

論文 入力地震動の特性と RC 橋脚に生じる塑性応答回数

星隈 順一^{*1}・運上 茂樹^{*2}

要旨：本研究では，RC 橋脚に対する正負交番載荷実験での載荷方法と入力地震動の関係を明らかにするために，剛性低下型の履歴復元力特性でモデル化された一自由度振動系に対して，これまでに実測された様々な強震記録を入力地震動として非線形時刻歴応答解析を行い，塑性応答の繰返し回数等に着眼して検討を行った。その結果，塑性応答回数は海洋型地震と内陸型地震で大きく異なり，最大応答変位が発生する前までの累積塑性率は地震動の継続時間と相関があること，また従来行われている正負交番載荷実験での載荷方法は，実際の地震時の挙動よりも比較的厳しい載荷条件となっていることがわかった。

キーワード：塑性応答，繰返し回数，鉄筋コンクリート橋脚，入力地震動特性

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能を実験的に検証する場合，一般に正負交番載荷実験が行われることが多い。振動台実験やハイブリッド実験は，ある入力地震動が作用した時の挙動を実験的に検証する手法であるのに対して，正負交番載荷実験は，当該橋脚がどの程度の塑性変形性能を保有しているのかを検証する手法であり，一般には入力地震動の特性とは無関係に実験が行われている。その一方で，この正負交番載荷実験では，載荷繰返し回数や載荷履歴によって，終局変位やじん性率等，塑性変形性能を表わす指標に影響が生じることがこれまでの多くの研究で指摘されている^{1),2),3)}。

しかしながら，一般に，鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験では，降伏変位を基準変位として，その整数倍の変位を順次与える方法が採用されているが，各載荷ステップにおける繰返し回数は，研究者によって異なっている場合がある。また，正負交番載荷実験における載荷繰返し回数の設定根拠を，入力地震動の特性との関係から明確に説明した研究は，米国では鋼構造の分野で報告例があるが⁴⁾，我が国における地震動の特性を反映して行った研

究はこれまでにほとんどない。

このような背景から，著者らは，振幅の繰返し特性や継続時間の異なる幾つかの強震記録を用いて非線形時刻歴応答解析を行い，鉄筋コンクリート橋脚に生じる塑性応答の繰返し回数特性について検討を行っている⁵⁾。本報告では，解析に用いた強震記録数をさらに大幅に追加するとともに，振動系の固有周期の条件を増やして解析を行い，塑性応答の繰返し回数のみならず累積塑性変形量，履歴吸収エネルギーの観点からも解析結果の考察を行った。さらに，地震動の特性として継続時間と位相差分布に着目し，これらと累積塑性率との関係についても検討した。なお，著者らは，既に，最大応答変位の発生前後における塑性応答の繰返し回数の特性について比較検討した結果を報告しているため⁵⁾，今回の検討では，塑性変形性能の評価で重要な最大応答発生前までの時間領域を対象として考察を行うこととした。

2. RC 橋脚の非線形繰返し応答特性の解析

2.1 非線形時刻歴応答解析モデル

本解析では，鉄筋コンクリート橋脚を 1 自由度系にモデル化し，その基部に地震動を作用さ

*1 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（耐震）主任研究員 工博（正会員）

*2 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（耐震）上席研究員 工博（正会員）

表－１ 解析で考慮した地震の震源地と震源特性

プレート境界付近で生じた海洋型地震	越前岬沖	日向灘	東北東方沖
	青森県東方沖	岩手県沖	愛媛県西部沿岸
	宮城県沖	襟裳岬沖	八丈島東方沖
	根室半島沖	伊豆半島南部沿岸近海	
	大島近海	宮城県沖	伊豆半島付近
	日本海中部	釧路沖	北海道南西沖
	北海道東方沖		
内陸直下型地震	ノースリッジ	兵庫県南部	鳥取県西部

せて時刻歴応答解析を行った。橋脚断面の履歴復元力特性としては、剛性低下型弾塑性モデル（武田モデル⁶⁾）を適用した。ただし、本解析では、塑性域での挙動に着目しているため、履歴曲線のスケルトンは、１次剛性（降伏剛性）に対する２次剛性（降伏後剛性）の比を 0.001 としたバイリニア型モデルとした。また、武田モデルにおける除荷剛性低下指数は 0.5 とした。

