.5MPa
鋼材種別	降伏強度	引張強度	弾性係数
スターラップ [°] φ9(SR235)	382.8MPa	486.8MPa	205GPa
主筋 D16(SD345)	412.9MPa	618.5MPa	192GPa

*: 曲げ試験開始日, **: 試験終了日, ***: 実施期間中の値として採用

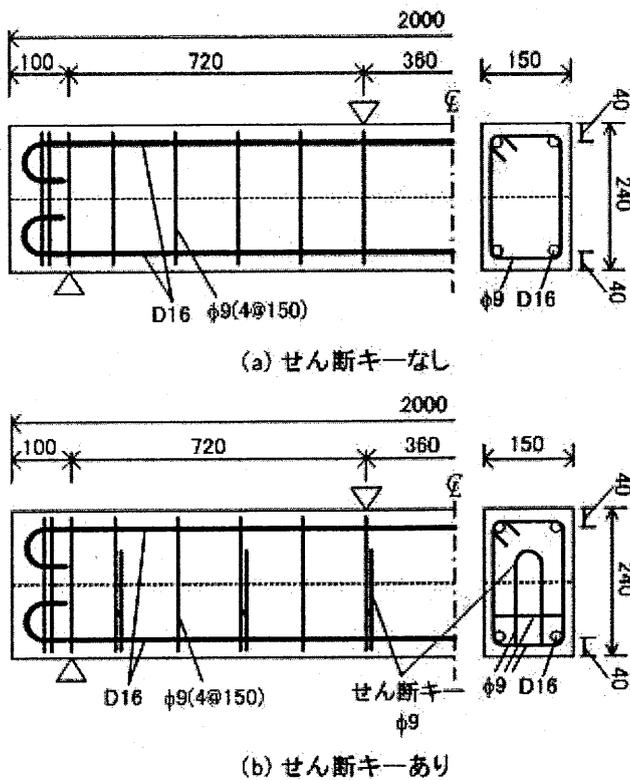


図-4 配筋図

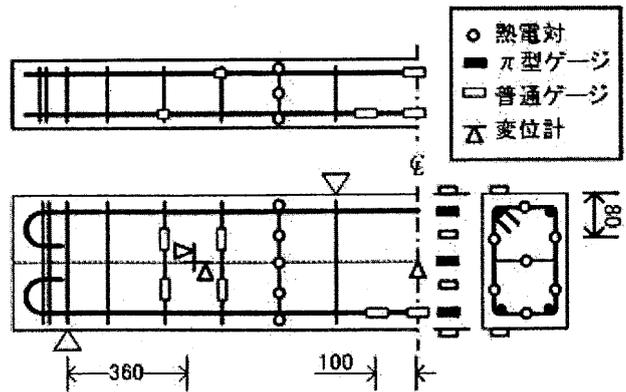


図-5 センサ配置 (ただし熱電対は片側のみ)

は 25MPa で、17 時間の蒸気養生を行った後、
 気中養生を行っている。材料試験結果を表-4 に
 示す。供試体のかぶりは 4cm, a/d は 3.6 であり、
 いずれの供試体においても曲げ破壊先行型の設
 計を行っている。またコンクリートと SSC との
 合成梁の場合、打継ぎ面にせん断キーを設置し
 たケースも設定した。せん断キーは直径 9mm
 の丸鋼を用いており、30cm 間隔でスターラップ
 に溶接止めで固定した。配筋図を図-4 に示す。
 ただし、本試験では合成梁の曲げ挙動を把握す
 ることを目的としているため、スターラップに
 より十分なせん断耐力を生じるよう設計してい
 る。またスターラップにより十分なせん断抵抗
 が確保されているため、せん断キーは付加程度
 の役割として導入した。

また計測項目として、曲げ区間中央点の鉛直
 変位、せん断区間中央点における打継ぎ目のズ
 レ変位 (鉛直・水平)、曲げ区間内の引張側鉄筋
 のひずみ、スターラップのひずみ、断面内の温
 度分布を設定した。また曲げ区間中央部の断面
 内ひずみ分布を求めるために、梁表面にπ型ゲ
 ージおよびコンクリート用ゲージを貼付した。
 センサ配置を図-5 に示す。

