

論文 コンクリートと鋼材摩擦面の摩擦すべり挙動に関する研究

吉岡 智和*1・大久保 全陸*2

要旨: 著者らは、構造骨組とRC造壁を摩擦すべり接合により連結する耐震壁の開発を目指し、それに適用する簡易なボルト締付型摩擦すべり接合に関する研究を行っている。本報では、そのような摩擦すべり接合として、コンクリート板と鋼板をボルトにより締め付けた接合部を提案し、その動的な摩擦すべり特性を把握するため、接合部を模擬した接合要素による動的載荷実験を実施した。実験結果から、繰り返し摺動に伴うすべり係数の変化特性に対する諸要因の影響を明らかにし、すべり係数の変化特性評価式の提案を行った。

キーワード: 摩擦すべり接合, コンクリート, 鋼材, すべり係数, 動的載荷実験

1. はじめに

著者らは、図-1に示すような、構造骨組と RC 造壁を摩擦すべり接合により連結した耐震壁システムの研究を行っている。このシステムでは、大地震時に、接合部に摩擦摺動を生じさせ、RC 造壁へのせん断力の入力を抑制するとともに、その摩擦すべり挙動をエネルギー消費機構として利用するものである。著者らは、そのような摩擦すべり接合の一手法として、骨組に取り付けた鋼製金物とRC造壁を直接ボルトにより締め付けた簡易な接合法を提案する。しかしながら、このようなコンクリートと鋼材を組み合わせボルトにより締め付けた摩擦面における動的繰り返し摺動時の摩擦すべり特性

は、未だ把握されておらず不明な点が多い。

そこで本研究では、コンクリート板と鋼板をボルトにより締め付けた接合部要素試験体の動的載荷試験を実施し、すべり速度をはじめとする5つの実験変数が繰り返し摺動に伴うすべり係数の変化特性に与える影響を検討し、その結果をもとに、すべり係数の変化特性の定式化を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-2 に接合要素試験体形状を、図-3 に鋼板およびコンクリート板形状を示す。試験体は、1枚の鋼板を2枚のコンクリート板で挟み、これを1本の P

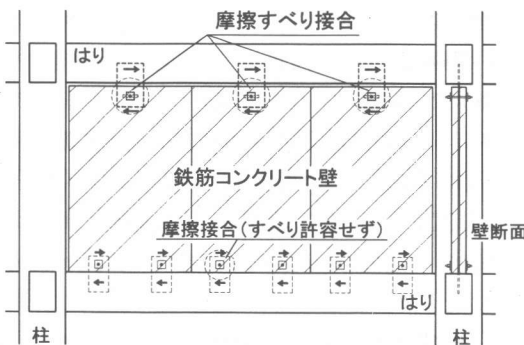


図-1 摩擦すべりを利用した耐震壁の概念

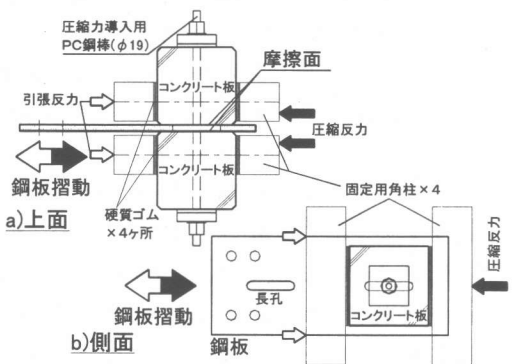


図-2 接合要素試験体形状

*1 九州芸術工科大学助手 芸術工学部環境設計学科 工修(正会員)

*2 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科 工博(正会員)