ここで、ある入力地震動に対して系に生じる最大応答変位 δ_{max} とし、最大応答塑性率 μ_{max} を次式で定義する。

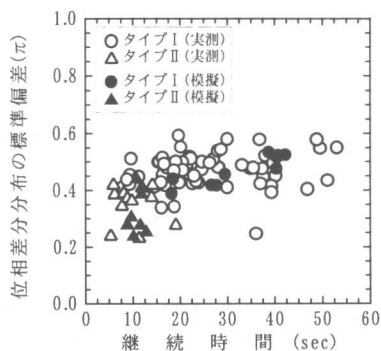
$$\mu_{max} = \delta_{max} / \delta_y \quad (1)$$

ただし、 δ_y は降伏変位である。また、系の固有周期は１次剛性と質量から算出される。

本解析では、目標とする最大応答塑性率と固有周期を予め設定し、これに達するように系の降伏耐力 P_y および降伏変位 δ_y 、質点の質量を収束計算により定める。これは、系の降伏耐力や入力地震動の強度に応じて非線形域に達しなかったり、また、最大応答塑性率も異なったりするためであり、どのような入力地震動に対しても、所定の最大応答塑性率が生じるように考慮したものである。

2.2 解析に用いた入力地震動とその特性

本解析に用いた入力地震動は、既往の地震により実測された 77 成分と、耐震設計用として作成された模擬地震動 18 成分の合計 95 成分である。ここで、実測波の 77 成分は、マグニチュードが 6.5 以上の 25 の地震により観測されたものであり、その地震の震源地と震源特性を整理すると表－１の通りである。これ以降は、プレー



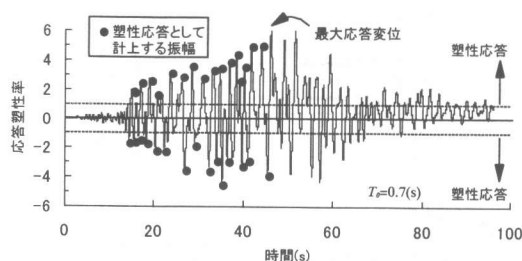
図－１ 解析に用いた地震動の特性

ト境界付近の海洋型地震により生じた地震動をタイプⅠの地震動、内陸直下型地震により生じた地震動をタイプⅡの地震動と呼ぶことにする。なお、解析に用いた入力地震動の中には、観測地点の震央距離が遠い場合もあり、加速度はそれほど大きくないものも含まれている。また、マグニチュードが 8 を超える海洋型地震の強震記録は得られてなく、今回の解析には、このような巨大地震による地震動は含まれていないことに注意する必要がある。

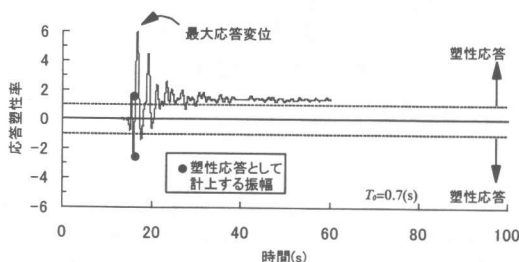
本解析に用いた入力地震動の継続時間と位相差分分布の標準偏差の関係を示したのが図－１である。継続時間と位相差分分布の標準偏差に着目したのは、一般に直下型地震では継続時間が短く位相差分分布の標準偏差が小さいが、海洋型地震では継続時間が長く位相差分分布の標準偏差が大きい地震動となることが報告されているためである⁷⁾。なお、継続時間とは、入力地震動の総エネルギーに対する累積エネルギーの比が 5% から 95% に達するのに要する時間として定義した⁸⁾。また、位相差分とは、フーリエ展開項の隣同士の位相の差のことである⁹⁾。図－１より、本解析に用いる地震動においても、タイプⅠの地震動と比較すると、タイプⅡの地震動では継続時間が短く、また位相差分分布の標準偏差も小さくなっていることが確認される。