3.2 供試体の作製

合成梁の作製にあたり、既設コンクリートを
 型枠の半分まで打設し、打設 17 時間後に打継ぎ
 面のチッピング処理を行った。SSC の打設は、
 既設コンクリート打設 10 日後に行った。また
 SSC の打設前、あらかじめコンクリートの打継

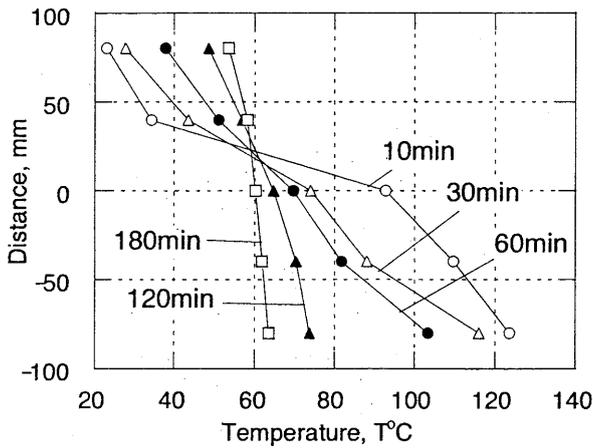


図-6 断面上の温度履歴

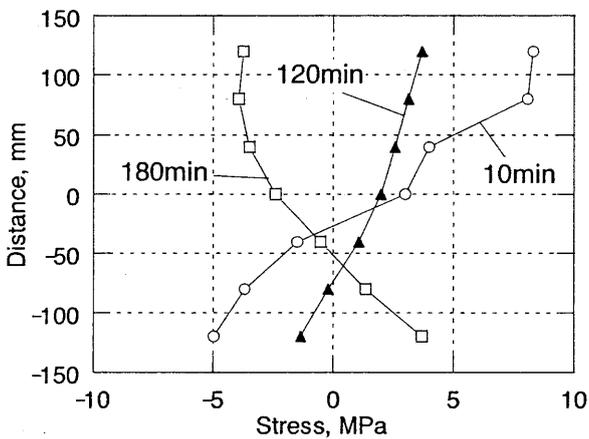


図-7 自己平衡温度応力

ぎ面をヒーターにより 60°C程度まで加熱している。ただしコンクリートを打継ぐケースでは、チッピング処理後直ちに打設を行った。

3.3 打設に伴う初期ひび割れ

SSC の打継ぎは、高温 (150°C程度) の SSC を常温のコンクリート上へ打設することになるため、温度勾配が発生し、温度ひび割れが発生する可能性がある。図-6 は合成梁断面上の打設直後からの温度履歴の一例を示している。ただし図のゼロ点は図心を示し、プラス側は打設面側を示す。今、外部拘束がないと仮定し、複合梁断面に対して自己平衡応力を計算すると、打設後 10 分、120 分および 180 分における自己平衡温度応力は図-7 のようになる。図より、打設後 10 分の時点でコンクリート側に 8MPa 程度の引張応力が生じていることが分かる。また 180

分後には逆転して SSC 側にも引張応力が発生する可能性も示唆している。この結果はあくまで外部拘束がないと仮定したものであるが、載荷前に目視によりひび割れを確認したところ、一部の供試体で SSC およびコンクリートにひび割れが発生していた。以上より、打継ぎの際にひび割れを抑制する必要がある場合には、事前にコンクリート側を加熱するなどして温度管理を行う必要があるといえる。また打設による温度上昇で、鉄筋に 1000 μ 程度までひずみが発生するが、残留ひずみはほとんど生じておらず、打設熱による鉄筋への影響は少ないといえる。