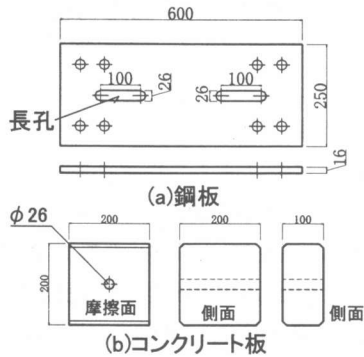


図-3 鋼板およびコンクリート板の形状

C鋼棒で締め付け圧着し、中央の鋼板に強制変位を与え摺動させる2面摩擦接合型式の接合要素とした。なお、試験体の形状は、加力の容易さを考慮して決定したもので、想定する摩擦すべり接合部のディテールと必ずしも一致していない。なお、2面摩擦接合形式の接合は、図-1に示すように、1つの手法として実現可能である。

試験体を構成する鋼板は、幅 250mm×長さ 600mm×厚さ 16mm の平板で、材質は SS400 とし、表面のミルスケールは未除去のまま実験に使用した。コンクリート板は、180mm×200mm の摩擦面を有する厚さ 200mm もしくは 100mm の直方体とした。コンクリート板の摩擦面は化粧合板型枠を2日間置き脱型した表面とした。なお、コンクリート板の摺動方向に直交する出隅部は、摺動に伴う引っかかりを防ぐため、約 10mm の面取りを行った。表-1 に、各試験体に用いたコンクリートの調査を示す。

締め付け用ボルトは、呼び径 19mm の PC 鋼棒を使用した。また、ボルト貫通用の孔として、鋼板に幅 26mm、長さ 100mm の長孔を、コンクリート板に直径 26mm の円孔をそれぞれ設けた。

表-2 に本実験で実施した試験シリーズの一覧を示す。設定した実験変数は、最大すべり振幅 (40, 80mm)、平均すべり速度 (4, 1cm/s)、コンクリート強度 (50, 30MPa)、コンクリート板厚さ (200, 100mm) および初期導入ボルト軸力 (120kN, 90kN, 60kN) の 5 変数である。なお、CS1~5 シリーズでは、同一シリーズ・同一条件下において 4 体の試験を行い、CS61, CS62 では各 1 体ずつ、計 22 体の

表-1 コンクリートの調査

Fc (MPa)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			単位重量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	水	セメント	粗骨材		
50	3	37	38	180	180	154	242	394	180	486	616	1044
30	3	54	38	180	180	106	260	424	180	333	663	1124

表-2 試験シリーズ

試験シリーズ	試験体数	ボルト軸力 (kN)	板厚 (*1) (mm)	Fc (*2) (MPa)	平均すべり速度 (cm/s)	最大振幅 (mm)	加振波 #
CS1	4	120	200	56.8	4	40	1
CS2				51.6		80	
CS3				56.8	1	40	
CS4				35.9	1		
CS5				57.0			
CS61	1	90	200	51.6	4	40	1
CS62	60						

*1:コンクリート板厚さ,*2:コンクリート圧縮強度

表-3 加振正弦波

	振幅 (mm)	10	20	→	40	→	20	10
#1	振動数 (Hz)	2	1	→	0.5	→	1	2
	繰返し数	1	1	→	10	→	1	1
	振動数 (Hz)	0.5	0.25	→	0.125	→	0.25	0.5
#2	振動数 (Hz)	1	1	→	10	→	1	1
	繰返し数	1	1	→	10	→	1	1
	振動数 (Hz)	10	20	40	80	40	20	10
#3	振動数 (Hz)	2	1	0.5	0.25	0.5	1	2
	繰返し数	1	1	1	5	1	1	1

試験を実施した。

2.2 加振方法および計測方法

加振は、大地震時に接合部に生じるすべり応答を模擬するため、2枚のコンクリート板を固定した状態で、200kN 動的アクチュエータにより、中央に挟んだ鋼板に対して、押し引き繰返し強制変位を与えた。鋼板に与えた強制変位の時刻歴は正弦波とした。加振に使用した正弦波の諸元を表-3に示す。なお、与えた正弦波は各 Cycle の平均すべり速度が一定となるよう設定し、加振波 1, 3 では平均すべり速度を 4cm/sec、加振波 2 では 1cm/sec とした。