2.3 解析ケース

本解析では、系の固有周期として、0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.95, 1.0, 1.5, 2.0 秒の 10 ケース、



(a) 日本海中部地震での実測波による解析



(b) 兵庫県南部地震での実測波による解析

図-2 塑性応答の繰り返し回数の評価

また、最大応答塑性率 μ_0 は、3.0、6.0、9.0 の 3 ケースをそれぞれ設定した。解析は、前述した入力地震動に対して、固有周期と最大応答塑性率の全ての組み合わせに対して行った。ただし、収束計算が適切に終了できなかった解析ケースもいくつかあったため、これらの解析ケースについては、解析結果に含めていない。

3. 塑性応答の繰り返し回数

3.1 塑性応答の繰り返し回数の計数方法

塑性応答の繰り返し回数の計数方法を図-2 に示す。すなわち、最大応答変位が発生する前までの水平変位の時刻歴波形において、ゼロ・クロッシングする時刻 t_i ($i=1,2,\dots$) を求める。そして、 $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ の時刻区間における水平変位の絶対値の最大値が $1\delta_y$ よりも大きくなっている場合に対して、その時刻区間における水平変位の絶対値の最大値 δ_i ならびに応答塑性率 $\mu_i (= \delta_i / \delta_y)$ を算出する。そして、塑性応答の繰り返し回数は、ここに求めた応答塑性率 μ_i の度数分布により評価するものとする。ただし、応答塑性率のカテゴリーは、1.0 以上 2.0 未満、

2.0 以上 3.0 未満というように、1.0 刻みで設定した。なお、模型供試体に対する正負交番荷重実験では、一般に正負にそれぞれ 1 回ずつ変形させることを 1 回の繰り返し回数として定義されているのに対し、本解析では正側もしくは負側に 1 回変形することを 1 回の繰り返し回数としてカウントしていることに注意する必要がある。

3.2 塑性応答の繰り返し回数の考察

図-3 は、最大応答変位が生じる前までの時間における応答塑性率の度数分布を全ての解析ケースに対して求め、その平均値と標準偏差を示したものである。ここで、応答塑性率が k 以上 $k+1$ 未満 ($k=1, 2, \dots, 8$) の繰り返し回数は、図の横軸において、 $\mu = k+0.5$ の位置にプロットしている。また、ここでは、入力地震動と系の固有周期の特性を全解析ケースで平均化して示していることになる。

これより、タイプ I の地震動では、標準偏差の 1 倍のばらつきを考慮すると、 $1 \sim 2\delta_y$ の応答が 23 回前後作用するが、 $3 \sim 4\delta_y$ の応答は 6 回前後、 $5 \sim 6\delta_y$ の応答は 3 回前後となっている。これは、繰り返し回数 n を 10 回とする正負交番荷重は、タイプ I の地震動が作用した時の実際の挙動よりも非常に多い繰り返し回数を与えていることを示している。また、応答変位の増大に伴って、その繰り返し回数が徐々に少なくなっている点も特徴的である。一般的な正負交番荷重実験では、荷重変位とは無関係に繰り返し回数は一定とすることが多いが、本解析結果からは、タイプ I の地震動に対しては、荷重変位の増大に伴って、徐々に繰り返し回数を減らす方が合理的であると言える。

一方、タイプ II の地震動に対する繰り返し回数は、明らかにタイプ I の地震動の場合よりも少ない。すなわち、 $1 \sim 2\delta_y$ の応答は 6 回前後作用しているが、 $3\delta_y$ 以降の応答変位は、各カテゴリーとも 1 回程度ずつしか作用していない。これは、タイプ II の地震動に対しては、正負交番荷重実験において、 $3\delta_y$ 以上の荷重ステップ

