コンクリートせん断ひび割れの最適制御実験法の提案

—ひび割れ面高精度制御型せん断加力システムの開発と最適制御パラメータの同定 その1—

PROPOSAL OF AN OPTIMIZED EXPERIMENTAL METHOD FOR CRACKED CONCRETE

Development of a shear loading system type of highly controlled crack surface
and identification of optimized control parameter Part 1

高瀬 裕也*, 佐藤 良介**, 和田 俊良***, 上田 正生****

Yuya TAKASE, Ryosuke SATO, Toshinaga WADA
and Masaiki UEDA

In this study, a new experimental method has been proposed in order to elucidate shear transfer mechanism of cracked concrete. For the purpose of controlling transition of crack width under shear stress mode precisely and automatically, 4-axes loading system based on optimal control theory and PID algorithms has been introduced.

As the results, it is proved that this kind of experiments should be controlled not manually but automatically for the accuracy. Moreover, the experimental data obtained by using this system also identify the optimal PID values for this kind of experiments.

Keywords : Concrete Crack Surface, Crack width, Shear Transfer, The Experimental System, PID-Control Theory

コンクリートひび割れ面、ひび割れ幅、せん断応力伝達機構、実験システム、PID 制御理論

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造の部材の一部分にひび割れが発生し、そこに何らかの原因で更にせん断変形が強制されると、分離された面ひび割れ凹凸面の相互接触に起因して、せん断応力のみならず垂直応力を含む複雑な応力が発生することになる。一般にこのメカニズムを「せん断応力伝達機構」と呼び、この機構自体がコンクリートの破壊現象の重要モードの一つであることは自明である。また更には、ひび割れ面を跨いで鉄筋が存在する場合、鉄筋も応分の応力を分担し時には降伏に至ることがあるため、せん断応力伝達機構の解明は、鉄筋コンクリート部材の耐荷一変形性能を支配する最重要課題の一つに位置づけられている。

コンクリートのせん断応力伝達機構の解明を意図した既往の実験研究（以下、せん断ひび割れ実験^{例えば1)~7)}と略称する）は、著者らの知る限りでは1960年代まで遡ることができる。しかし今日においても尚、せん断実験のための計測・制御・加力の各方法が統一されていないため、これら既往の実験値には、計測・制御・加力手法の差異に起因する誤差が含まれている可能性が高く、実験値相互間の比較さえ心もとないのが現状である。

この原因は恐らく、粗面であるひび割れ面の凹凸のランダムさに随伴して、せん断に伴うひび割れ面間の相互接触を大きく左右する「せん断方向と垂直方向の変位、そしてこれに応答する両方向の加力量」を厳密に制御することが極めて困難であり、計測結果の再

現性や安定性に大きな影響をおよぼすことになるためと推察される。

既に触れたように、3次元として展開されるひび割れ面の形状は極めて不規則性に富んでいるため、ごく僅かな載荷一変位経路の差異が発生する応力の値に大きな影響を与える可能性がある。従って、コンクリートのせん断ひび割れ実験において信頼できる有用なデータを獲得するには、「せん断面と垂直な方向の変位が厳密に保持・制御可能である」ことが必要不可欠となる。これは結果として、この種の実験装置には、「ひび割れ面のランダムな凹凸に起因する複雑な応答に正確かつ柔軟に追従できる」という厳しい要求性能を満たすことが求められることを意味している。

しかしながら、打ち継ぎ接合面を対象とした実験においては、河野ら⁸⁾の3点加力法が見受けられるものの、一体連続のコンクリートに形成されたひび割れ面を対象とした既往の実験方法を精査した限りでは、ひび割れ面を垂直方向に拘束・制御するために用いられているシステムは、2軸以下の加力法が殆どで3軸以上の多軸加力を採用した研究を見出すことはできなかった。当然のことながら、ひび割れ面という面を保持し制御するためには最低限3軸加力が必要なはずであり、このような既往の加力システムではひび割れ面を高精度で拘束・制御するにはかなり無理があるように思われる。

以上のような研究の現況を踏まえ、著者らはここ数年来、コンクリートのせん断応力伝達機構を詳細に解明するために必要な「多

* 北海道大学大学院工学研究科建築都市空間デザイン専攻
大学院生・工修

** 東急建設技術研究所 工博

*** 北海道職業能力開発大学校建築科 講師・工博

**** 北海道大学大学院工学研究科建築都市空間デザイン専攻
教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, M. Eng.

Tokyu Construction Company, Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture, Hokkaido Polytechnic College, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

表 1 既往のコンクリートせん断ひび割れ実験法の概要と実験項目の設定一覧

実験者	せん断加力	載荷履歴	垂直加力	垂直軸数	垂直制御	τ - δ	τ - σ	ω 推移	最大出力値			
									δ (mm)	τ (Mpa)	ω (mm)	σ (Mpa)
Millard ¹⁾	不明	単調載荷	不明	1	手動	掲載	σ - ω で掲載	掲載	1.75	5.05	0.0~1.5	-4
李 ²⁾	不明	両振幅繰返し	CHJ	2	手動	掲載	掲載	未掲載	± 1.5	± 8	0.1~1.0	-6
佐々木 ³⁾	OJ	単調載荷	OJ	2	手動	掲載	掲載	未掲載	1.5	11	0.05~0.3	-17
篠原 ⁴⁾	ACT	片振幅繰返し	ACT	1	自動	掲載	掲載	未掲載	1.4	13	0.0~0.8	-14
長谷川 ⁵⁾	ACT	両振幅繰返し	ACT	1	自動	掲載	未掲載	未掲載	± 1.0	± 8	0.6~0.8	—

OJ:オイルジャッキ ACT:アクチュエータ CHJ:センターホールジャッキ δ :せん断変位 τ :せん断応力 ω :ひび割れ幅 σ :垂直応力

軸加力法によるせん断ひび割れ実験装置」の開発を意図して、試行錯誤を重ね試作・改良に勤めてきた。しかしここに至って初めて、著者らの当初の要求性能を満たし得る、ひび割れ面を高精度でコントロール可能なコンクリートせん断ひび割れ実験装置（以降、著者らはこの装置を「ひび割れ面高精度制御型せん断加力システム」と呼称する）を、ほぼ完成し得たと確信できる段階に至った。