計測した物理量は、ロードセルにより計測した鋼板の強制変位に伴い生じる荷重、2つの変位計により計測した鋼板とコンクリート板間の相対すべり量、PC 鋼棒に貼り付けた 3 枚のひずみゲージから得られたひずみより換算したボルト軸力である。

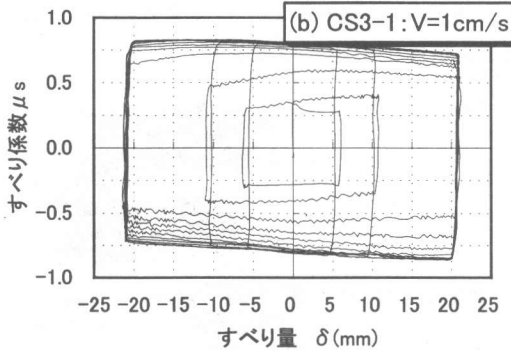
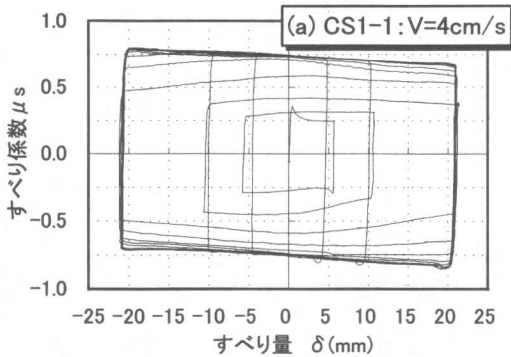


図-4 すべり係数とすべり量の関係

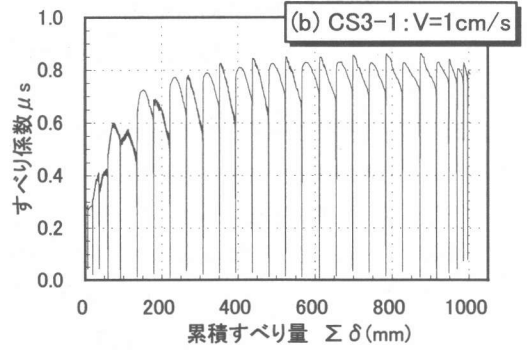
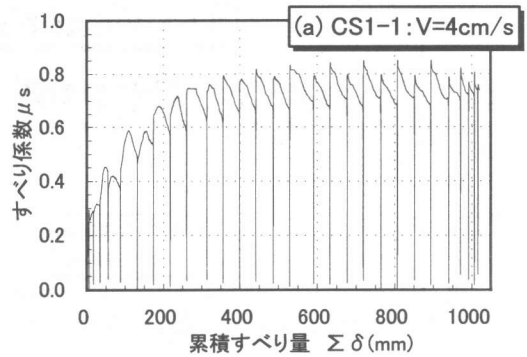


図-5 すべり係数の絶対値と累積すべり量の関係

3. 実験結果

3.1 すべり係数とすべり量の関係

図-4, 5 に CS1-1, CS3-1 のすべり係数とすべり量の関係およびすべり係数の絶対値と累積すべり量の関係を示す。なお、本論中で使用するすべり係数は、鋼板の強制変位に伴い生じた荷重を初期導入ボルト軸力と摩擦面数(2)で除した値を表し、累積すべり量は繰返し摺動を受ける摩擦面が摺動開始から該時点までに経験した正負すべり量の絶対値の総和を表すものとする。

図-5(a)から、CS1-1 のすべり係数は処女摺動開始直後から累積すべり量の増加に伴い上昇するが(すべり係数上昇領域と称す)、累積すべり量がある値に達した後は一定範囲の安定したすべり係数を保持しながら摺動する(すべり係数安定領域と称す)傾向が観察される。図-4(a)から、すべり係数安定領域での1Cycle におけるすべり係数とすべり量の関係は、摺動開始時にすべり係数がやや大きく、摺動終了時にすべり係数がやや小さくなる傾向が観られるが、概ね剛塑性型の履歴曲線を示した。

