

147. ポリマーモルタルまたは無収縮モルタルで 巻き立て補強された RC 柱の履歴性状

HYSTERETIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS
STRENGTHENED BY USING POLYMER MORTAR OR NON-SHRINKING MORTAR

武蔵工業大学工学部

皆川 勝 篠原雅人

佐藤安雄

奈良建設(株) 土木技術研究所 佐藤貢一

Masaru MINAGAWA *¹ Koichi SATOH *²

Masato SHINOHARA *¹ and Yasuo SATOH *¹

[KEY WORDS] Polymer mortar, Non-shrinking mortar, Carbon fiber reinforced plastic, Earthquake resistance, Reinforced concrete column, Statically repeated load.

[ABSTRACT] We proposed a new type of additional strengthening method by using polymer mortar and reinforcing bars to make reinforced concrete column members effectively resist earthquake motion (Ref.8). In this paper, we present experimental results obtained from quasi-static cyclic loading tests of reinforced concrete column specimens strengthened by the proposed method. For comparison, we employed two types of additional reinforcing bars; steel bars and CFRP bars, also two types of covering material; polymer mortar and non-shrinking mortar.

Experimental results confirmed that (1) CFRP bars effectively improve deformability as well as load carrying capacity and (2) both polymer mortar and non-shrinking mortar covers effectively strengthen the specimens.

*1 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology

*2 Nara Construction Company Ltd., Central Research Laboratory

1.はじめに

本研究は、新素材を用いた鉄筋コンクリート柱の巻き立て補強の有効性を実験的に検討するものである。RC柱の耐震性能に関する基本的な研究としては、池田らによる仮動的実験による検討¹⁾、Kawashima et. al.による静的加力実験による検討²⁾などがある。また、従来、橋梁のRC橋脚の鉄筋段落とし部での損傷の危惧がなされていた^{3)・4)}が、阪神大震災においてもそれが現実のものとなり応急処置はとられているものの、既存構造物の補強方法や、損傷構造物の補修方法の確立が緊急の課題となっている。一方、補強方法としては、鋼板接着⁵⁾、RC巻き立て⁶⁾、炭素繊維巻き立て⁷⁾などが検討されている。著者のひとり、補強筋とポリマーモルタル（以後、PPモルタル）によるRC梁補強の有効性を示し⁸⁾、この実績に基づいて日本道路公団は実橋のRC床版の補強にこれを適用し、さらに、補強効果に関する追跡調査を実施した⁹⁾。更に著者らは、RC柱を同様の方法で補強し、これに死荷重を想定した軸方向荷重を載荷し、横方向に地震を想定した荷重を載荷する二方向外力場におけるハイブリッド実験を行い、地震時のRC柱の変位—復元力特性の面から補強効果を調べた¹⁰⁾。本研究では、補強材としてPPモルタルのほかに無収縮モルタルを用い、補強筋として鉄筋またはCFRPを用いて、RC柱供試体を巻き立て補強し、準静的繰り返し載荷試験によって、履歴性状に及ぼす補強筋および補強材の影響を検討した。

2.材料の力学特性

補強筋としては、D13鉄筋及び高弾性炭素繊維をビニルエステル樹脂で成形したCFRP格子を用いた。補強前供試体に用いたD10主鉄筋、D6帯鉄筋、補強筋として用いたD13鉄筋およびCFRPの力学特性をTable1に示す。補強材としては、エマルジョンとコンパウンド3号を1:6に配合したポリアクリル酸エステル系ポリマーモルタル（以下、略してPPモルタル）及びカルシウム・サルフォ・アルミネート系膨張材を使用した無収縮モルタルを用いた。補強前供試体に用いたコンクリート、補強材として用いたPPモルタル及び無収縮モルタルの力学特性をTable2に示す。PPモルタル、無収縮モルタル共に流動性に優れ、付着強度が高いことから、コンクリートとの十分な接着効果が期待できる。さらにPPモルタルは、コンクリートに比べ弾性係数が比較的低い点に、無収縮モルタルは、コンクリートに比べ圧縮、せん断強度が比較的高い点にそれぞれ特徴がある。