本論文では、著者らが新たに加力軸力数4（以下、4点加力と記述する）を採用して開発した「ひび割れ面高精度制御型せん断加力装置」の機構の概要と、そのPID制御理論に基づく自動制御手法について詳述し、さらに、実際にコンクリート試験体を幾つか製作して基礎的な実験を行い、自動制御時におけるPID制御パラメータの最適値の同定を試みる。さらにまた、著者らの本せん断実験装置を手動制御で動作させた場合の実験をも実施して、自動制御で得られた結果との比較を通して手動制御実験における問題点の考察を行ってみる。

2. 既往のせん断ひび割れ実験法のシステム構成の変遷と考察

せん断ひび割れ実験によって獲得すべき最も基本的な資料は、せん断応力伝達機構を記述するための「せん断変位 δ 、垂直変位 ω （以下、ひび割れ幅 ω と呼ぶ）、せん断応力 τ そして垂直応力 σ の4量」であり、本研究ではこれを「せん断ひび割れの基本4量」と略称する。この分野における先駆者達は、この基本4量をより正確に取得するために、これまで幾多の段階を踏みつつ、個々の実験システムの高機能化への努力を続けてきたようである。

せん断ひび割れ実験の始まりは素朴なPush-off加力であり、その後、ひび割れ面の垂直方向（ひび割れ幅もしくは垂直応力）が拘束されるようになり、せん断方向の載荷形式として、逆対称2点曲げ加力、直せん断加力、アクチュエータ加力へと発展を見せた。実験時における制御手法についても、手動から自動化が図られており、研究者はその時代の機器を縦横に駆使し、工夫に工夫を重ねたシステム^{1)~8)}を開発してきた。この種の研究例の数は膨大であるが、表1にはその中から、本システム設計仕様を設定する際に多大な示唆を与えてくれた主要な実験研究の一覧を揚げた。

同表1のMillardら¹⁾は、ひび割れ試験体をコンパクトな専用載荷フレームに組込み、せん断に逆対称2点曲げ加力を、ひび割れ面の垂直方向に単軸3点加力を組入れて、せん断応力伝達下での補強筋のdowel効果を単調載荷経路で検証した。ひび割れ面は引張加力によって形成され、その後、せん断加力下でのひび割れ面の受動的な自由拡幅が計測されて、せん断ひび割れの基本4量の全てが報告されている。しかし、この実験では全ての試験体にdowel筋が埋設されて

おり、コンクリートのせん断応力伝達機構そのものを純粋に知ることとはできない。

李・前川²⁾は、初めてひび割れ幅の拘束に2軸のセンターホールジャッキによるアクティブ加力を導入し、逆対称2点曲げ加力による正負交番繰返しせん断実験を行った。そしてまた、その計測資料が、ひび割れ面の接触密度関数（傾斜密度関数）を用いた塑性モデルによって見事にシミュレートされると報告している。周知のようにこの研究は、以後のせん断ひび割れの実験と理論の展開に、甚大な影響を与えた。しかしこの研究は、せん断ひび割れ実験のエポックメイキングであるものの、ひび割れ幅の初期設定値が記載されているのみで、その計測値そのものの推移は、経過が明らかにされておらず不明である。

佐々木ら³⁾は、コンクリートを楔で割裂いてひび割れ面を形成させ、その面外変形をH型鋼で押さえながら、ひび割れ幅を2軸のオイルジャッキで拘束し、これに直せん断力を加えている。載荷経路は単調載荷のみであり、繰返し挙動は取扱われていない。

篠原ら⁴⁾と長谷川ら⁵⁾の基本システムはほぼ同一のようである。この2つの実験では、ひび割れ試験体をH型鋼と棒鋼を組合わせた巧緻な治具で固定し、ひび割れ幅の拘束に1本のアクチュエータを設置して対処している。さらにこれに、せん断方向の2本のアクチュエータと反力ジャッキを組合わせた加力システムを自動制御し、以前の研究と比較するとひび割れ面の制御法が大巾に向上しており、既往の実験法の中では、最高の精度を有しているものと判断される。しかし、両実験の報告ともに、自動制御のパラメータが実験結果に及ぼす影響については全く言及されていない。

以上において既往の主要なせん断ひび割れ実験の変遷を概観してきたが、結果として前掲のせん断ひび割れの基本4量すべてが記載されている報告例は、Millardらの補強筋をもつdowel実験以外には見当たらずである。容易に理解し得るように、せん断ひび割れ実験を実施する際に必須となる「ひび割れ面に関する重要な制御項目」は、せん断方向とこれに垂直なひび割れ幅方向の2つの変位量であるが、この際、最も肝要で困難なのは「ひび割れ発生によって上下二つに分離した試験体の上下面を、実験遂行時全般にわたって常に水平を保つ必要がある」ということである。何故ならば、試験体の上下面のいずれかに、僅かでも面外回転（せん断方向に平行か垂直に関らず）変形が生じた場合、それは直ちにひび割れ面に曲げ、時には振りモーメントが作用したことを意味し、結果としてその実験自体が、「せん断実験」から「曲げ等を含むせん断実験」へと、そのカテゴリーを変更してしまったことになるからである。すなわち著者らがここで強調したいのは、試験体の上下面を常に水平を保つ

には、最低限三角形の3頂点を押えた3軸加力が必要であるということである。この観点からすれば、先に言及した「ひび割れ面と垂直な方向の制御を2軸（時には1軸）加力で行っている既往のせん断実験」の多くは、この「曲げ等を含むせん断実験」の範疇に分類され得る可能性から逃れられないように思われる。

3. ひび割れ面高精度制御型せん断加力実験装置と加力自動制御による全システムの概要

本3章では、ひび割れ幅を多軸4点制御する本実験システムの詳細を、せん断ひび割れ試験体から、計測、加力機器、加力フレーム、制御システムそして自動制御アルゴリズムまで、その連関する全ての要素について解説を加えることにする。

3.1 新しいせん断加力システムのための要求性能

前2章では既往のコンクリートせん断実験手法について概観し、せん断実験手法の発展の経緯とこの種の試験における計測・制御・加力手法に関わる問題点について若干の考察を行った。以上の結果を踏まえ、著者らは、既往の実験法に見られる弱点を出来る限り克服すべく表2に掲げる項目を、本実験システムの要求性能として念頭におき、ひび割れ面を高精度に制御することが可能な新しいコンクリートせん断加力システムを開発・構築することとした。

表2の左欄には基本的な要求性能項目を、また右欄にはこれに対応するため本システムで設定した性能の範囲を可能な限り具体的に標記した。表に明らかなように、本提案加力システムの最大の特徴