CS1に比較し、平均すべり速度の小さい CS3 シリーズ 1 体目の試験体(CS3-1)においても、すべり係数とすべり量の関係および累積すべり量の増加に伴うすべり係数の変化特性に関して、CS1-1 とほぼ同様の性質が観察された。

3.2 繰返し摺動に伴うすべり係数の変化特性に与える諸要因の影響

前節で示した CS1-1, CS3-1 に観られる累積すべり量の増加に伴うすべり係数の変化特性に関して、CS1 シリーズの実験結果と CS2~6 シリーズの実験結果の比較を行い、設定した実験変数(最大すべり振幅、平均すべり速度、コンクリート強度、コンクリート板厚さおよび初期導入ボルト軸力)が、その変化特性に与える影響について検討を行った。

最初に、最大すべり振幅の影響に着目して実施した CS1 と CS2 シリーズの実験結果の比較を行う。両シリーズのすべり係数の変化特性を、図-6 に示す。図中のすべり係数は各 Cycle においてすべり量がゼロとなる時点、すなわち、半 Cycle 終了点および Cycle 終了点での観測値を表したものであ

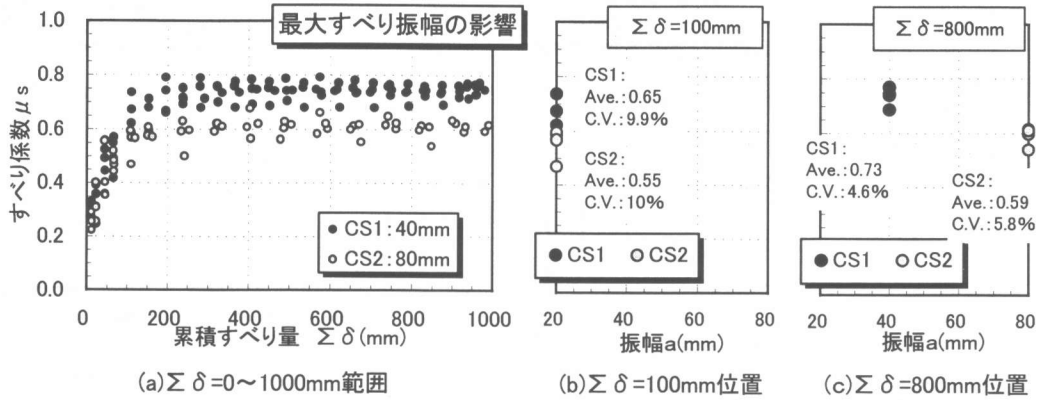


図-6 Cycle 毎のすべり係数の変化特性 (CS1 と CS2 の比較)

る。なお、以降本論で使用する Cycle 毎のすべり係数は、上記観測値を示すものとする。

両シリーズの実験結果を比較すると、CS2 は CS1 と同様のすべり係数の変化傾向を示すが、すべり係数の大きさは全ての摺動範囲で CS1 を下回る結果となった。すなわち、図-6(b) に示す両シリーズが同一すべり振幅で摺動する 20mm 振幅 Cycle (累積すべり量 $\Sigma \delta = 100\text{mm}$) においても、図-6(c) に示す両シリーズが異なるすべり振幅で摺動する範囲 ($\Sigma \delta = 800\text{mm}$) と同様に、CS2 のすべり係数は CS1 のそれを下回っている。従って、両シリーズのすべり係数の差異は、すべり振幅の大きさの違いに起因するものではないと推測される。また、図-7 に示す実験終了後に観察された鋼板摩擦面の長孔周辺の摺動痕分布 (■部分) は、両シリーズにおいて大きく異なっている。CS1 では摺動痕が長孔に沿って広範囲に分布しているのに対し、CS2 では、長孔の左上および右下部分に集中した摺動痕が観られる。以上の観察より、先に述べた両シリーズのすべり係数の違いは、摩擦接触面が小さく集中しかつ不均等になったことに起因する可能性が考えられる。ただし、この点に関しては、今後検討を要する課題である。