Table1 Mechanical properties of reinforcing bar

	Elastic modulus (GPa)	Cross sectional area of carbon fibers (cm ²)	Cross sectional area (cm ²)	Yield load (N)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Maximum load (N)
Supplementary reinforcing bar D13	196		1.27	4.25×10 ⁴	335	485	6.15×10 ⁴
Main reinforcing bar D10	190		0.713	2.52×10 ⁴	353	526	3.75×10 ⁴
Lateral tie D6	173		0.317	1.18×10 ⁴	371	541	1.72×10 ⁴
CFRP	306	0.257	0.357			2650	9.44×10 ⁴

Table2 Mechanical properties of concrete and mortar

	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Concrete	28.0	2.29		26.3
Polymer mortar	33.5	3.02	11.8	14.2
Expansive mortar	53.6	2.31	5.57	22.8

3.供試体の補強

はじめに、Fig.1(a)に示す補強前供試体を10体作成した。断面は300mm×300mm、スパンは1000mm、鉄筋比は0.95%である。このうち2体を無補強供試体（N-type）とし、残る8体をTable3に示す4通りの材料の組合せで補強した。供試体タイプ名の1文字目は補強筋を、2文字目は補強材を示しており、それぞれの補強筋と補強材の組合せは以下の通りである。

- SP-type : 鉄筋とPPモルタル
- SM-type : 鉄筋と無収縮モルタル
- FP-type : CFRPとPPモルタル
- FM-type : CFRPと無収縮モルタル

Table3 Types of RC-column specimens

Type	Reinforcing bar	Mortar	Configuration of fixed parts of reinforcing bar	Cross section of holes to fix	Length of fixed part (mm)	Axial steel ratio (%)	
						*1	*2
N-type					150 100	0.95	
SP-type	D13	Polymer mortar	J-type	rectangle of 85mm×26mm	150 100	0.95	2.08
SM-type	D13	Expansive mortar	J-type	rectangle of 85mm×26mm	150 100	0.95	2.08
FP-type	CFRP	Polymer mortar	FG-type	rectangle of 250mm×26mm	150 100	0.95	1.90
FM-type	CFRP	Expansive mortar	FG-type	rectangle of 250mm×26mm	150 100	0.95	1.90

*1: before supplementary strengthening
*2: after supplementary strengthening

補強にあたっては、まずフーチング基部に深さ150mm（供試体側面についてはフーチング内配筋の関係で100mm）で、Table3内に示した断面を有する孔をドリルで開け、定着用PPモルタルを充填して補強筋を定着させた。定着部についてはFig.2に示すように、鉄筋についてはJフックを設け、CFRPについては格子状態で埋め込んだ。なお、補強筋の定着長と定着部形状については、引き抜き試験により付着強度が補強筋の降伏強度を上回るよう設定した⁹⁾。補強筋の量は、鉄筋補強の場合には鉄筋比が約2倍となるように設定し、CFRP補強の場合には引張剛性が鉄筋補強の場合と同値になるようにしたことから、Table3内に示したように補強後の鉄筋比は鉄筋補強の場合の方がCFRP補強の場合より9%程大きい。また、補強後の帯鉄筋比も補強前の約2倍となるように設定している。なお、CFRP補強の場合は、補強用主筋と帯鉄筋に相当するCFRPの2柱面分をあらかじめ格子状に成形したものを2つ組合わせて補強した。Fig.1(b)のように配筋した後、補強材としてPPモルタル又は無収縮モルタルを巻き立てた。なお、補強前供試体と補強材の付着を良くするため、ワイヤーブラシ処理及びPPモルタル（エマルジョン：コンパウンド6号=1:3.5）による含浸処理を供試体表面及び定着用ドリル孔内面に施した。