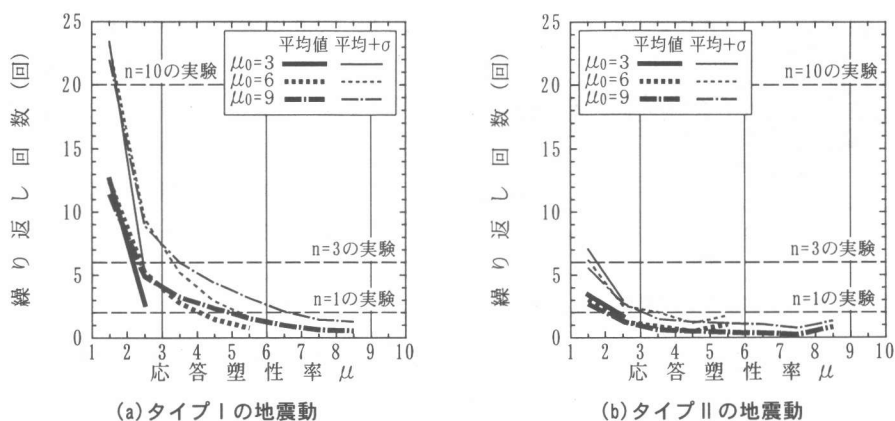
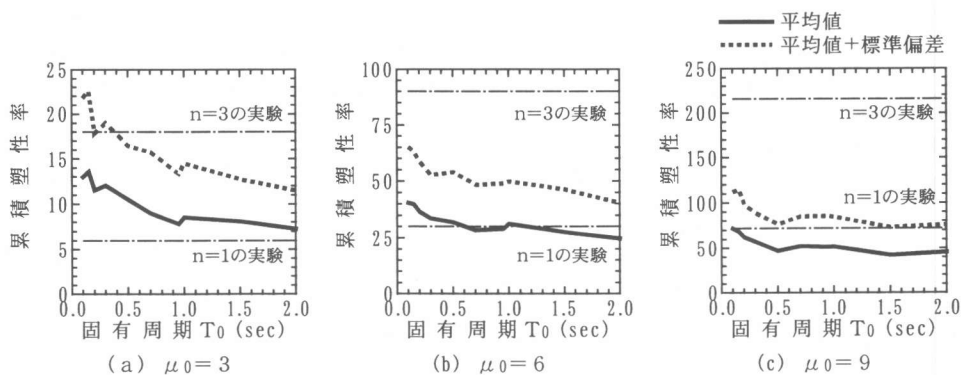
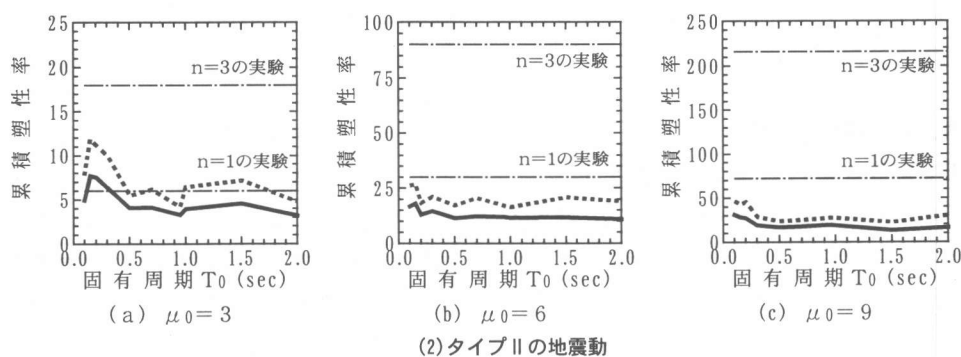


