

## 超多径間連続橋の地震応答特性に及ぼす空間相関入力地震動の影響

THE EFFECTS OF SPATIALLY CORRELATED INPUT MOTIONS ON  
THE RESPONSE OF SUPER MULTIPLE-SPAN CONTINUOUS BRIDGES

常田 賢一\* 田村 敬一\*\*

宇佐美 淳\*\*\* 大塚 久哲\*\*\*\*

By Ken-ichi TOKIDA and Keiichi TAMURA

and Jun USAMI and Hisanori OTSUKA

Considering the spatial variation of ground motion, a simple method is proposed to establish the spatially correlated input ground motions, and the seismic response of 5 to 20-span continuous bridges to this spatially correlated motions is studied by dynamic response analysis. The results are compared to the response estimated for the uniform input motions, and the time-lagged input motions.

Key Words: super multiple-span continuous bridges, spatially correlated input motions, dynamic response analysis

## 1 まえがき

最近、騒音振動の低減、走行性・耐久性の向上、維持管理の軽減などから、連続橋の超多径間化の計画が進められているが、このような連続橋は延長が長く、各橋脚に対して必ずしも同一の地震動が入力するとは限らず、橋脚ごとに異なる地震動の入力を受けることが予想される。しかしながら、このような構造に対する適切な入力地震動の評価に関する研究は、ほとんどなされていない現状である。

本論文は、超多径間連続橋の合理的な動的解析に用いる適切な波形とその設計地震動の入力方法を得ることを目的として、同一地震入力、位相差地震入力、多点地震入力などに対する超多径間連続橋の地震応答を動的解析により算出し、入力地震動の差異の影響について比較・検討したものである。

## 2 入力地震動の設定

近年の高密度強震観測の進展とあいまって、地震動の時間-空間変動特性に関する研究が、行われるよう

- 
- \* 建設省北陸地方建設局 金沢工事事務所長 (〒921 石川県金沢市泉本町5丁目8番地)
  - \*\* 工博 建設省道路局 路政課補佐 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関2丁目1番3号)
  - \*\*\* 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)
  - \*\*\*\* 工博 建設省土木研究所 振動研究室長 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

になってきた<sup>1) 2) 3)</sup>。土木研究所においても静岡県内駿河湾の相良、焼津、沼津、松崎の4地区において高密度強震観測を行っている。これらの観測記録をもとに、田村らは、式(1)に示す地震動の空間相関係数 $\rho_s(\eta)$ を提案した<sup>4)</sup>。

$$\rho_s(\eta) = \{1 - (\eta/\xi_0)^2\} \exp\{-(\eta/\xi_0)^2\} \quad (1)$$

ここで、 $\eta$ は2地点間の距離を示し、 $\xi_0$ は実測データとの2乗誤差が最小となるように定めるパラメータである。式(1)で算出した空間相関関数と1988年東京都東部地震(M=6.0、震央距離h=96km)の地震による実測波形から計算した相関係数を1例として示すと、図-1のようである。ここに、式(1)の $\xi_0$ は550mとした。図からわかるように、実測波形と式(1)の結果はよく一致しており、式(1)は十分実用的であると言える。また図から、距離が大きくなるに従い、地震動の相関が低下していることもわかる。

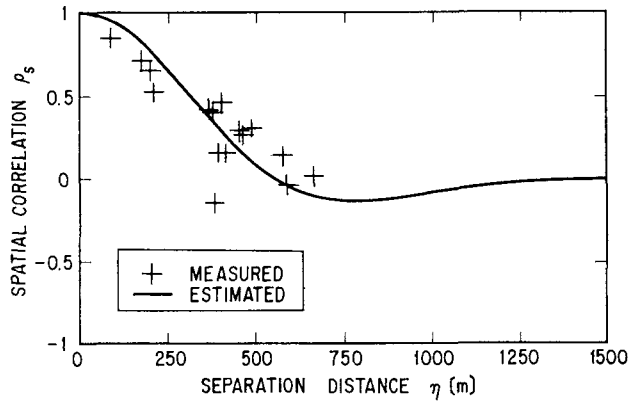


図-1 空間相関関数

近年、空間相関を有する地震動波形のシミュレーション手法については、確率過程論に基づく検討等もなされているが、本研究では、超多径間連続橋の地震応答に及ぼす入力地震動の差異の影響について検討することを主たる目的として、入力地震動については、端橋脚に作用する地震動波形を基準波形とし、橋脚位置に応じて基準波形と所要の相互相関係数を有するような地震動波形をシミュレートした。すなわち、地震動のパワースペクトルは一定に保ちながら、基準波形のフーリエ位相角に順次ノイズを加え、基準波形との相互相関係数が端橋脚からの距離に応じて、式(1)で表されるような波形群をシミュレートした。