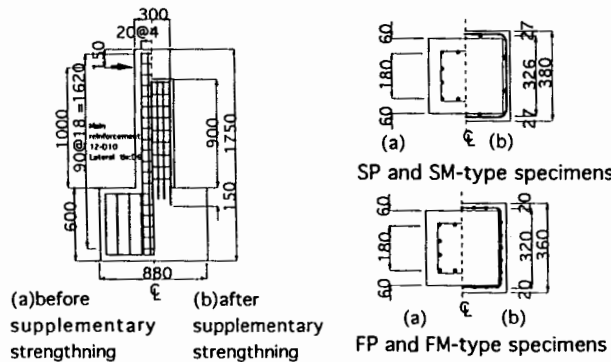


Fig.1 Configuration of specimens

4. 実験方法

荷重方法は、Fig.3に示すように、片持ちばりの先端に死荷重を想定し設計軸方向耐力の6%に相当する9.3tfを載荷した状態で、柱先端での変位を両振りで静的に制御する方法である。変位振幅はFig.4に示すように、降伏変位 δy を基準とし $0.5\delta y$ 、 $1.0\delta y$ 、(以後 $0.5\delta y$ 刻み)、と変化させた。なお、ここでいう降伏変位とは、無補強供試体の主鉄筋が降伏を開始するときの供試体先端での変位である。なお、この時の横方向荷重を降伏荷重と呼ぶ。また、主鉄筋、補強筋の柱付け根部にひずみゲージを貼付して、軸ひずみを測定した。

5. 実験結果及び考察

5.1 破壊状態

$1.0\delta y$ までのクラックの進展状況をFig.5に示す。N-typeでは柱基部、柱基部から5~40cm部の順にクラックが入りせん断破壊し、その後柱基部が圧壊した。SP-typeでは柱基部から5~50cm部、柱基部の順にクラックが入り、 $3.0\delta y$ 以降はフーチングが破壊を起こし、柱基部の破壊は進まなかった。SM-typeでは柱基部、柱基部から5~60cm部の順にクラックが入り、

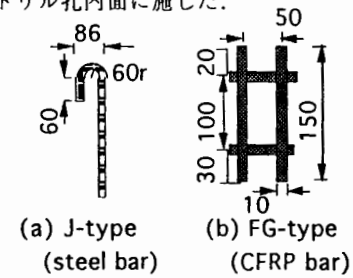


Fig.2 Configuration of fixed parts of reinforcements

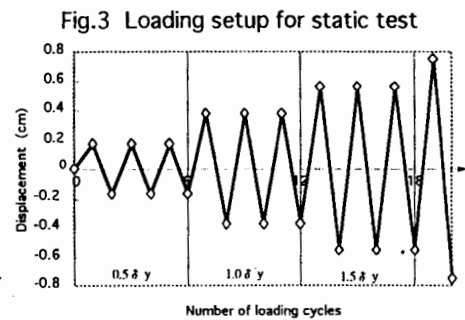
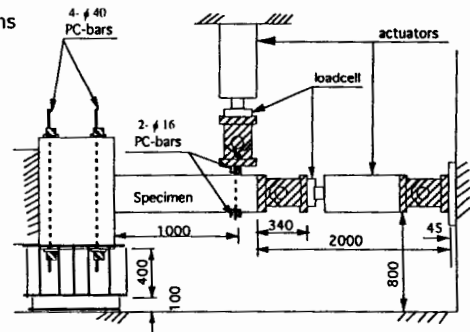