表2 せん断自動拘束加力システムの必要性能

要求性能の項目	具体的な設定性能
ひび割れ面の拘束方法	多軸加力(3軸以上)
高精度な制御方法	自動制御
載荷履歴	正負交番繰返し
試験体の対象せん断面積	6400(80×80)mm ² 以上
最大せん断変位 δ	1.5 mm
ひび割れ幅 w の範囲	0.1~1.0 mm
最大せん断出力	130 kN
最大垂直出力	170 kN

図1 せん断ひび割れ試験体の諸元寸法 (単位: mm)

図2 鋼製取付け固定治具の詳細 (単位: mm)

は、同表の第1行目と2行目に記載されているとおり、①ひび割れ面を高精度にコントロール可能とするため初めて多軸加力を導入する、②実験時の加力経路をPID理論に基づき完全に自動制御化する点にある。また特に、試験体の上面を常に水平に保つには最低限3軸（点）加力が必要であるが、本装置の構築段階における試行錯誤から、3軸では不十分であることが予測されたため、その制御はより複雑になるが実験時における加力動作の柔軟性を優先させ、あえて多軸4点加力を採用することとした。また3行目に載荷履歴を掲げ、その具体性能に正負交番繰返し載荷としたのは、地震時にせん断ひび割れ面に正負繰返し変形が強制されるにも拘らず、既往の研究に「正負交番繰返し載荷下でのせん断ひび割れの基本4量」の全てが記載されているデータが見当たらず、せん断応力伝達機構が有する「エネルギー消費とその塑性化の程度」が正確に同定できないからである。

また本表の4行目は、コンクリート試験体の対象せん断面積に関するものであるが、この試験体せん断面積のスケールの選定は、実験装置全体の規模を決定する上で重要である。しかし、それは単に加力装置が具備すべき規模と性能の設計に直接的に関与するためばかりではなく、「得られた試験体のひび割れ面の中に global roughness⁹⁾¹⁰⁾として識別される大きな凹凸(うねり)の反曲点、例えば山もしくは谷の一部が含まれる程その対象面積が大きくてはならない」と言

図3 せん断ひび割れ試験体の組込みとひび割れ幅用計測変位計の設置

図4 ひび割れ面高精度制御型せん断加力装置の反力フレームと機器構成

写真1 ひび割れ面高精度制御型せん断加力装置の反力フレームの全景

う制約があるからである。なぜならば、この反曲点の一部が含まれると、本実験が主として対象としている「微小面領域における凹凸としての local roughness⁹⁾¹⁰⁾」のせん断応答よりも global roughness の乗越えに伴う応答の影響が卓越する可能性が考えられるからである。上述の考察を踏まえ、著者らの過去の実験資料と経験^{11)~14)}、即ち「最大骨材寸法 20mm のコンクリートのひび割れ面を対象とする場合、80mm 角程度の矩形領域を採用すれば、ほぼ均一なひび割れ面形状がえられる」そして「引張ひび割れの global roughness が小さく、その local roughness はほぼ等方に展開する」と言う根拠に基づき、この対象ひび割れ面のスケールを下限の大よその基準値として設定したものである。

加えて、表 2 の 7 行目と 8 行目に記載した「加力出力の設定値」は 4 行目のひび割れ面積の大きさを基にして、同表のせん断変位 δ とひび割れ幅 w に惹起される実際の加力値に、加力機への余力を見込んで大き目に算定されている。

3.2 ひび割れ面高精度制御型せん断加力実験装置の概要

3.2.1 多軸 4 点加力機構の導入

既往の研究例の中で、コンクリートのひび割れ幅を制御する機械的機構を有しているのは、先に触れた Millard ら¹⁾のシステムが唯一であり、このシステムにおいては、試験体側面の 3 点に単軸の力を分散させた受動的なひび割れ幅制御を行っている。しかしこの単軸加力ではアクティブ制御は不可能であるばかりか、測定間距離が 50mm (詳細は、参考文献 1) の図 4 を参照されたい) と過大に過ぎている。この 50mm を過大とする理由は、ひび割れ幅の測定間距離が大きいとその局所での 0~1mm 程度の変形挙動を感知できない可能性があるからであり、このためにコンクリート材料試験や鉄筋コンクリート部材実験では、ひび割れ幅の測定にクラックスケールがよく活用されている。また、このひび割れ幅の測定には DEMEC mechanical strain gage (機械式ストレインゲージ) で計測されているなど、十分な精度を有しているとはいえないように思われる。

著者らは Millard らと異なり、矩形ひび割れ面の 4 隅角点のひび割れ幅を直接計測し、各々の計測値に応答する 4 つの拘束力、即ち多軸 4 点加力機構を導入することとした。この 4 点加力機構の特徴は、その軸力数、即ち制御自由度の多さが、ひび割れ面凹凸に起因する応答に柔軟に対応可能とする点にある。勿論、コンパクトな 3 点加力でもひび割れ幅は制御可能であるが、実際のシステムを構成する際には、加力軸力数がそれよりも多いにも拘らず、多軸 4 点の方がその機械機構配置が簡素化されその制御自由度を大きく確保できるので、本装置では加力軸数として 4 点を選定したものである。

3.2.2 せん断ひび割れ試験体の詳細

図 1 にせん断ひび割れ試験体の諸元寸法を、図 2 に同試験体用の鋼製取付け固定治具 (以下、スチールキャップ) の詳細を、図 3 に同試験体の組込みをそれぞれ示す。

図 1 より、せん断ひび割れ試験体 (以下、試験体と略記する) は諸元寸法 95mm × 160mm × 250mm の直方体とし、中央位置に表 2 の要求性能を充たすべく 7500mm² (75mm × 100mm) の想定ひび割れ面が形成されるよう、その 4 周辺にひび割れ誘発用の切欠きを設けている。著者らが、ひび割れ設定領域 (75mm × 100mm) として表 2 の値 80mm × 80mm (6400mm²) より幾分の変更を加えているのは、先に触れたように表 2 が一つの基準値として看做され、合わせてコ

ンクリートの粗骨材粒度分布に幅があるだけでなく、鉄筋コンクリート部材などに展開されるひび割れ面の観察から、要求性能面積 (6400mm²) を充たしていれば十分で、この 7500mm² にある程度の均一なひび割れ凹凸が形成され则认为したからである。この設定面積の妥当性については、本実験結果を通して後に触れる。

図 2 の鋼製取付け固定治具は、所謂せん断箱¹⁵⁾であり、上下部のスチールキャップと試験体の高ナットを通してボルト締結し、それらの隙間に図 3 のように無収縮セメントペーストを流し込んで両者を一体化させている。さらに図 4 に、本実験システムのフレームと機器構成を掲げるが、試験体の加力フレームへの装着は、マイクロジャッキと上部スチールキャップを自作荷重計によって連結させ、同時に下部スチールキャップはスライディングテーブルに高力ボルト締めされている。