続いて、他の実験要因の影響を検討するため、図-8 に CS1 と CS3~6 シリーズのすべり係数の変化特性の比較を示す。比較の結果から、CS3、CS4 では、CS1 と同様のすべり係数の変化特性が観察され、ほぼ同程度のすべり係数の大きさおよびばら

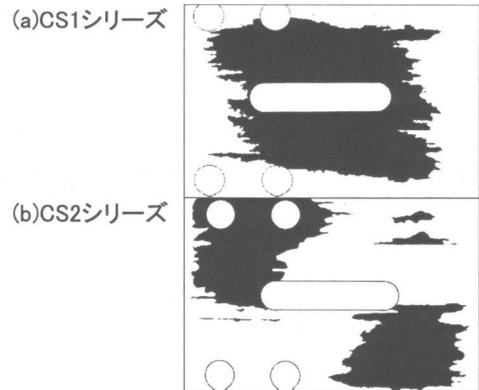


図-7 実験終了後の鋼材摩擦面

つきを示した。従って、平均すべり速度 (1~4 cm/sec) およびコンクリート強度 (36~57MPa) については、本実験範囲内では、すべり係数の変化特性に大きな影響を与えないと考えられる。

一方、CS1 に比較し、板厚の薄いコンクリート板を使用した CS5 では、累積すべり量が約 400mm 超過した後に、すべり係数が緩やかに減少する傾向が観察された。CS1、5 の 14Cycle 終了時のすべり係数の平均値は 0.75、0.63 となるのに対し、初期導入ボルト軸力に対する 14Cycle 終了時のボルト軸力低下率の平均値は 2.9%、5.3% となっており、繰り返し摺動に伴うボルト軸力の低下がすべり係数の減少を誘引したとは考えられない。このすべり係数の緩やかな減少の原因についても、今後検討を要する課題である。