3.4 実験結果

(1) 破壊性状および荷重変位関係

全ての供試体において、圧縮側 SSC またはコンクリートの圧壊により曲げ破壊した。また圧縮側が SSC の場合、SSC の圧壊により急激に荷重が低下した。圧縮側がコンクリートの場合、コンクリート圧壊後も急激に荷重が低下することがなかったため、降伏変位の 10 倍まで荷重を行い、その後除荷を行った。

圧縮側に SSC が位置するケース (1-1, 2-1, 4-1) の荷重変位関係を図-8 に、コンクリートが位置するケース (1-2, 2-2, 3-1) の荷重変位関係を図-9 に示す。ここでの変位は、曲げ区間中央点における鉛直変位である。荷重変位関係より、圧縮側の材料特性が曲げ挙動を支配していることがわかる。また一体梁と合成梁の顕著な違いが見られないことから、本供試体における SSC とコンクリートの付着は良好であるといえる。ただし荷重変位関係からは、せん断キーの効果は確認できない。本研究では、設計上曲げ破壊先行型となっているため、せん断耐力確保のためのスターラップが配筋されており、これらがズレ防止の効果を発揮しているためだと思われる。

最大耐力の解析値および実験値を表-5 に示す。解析値はファイバー法による断面計算により算出した。最大値に関しては、圧縮側がコンクリートの場合に解析値と実験値がほぼ一致し

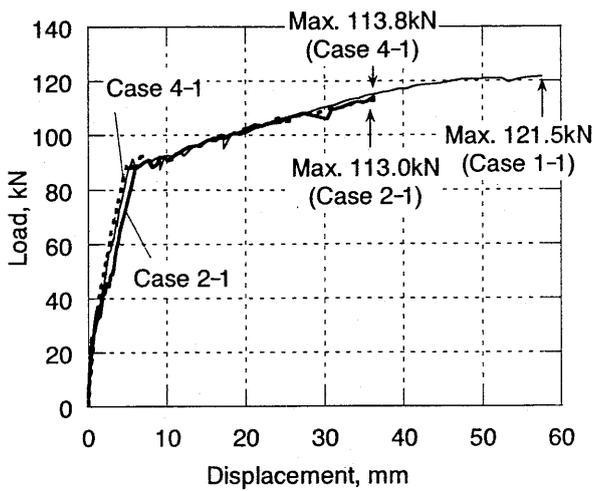


図-8 荷重変位関係 (圧縮側 SSC)

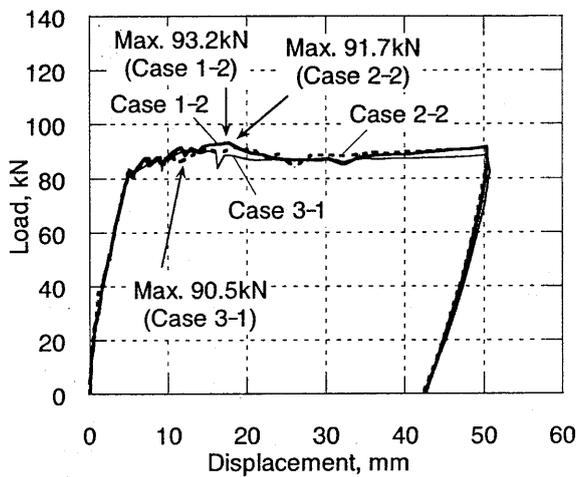


図-9 荷重変位関係 (圧縮側コンクリート)

表-5 最大耐力の実験値と解析値

圧縮側の材料	SSC	コンクリート
解析値	99.70kN	90.27kN
実験値 (合成梁)	113.0kN~ 121.5kN	91.7kN~ 93.2kN

ている。しかし圧縮側が SSC の場合、実験値が解析値より大きくなっている。これは試算に用いた SSC の応力ひずみ曲線として、RC 示方書に示されるコンクリートの曲線式⁵⁾を代用し、SSC の係数 (最大応力: 82.3MPa, 終局ひずみ: 0.01 等) を代入して用いているため、若干の差が生じたものと考えられる。しかし、試算の結果は安全側であるため、合成梁の最大耐力を試算する場合、断面法による試算は設計上有効で