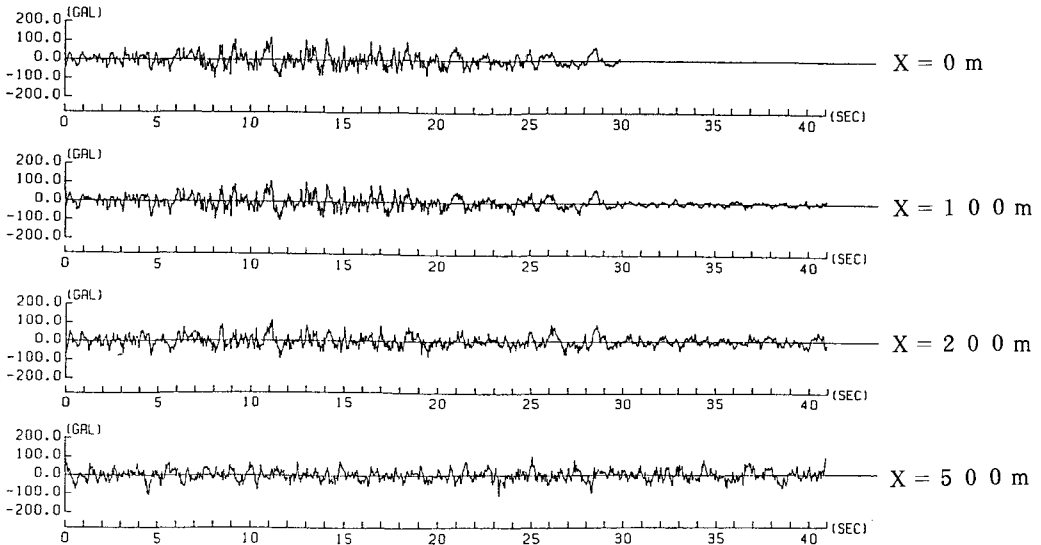


図-2 箇所ごとの変動を考慮した入力地震動

図-2の最上段の波形は、1968年日向灘地震(M7.5, D=30km)時における、愛媛県内の板島橋の地盤(Ⅱ種地盤に相当する)上での地震動波形である<sup>5)</sup>。この波形は、道路橋示方書の標準波形であり、本解析の原波形として使用することとした。この波形を基に上述の空間相関関数を用いて、距離を50~1,000mまで変化させたときの地震動波形を作成した。 $\xi_0$ は500mと設定した。この値は、8地震における高密度強震観測記録の解析<sup>6)</sup>から求められた平均的な $\xi_0$ の値を参考に決定したものである。図-2の2段目以降は代表例として、距離 $X=100, 200$ および500mの波形を示す。

### 3 解析モデル

#### (1) 解析ケース

多径間連続桁橋の動的応答解析を行うにあたり、解析モデルは、径間長を50mとし、径間数は5径間、10径間、15径間、20径間の4通りについて解析した。また、支承形式は固定支承形式およびゴム支承(せん断弾性係数 $G=100\text{tf/m}^2$ )形式の2ケースとした。

一般に多径間の橋梁においては、上部構造と下部構造を剛結合すると温度変化による上部構造の伸縮により、下部構造に大きな変形が生じる。このため最近では支承にゴム支承を用い、この温度変化による変形を吸収することにより、下部構造に作用する力を減少させることが多くなっている。したがって、ここでは上記2ケースの支承形式について検討を行った。

#### (2) 入力地震動波形

入力地震動波形は、図-2で示すⅡ種地盤相当の修正板島橋波形(最大加速度118.3gal、継続時間30秒)を基本とし、地震動の入力方法はこれまで一般に用いられた1地震波同時入力他、多点入力、位相差入力についても行った。ここでいう多点入力とは、各橋脚ごとに空間相関を考慮した異なる地震動を作用させるものをいい、位相差入力とは、地震動波形は1つであるが各橋脚に時間的ずれをもって作用させた場合を指す。ここで、地震波の伝播速度は500m/sと仮定した。同時入力以外の地震波は $P_1$ 橋脚から $P_2$ 、 $P_3$ と順次入射した。