最後に、初期導入ボルト軸力の影響を検討するため、CS1、CS61 および CS62 の実験結果の比較

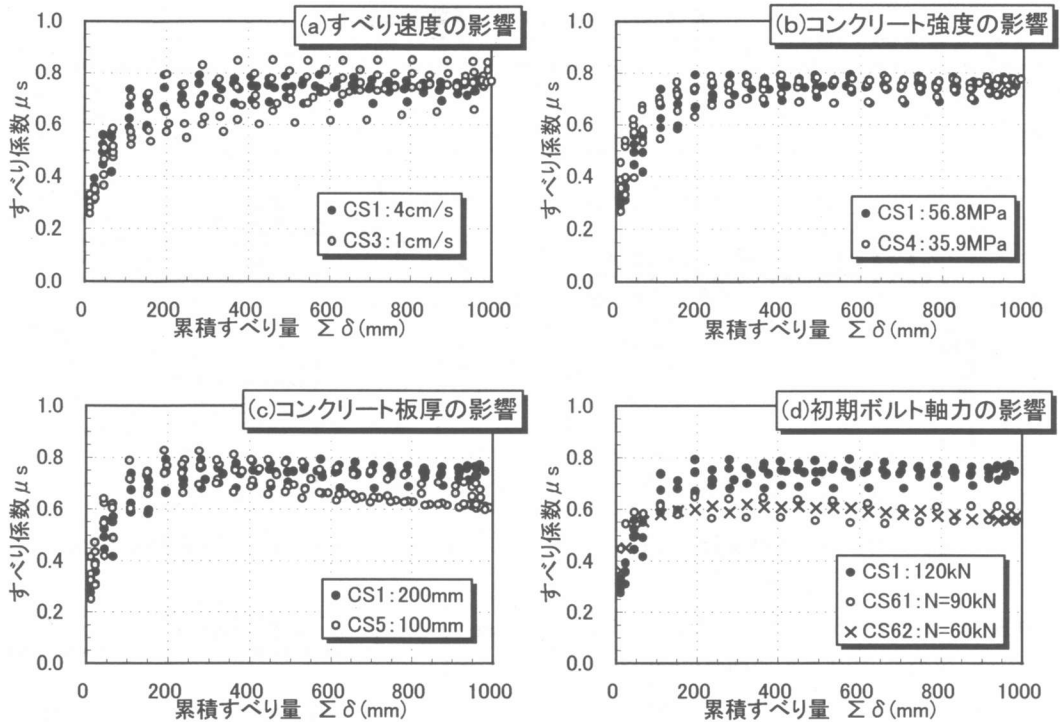


図-8 すべり係数の変化特性に対する諸要因の影響

を行った。比較の結果から、ボルト軸力 60kN および 90kN を導入した CS61, 62 のすべり係数は、CS1 シリーズに比較し小さい値で推移している。しかしながら、CS61, CS62 では、ほぼ同程度のすべり係数を保持し摺動する結果となったのに加え、先に述べた初期導入ボルト軸力 120kN の CS2 と同程度のすべり係数を示す結果となった。これらの結果を考慮すると、初期導入ボルト軸力の範囲が 60～120kN であれば、すべり係数の変化特性に与える影響は小さいものと推測出来る。ただし、本実験では初期導入ボルト軸力として 120kN 以外の実験データサンプルが極めて少ないため、上記の傾向を確認するには至っていない。

4. 繰り返し摺動に伴うすべり係数変化特性の定式化

3. 2節の検討結果から、最大すべり振幅、平均すべり速度、コンクリート強度および初期導入ボルト軸力が本実験で設定した範囲内では、同一累積すべり量で観測されるすべり係数に多少の変動は

あるものの、すべり係数が累積すべり量の増加に伴って変化する特性の傾向は概ね一致している。また、コンクリート板厚さが小さいとすべり係数の変化特性に違いが表れるが、累積すべり量が 1000mm 以下の範囲では、その差は比較的小さいものであった。そこで、本章では、CS1～6 シリーズ 22 体の実験結果をもとにした統計解析を行い、実験条件の違いに関わらず、累積すべり量の増加に伴うすべり係数の変化特性を統一して評価する算定式の定式化を試みる。

なお、評価式の定式化に当っては、すべり係数変化特性を、累積すべり量が 180mm に達するまでのすべり係数上昇領域と、それ以降のすべり係数安定領域に分け表現することとした。次に、すべり係数変化特性の評価式を示す。

$$1) 0\text{mm} \leq \Sigma \delta \leq 180\text{mm}$$

$$c_s \mu_s = 0.69 - 1.25 \times 10^{-5} \cdot (\Sigma \delta - 180)^2 \quad (1)$$

$$2) 180\text{mm} < \Sigma \delta \leq 1000\text{mm}$$

$$c_s \mu_s = 0.69 \quad (2)$$

ここで、 $\Sigma \delta$: 累積すべり量(mm)

表-4 Cycle 毎のすべり係数の推移

	Start	1Cyc	2Cyc	3Cyc	4Cyc	5Cyc	6Cyc	7Cyc	8Cyc	9Cyc	10Cyc	11Cyc	12Cyc	13Cyc	14Cyc
$\Sigma \delta$ (mm)	0	23	67	153	239	325	411	497	583	668	753	838	925	967	988
平均値	0.36	0.38	0.54	0.65	0.68	0.69	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68
標準偏差	0.035	0.084	0.069	0.072	0.085	0.076	0.077	0.078	0.077	0.083	0.075	0.080	0.076	0.082	0.084

