

論文 地震波形入力による RC 橋脚モデルの動的損傷に関する 実験的研究

秋山 芳幸*¹・平澤 征夫*²・河井 康孝*³

要旨:地震の上下動が RC 橋脚の動的損傷に与える影響, 入力地震波振動時間短縮による載荷速度の違いがモデルの耐力や振動特性に及ぼす影響を明らかにする目的で, 兵庫県南部地震加速度波形入力による RC 橋脚モデルの振動台実験を水平 1 軸加振, 水平・鉛直 2 軸同時加振, 振動時間短縮波(3 種類)入力加振で行った。その結果, 上下動の影響は部材降伏までの損傷には認められないものの損傷の進行度合に現れ, 部材降伏後の終局時の破壊範囲が大きくなること, また振動時間短縮による影響は部材降伏時までは載荷速度の違いが, 降伏後は周波数増加による応答の違いが現れることを明らかにした。

キーワード: RC 橋脚モデル, 上下動, 載荷速度, 周波数, 部材降伏点

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では, 数多くの鉄筋コンクリート(以下 RC と略す)橋脚が損傷・倒壊した。この地震では比較的大きな上下動が観測されており, 損傷・倒壊の一要因として考えられる。しかし, RC 橋脚の損傷・倒壊に及ぼす上下動の影響はそれほど重要視されていないのが現状である。被害調査や解析・実験による推定がなされているが, その数は非常に少ない。

本研究では, 兵庫県南部地震における上下動が RC 橋脚の損傷やその過程に及ぼす影響を明らかにすることを目的として, RC 橋脚モデルを作製し, 神戸海洋気象台観測の加速度波形を用いて水平一軸加振および水平・鉛直二軸同時加振による振動台実験を行い, 得られた最大応答荷重～最大応答変位包絡線から, 部材降伏時と終局破壊に至る状況の違いを比較した。

また本研究の後半では, 入力する兵庫県南部地震加速度波形の振動時間短縮(圧縮)した波形を用いた水平一軸方向加振実験を行い, 時間短縮の影響を調べた。これは, 一般にモデル実験においてはモデルのスケールに応じて載荷時間を圧縮する方法がとられるが, この方法によ

る実験では, 振動時間短縮により周波数やひずみ速度(入力側からみれば載荷速度)を増加させることになるので, これがモデルの耐力と振動挙動に及ぼす影響をまず調べておく必要があったからである。ただし, 一般的にはモデルの縮小率に応じて上載荷重を変化させる必要があるが, 本研究では特に, 周波数の違いあるいは, ひずみ速度の違いによる影響を実験的に明らかにすることを目的としているので, 上載荷重は変化させないで一定とした。

2. 実験概要

2.1 入力地震波

入力地震波は図-1 に示す 4 種類の波形を用いた。(a)は 1995 年の兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台において観測された南北(NS)方向の加速度波形, (d)は鉛直(UD)方向の加速度波形である。最大地震加速度はそれぞれ 818gal, 332gal で, 振動時間は 30 秒である。(b)は (a)を基準波形として作成した振動時間 15 秒((a)を 1/2 に圧縮)に短縮した波形であり(c)は振動時間を 10 秒((a)を 1/3 に圧縮)に短縮した波形である。

*1 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻 博士前期課程(正会員)

*2 中部大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

*3 中部大学 工学部土木工学科

表-1 実験計画と使用材料の力学的特性

加振方法	入力地震波	実験 シリーズ名	供試体 No.	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	主鉄筋 (試験片5本平均)	帯鉄筋 (試験片3本平均)
水平一軸方向加振	図-1(a)	KHT	1	42.5	降伏強度 $380N/mm^2$ 降伏ひずみ 2020μ	降伏強度 $300N/mm^2$ 降伏ひずみ 1720μ
			2	35.7		
水平一軸・鉛直方向 同時加振	図-1(a)と 図-1(d)	KVHT	1	34.5		
			2	37.3		
水平一軸 振動時間短縮波 入力加振	図-1(a)	KT-N	1	36.6	降伏強度 $365N/mm^2$ 降伏ひずみ 1920μ	
			2	37.9		
	図-1(b)	KT-1/2	1	※		
			2	40.6		
			3	36.7		
	図-1(c)	KT-1/3	1	35.9		
2			34.9			