さらに、空間相関係数における $\xi_0$ を、250mあるいは1,000mとした地震波も、比較のため入力して解析した。前者を相関係数小、後者を相関係数大と呼ぶ。

#### (3) 解析モデル

解析モデルは、図-3に示す5径間連続桁橋を基本形とした。上部構造および下部構造の寸法は、設計事例に基づいて決定し、応答解析結果の比較を容易にするため各モデルとも同一とした。橋脚と桁の間は、両

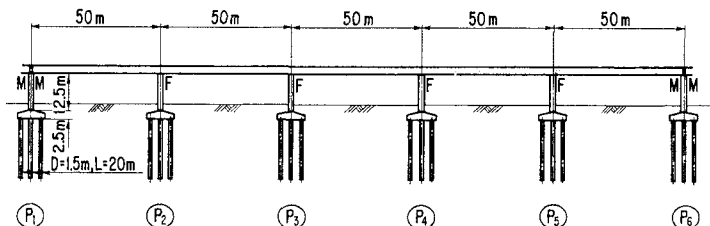


図-3 解析モデル基本構造

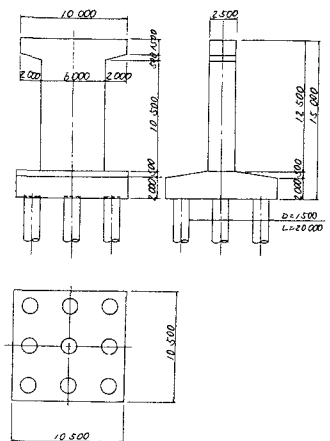


図-4 解析モデル基本構造  
(下部構造)

端を可動支承とし、中間橋脚上は前述のように固定あるいはゴム支承とした。また、解析モデルの上部工は鋼橋とした。

下部構造諸元を図-4に示す。下部構造は、壁式橋脚およびくい基礎を採用し、橋脚の高さは15mとした。ゴム支承を用いた場合の下部構造は、固定支承と比較して、橋脚の幅を2.5mから2.2mに、杭基礎本数を1本減少させた。

地震動入力については一般の設計で行われている方法と同じように、設計地盤面（基礎フーチング底面）を地震動入力位置とした。

下部構造は地盤で支えられており、入力地震動は地盤バネを介して構造物に入力すると考えてよいため、本解析においても同様なモデルにした。解析モデルを図-5に示す。同図(a)は、橋脚上の支承が固定で、橋軸方向の入力地震動に対する解析モデル、(b)は、同様に固定支承を有するが、橋軸直角方向の動的解析モデル、(c)は、橋脚上の支承はゴム支承で、橋軸方向の入力地震動に対する解析モデルである。時間刻みは0.02秒とし、減衰比は0.05とした。このような解析モデルを用いて行った解析ケースを表-1に示す。