あるといえる。

またせん断耐力の試算を、通常のコンクリートに対する経験式⁵⁾を用いて行った。ただし、コンクリートおよび SSC が受け持つせん断耐力は、合成梁においてそれぞれ半分とし、SSC の耐力については単純に圧縮強度が 82MPa のコンクリートとして計算した。その結果、合成梁のせん断耐力は 106.9kN (載荷荷重としては 213.8kN) と算定された。過去の研究においても⁶⁾、SSC を高強度コンクリートとみなして試算すれば、ほぼ実験値と一致するという結果が得られている。今回もすべて曲げ破壊していることより、合成梁についても SSC を高強度コンクリートとみなせば十分経験式が適用できるといえる。

(2) 断面上のひずみ分布およびズレ変位

曲げひび割れ発生時および降伏時の曲げ区間中央断面におけるひずみ分布を図-10~図-13に示す。ただし図-10 および図-12 は圧縮側 SSC の場合、図-11 および図-13 はコンクリートの場合である。圧縮側 SSC の場合、一体梁である 4-1 での分布はほぼ連続的な線形分布であるが、合成梁での分布は圧縮側において若干非線形となっている。また降伏時では、特に 1-1 (せん断キーなし) の場合においてひずみ分布の不連続が示唆される。一方圧縮側コンクリートの場合、ひび割れ発生時にはほぼ連続的な線形分布となっている。しかし降伏時において、非合成梁の分布に近くなっている。また 2-2 において値の乱れが見られるが、これはひび割れ発生位置等の影響で、引張側の正確なひずみ値が出ていないためである。これらの結果より、それぞれのケースで、降伏時付近までは合成梁がほぼ一体化して挙動しているといえる。ただし、ひずみ分布にはせん断キーの効果は顕著には現れていない。

また図-14 および図-15 に、境界面の横方向ズレ変位を示す。図中 R および L は、二つあるせん断区間のそれぞれ右側および左側の中央位置を示す。ズレ変位は、40kN 付近で発生量が増加

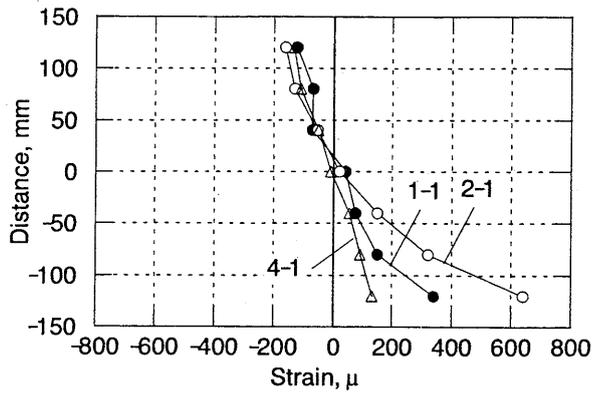


図-10 ひび割れ時ひずみ分布 (圧縮側 SSC)

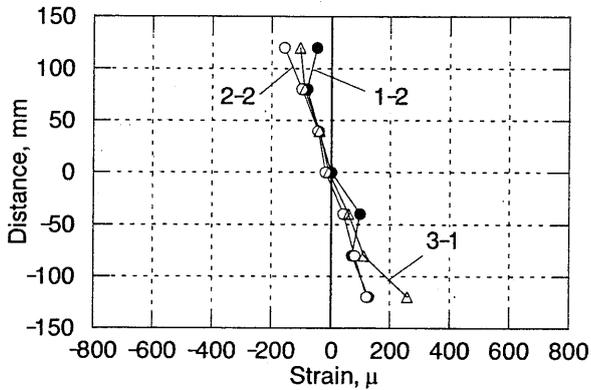


図-11 ひび割れ時ひずみ分布 (圧縮側 C)