※: シリンダー供試体圧縮試験において装置の設定ミスがあり、得られた結果に信頼性が無いため除外した。

2.2 供試体と実験計画

供試体の形状・寸法を図-2に示す。柱部の断面は $150 \times 150 \text{ mm}$ 、高さは 1110 mm 、載荷位置までは 985 mm で、軸方向鉄筋にD10 (SD345)を8本(軸方向鉄筋比 2.54%)、帯鉄筋に $\phi 6$ (SR295)を 100 mm ピッチ(拘束鉄筋比 0.86%)で用いた。

実験計画と供試体に使用した材料の強度を表-1に示す。実験シリーズ名は加振方法と入力地震波を表すように、KHT, KVHT, KT-N, KT-1/2, KT-1/3とし、各シリーズにつき2~3体の供試体を用いて実験を行った。

2.3 実験および計測方法

KHT, KVHTは図-3に、KT-N, 1/2, 1/3は図-4に示す振動台試験装置を用いて実験を行った。供試体はフーチング部に通した $\phi 32 \text{ mm}$ の鋼棒8本によって振動台に固定した。また、供試体頂部に 11.3 kN の錘を取付けて、上部工の仮想重量(軸方向応力度 0.52 N/mm^2)とした。地震力の載荷は同一供試体に対し、入力地震加速度を最大地震加速度(818 gal)の $1/10$ 倍の入力レベルからはじめて $2/10$ 倍、 $3/10$ 倍…と段階的に増加させる方法で、実験装置の許容限界(図-3, 図-4に示す)近く、あるいは計測器の計測範囲限界近くまで行った。

計測は供試体頂部の応答加速度、応答変位および振動台上の加速度、変位を図-3, 4中に示した加速度計や変位計測器(LVDT, レザ-変位計)によって計測した。またKT-N, 1/2, 1/3は各加振段階で加振後、柱頂部に微小荷重(0.85 kN)を吊しそれを切断することにより柱を自由振動さ

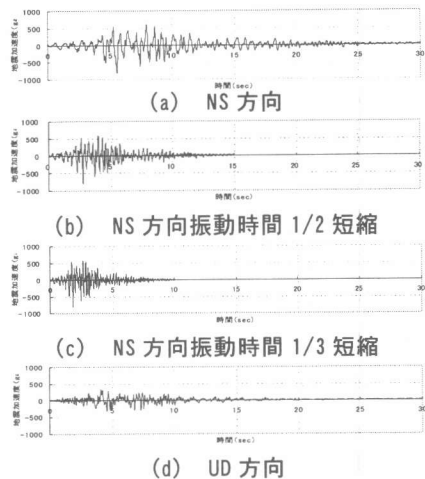


図-1 兵庫県南部地震加速度波形

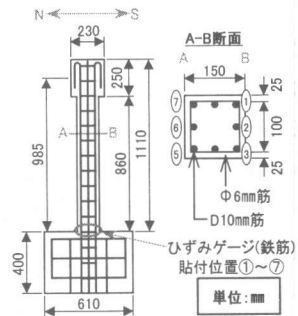


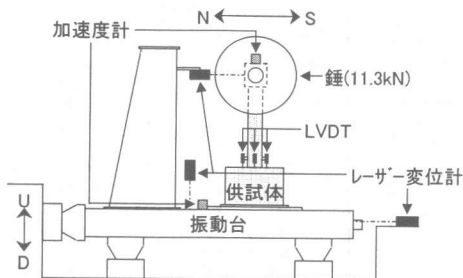
図-2 供試体形状・寸法図

せる単振動試験を行い、得られた振動加速度波形から供試体の自由振動数と減衰定数を求めた。

3. 実験結果と考察

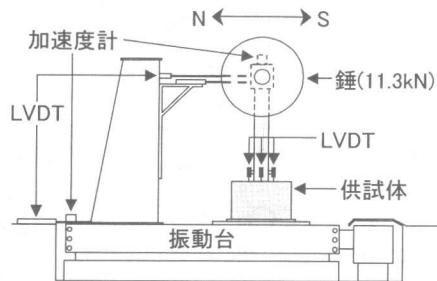
以下で示した荷重は $F = m \times \alpha$ (m : 錘と供試体柱部の質量, α : 応答加速度)により求めた慣性力である。