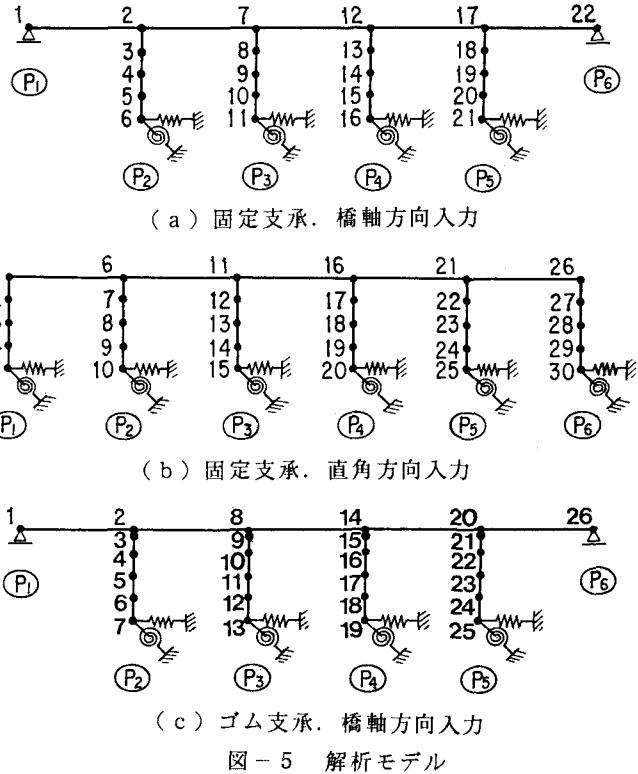


図-5 解析モデル

4 解析結果と考察

図-6は、解析結果の一例として10径間連続橋に対する多点入力時の加速度応答波形を示している。ゴム支承モデルでは、主桁と橋脚天端との間に応答の差異が生じるため、同一橋脚における両者の応答波形を示している。固定支承モデルは、橋軸方向入力の方が直角方向入力より、若干長周期の応答となり、橋脚別では、中央の橋脚の応答が小さくなっている。ゴム支承モデルは、主桁上で短周期成分が減少しており、橋脚天端とは異なった動きとなっている。また、主桁上では両端支点で大きな差異は見られないが、橋脚天端では減衰の速さが異なっている。

本研究では、図-6に示すような加速度と変位の応答波形を計算し、それらを用いて以下の点に着目して主要な応答特性を比較検討した。

表-1 解析ケース

モデル	径間	同一入力 (基本波形)	多点入力	位相入力	相関大	相関小
橋固 軸定 方支	5径間	○	○	○		○
	10径間	○	○	○	○	○
	15径間	○	○	○		○
直固 角定 方支	20径間	○	○	○		○
	5径間	○	○	○		○
	10径間	○	○	○	○	○
橋ゴ 軸ム	15径間	○	○	○		○
	20径間	○	○	○		○
	5径間	○	○	○		○
橋ゴ 軸ム 方支 向承	10径間	○	○	○	○	○
	15径間	○	○	○		○
	20径間	○	○	○		○

- ①各橋脚の応答の比較
- ②径間数の違いによる応答の比較
- ③波形入力の違いによる応答の比較
- ④相関係数の違いによる応答の比較
- ⑤支承形式の違いによる応答の比較