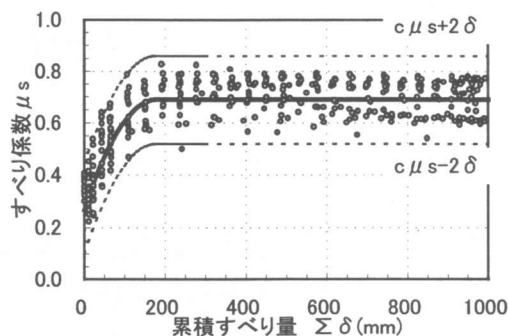


図-9 すべり係数評価式の検証

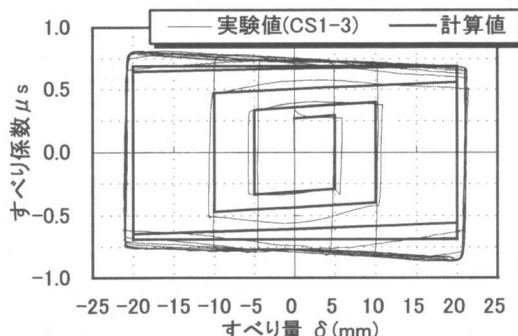


図-10 すべり係数とすべり量関係の比較

式(1)は、累積すべり量 200mm までに観測された Cycle 毎のすべり係数の実験値について、2次多項式モデルを用いた回帰分析を行い得られたものである。式(2)のすべり係数は、式(1)の極値をもとに決定した。次に、全試験体(22 体)の処女摺動開始時(Start)および各 Cycle 終了時(1~14Cycle)の累積すべり量の平均値、すべり係数の平均値および標準偏差を表-4 に示す。表-4 に観られるように、式(2)と4Cycle 以降のすべり係数は概ね一致している。

続いて、図-9 に、各試験体の Cycle 毎のすべり係数の実験値と式(1)、(2)を比較し示す。式(1)、(2)の計算値に対し、表-4 に観られる最大標準偏差 $\sigma = 0.085$ の2倍の値を加減し得られる値で示される 95%信頼区間 ($c\mu_s + 2\sigma \sim c\mu_s - 2\sigma$) 内に、概ね全ての実験結果を包含することを確認できた。

さらに、式(1)、(2)より算定したすべり係数とすべり量の関係およびすべり係数と累積すべり量の関係を CS1-3 の実験結果と比較し、図-10 および図-11 に示す。両者は、概ね良い対応を示す結果となった。以上の結果から、ボルトにより締め付けたコンクリートと鋼材摩擦面の繰り返し摺動に伴うすべり係数の変化特性は、本実験で設定した実験変数の範囲においては、式(1)、(2)により、概ね評価可能であると考えられる。

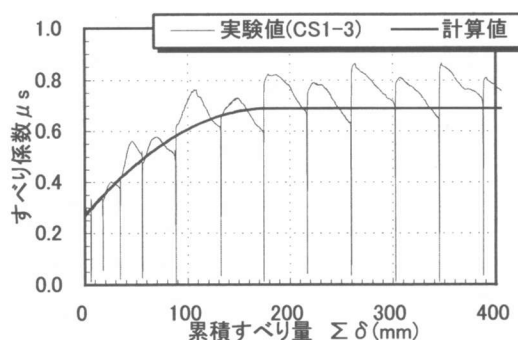


図-11 すべり係数と累積すべり量関係の比較

5. まとめ

コンクリート板と鋼板をボルトで締め付けた接合要素試験体の動的載荷実験を実施し、累積すべり量の増加に伴うすべり係数の変化特性に及ぼすすべり振幅、平均すべり速度、コンクリート強度、コンクリート板厚さおよび初期導入ボルト軸力の影響について検討し、最後にすべり係数の変化特性の定式化を試みた。しかし、摩擦接触面の大きさの違いによると思われるすべり係数の変動等の未解明な課題も多く、さらなる資料の蓄積が望まれる。

【謝辞】

本実験の実施にあたり、フドウ建研(株)、黒沢建設(株)、(株)ピー・エスおよび(株)富士ピー・エスの協力を得た。ここに記して、謝意を表わす。