3.2.3 変位量ならびに荷重値を検出する計測機器

表 3 に変位と荷重を計測する機器の性能一覧を示す。せん断変位の計測は、ひび割れ面位置で上下に分割される試験体の各部位をそれぞれ 25mm 変位計によって計測し、その相対変位成分をせん断変位 δ とする。またひび割れ幅 w については、先の図 3 に示したひび割れ面の 4 隅角点にクリップ式変位計 (感度: 1/2500mm) の取付け銅製チップ (先端間距離 8mm) を接着剤で貼付し、これに同変位計を噛ませて計測するので、従来よりもひび割れ直近傍のひび割れ幅 w (垂直変位) がより正確に計測可能となり、その精度は格段に改

表 3 変位と荷重を計測する機器の性能一覧

計測器名	定格容量	定格出力 mV/V
水平	変位計	25 mm
	荷重計	200 kN
垂直	変位計	2 mm
	荷重計	50 kN

表 4 サーボモータ式加力機器の性能一覧

サーボ装置名	最高速度	最大出力
モータ	4500 r/min	2.88 N・M
減速器	180 r/min	12.75 N・M
マイクロジャッキ	0.5 mm/sec	50 kN

図 5 ひび割れ面高精度制御型せん断加力システムの詳細

表 5 静的データロガー・自動制御システムの性能一覧

機器名	入力数 ch	出力数 ch	分解能	サンプリング 速度 msec/ch
データロガー	4	-	1 × 10 ⁻⁶	80
LabVIEW	8	4	16 bit	10

善される。

せん断応力 τ は、図4のオイルジャッキの先端に装着・固定した200kN 荷重計を用いて、正・負荷重をそれぞれ直接計測し、その計測値をひび割れ面積7500mm²で除した値とする。同時に垂直応力 σ は、図4の試験体とマイクロジャッキを連結する自作荷重計を用い、ひび割れ面の隅角4点の荷重をそれぞれ計測して、これらの総和を取って上記のひび割れ面積で除した値とする。

3.2.4 セン断系統と垂直系統の加力機器の構成

前出の図4の本実験システムの加力フレームと機器構成の他に、その全景の実写を写真1に掲げる。図4と写真1より、加力フレームは、全溶接の鉄骨造であり、加力に対して十分な剛性が保持されるように設計・制作され、余分な曲げ変形を除くために、試験体形状にフィットさせるべく、でき得る限りコンパクト化している。

正負交番繰り返しせん断加力には、手動制御用の静的載荷用の200kN オイルジャッキをフレーム両端に各1本ずつ固定するが、0.01mm オーダーのせん断変位の制御に備え、その油圧ポンプは手動式微量吐出型とする。

ひび割れ面の垂直方向加力では、ひび割れ面を高精度で拘束するため4本の50kN マイクロジャッキを配す。この垂直加力機の性能は表4のとおりであり、マイクロジャッキは、減速器(1:25)を介してサーボモータと連結され、モータの回転動力が変換されてジャッキヘッドが上下動する。サーボモータは、入力電圧±10Vで最高回転速度4700rpmを発揮し、ジャッキヘッド速度は無加力状態で約0.5mm/secであり、出力電圧に対するジャッキヘッド速度の線形特性が保証されている。

3.3 計測・制御システムの詳細と自動制御アルゴリズムのシステムへの組み込み

図5に本せん断加力システムの詳細を、表5に静的データロガー・自動制御システムの性能一覧を示す。図5より明らかなように、本せん断加力システムにおける計測・制御網は、「せん断と垂直」の2系統で構成されている。オペレータは手動せん断加力に応答するせん断変位、ひび割れ幅そして垂直力をモニタリングし、これに従って次のせん断加力を調整するので、両系統の連繋は人為による間接的な同期のみが取られていることになる。

「せん断系統」の変位量と荷重値は、表5のデータロガーを用いる通常の静的計測で取得する。

図6 コンクリートせん断ひび割れ幅 ω の自動制御アルゴリズムのフロー

一方の「垂直系統」の計測・制御の動作は、同表5のLabVIEW¹⁶⁾を用いて統御することとし、その自動化システムを構築している。即ち、ひび割れ幅と垂直荷重値の各4点(チャンネル)を別個に計測し、これらをAD変換してそれぞれ独立にLabVIEWで解析される応答電圧値を、4本のマイクロジャッキへDA変換して出力する。この垂直系統におけるAD・DA変換機は、共に16bitの分解能を有し、十分な処理精度が保持されている。さらに、本システムで使用するひずみアンプは、チャンネル毎の計測に10msecを要するため、ひび割れ幅と垂直荷重値の各4点、即ち計8点の計測・制御のサンプリング周期は80msecである。

周知のとおり制御理論は多種多様で、中には最適レギュレータ法のように、実験システム自身の構成要素、例えば信号系統のサンプリング周期、機械動作の応答速度、ノイズの影響などを別個に同定して、その資料から全体の制御アルゴリズムを構築していくものさえある。しかし、本論文が制御対象としているコンクリートひび割れ面は試験体ごとにバラツキを有すること、その計測・制御・加力の系が複雑極まりないことから、システム同定に基づく制御方法は非効率であり、その効果に期待が持てない。そこで著者らは、これに替えて、汎用性や一般性に優れる「自動PID制御理論(以下、PID制御理論と略記する)」をひび割れ幅の自動制御に導入することとした。本論で採用したPID制御動作の基本は、比例(Proportional)、積分(Integral)、微分(Differential)である。PID制御理論における伝達関数は、入力値(ひび割れ幅 ω)と目標値(制御指標 ω_0)の差、即ち偏差 e を基底変数として以下のように表される。

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t) dt + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

$U(t)$: 時刻 t における出力値 $e(t)$: 時刻 t における偏差
 K_p : 比例ゲイン K_I : 積分ゲイン K_D : 微分ゲイン

さらに式(1)はラプラス変換されて、式(2)のように再記述される。

$$U(s) = K_p \cdot \left[1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right] \cdot e(s) \quad (2)$$

s : ラプラス演算子 T_I : 積分時間 T_D : 微分時間

このPID制御理論が、ひび割れ面の4つの隅角点ごとの「ひび割れ幅の計測値 ω 」と「マイクロジャッキへの出力電圧値 U 」との関係に、独立線形に成立するものとして、図6の制御アルゴリズムのフローが描かれる。なお、この図6のアルゴリズムのフローは、実際のデジタル信号処理に合致させて、上式(2)を離散化した形で表現し直してある。