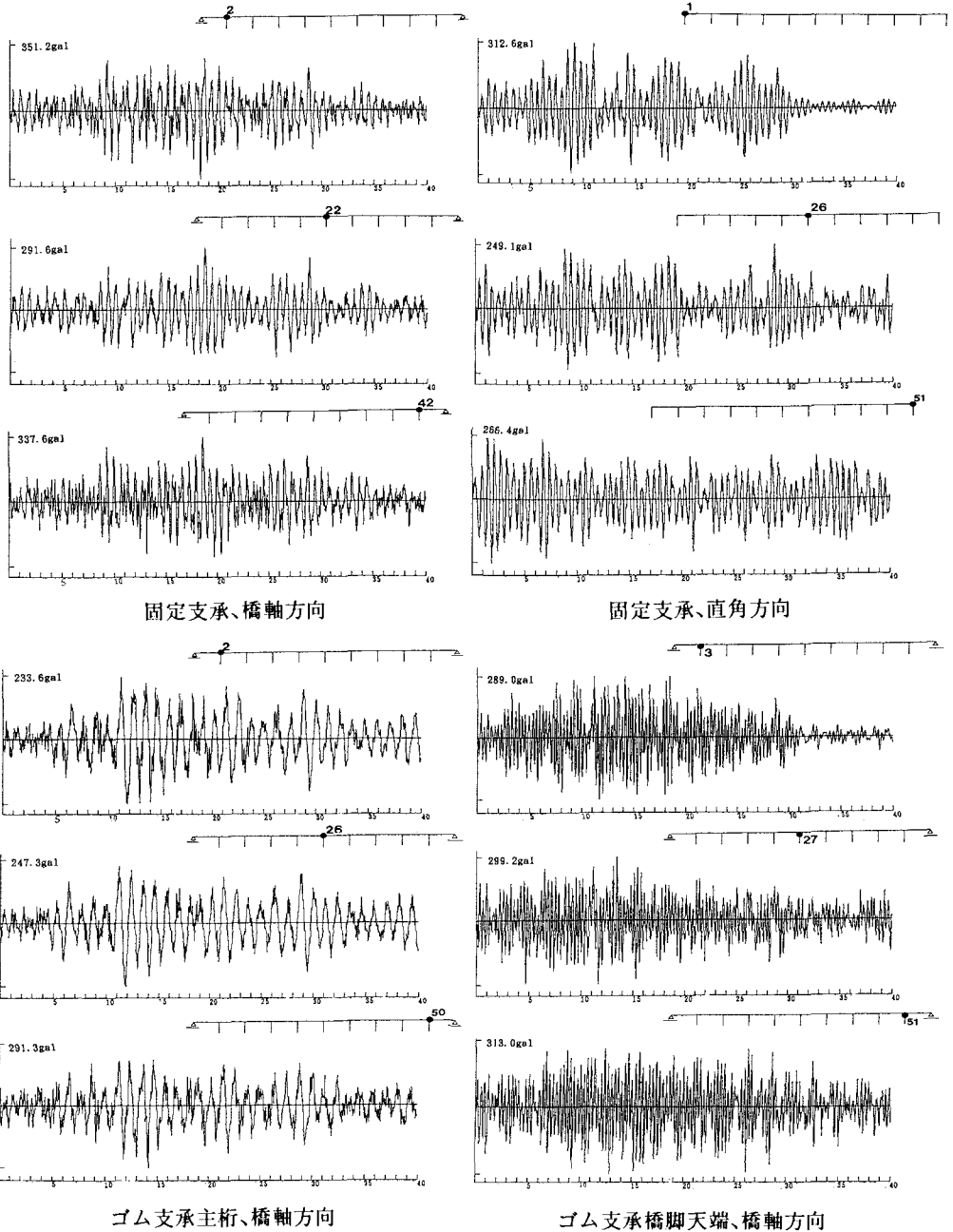


図-6 多点入力に対する10径間連続橋の加速度応答波形  
(縦軸は加速度((gal)), 横軸は時間((秒))を示す)

(1) 各橋脚の応答の比較

はじめに、各橋脚の応答結果を見ると、橋軸方向入力の場合、図-7(a)や(c)に示すように10径間程度では波形入力の違いにかかわらず各橋脚天端での水平変位に差は見られない。図-8の例でみられるように、15径間以上では中央部の水平変位が小さくなる傾向を示した。これに対して、直角方向入力の場合の橋脚天端水平変位は、図-7(b)に示すように、同一入力の場合は橋脚位置によらずほぼ一定値であるが、多点入力の場合は、P<sub>5</sub>橋脚以降で変位が小さくなり、位相差入力の場合は、橋脚ごとに応答値が異なっている。このように、直角方向入力の場合には各橋脚によって変位が異なる場合がある。

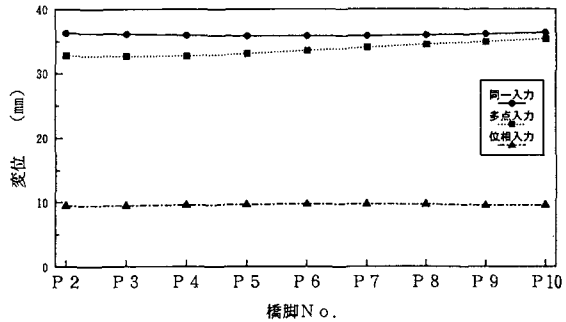
なお、以後の考察は最大応答値を示した橋脚について行っている。

(2) 径間数の違いによる応答の比較

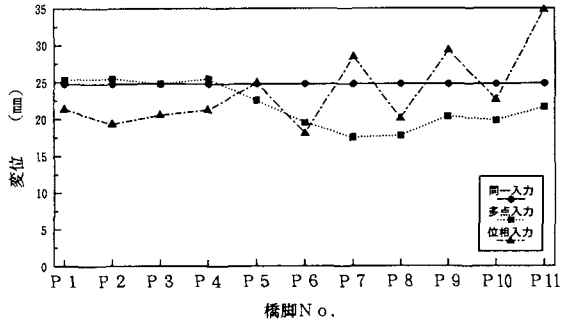
図-9は固定支承橋軸方向入力の場合の橋脚天端変位と加速度応答について、径間数の違いによる差を示したものである。