Fig.4 Loading pattern

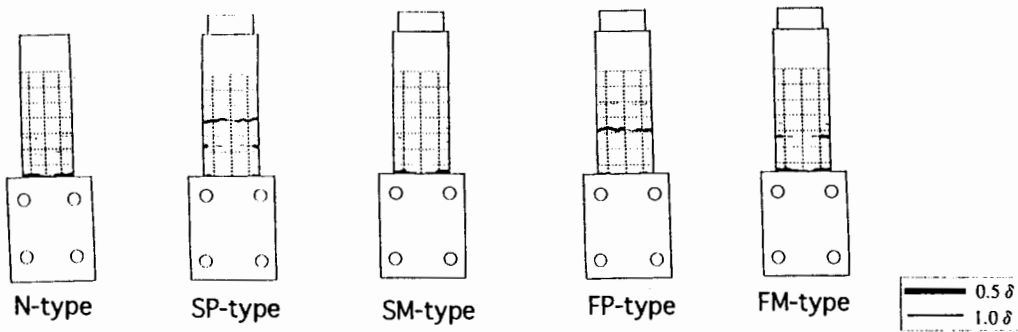


Fig.5 Crack pattern of RC-column specimens

3.0 δ_y 以降はSP-type同様フーチングが破壊した。FP-typeでは柱基部から20~50cm部、柱基部の順にクラックが入り、3.0 δ_y 以降は柱基部が破壊した。FM-typeでは柱基部にクラックが入り、3.0 δ_y 以降は柱基部の破壊とフーチングの破壊を生じた。なお、各供試体とも2体実験したが、クラックの進展状況に明確な差異は見られなかった。このように、無補強、無収縮モルタル補強の場合に柱基部、柱面の順にクラックが進行したのに対し、PPモルタル補強の場合には柱面、柱基部の順にクラックが進行した。無補強供試体ではせん断破壊が生じたのに対して、補強後供試体では、いずれの場合もフーチング部の破壊に至るまでせん断破壊は生じておらず、巻き立てによるせん断補強が有効であったことがわかる。補強材の種類によって破壊様式に相違が見られたが、これはPPモルタルと無収縮モルタルの材料特性の相違によるものであると推測されるが、後述のように履歴性状には明らかな差異は認められておらず、本研究の範囲ではその要因を特定するまでには至らなかった。

5.2 履歴荷重変位性状

履歴荷重-変位曲線の例をFig.6に示す。なお、荷重及び変位は、それぞれ無補強供試体の降伏荷重及び降伏変位で無次元化して示してある。ここで耐荷力を比較するため、3.0 δ_y までの実験結果より無次

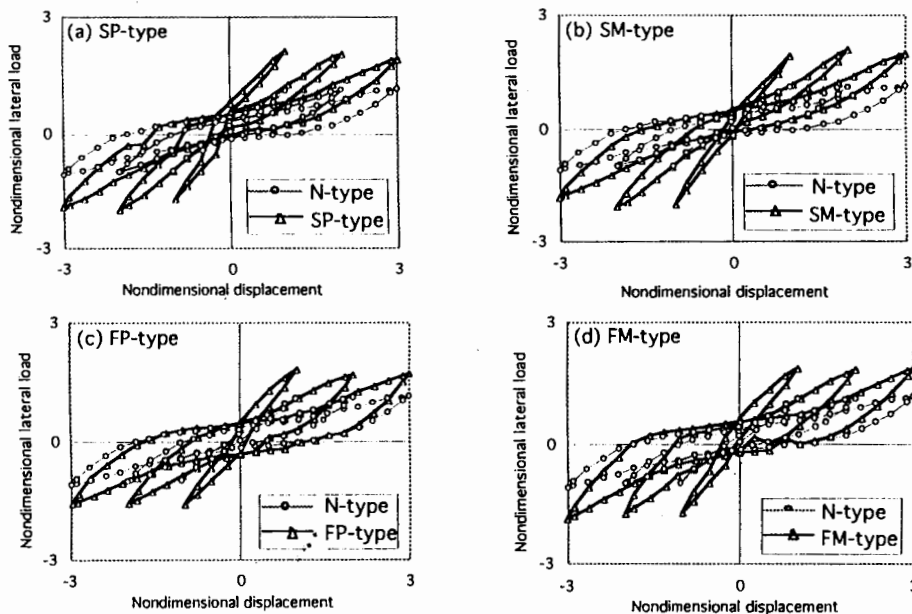


Fig.6 Nondimensional lateral load-displacement relationships

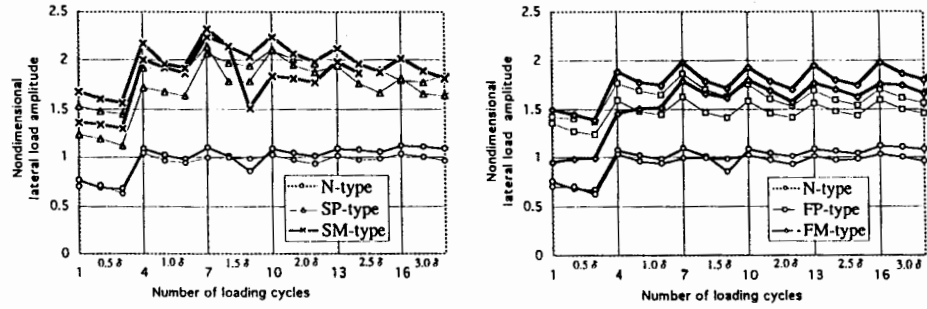


Fig.7 Relationships between nondimensional lateral load amplitude and the number of loading cycles