本制御システムを最適に移動させるには、上述したPID制御理論における比例、積分、微分の3つの制御動作を調整する各々のパラメータ、所謂「比例ゲイン K_p 、積分時間 T_I 、微分時間 T_D 」の最適値を実験結果と比較しながら直接特定しなければならない。ここに、比例ゲイン K_p は、ひび割れ幅 ω の偏差を線形修正し、積分時間 T_I は比例ゲインのみで対応しきれない定常偏差を埋め、微分時間 T_D は偏差修正の即応性を改善することになる。その同定については次章で詳述する。

4. 本せん断加力装置の自動制御時における最適化パラメータ設定のための検証実験

最近のコンクリートせん断ひび割れ実験に関する研究では、手動

による「ひび割れ幅 ω 」の制御時における再現性（試験者の技量の巧拙のみにその原因を求めることが困難な実験結果の再現性の低さ）の問題から、その制御手法を手動から自動化へとシフトして行く趨勢にある。しかしながら、これら既往の自動制御手法にも未だ多くの問題があることは、既に指摘したところである。

前述したように、著者らの実験装置では、既往の実験法の問題点の克服を意図して多軸4点加力を採用することとしたが、加力軸を従来の2軸以下から多軸4点へと変更することに伴って、その制御は格段に複雑度を増すことになる。従って本章では、本提案実験システムの基本的な性能を確認し、その妥当性を検証するため、前章で記述した「PID制御理論」の基本制御パラメータを幾つか組み合わせた3種の基礎実験シリーズを設定して実際に実験を行い、最適パラメータの同定を試みることとする。またここでは更に、比較のため本実験装置を自動ではなく手動で作動させた場合の実験も行って検討・考察を行ってみる。

4.1 試験体シリーズの概要と実験条件及び自動制御のためのパラメータの設定

表6に、本論文で実験の対象とした全14体のせん断ひび割れ試験体と設定パラメータの一覧を掲げる。本実験を実施するに当たり設定した共通の実験条件は「ひび割れ幅 ω 一定保持」である。この条件は、本システムによるひび割れ面の制御の程度を評価するための指標として設けたものである。

同表から明らかなように、本実験シリーズは大別して自動制御群と手動制御群に分けられるが、ここでの主題は自動制御時の最適パラメータの特定であり、手動制御シリーズ1体（W05MNU）は、既往の手動制御実験の問題点を明らかにするため取上げたものである。これらの試験体のうち自動制御群は、さらに3種類に分類され、それぞれP、I、Dシリーズと名称される。

尚、表7と表8に本実験シリーズ試験体の製作に用いたコンクリートの調合表と材料性状を掲げる。

これらの試験体の名称は、W記号のあとの数値がひび割れ幅 ω を意味し（例えば05は $\omega = 0.5\text{mm}$ ）、これに続けて各P、I、D動作のパラメータ値を付加（例えば-P60D01はP制御のパラメータ $K_p=60$ と、

表6 せん断ひび割れ試験体一覧と実験パラメータの設定

制御方法	シリーズ	試験体名	ひび割れ幅 ω_0	K_p	T_I	T_D
自動制御	P	W05P10	0.5	10	—	—
		W05P40	0.5	40	—	—
		W05P60	0.5	60	—	—
		W05P120	0.5	120	—	—
		W01P60	0.1	60	—	—
		W10P60	1.0	60	—	—
		W10P120	1.0	120	—	—
	I	W05P60I100	0.5	60	100	—
		W05P60I40	0.5	60	40	—
		W05P60I10	0.5	60	10	—
	D	W05P60D01	0.5	60	—	0.1
		W05P60D02	0.5	60	—	0.2
		W05P60D03	0.5	60	—	0.3
手動制御	MNU	W05MNU	0.5	—	—	—

表7 コンクリートの調合表

W/C (%)	配合(Kg/m ³)				
	水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
38.5	176	458	787	880	4.992

表8 コンクリートの材料性状

最大骨材寸法	圧縮強度	割裂強度
20 mm	39.2 N/mm ²	3.22 N/mm ²

D制御パラメータ $T_D=0.1$ を意味する）して表記することとした。ここにPシリーズは比例ゲイン K_p を、Iシリーズは K_p の他に積分時間 T_I を、そしてDシリーズは K_p の他に微分時間 T_D をそれぞれ制御パラメータとして採用したものである。これらの自動制御3シリーズの記号のならびに注目すると分かるように、3種のパラメータのうちの比例ゲインPパラメータのみが全シリーズに含まれているのは、PID制御理論¹⁷⁾¹⁸⁾ではこのPパラメータの値が最も支配的であることは周知の事実であり、他のI、Dパラメータの効果は2次的であることが判明していたためである。

ここで試みるPID制御パラメータの検証手法は、自動制御の分野で一般的な限界感度法¹⁷⁾¹⁸⁾に準じたもので、各パラメータを初期に小さく設定しておき、そのあと徐々に大きくしながら目標値であるひび割れ幅 ω を計測し続け、「ひび割れ幅 ω —せん断変位 δ 曲線」、「せん断応力 τ —せん断変位 δ 曲線」、そして「垂直応力 σ —せん断応力 τ 曲線」の関係を比較・検討して行くものである。また、制御指標であるひび割れ幅 ω_0 については、本実験装置では要求性能で設定したとおり0.1mm～1.0mmまで制御可能であるが、ここでは、本実験シリーズにおける基準ひび割れ幅を制御可能な最大値の2分の1として、ひび割れを引張力によって発生させた後、水平せん断変位 δ が $\pm 0.8\text{mm}$ の範囲に収まるように加力した。

4.2 PID自動制御による実験の結果とその考察

4.2.1 Pシリーズによる比例ゲイン K_p の同定

本項では3種のPID制御パラメータのうち最も支配的なP制御のための比例ゲイン K_p のみに注目した表6のPシリーズを対象にして、 K_p が制御指標であるひび割れ幅 ω_0 の偏差を線形修整していく効果を見ていくことにする。