橋脚天端変位においては、同一波入力と相関大の場合は径間数による差異がほとんど現れない。多点入力と位相差入力の場合は、径間数の増加にともなって応答値が減少する傾向にあるが、位相差入力では10径間程度、多点入力では15径間程度で値は収束している。加速度応答は、同一波入力以外は径間数によって変化するが、変化の程度は変位の場合ほど顕著ではない。

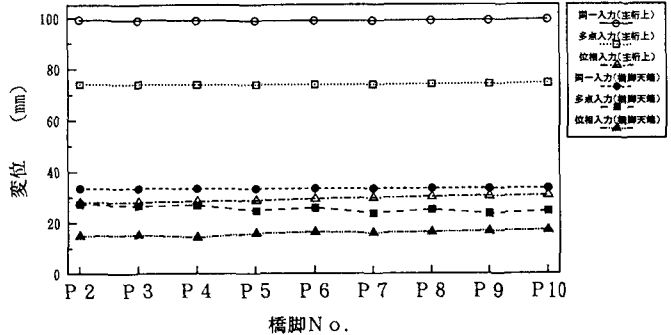
ゴム支承を用いた場合の主桁上並びに橋脚天端における応答結果も、前述と同様の傾向を示すが、橋脚天端の応答をみると、径間数の違いによる差が主桁ほど顕著ではない。



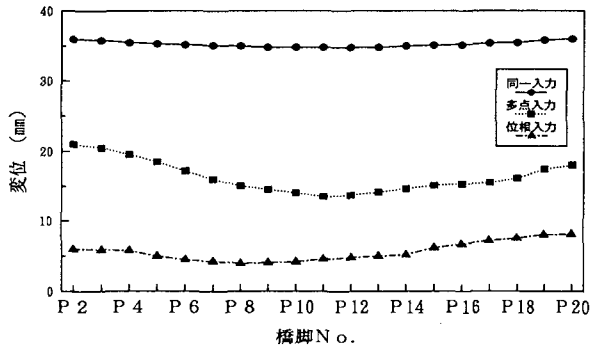
(a) 固定支承橋軸方向



(b) 固定支承直角方向



(c) ゴム支承橋軸方向  
図-7 橋脚別の変位 (10径間)



(固定支承橋軸方向)  
図-8 橋脚別の変位 (20径間)

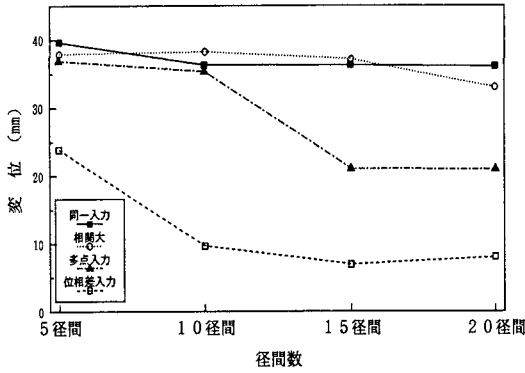


図-9 径間数の違いによる応答結果  
(固定支承橋軸方向)

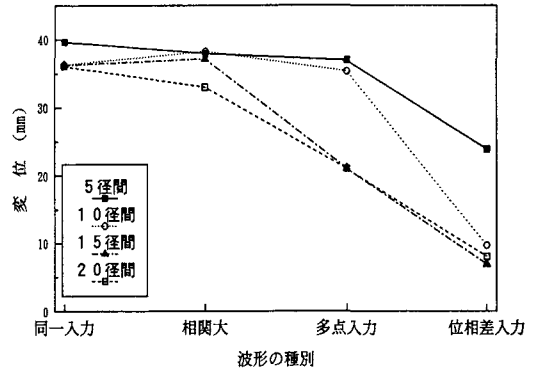
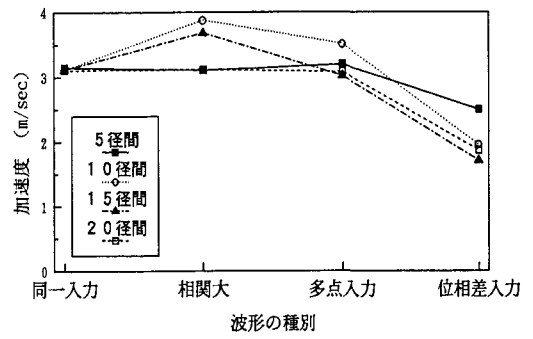
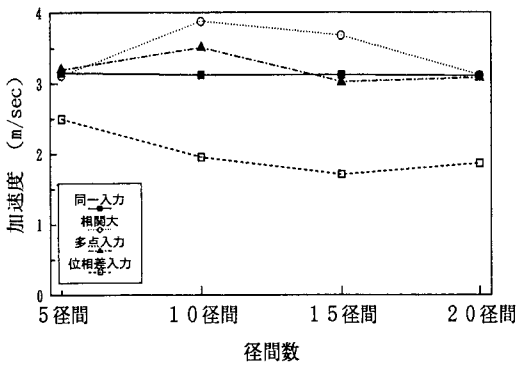