3.1 水平鉛直二軸方向同時加振実験



最大変位：[水平] 300 mm p-p [鉛直] 200 mm p-p
 最大加速度：[水平] 3G [鉛直] 1G

図-3 水平・鉛直二軸同時加振振動台試験装置



最大変位：200 mm p-p 最大加速度：3G

図-4 水平一軸加振振動台試験装置

図-5 に実験終了後の KHT と KVHT の柱基部における四面の損傷状況を示す。これらの図より、KHT は曲げひび割れの貫通やコンクリートの圧壊などが主な損傷であるのに対し、KVHT の損傷は、軸方向鉄筋の座屈、比較的大きなコンクリートの剥落などが認められ、KVHT の損傷は KHT の損傷よりも大きいことがわかる。また、実験中の観察から、KHT の損傷は、柱基部でひび割れが横に貫通後、ひび割れ周囲のコンクリートの圧壊が徐々に進行し、10 回目加振後の圧壊の範囲は基部 10 cm 以内に止まった。これに対して KVHT の損傷は、9 回目の加振(入力加速度 736gal)までは基部に貫通したひび割れが見られた程度でそれほど進行していなかったが、最後の 10 回目の加振(入力加速度 818gal)で突然に鉄筋の座屈、コンクリートの剥離が起これ、その範囲も 15 cm 以上であることが確認できた。

図-6 は、KHT および KVHT の最大応答荷重～最大応答変位包絡線図である。この図より、KHT の 6 回目の加振(入力加速度 491gal)と KVHT の 8 回目の加振(入力加速度 654gal)の点がほとんど同じであることが認められた(図中の丸で囲まれた部分)。この KHT の 6 回目、KVHT の 8 回目は表-2 に示す各加振段階後に計測した柱基部の鉄筋の残留ひずみの値より、すべての鉄筋が降伏した加振段階であると判断できる。また、図-7 に示した各加振段階後における LVDT で計測した柱基部の伸び量より、柱基部のひび割れの開口の発生・進行は KHT の方が早く、KVHT で

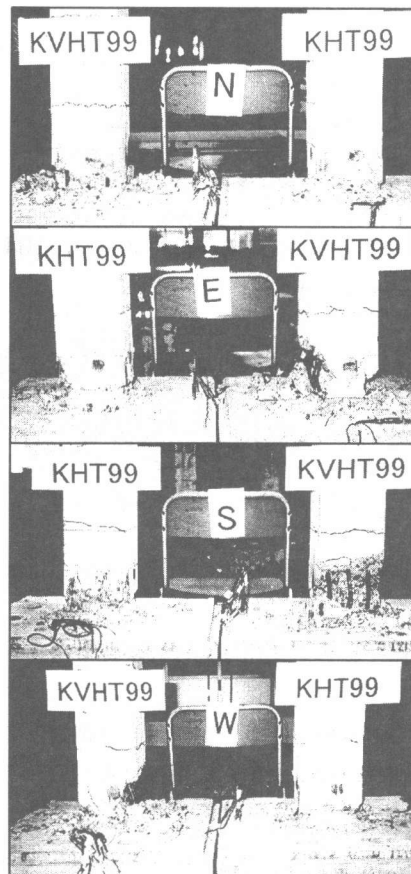


図-5 実験終了後の供試体柱基部各面の損傷状況 (KHT, KVHT の比較)

はひび割れの開口が少ないことが認められる。このことは、実験中の観察でも確認できた。

以上から、①部材降伏までのひび割れの発生・開口や鉄筋の降伏は、上下動がある供試体よりも水平動のみの供試体の方が早い段階で進行すること、②部材降伏後のコンクリートの圧壊