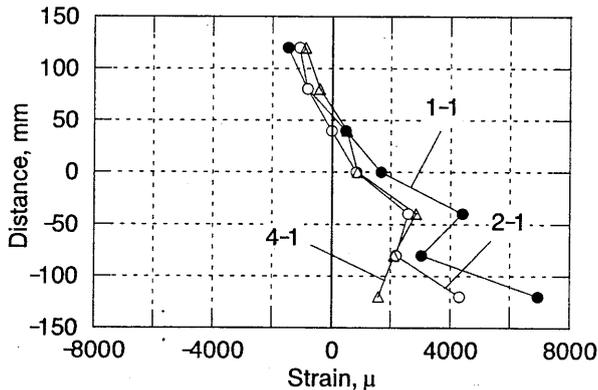


図-12 降伏時ひずみ分布 (圧縮側 SSC)

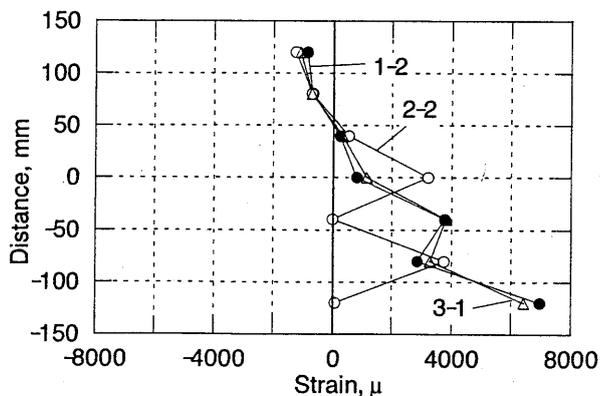


図-13 降伏時ひずみ分布 (圧縮側 C)

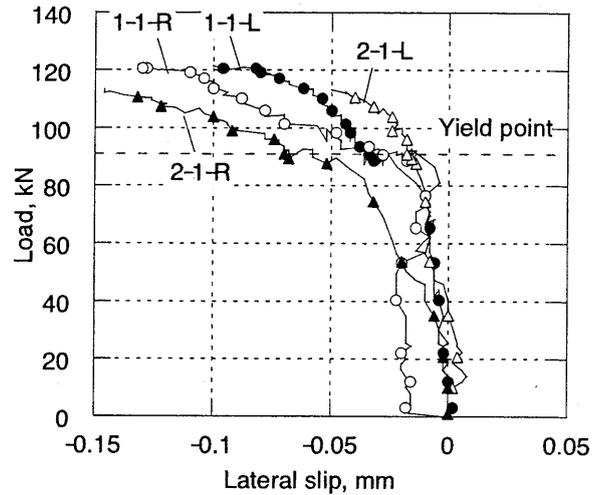


図-14 横方向ズレ変位 (圧縮側 SSC)

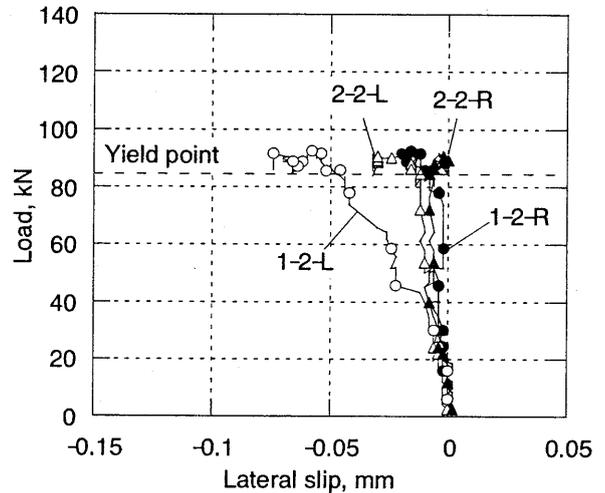


図-15 横方向ズレ変位 (圧縮側 C)

し始め、鉄筋降伏後にさらに発生量が大きくなっている。40kN 付近でのズレ量増加は、スターラップに貼付したひずみゲージの増分量からも確認できる。しかし、ズレの発生量自体は小さいため、境界面でのズレが原因となり破壊に至ることはなかった。