図-10 波形入力の違いによる応答結果  
(固定支承橋軸方向)



### (3) 波形入力の違いによる応答の比較

図-10は、固定支承橋軸方向入力の場合の橋脚天端変位と加速度応答を、波形入力の違いに関してまとめたものである。この図から、位相差入力の応答値は、他の入力方法の場合と比較して、かなり小さいことがわかる。橋軸直角方向に対する位相差入力の場合は、図-7(b)に見られるようにP<sub>7</sub>橋脚から1個おきに同一入力より大きくなっている。ゴム支承橋軸方向入力の場合は、固定支承橋軸方向入力と同様の傾向を示すが、橋脚天端の応答は波形入力の違いによる差が主桁ほど顕著ではない(図-7(c))。これは地震力の作用が下部構造から伝達し、ゴム支承を介して上部構造に作用するが、剛性の高い橋脚では波形の差があまり出ず、主桁上で波形の違いが増幅されるためと思われる。

### (4) 相関係数の違いによる応答の比較

相関大と相関小は、多点入力に比較して相関係数がそれぞれ大きい場合と小さい場合に相当するので、図-11に示すように横軸上の位置を多点入力の両側にとってプロットした。図からわかるように、相関小の応答結果は多点入力と位相差入力の中間の値を示しており、相関大は、一部の点の加速度を除いて多点入力と同一入力の中間的な値を示している。

(5) 支承形式の違いによる応答の比較

図-12は、支承形式の違いによる橋軸方向の固有周期の比較を示す。固定支承とゴム支承との固有周期の差は大きい、いずれも径間数による差はほとんど見られない。

図-13は、多点入力における支承形式の違いを変位に関して示しているが、径間数にかかわらずゴム支承橋脚天端の変位は固定支承の変位よりも小さくなっている。

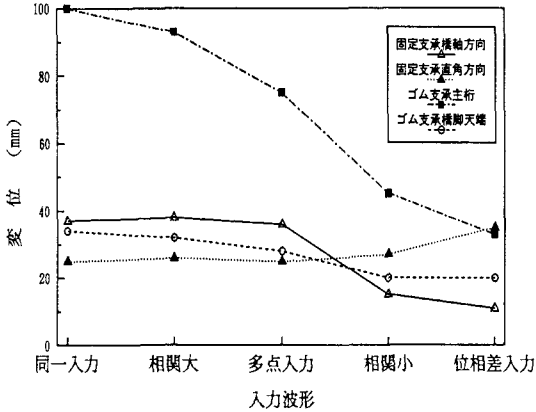


図-11 波形入力の違いによる応答結果 (10径間)

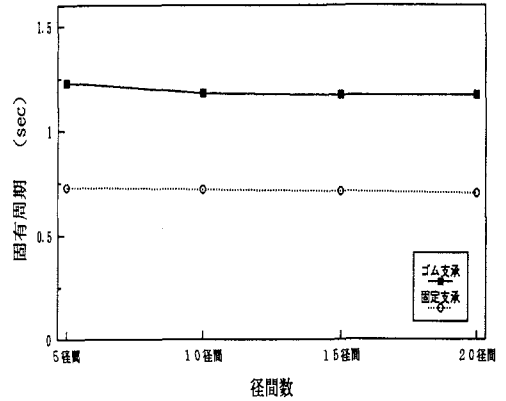
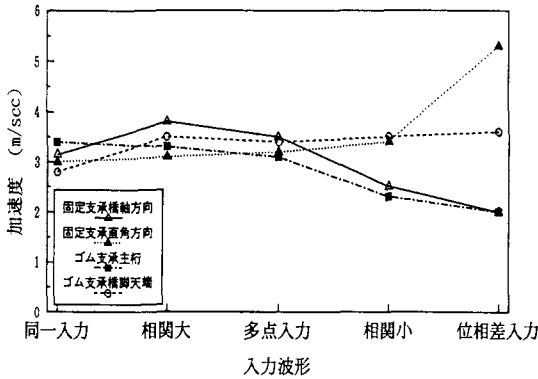