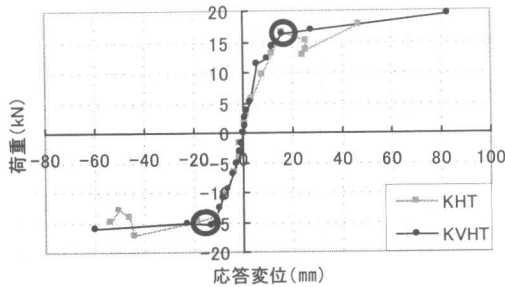


図-6 最大応答荷重～最大応答変位包絡線

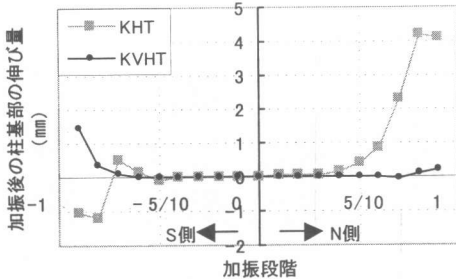


図-7 各加振段階後の柱基部の伸び量

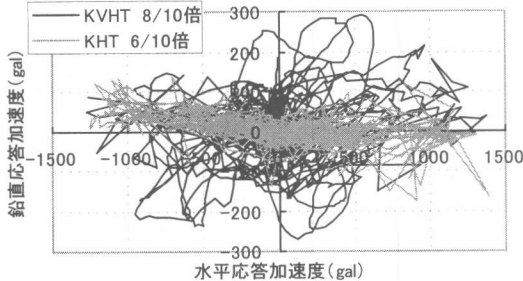


図-8 部材降伏点における応答の比較

・剥離や鉄筋の座屈などの破壊に直結する損傷は、水平動のみの供試体では徐々に進行するのに対し、同時に上下動が作用した供試体ではある段階まではそれほどの損傷はみられないが、終局近くで鉄筋の座屈による破壊が急激に生じ、かぶりコンクリートの剥離範囲が大きくなることが明らかとなった。これは、水平・鉛直二軸同時加振では、図-8に示すように上下動による軸力の変動が非常に大きく、柱軸方向に引張・圧縮力が付加されるが、同時に作用する曲げモーメントにより軸力の作用位置が変動するため、その時作用するせん断力が一部分に集中しにくく、部材降伏までの損傷には時間がかかることになるためである。また、部材降伏後の損傷の進行は、水平動による曲げ引張・圧縮力に上下

表-2 各加振段階後の鉄筋の残留ひずみ

加振段階	KVHT			KHT		
	N側鉄筋番号			N側鉄筋番号		
	⑤	⑥	⑦	⑤	⑥	⑦
0	0	0	0	5	*****	0
1/10	4	-2	0	24	*****	1
2/10	2	15	14	64	*****	41
3/10	29	25	25	72	*****	61
4/10	22	16	20	19	*****	76
5/10	25	12	20	-72	*****	-65
6/10	79	24	0	-128	*****	3737
7/10	756	89	1335	2107	*****	2393
8/10	503	1344	1159	2159	*****	1992
9/10	-1284	623	-140	2125	*****	1643
1	*****	181	*****			
加振段階	S側鉄筋番号			S側鉄筋番号		
	①	②	③	①	②	③
	0	0	0	0	0	*****
1/10	7	-8	-3	0	-10	*****
2/10	12	-2	15	21	1	*****
3/10	27	7	30	48	-14	*****
4/10	41	-3844	47	49	-13	*****
5/10	40	24	43	2168	274	*****
6/10	51	13	29	3603	1649	*****
7/10	2349	188	2542	3106	1531	*****
8/10	1201	3568	811	3035	1330	*****
9/10	955	1241	661	3591	1572	*****
1	4246	-2644	-1340			

※:各鉄筋番号の位置は図-2を参照のこと

(単位:μ)

動による引張・圧縮力が加わった力が降伏した鉄筋に作用することになり、より鉄筋が座屈しやすい状態になったためと考えられる。

この実験結果より、耐震設計において部材降伏後の塑性域では上下動の影響による急激な耐力の低下(軸方向鉄筋の突然の座屈発生による)を考慮する必要があると考えられる。

3.2 水平一軸方向振動時間短縮加速度波形入力加振実験

図9～図12に実験結果を示す。これらのデータは、各シリーズにおける2～3体の平均値で示してある。

(1) 最大応答荷重～最大応答変位包絡線

図-9は、実験結果より得られた最大応答荷重～最大応答変位包絡線である。図中に部材降伏点と最大荷重点を拡大した印で示した。この図と表-3より、各シリーズの応答荷重と応答変位の大きさを比較すると、部材降伏点までは応答荷重、応答変位ともKT-1/3が最も大きく、続いてKT-1/2, KT-Nの順になっている。すなわち、部材降伏点までは応答荷重、応答変位とも振動時間を短縮したもののほど大きくなっており、振動時間短縮による載荷速度の増加の影響が認め