図-3 塑性応答の繰り返し回数



(1)タイプⅠの地震動



(2)タイプⅡの地震動

図-4 最大応答変位発生までの累積塑性率

の繰り返し回数は1回でも十分であることを示している。

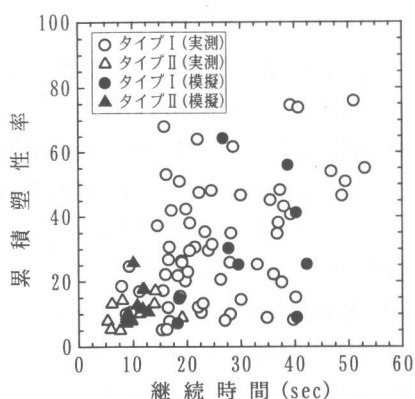
4. 累積塑性率

米国における塑性応答の繰り返し回数に関する研究では、累積塑性率という指標も用いられている⁵⁾。累積塑性率は、3.1で述べた手法に

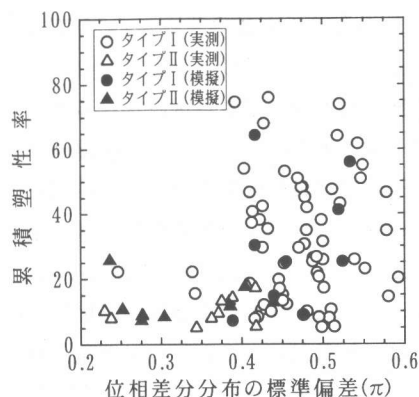
より導き出される $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ の時刻区間における水平変位の絶対値の最大値 δ_i を用いて、次式により定義される値である。

$$N_p = \frac{\sum_i (\delta_i - \delta_y)}{\delta_y} \quad (2)$$

ここに、 N_p ：累積塑性率



(a) 継続時間と累積塑性率



(b) 位相差分布と累積塑性率

図-5 地震動の特性と累積塑性率の関係

δ_i : $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ の時刻区間における水平変位の絶対値の最大値

δ_y : 降伏変位

そこで、ここでは、本解析により求められた応答結果を、式(2)に基づいて整理することとした。図-4は、最大応答変位が発生するまでの累積塑性率と固有周期の関係を地震動のタイプ毎に比較して示したものである。図中には、各载荷ステップの繰り返し回数を1回ならびに3回とした正負交番载荷実験における累積塑性率も併記した。これより、タイプIIの地震動に対する累積塑性率は、タイプIの地震動のおよそ1/2程度となっていることがわかる。また、目標とする最大塑性率が大きくなるほど、降伏変位の整数倍毎に正負交番载荷をする载荷方法は、実際の挙動よりも厳しい载荷条件となっていることもわかる。

また、タイプIの地震動の場合、固有周期が長くなるにつれて、累積塑性率が小さくなる傾向があるが、タイプIIの地震動で固有周期によらず累積塑性率は概ね一定となっている。これは、タイプIIの地震動では、最大応答変位が生じるまでの時間が短く、塑性応答の繰り返し回数が少ないためである。

最大応答変位が発生するまでの累積塑性率と地震動の特性の関係を示したのが図-5である。これより、ばらつきは大きいものの、継続時間が長くなるにつれて累積塑性率が大きくなる傾

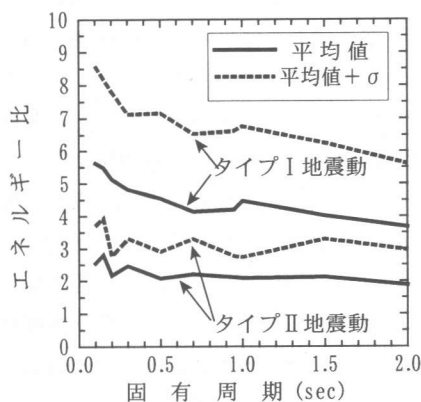


図-6 エネルギー比の比較 ($\mu_0=6$)

向がある。一方、位相差分布の標準偏差との関係を見ると、位相差分布のばらつきが小さい場合、累積塑性率も小さい。これは、短い継続時間に大きな入力を与えられ、累積塑性率が小さい段階で最大応答変位が生じるためである。逆に、位相差分布の標準偏差が大きい地震動では、累積塑性率はほぼ均一にばらついており、特徴的な傾向は認められなかった。

5. 履歴吸収エネルギー

図-6は、最大応答塑性率を6.0とした場合のエネルギー比の平均値とそのばらつきを地震動のタイプで比較して示したものである。ここで、エネルギー比とは、最大応答変位が生じる時刻までに鉄筋コンクリート橋脚が吸収したエネルギー E_D とその最大応答変位まで一方向に