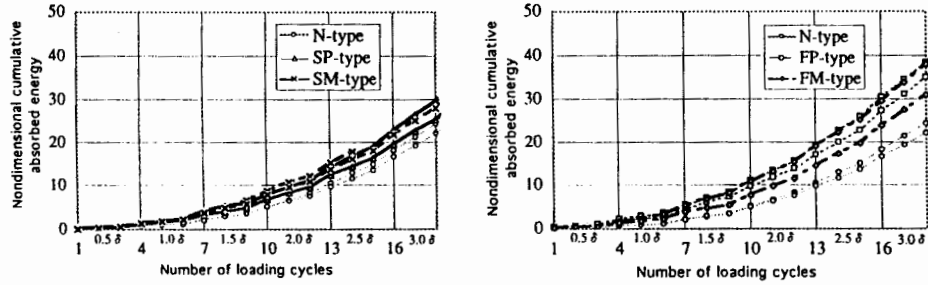


Fig.8 Relationships between nondimensional cumulative absorbed energy and the number of loading cycles

元化荷重振幅と載荷回数との関係をFig.7に示す。なお無次元化荷重振幅とは各載荷サイクルでの荷重振幅を無補強供試体の降伏荷重で除した値であり、各サイクルでの最大荷重値に相当する。鉄筋補強の場合とCFRP補強の場合の無次元化荷重振幅は、 $1.0\delta y$ での無補強のそれに比べそれぞれ2.1倍程度、1.8倍程度で、この比はそれぞれの鉄筋比の比にほぼ一致している。 $1.0\delta y$ 以降については、無補強及びCFRP補強の場合、荷重振幅がほぼ一定であるのに対し、鉄筋補強の場合は緩やかではあるが減少している。また全体的に補強筋の種類にかかわらず無収縮モルタル補強の方がPPモルタル補強に比べて荷重振幅がやや大きいが、これは無収縮モルタルの圧縮強度がPPモルタルのそれに比べて高いことによると思われる。また、後述のFig.9からも分かるように、主鉄筋の降伏する荷重はいずれの場合も無補強供試体の1.5倍から2倍となっており、補強効果は顕著である。

次に、変形能を比較するため、 $3.0\delta y$ までの実験結果より無次元化累積履歴吸収エネルギーと載荷回数との関係をFig.8に示す。なお、無次元化累積履歴吸収エネルギーとは、各載荷回数で描かれる無次元化荷重-変位曲線の1ループの面積の各載荷回数までの累積量である。鉄筋補強の場合の累積履歴吸収エネルギーは無補強のそれに比べて10%程度の増加にとどまっているのに対して、CFRP補強の場合は50%程度大きくになっている。この履歴吸収エネルギーの顕著な増加は、CFRPが鉄筋に比べて高強度であり、しかも鉄筋に比べて高ひずみ領域まで弾性的挙動を示すことによると思われる。それにもかかわらず上述のように最大荷重値が必ずしも高くなっていないが、これには巻き立て材と補強前供試体との付着面の一部剥離、基部への定着部の引き抜けなどが影響しているものと思われる。なお、補強材の相違による変形能の相違は本実験の範囲では明確にはあらわれなかった。

5.3 主鉄筋のひずみ性状

主鉄筋のひずみ性状として、 $1.0\delta y$ での無次元化荷重と柱基部での主鉄筋の無次元化ひずみの関係を

Fig.9に示す。なお、無次元化ひずみとは各載荷サイクルでのひずみ量を鉄筋の降伏ひずみで除した値である。同程度の無次元化荷重において、鉄筋補強、CFRP補強の場合の無次元化引張ひずみは無補強のそれに比べ50%程度低減されている。また無収縮モルタル補強の場合の無次元化圧縮ひずみは、無補強のそれに比べ低減しているのに