(1) ひび割れ幅 $\omega_0=0.5\text{mm}$ を制御指標とした場合

図7の(a)～(d)に、ひび割れ幅 $\omega_0=0.5\text{mm}$ を制御指標とした場合の K_p を順次10、40、60、120と変動させていった、それぞれの試験体W05P10、W05P40、W05P60、W05P120の実験結果を掲げる。(a)～(d)の各試験体の各図には、ひび割れ幅—せん断変位曲線（ ω — δ 曲線）、せん断応力—せん断変位曲線（ τ — δ 曲線）、せん断応力—垂直応力曲線（ τ — σ 曲線）がそれぞれ図示されている。但し、この3種の図のうち ω — δ 曲線の各図には、前項3.3で記述したように各試験体の4隅点で計測された4種のひび割れ幅の全てが記載されている。

これらの図を見ると明らかなように、比例動作を最も小さく $K_p=10$ とした図7(a)のW05P10試験体では、所与のひび割れ幅（ $\omega_0=0.5\text{mm}$ ）の近傍に収束しているとはとても言えず、後続の K_p をより大きく取ってひび割れ幅が一定に収束した場合の τ — σ 曲線が呈する線形の推移とは異なり、この $K_p=10$ の τ — σ 曲線は緩慢な脹らみを有する曲線を描いている。

更に比例ゲイン K_p の値を漸次40、60、120と大きく取ったW05P40、W05P60、W05P120の各試験体の結果を図7(b)～図7(d)に観察すると、ひび割れ幅は0.5mmにほぼ収束し、同時に上記3試験体の τ — σ 曲線については、それらの間に僅かな差異が識別されるのみで、先の比例ゲイン $K_p=10$ の場合よりも遥かに安定した結果が得られている。

上記の検証から、ひび割れ幅を0.5mmに固定したせん断ひび割れ面の変形性状を知るには、比例動作は極めて有効であり、本実験結

果と先の限界感度法¹⁷⁾¹⁸⁾に依拠して比例ゲイン K_p を40から120の範囲に取ると、良好な精度の実験結果が得られることが明らかとなった。

(2) 制御指標・ひび割れ幅を $\omega_0 = 0.1\text{mm}$ と 1.0mm とした場合

比例ゲイン K_p はひび割れ幅 ω の偏差を線形修正するので、制御対象ひび割れ幅がその基準値 0.5mm から離れれば、前述の K_p の修正効果が異なることが予想される。ここでは、前出の表2に記載した本システムの必要性能の確認の意味も含めて、制御指標・ひび割れ幅 ω_0 を 0.1mm ならびに 1.0mm へ拡張した2つのケースについて、比例ゲイン K_p の影響を見定めることとする。

図8(a)に、ひび割れ幅 0.1mm と小さく固定し、比例ゲイン $K_p=60$ のW01P60試験体の変形性状を示す。本実験シリーズにおいては、ひび割れ幅 0.1mm の場合にひび割れ面の噛み合い(contact)が最も密着し、せん断膨張現象(dilatancy)は顕著となるが、同図8(a)よりひび割れ幅は収束し、せん断応力-垂直応力の挙動に原点近傍で局部的なごく僅かなシフトが検出されているものの、変位と応力の推移の掌握は可能のように思われる。

次に、ひび割れ面の噛み合いが最も緩く、制御ひび割れ幅 ω_0 が 1.0mm へ拡大された、比例ゲイン $K_p=60$ であるW10P60試験体の変形性状を図8(b)に示す。この図8(b)より、ひび割れ幅とせん断応

力の性状は安定したように見えるが、その垂直応力に、振動的な応力変化が窺える。そこで更に、比例ゲイン K_p を60から120へ引上げ、偏差修正応答速度を最大に取った図8(c)のW10P120試験体に注目してみると、ひび割れ幅は一定を保ち、応力性状にフラツキのない連続曲線が計測されていることが分る。

本項では、比例ゲイン K_p のみについて考察してきたが、先のひび割れ幅 0.5mm とここでのひび割れ幅 0.1mm と 1.0mm とした場合の検討結果から、本システムにおいては比例ゲイン $K_p=60 \sim 120$ 程度が妥当であると言えるようである。

4.2.2 Iシリーズによる積分時間 T_i が制御結果に与える影響

P制御のみに着目した前項の考察において、その傾向を殆んど識別することが出来なかったために触れずにいたが、自動制御理論の分野で広く知られている現象に、「P制御のみの調整では、目標とする制御指標と実際に得られる結果(計測値)の間に定常的な差異、所謂“定常偏差”が残留することがある」と言う問題がある。既に述べたように、前項において定常偏差を確認することは出来なかったが、本項では、本実験システムにおいてこの現象が生じ得るかを調べるため、P制御の比例ゲイン K_p を一定値に固定したまま、積分時間 T_i のみを変動させたI制御を行ってみる。

図9の(a)~(c)は、ひび割れ幅 0.5mm 、比例ゲインを $K_p=60$ に固定し、積分時間 T_i のみを100、40、10と3段階に小さくしていったIシリーズ試験体W05P60I100、W05P60I40、W05P60I10の実験結果を示したものである。前掲のPID理論式(2)からも知り得るようにこの理論に従えば、積分時間 T_i が減少すると積分動作が大きくなるが、これらの結果の中でも $T_i=40$ の図9(b)と $T_i=10$ の図9(c)間のせん断応力-垂直応力曲線($\tau-\sigma$ 曲線)に、明らかに積分動作の効果が読み取れ、応力の $\tau-\sigma$ 曲線が局所で微細動するようになり、その全

(a) $\omega_0=0.5\text{mm}$ 、 $K_p=10$ のせん断ひび割れ試験体W05P10の変形性状

(b) $\omega_0=0.5\text{mm}$ 、 $K_p=40$ のせん断ひび割れ試験体W05P40の変形性状

(c) $\omega_0=0.5\text{mm}$ 、 $K_p=60$ のせん断ひび割れ試験体W05P60の変形性状

(d) $\omega_0=0.5\text{mm}$ 、 $K_p=120$ のせん断ひび割れ試験体W05P120の変形性状

図7 ひび割れ幅 ω を一定に保持した場合の比例ゲイン K_p の検討

(a) $\omega_0=0.1\text{mm}$ 、 $K_p=60$ のせん断ひび割れ試験体W01P60の変形性状

(b) $\omega_0=1.0\text{mm}$ 、 $K_p=60$ のせん断ひび割れ試験体W10P60の変形性状

(c) $\omega_0=1.0\text{mm}$ 、 $K_p=120$ のせん断ひび割れ試験体W10P120の変形性状

図8 ひび割れ幅 ω を2段階に拡張した場合の比例ゲイン K_p の検討

容が不安定であることを知る。

これら3種の図のうち、図9(a)は、これらIシリーズの中では積分動作が最も小さい試験体(W05P60I100)に関するものであるが、得られた実験曲線は前項のPシリーズ試験体W05P60の図7(c)と同様、極めて安定した結果を示している。しかし T_I をより小さくした(結果として積分動作が大きくなる)図9(b)のW05P60I40試験体と図9(c)のW05P60I10試験体では、共にひび割れ幅 ω に収束が見られても、応力値 τ と σ の曲線には微細なブレが認められる。