単調載荷した場合の吸収エネルギー E_s の比として定義している。これより、解析結果のばらつきとして標準偏差の1倍を見込むと、最大応答変位が発生するまでに、タイプⅠの地震動では、一方向への単調載荷の場合の6~8倍程度、タイプⅡの地震動では3~4倍程度のエネルギーが鉄筋コンクリート橋脚に与えられていることがわかる。これは、タイプⅠ地震動の場合、鉄筋コンクリート橋脚に6~8 E_s のエネルギーが与えられた後に、またタイプⅡの地震動の場合、3~4 E_s のエネルギーが与えられた後に最大応答変位が生じることを意味している。

一般的な正負交番載荷実験では、例えば $6\delta_y$ の変形性能を保有していることを確認する時、その従前において $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $4\delta_y$ 、 $5\delta_y$ という載荷を行っている。すなわち、 $6\delta_y$ の載荷を行う前の段階で、試験体には本解析により求められた値以上の大きなエネルギーが既に与えられていることが考えられる。著者らが行った断面が2.4mの正方形で高さが9.6mの超大型試験体による繰り返し回数が3回の正負交番載荷実験の結果¹⁰⁾を例にとると、 $6\delta_y$ の載荷の前までに試験体に与えたエネルギーは、 $6\delta_y$ の水平変位を一方向に単調に与えた場合のエネルギーのおよそ7.8倍であった。したがって、このような載荷方法は、前述した解析値と比較すると、タイプⅠの地震動に対する挙動の方に近い。

6. 結論

本研究では、一質点系の振動系を対象として、既往の多数の強震記録数を入力地震動として非線形時刻歴応答解析を行い、塑性応答の繰り返し特性と正負交番載荷実験の載荷方法の関係について検討を行った。本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1)タイプⅠの地震動に対しては、応答変位の増大に伴って、塑性応答の繰り返し回数は徐々に少なくなり、 $5\sim 6\delta_y$ の応答になると繰り返し回数は3回前後である。
- 2)タイプⅡの地震動に対する塑性応答の繰り返し

し回数は、タイプⅠの地震動の場合よりも少なく、 $3\delta_y$ 以降の応答変位は、各ステップとも1回程度ずつしか作用しない。

- 3)最大応答変位が生じるまでの時間領域では、タイプⅡの地震動に対する累積塑性率は、タイプⅠの地震動の約1/2程度となる。また、目標とする最大塑性率が大きいほど、降伏変位の整数倍毎に正負交番載荷をする載荷方法は、実際の挙動よりも厳しい載荷条件となる。
- 4)最大応答変位が発生するまでに鉄筋コンクリート橋脚が吸収しているエネルギーを実験結果と比較した結果、繰り返し回数を3回として降伏変位の整数倍の変位毎に正負交番載荷する載荷パターンは、タイプⅠの地震動に対する応答に概ね相当している。

参考文献

- 1) Kawashima, K. and Koyama, T. : Effect of Number of Loading Cycles on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Bridge Pier Columns, Proceedings of JSCE, No.392 / I-9, pp.205-213, 1988.4
- 2)尾坂芳夫, 鈴木基行, 蟹江秀樹: RC柱の履歴復元力特性に及ぼす載荷速度と載荷パターンの影響, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.911-922, 1988年4月
- 3)武村浩志, 川島一彦: 載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.849-858, 1997年3月
- 4) ATC24 : Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, 1992
- 5)星隈順一, 運上茂樹: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時非線形応答の繰り返し特性, 第24回地震工学研究発表会, pp.993-996, 1997年7月
- 6) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, 96(12), 2557-2573, 1970
- 7)桑村仁, 竹田拓也, 佐藤義也: 地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率—直下型地震と海洋型地震の比較を通して—, 日本建築学会構造系論文集, 第491号, pp.29-36, 1997年1月
- 8)Trifunac, M.D. and Brady, A.G.: A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol.65, pp.581-626, 1975
- 9)大崎順彦, 岩崎良二, 太川出, 政尾亮: 地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第5回日本地震工学シンポジウム, pp.201-208, 1978年11月
- 10)星隈順一, 運上茂樹, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.215-232, 2001年2月