以上より、SSCとコンクリートの合成梁の曲げ挙動については、所定のせん断耐力が得られるようスターラップを配筋することで、十分合成挙動が確保されることが明らかとなった。また打設温度によるひび割れが発生していたが、曲げ挙動自体には影響を与えていないといえる。今後、合成梁のせん断耐力に焦点を当て、より詳細な検討を行っていく予定である。

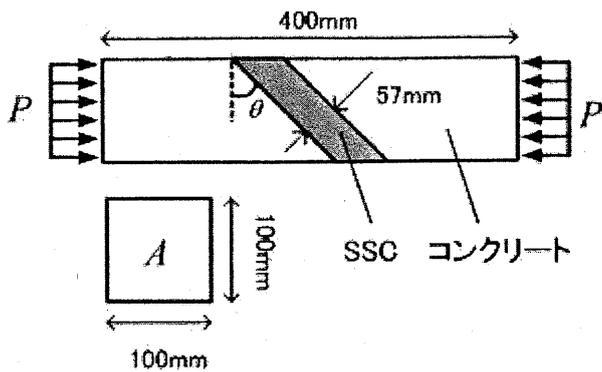


図-16 付着試験供試体

4. コンクリートとSSCの付着試験

4.1 実験概要

コンクリートとSSCのせん断付着強度を得るために、図-16に示す供試体に対して一軸載荷試験を行った。試験パラメータとして、図中境界面角度 θ を 35° 、 45° 、 55° 、 65° とし、それぞれ4つの供試体を準備した。供試体は、まず早強ポルトランドセメントによりコンクリート部を打設し、14日間の水中養生の後、SSCを打設し作製した。ただし付着面は型枠面とし、ワイヤブラシによる処理を行っている。

またここでは、モルクーロン型の破壊基準を仮定し、最大荷重から二軸状態である境界面のせん断付着強度を算定する。すなわち、せん断付着強度 τ_b は、せん断面の法線方向応力 σ_n 、粘着力 c 、摩擦角 ϕ として、以下の式で表される。

$$\tau_b = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (3)$$

一方、破壊時の最大荷重 P 、供試体の断面積 A 、境界面角度 θ とすれば、破壊時の応力が以下の式で求まる。

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \cos^2 \theta \quad (4)$$

$$\tau_b = \frac{P}{A} \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (5)$$

これらの応力より、式(3)中の c 、 ϕ を評価する。

4.2 実験結果

試験結果を表-6に示す。ただし、一部SSCの打設不良が確認されたため、実質の付着面積を用いて補正している。また 35° 、 45° 、 55° の供

表-6 せん断付着応力試験の結果

θ	No.	P kN	σ_n MPa	τ_b MPa
35°	1	348.5	39.10	27.38
	2*	529.0	38.25	26.78
	3	321.0	36.14	25.31
	4	363.0	38.06	26.65
45°	1	353.0	29.23	29.23
	2	391.5	28.00	28.00
	3	391.5	26.70	26.70
	4	399.0	25.63	25.63
55°	1	450.5	18.49	26.41
	2	309.0	15.46	22.08
	3	430.0	18.22	26.02
	4	428.0	17.75	25.35
65°	1	126.0	2.50	5.36
	2	137.5	母材破壊	
	3	117.5	母材破壊	
	4	作製不良により試験不可		

*表面処理なし

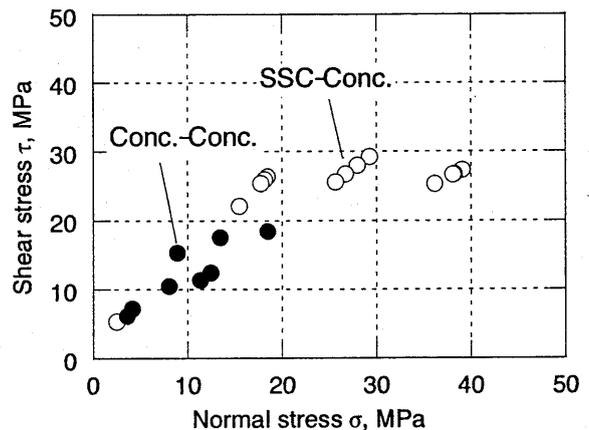


図-17 直応力-せん断応力関係

試体に用いられているコンクリートの試験時圧縮強度は 58.2MPa であったが、 65° に用いられているコンクリートの圧縮強度は 18MPa と極端に低かった。そのため 65° の供試体については、ほとんどが母材で破壊し、界面で破壊したケースは一体のみであった。また以上の直応力およびせん断応力をプロットしたものを図-17