この原因は積分動作によって、偏差履歴の積分値が応答出力電圧値に加算され、ある方向にひび割れ幅の偏差が計測されると、これを相殺するように、目標値へ向かって逆偏差が生じるまでひび割れ幅を増減させてしまうからである。即ち、積分動作は、最終的に目標ひび割れ幅へヒタリと計測ひび割れ幅を合致させるが、その収束過程において、常に振動的な修正を加える可能性があり、実際に本実験シリーズでは、この振動性状が殊のほか大きく検出された。従って、本システムに敢えて「積分時間 T_I を導入する必要性は少ない」と結論できるようなのである。

4.2.3 Dシリーズによる微分時間 T_D が制御結果に与える影響

PID制御における微分動作としての「微分時間 T_D 」は、ひび割れ幅の偏差を瞬時に修正しようとする効果を持っている。ここではDシリーズの3試験体により微分動作の影響について調べてみる。

図10の(a)~(c)に、ひび割れ幅0.5mm、比例ゲインを $K_P=60$ に固定し、微分時間 T_D のみを0.1、0.2、0.3と3段階に大きくしていったDシリーズ試験体W05P60D01、W05P60D02、W05P60D03の実験結果を掲げ、ひび割れ幅の偏差修正における微分時間による即応性の向上効果について検証する。

図10(a)の微分動作を最も小さく微分時間 $T_D=0.1$ としたW05P60D01試験体の变形性状を見てみると、ひび割れ幅の推移に僅かばかりの誤差が介在するものの、微分動作による特段の改善は認められない。このW05P60D01試験体は、前出の比例動作のみとした図7(c)のW05P60試験体と積分動作を一番小さく設定した図9(a)のW05P60I100試験体と比較されるが、微分動作の全般の検証を済ませた後にこの3試験体に触れるので、その時点で言及することとする。

微分時間 $T_D=0.2$ と大きく取ったW05P60D02試験体の図10(b)と微分時間 $T_D=0.3$ のW05P60D03試験体の図10(c)を比較すると分かるように、両図ともひび割れ幅は収束するが、微分時間を大きく取れば取るほど、せん断応力 τ と垂直応力 σ の対応が判読できなくなる。この垂直応力値の推移挙動は、本計測システムでは除去できない「電気ノイズ(クリップ変位計で計測して1/1000mm程度であり環境条件の影響を受ける)」への過敏な微分動作の反応の結果であると推察される。なお、W05P60D03試験体の計測結果では、正加力のみで終了してしまっているが、これは正加力時に本システム性能を超える過大な残留垂直応力が発生し、システム自身のセーフティー機能が作動して、この荷重段階で実験を終了したためである。

ひび割れ面形状はその面積を小さくし過ぎると粗さが卓越し、均一性を失う場合があり、上記のW05P60D03試験体が設定面積の小ささを原因として過大な応力が発生したとも考えられない訳ではないが、他の計12体に及ぶ試験体のせん断ひび割れの基本4量がすべて計測されている事実より、設定ひび割れ面積(7500mm²)はせん断応力伝達機構を知るにはほぼ満足される面積であると判断される。

図9 ひび割れ幅を一定に保持した場合の積分時間 T_I の検討

図10 ひび割れ幅を一定に保持した場合の積分時間 T_D の検討

以上、せん断ひび割れ実験における微分動作を調べたDシリーズの検討結果から、微分動作の調整による顕著な有効性は認められず、返って過大な微分時間 T_D の設定が、電気ノイズ(揺らぎ)を増幅し、不安定な垂直応力値が計測された。従って、「本システムに微分時間 T_D を導入する必要性はない」と結論できるように思われる。

先に触れたように、前掲の図7(c)のW05P60試験体、図9(a)のW05P60I100試験体そして図10(a)のW05P60D01試験体から、同一のひび割れ幅とせん断変位履歴下でのPID理論に基づく制御動作の効果が比較できる。これらの3つの図より、W05P60I100試験体とW05P60D01試験体に、全般にほぼ一致したせん断応力 τ -せん断変位 δ 経路が認められる。一方、P動作のみのW05P60試験体は、せん断正加力・除荷経路までは、他の2体とほぼ近い経路を辿るものの、負加力時のピークせん断応力の絶対値が大きな値を呈していることを知る。3試験体とも最初のせん断正加力時の「せん断ひび割れの基本4量」がほぼ等しいことから、P、I、Dの各動作効果とひび割れ面の初期形状に大きな違いがあったとは考え難く、ひび割れ幅とせん断変位で表示される「変位履歴」下で定まるひび割れ面の損傷(損耗)程度の違いに誘引されて、反転負加力時のW05P60試験体のピーク値が大きくなったと考える方が自然なようである。しかし、本実験資料には数に限りがあるため、上記3試験体への検証・考察を特定する段階までには到らず、PID制御パラメータ値の同定とは全く別個に、「変位履歴」の影響を掌握する新たな実験シリーズが必要と思われる。

著者らは、本実験シリーズで13体のひび割れ試験体のひび割れ幅を自動制御加力した。加力時には、垂直系統の4本のマイクロジャッキをモニターしており、ジャッキの出力値は独立して制御しているので、ひび割れ面は常に水平を保持可能なため、局部モーメントの発生はほぼ完全に近い状態でキャンセルされている。

4.3 手動制御による実験の結果とその考察

本項では、表6の手動制御シリーズに分類される1体の試験体W05MNUを対象にして、本せん断加力装置を手動制御で作動させた実験結果について述べることにする。

図11は、制御指標 ω_0 ・ひび割れ幅 ω_0 を前項4.2の自動制御シリーズでベースとした0.5mmに設定して、計測値をモニターをみながら注意深く目視観察しつつ手動制御によって実験を行った場合の結果を示したものである。ひび割れ幅を制御するための多軸4点の加力ジャッキには、それぞれに1人ずつのオペレータを配置し、これに水平方向のせん断加力ジャッキを受け持つオペレータ1人、その他に計測担当1名を加えて総計6名で実験を行った。勿論、これらの実験に従事したオペレータは初心者ではなく、本試験装置の自動制御システムが完成する以前に幾度も手動実験を重ね、その操作に十分熟達した後にこの実験を行っている。