図-12 支承形式の違いによる固有周期の比較

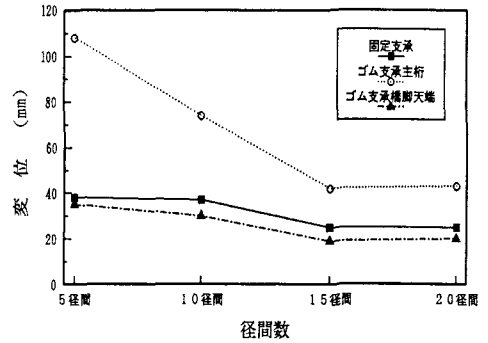


図-13 支承形式の違いによる応答変位の比較 (多点入力)

5 結論

本研究で行った数値解析の結果から得られた知見の主なものは、以下のようである。

- 1) 橋軸方向の位相差入力の応答値は、他の波形入力の場合に比べて小さくなっている。このため位相差入力を設計に用いると、危険側の設計になる可能性がある。
- 2) 実際の応答に近い結果を与えていると考えられる多点入力では、15径間程度で応答変位の値が収束しており、多径間化のメリットは本研究で対象とした橋梁では一応15径間程度であると言える。
- 3) 多点入力に比べて、同一入力や位相差入力では、超多径間連続橋の地震応答特性を的確に評価していないように思われる。したがって、本論文で解析の対象としたような比較的径間長が短くても超多径間である橋梁に対しては、入力地震動の空間相関を考慮した動的解析が望ましいと言える。



相関係数が異なって評価された場合（本文の相関大や相関小の計算例を指す）、同一入力や位相差入力の場合ほど極端な結果は生じないようであるが、的確な相関係数の評価は必要であろう。

- 4) 支承形式の違いによる比較では各波形、各径間数ともにゴム支承橋脚天端の変位が固定支承に比べて小さくなっている。変位が小さくなれば橋脚下端の曲げモーメントも小さくなり、ゴム支承形式が有利になると考えられる。しかし、上部構造主桁の変位は固定支承形式に比べてかなり大きい。

本数値解析によって、超多径間連続橋の入力地震動を設定するための基礎的知見と本構造の地震応答特性を、ある程度明らかにできたと考えている。しかしながら、使用原波形や地盤種別の違いにより、応答特性にどの程度の差異が生じるかの検討、地盤との相互作用を考慮した場合に、波形入力の差が応答特性に及ぼす影響の度合いの検討などが、今後の課題として残っている。さらに、解析モデルに関しては、異なった支間、橋脚高さおよび上部構造形式での応答の差異についての検討なども必要と思われる。

#### 参考文献

- 1) Harada, T. (1984). "Probabilistic Modeling of Spatial Variation of Strong Earthquake Ground Displacements", Proc. of 8th World Conference on Earthquake Engineering.
- 2) Abrahamson, N. A., Bolt, B. A., Darragh, M., Penzien, J. and Tsai, Y. B. (1987). "The SMART-1 Accelerograph Array(1980-1987): A Review", Earthquake Spectra, Vol. 3, No. 2.
- 3) Tamura, K., Winterstein, S. R. and Shah, H. C. (1991). "Spatially Varying Ground Motion Models and Their Application to the Estimation of Differential Ground Motion", Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No. 437/I-17.
- 4) 田村敬一他：時間－空間変動を考慮した相対地震動の評価、第21回地震工学研究発表会講演概要、平成3年7月
- 5) 道路橋示方書、同解説：（社）日本道路協会、V耐震設計編、1990年
- 6) Tamura, K. and Aizawa, K. (1992) "Differential Ground Motion Estimation Using a Time-space Stochastic Process Model", Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No. 441/I-18.

(1993年9月16日受付)