られる。一方、最大荷重点での応答荷重はKT-NとKT-1/2がほぼ同じで、KT-1/3が小さくなっており、応答変位はKT-Nが最も大きく、続いてKT-1/2、KT-1/3の順に小さくなっている。このことから、最大荷重点での応答荷重、応答変位の大きさは振動時間を短縮したもののほど小さくなる傾向を示しており、部材降伏点までの大きさの関係とは逆になっている。この最大荷重点での応答荷重、応答変位の大きさおよび、それ以後の変位増大の傾向の違いは、基本的に載荷速度の違いによるものと考えてよいであろう。

しかし、振動時間短縮による影響には、載荷速度の増加の他に周波数の増加による応答の違いも含まれていると考えるべきである。以上より、得られた最大応答荷重～最大応答変位包絡線は、部材降伏点付近まではあまり変化していないことから、前述した部材降伏点での荷重、変位の増加傾向には載荷速度の増加の影響が大きいと考えられる。一方、最大荷重点の荷重、変位の大きさおよびそれ以後の変位増大の傾向の違いには、周波数の違いによる応答の違いが損傷の進行に与える影響の違いとして現れていると考えるのが妥当であろう。

(2) 自由振動数～最大応答変位関係

図-10は、各加振段階における最大応答変位を横軸にとり、加振後の単振動試験によって得た自由振動数を縦軸にとって両者の関係を図示したものである。この図より、各シリーズの自由振動数の変化を比較すると、部材降伏点（約15mm前後）までは振動時間を短縮したもののほど振動数が大きくなっており、剛性の低下が少ないことがわかる。

一方、部材降伏点より後では、自由振動数の大きさやその変化の傾向にほとんど違いは認められず、振動時間短縮の影響は極めて小さいと考えられる。

(3) 減衰定数～最大応答変位関係

図-11は単振動試験によって得た減衰定数の変化を、その時の加振段階における最大応答変位との関係で示したものである。この図より、

表-3 荷重、応答変位の大きさの比較

実験シリーズ名	部材降伏点		最大荷重点	
	荷重(kN)	応答変位(mm)	荷重(kN)	応答変位(mm)
KT-N	14.1	13.9	16.7	23.1
KT-1/2	15.0	14.5	16.7	21.5
KT-1/3	15.5	15.8	16.2	17.9

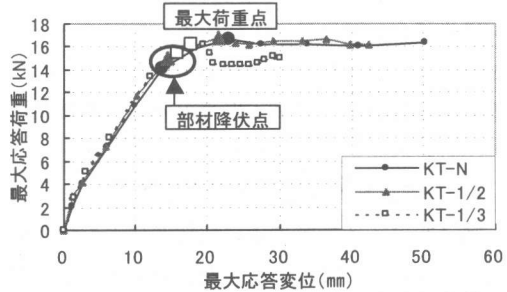


図-9 最大応答荷重～最大応答変位包絡線

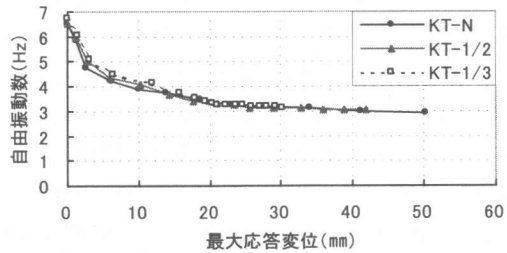


図-10 自由振動数～最大応答変位関係

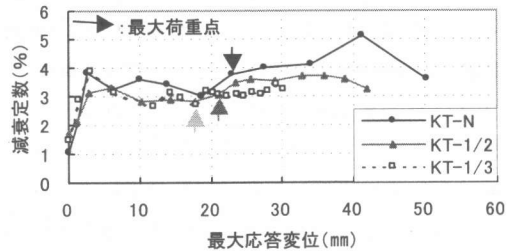


図-11 減衰定数～最大応答変位関係

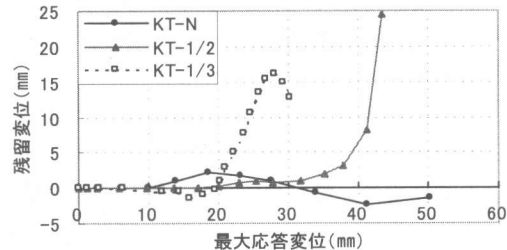


図-12 残留変位～最大応答変位関係

各シリーズの減衰定数の変化は、一度上昇した後に最大荷重時の応答変位（20mm前後）までで低下するという同じ傾向を示している。すなわち、どのシリーズも応答変位3mm程度までは減衰定数が3～4%近くまで増加する。その後、応