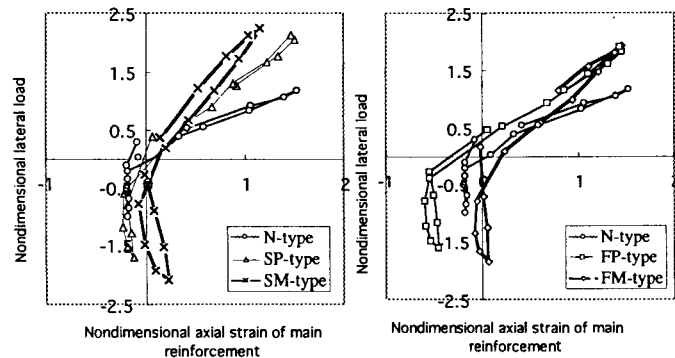


Fig.9 Relationships between nondimensional lateral load and nondimensional axial strain of main reinforcement

対し、PPモルタル補強の場合は

無補強のそれに比べ増大している。これはPPモルタルの弾性係数がコンクリートと比べ低いこと、無収縮モルタルの圧縮強度がコンクリートと比べ高いことによる影響と考えられる。

6.まとめ

RC柱の巻き立て補強における補強筋・補強材の相違が履歴性状に及ぼす影響を、定軸力下での準静的両振り変位制御試験により実験的に調べた。用いた補強筋は鉄筋または炭素繊維補強プラスチック、補強材は無収縮モルタルまたはポリアクリル酸エステル系ポリマーモルタル（PPモルタル）である。限られた実験ではあるが本実験範囲で以下のことがいえる。

- (1) 炭素繊維補強プラスチックを格子状に成形したものを、補強用主鉄筋および帯鉄筋として用いることができる。
- (2) 鉄筋の場合は通常のフックを、炭素繊維補強プラスチックの場合は上記格子の一部をフックの代わりに柱基部へ埋め込むことで、柱基部への補強筋の定着をすることが望ましい。
- (3) PPモルタルは柱基部への補強筋の定着材として有効である。
- (4) 巻き立て補強材として、無収縮モルタルとPPモルタルを用いた場合、履歴性状に大きな差異は見られない。
- (5) 補強筋として鉄筋を用いた場合、荷重振幅が徐々に減少して耐荷力が減少するのに対して、炭素繊維補強プラスチックを用いた場合にはそのような現象は見られない。また、履歴吸収エネルギーについては炭素繊維補強プラスチックを用いた場合の方が鉄筋を用いた場合より大きくなる。このように、本実験で得られた履歴性状の観点からは、炭素繊維補強プラスチックの方が鉄筋より補強材として好ましいと言える。

【参考文献】

- 1) 池田尚治, 山口隆裕, 鶴沢哲史; 地震動による鉄筋コンクリート柱の挙動と供用性能の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.119-124 (1990).
- 2) K.Kawashima and T.Koyama; Effects of cyclic loading hysteresis on dynamic behavior of reinforced concrete bridge piers, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.5, No.1, pp.343s-350s (1988).
- 3) 多久和勇, 石田博, 東田典雅, 大橋健二他; RC橋脚の補強効果について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-318, pp.662-663 (1990).
- 4) 多久和勇, 石田博, 東田典雅, 大橋健二他; 段落としを有する橋脚のRC巻き立て補強における打継ぎ面処理方法の影響, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-319, pp.664-665 (1990).
- 5) 山田善一, 家村浩和他; ハイブリッド実験による補修補強RC部材の地震時剛性劣化過程, 土木学会論文集, 第387号I-8, pp.407-416 (1987).
- 6) 佐藤貢一, 小玉克巳; FRPと各種モルタルで補強したRC梁の曲げ破壊性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.979-984 (1992).
- 7) 石井孝男, 佐藤貢一, 井口忠司, 大木浩晴他; 東名高速道路における鋼橋RC床版の損傷の経年変化, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, I-343, pp.684-685 (1994).
- 8) 皆川勝, 小玉克巳, 佐藤貢一, 佐藤安雄; C.F.R.P.により耐震補強されたRC柱のハイブリッド実験解析, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.844-849 (1993).
- 9) 皆川勝, 佐藤貢一, 篠原雅人, 佐藤安雄; ポリマーモルタルを用いたRC柱の耐震補強工法における補強筋定着に関する基礎的研究, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, V-333, pp.666-667 (1994).