しかし、この図11の左側のひび割れ幅 ω -せん断変位 δ 曲線を見ると明かなように、各オペレータは細心の注意を傾注したが、制御されるべき4隅点の各ひび割れ幅 ω の曲線の間には最大で0.2mm(制御指標が0.5mmであるにも拘らず)の差が生じてしまい、先の自動制御シリーズで得られたような良好なひび割れ幅の制御は成し得

図11 手動制御法によるせん断ひび割れ試験体W05MNUの変形性状

なかった。改めて指摘するまでもなく、制御されるべきひび割れ幅が目標値から一度大きく逸脱してしまうと、その結果がひび割れ面の他の部位に与える影響は極めて甚大で、その実験結果そのものが意義を全く失ってしまう懸念がある。

以上で見たように、手動によるひび割れ幅の制御は、所謂“神の手”を持つような技量を有する複数のオペレータの存在無しには、殆ど不可能であると結論することができるように思われる。

最後に、本実験シリーズでは普通強度コンクリートを実験対象としてきたが、周知の事実として、低強度コンクリートのひび割れ面はより粗くなり、高強度コンクリートのそれは平滑となる。これらに対応するPID制御パラメータを知るには、更なる検証実験を要するが、本論文で同定した結果は、コンクリート強度や最大骨材寸法等が変動した場合の基盤となることは論を俟たないと考えられる。

5. まとめ

本論文では、多軸4点加力機構を有するひび割れ面を高精度に制御可能なせん断加力装置を開発し、さらにPID制御理論に基づいてコントロール可能な自動制御システムの開発・提案を行った。またさらに、14体の試験体を製作して実際に実験を行い、自動制御を可能とする3種の制御パラメータ値の適正範囲の同定などを試み、検討・考察を加えた。得られた結果を要約すると以下のようなものである。

- 1) 本システムを適正に作動させるために必要なP制御のための比例ゲイン K_p の値は60～120の範囲であり、ひび割れ幅が大きい場合には、比例ゲイン K_p を大きく設定する必要があると考えている。
- 2) 本実験シリーズの範囲において、本システムの制御にはP、I、D3種の制御パラメータのうちP制御のみで十分であり、I制御パラメータ T_i とD制御パラメータ T_d を設定・調整する必要性は希薄である。
- 3) 手動によるひび割れ面の高精度な制御は殆ど不可能である。
- 4) 本論文で提案する「ひび割れ面高精度制御型せん断加力実験システム」は、コンクリートのせん断応力機構を研究するための有用なツールとなり得る。

今後、著者らは本実験システムを用いて、ひび割れ面の変位やその履歴、合わせて応力の経路を種々に設定した「せん断ひび割れの基本4量」を計測し、これらの資料からせん断ひび割れ面の応力伝達機構の知見を得て、より信頼性の高い新たな構成則モデルを模索してゆきたいと考えている。

謝辞

本研究の実施に際し、北海道職業能力開発大学校・制御科の成田忠夫先生から貴重なご意見を賜りました。また同大学校・建築科平成15年度と平成16年度のゼミ卒業生の諸君には、多大なご協力を頂きました。ここに、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Millard, S.G. and Johnson, R.P.: Shear Transfer across Cracks in Reinforced Concrete due to Aggregate Interlock and Dowel Action, M. of Concrete Research, Vol.36, No.126, pp. 123-137, 1984.3
- 2) 李宝禄, 前川宏一: 接触面密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達機構式, コンクリート工学論文, Vol.26, No.1, pp. 123-137, 1988.1

- 3) 佐々木仁, 寺岡勝: 人工軽量骨材コンクリートのひび割れ面における応力伝達構成式, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp. 111~118, 2001.12
- 4) 篠原保二, 川道克祥, 石飛幸子: コンクリートのひび割れ面における変位制御繰返しせん断挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第548号, pp. 101~106, 2001.10
- 5) 長谷川一, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 100N/mm²を超える高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断挙動に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol26, No2, pp. 91~96, 2004.7
- 6) Bujadham Buja: The Universal Model for Transfer across Crack in Concrete, Department of Civil Engineering, The Graduate School of The University of Tokyo, March 1991.
- 7) Van Mier, J.G.M., Nooru-Mohamed, M.B., and Timmers, G: An experimental study of shear fracture and aggregate interlock in cementbased composites, Heron, Vol.36, No.4, 1991.
- 8) 河野進, 長尾奈宜, 田中仁史: 高強度材料が接合面におけるせん断力伝達性能に与える影響の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol22, pp. 901~906, 2000
- 9) Michael N.Fardis, and Oral Buyukozturk: Shear Transfer Model for Reinforced Concrete, ASCE, Vol.105, No. EM2, pp. 255~275, 1979.4
- 10) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 齊藤功: ひび割れRC部材のせん断伝達作用に対するひび割れ面性状の影響, 土木学会論文集, 第360号/V-3, pp.91~100, 1985.8
- 11) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定の開発とデータの2次元分析手法の提案 -コンクリート亀裂面の形状分析に関する基礎的研究(その1)-, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.179~188, 1996.12
- 12) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: 種々の応力モード下におけるコンクリート亀裂面の2次元形状分析 -コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究(その2)-, 日本建築学会構造系論文集, 第504号, pp.81~86, 1998.2
- 13) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線を用いて測定したコンクリート亀裂面画像データの3次元分析手法の提案 -コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究(その3)-, 日本建築学会構造系論文集, 第524号, pp. 111~118, 1999.10
- 14) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: 種々の応力モード下におけるコンクリート亀裂面の3次元形状分析 -コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究(その4)-, 日本建築学会構造系論文集, 第534号, pp. 103~111, 2000.8
- 15) 細野康代, 吉嶺充俊: 単純せん断条件における砂の非排水繰返しせん断性状, 土木学会第59回年次学術講演会, pp. 471~472, 平成16年9月
- 16) ロバート・H. ビショップ: LabVIEW プログラミングガイド-グラフィカル言語によるPCベース計算とデータ解析, 株式会社アスキー, 2006年1月, 第1版
- 17) 黒須茂: 制御工学入門, 株式会社パワー社, 1986年2月, 第2版
- 18) システム制御情報学会編 須田信英/著者代表: システム制御情報ライブラリー6 PID制御, 朝倉書店, 1996年4月1日, 第5版

(2005年10月7日原稿受理, 2006年7月28日採用決定)