応変位が 20 mm 前後までに 3% まで減少している。しかし、最大荷重時の応変位以降の減衰定数の変化は、KT-N は約 5% まで顕著に、KT-1/2 は約 3.7% まで緩やかに増加するが、KT-1/3 は約 3.4% までほぼ横這いに推移する。すなわち、各シリーズとも減衰定数が増加する傾向はみられるが、その増加量には違いが認められた。これは、周波数の違いによる応答の違いの影響が現れたものと見る事ができよう。

(4) 残留変位～最大応変位関係

図-12 は各加振段階後の残留変位とその時の加振段階における最大応変位の関係を示したものである。この図より、各シリーズで残留変形量の増加傾向が異なることがわかる。すなわち、KT-N では、残留変位が約 +3 ~ -3 mm の狭い範囲で波打つように変化しているのに対して、KT-1/2、KT-1/3 の残留変位は最初、狭い範囲で波打つように変化しているが、その後急激に増大する傾向が認められた。さらに、残留変位の増大が始まる点については、KT-N では増大が確認されず、KT-1/2 は最大荷重点後 3 回目の加振段階（応変位 30 mm 以後）から増加し始め、KT-1/3 は最大荷重点（応変位 20 mm 弱）から増加し始めることがわかる。これは振動時間短縮による載荷速度および周波数の違いの影響による柱基部における損傷破壊の進行度の違いのためと考えられる。この場合も、周波数の影響が最大荷重点以後の応答の違いに現れているものと考えられる。

4. まとめ

兵庫県南部地震における上下動が RC 橋脚の動的損傷に及ぼす影響、および、入力地震波振動時間短縮によるひずみ速度（載荷速度）の違いがモデルの耐力や振動特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、兵庫県南部地震加速度波形入力による RC 橋脚モデルの振動台実験を水平一軸加振（KHT）、水平・鉛直二軸同時加振（KVHT）、振動時間短縮波入力加振（3 種類）で行った。その結果、次の事柄が明らかとなった。

- (1) 部材降伏までのひび割れの発生・開口や鉄筋の降伏は、KVHT よりも KHT の方が早い段階で生ずること、部材降伏後のコンクリートの圧壊・剥離や鉄筋の座屈などの損傷は、KHT では徐々に進行するのに対し、KVHT では終局に至る直前までは進行が遅いが、終局時の座屈破壊は突然生じ、その破壊範囲も大きくなる。
- (2) KT-N（実振動時間）、KT-1/2（1/2 に振動時間短縮）、KT-1/3（1/3 に振動時間短縮）の応答荷重と応変位の大きさの比較より、部材降伏点までは応答荷重、応変位ともに振動時間を短縮したものほど大きく現れており（すなわち剛性が高まる傾向を示しており）、振動時間短縮による載荷速度の増加の影響が認められる。
- (3) KT-N、1/2、1/3 の自由振動数の比較より、載荷速度が大きいほど剛性低下が少ない傾向を示しているが、部材降伏点以後はその大きさには、ほとんど違いは認められない。
- (4) 部材の損傷の進行に伴う減衰定数の変化は、KT-N、1/2、1/3 とも最大荷重点までは一度上昇した後に下がるというほぼ同じ傾向が認められるが、最大荷重点以後は減衰定数の増加傾向に違いが認められる。
- (5) 残留変位に及ぼす振動時間短縮の影響は、残留変位の急激な増大が始まる応変位の大きさの違いとして認められる。
- (6) 振動時間短縮による周波数増加による応答の違いの影響は、部材降伏時、最大荷重時およびそれ以後の応変位、減衰定数、残留変位の大きさの違いとして現れることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、中部大学総合工学研究所および、ハイテクリサーチセンター構想に基づく中部大学先端技術研究センター・Ⅲプロジェクトの平成 11 年度研究費補助によって行ったものであることを記して深く感謝致します。