に示す。同図には、コンクリートに対し同様のせん断試験を行っている文献7)の結果も示してある。文献7)に用いられている新旧コンクリートの圧縮強度は、それぞれ 46.8MPa, 48.8MPa である。図より、SSCの直応力-せん断応力関係にある程度の傾向がみられる。しかし今回の実験では、法線直応力が小さいデータ、すなわち境界面角度が大きいデータが不足しているため、破壊曲線の正確な摩擦角と切片を見つけることが出来なかった。しかし、コンクリートのデータと比較すれば、ほぼ同等の付着強度が得られているといえる。また界面の状態により、付着強度が異なることが予想されるため、界面の処理状態を考慮に入れた検討を行っていく予定である。

5. まとめ

SSCを補修材として適用することを目的に、硫黄高炉スラグ固化体(SSC)とコンクリートの合成梁に対して曲げ試験や簡易的な付着せん断試験を行い、合成構造の力学挙動を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 打設時の温度勾配により、既設コンクリート側およびSSC側にも温度ひび割れが発生する可能性があることがわかった。ひび割れを制御する必要がある場合には、温度管理等の注意が必要である。しかし、残留応力等による影響は見られなかった。
- 2) 合成梁の曲げ試験の結果、すべての合成梁において、合成境界面の破壊ではなく、圧縮側コンクリートまたはSSCにおいて圧壊が生じ終局に至った。さらに荷重変位曲線より、圧縮側の材料特性により最大荷重やじん性が決定されており、合成構造は一体梁として挙動しているといえる。
- 3) 曲げ区間中央断面のひずみ分布、およびせん断区間中央の横方向ズレ変位より、降伏までの曲げ変形に対しては、ほとんど境界のズレは確認できなかった。降伏以降は多少のズレが発生しているといえるが、境界

のズレが終局状態を誘発することではなく、合成構造を確保して挙動しているといえる。

- 4) 簡易的な付着せん断試験を行った結果、コンクリートとSSCの付着は、コンクリートによる打継ぎと同等の強度を有することがわかった。今後、界面の処理状態や、小さい応力状態での数値を充実させ、せん断付着力の評価を行っていく予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、小野紘一京都大学名誉教授の多大なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。また曲げ試験の遂行には、五洋建設技術研究所の方に、供試体作製には新日本石油室蘭製油所の方にご協力頂いた。さらにせん断付着試験の遂行には、日建設計シビルの波佐波浩一氏(試験当時京都大学修士課程学生)にご協力頂いた。ご協力頂いた方々に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 福井ほか：硫黄・高炉スラグ固化体の基礎物性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23 No.2，pp.913-918，2001.
- 2) 西ほか：硫黄コンクリートの諸性状，セメント技術年報，Vol.37，pp.533-536，1983.
- 3) 水上ほか：硫黄モルタルの諸性状とその利用，セメント技術年報，Vol.38，pp.491-494，1984.
- 4) 秋山正成：鉄鋼スラグ・石炭灰等を用いた硫黄固化体の開発，環境管理，Vol.39 No.3，pp.31-37，2003.
- 5) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧，技報堂出版，1996.
- 6) 小野ほか：硫黄・スラグ固化体(SSC)はりの曲げせん断性状に関する研究，第56回年土木学会次学術講演会，土木学会，V-219，438-439，2001.10
- 7) 林ほか：コンクリート打継ぎ部のせん断付着性状の評価に関する研究，土木学会論文集，No.690/V-53，pp.35-43，2001.11