

直接基礎を有する立体交差橋梁の滑動を考慮した地震応答解析

Earthquake Response Analysis by which slipping of Three Dimensional Flyover Bridge is considered

権 映録*, 西村宣男**

Young Rog KWON, Nobuo NISHIMURA

* 工博 大阪大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** 工博 大阪大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

In Japan, the process by which the intersection where a lot of traffic exists is made the flyover bridge is advanced from the viewpoint of the making of road traffic smooth and the securing of safe traffic space. It was difficult to set up the caisson or the pile style of a general bridge from the conditions of location of an exciting plane intersection road in OSAKA Pref. KITAHANADA intersection that is the one example. So, a structural style of footing, which had the steel beam was adopted. However, Hyogo-Ken Nanbu earthquake of January 17, 1995 caused severe damage to many bridges and structure etc. in various places. In this paper, three dimensional earthquake response analysis is done intended for the flyover bridge. Furthermore, the analysis involving slipping at the interface of soil and structure is developed for the approach of three dimensional soil-structure interaction system subjected to the strong excitation. Parametric studies are conducted to the soil and structure system subjected to the TAKATORI earthquake record (1995), which is given large damage to various structures. Also, the slipping between soil and structure is clarified to the hybrid time domain approach considering a geometrically nonlinear system at the contact surface introduced in this study.

Key Words: Flyover bridge, earthquake Response analysis, slipping, interface element

1. まえがき

道路交通流の円滑化と安全な交通空間の確保の観点から、交通量の多い交差点を立体交差化する事業が全国で進んでいる。その一例である大阪府北花田交差点では、既存の平面交差道路の立地条件から、一般的な橋梁のケーソン基礎あるいは杭基礎を設置することが困難であり、鋼製の支持ばりを有する直接基礎をもった構造形式¹⁾が採用された。北花田交差点では、交差点直下には地下鉄北花田駅が位置しており、常時多くの人と車が交差する交差点である。このような背景から、北花田交差点は立体交差化が行われた。そこで本交差点では、地下鉄駅舎に影響を与えず、かつ沿道への影響期間を短くすると共に高架下の利用が早期に再開できる工法である立体交差橋梁(通称, Uni Fly Over)工法が適用された。この工法は土中部分に基礎構造を必要とせず、下部工の支持梁を連続フーチングを介して直接基礎面に設置する工法で上部工、下部工を鋼製とし一体化構造とする工法である。

平成7年1月17日に発生した阪神淡路大震災は各地域で甚大な被害をもたらした。その地震被害の特徴の一つは地盤変形による構造物の被害であった。既往の地震応答解析では、構造物と地盤の相互作用を厳密に考えずに、地盤からの入力地震動を与えて地震応答解析が行われてきた。地盤-構造物の動的相互作用はそれぞれの間の接触面による運動エネルギーの相互交換問題であり、相互作用特性は地盤と構造物の固有の力学特性、接触面の幾何学的形状と接触面の状態によって変動する。地盤-構

造物の相互作用問題は過去には地盤と構造物の接触面で完全に固着状態として研究が行われた。しかし、大地震時は地盤-構造物の接触面では剥離とすべりの滑動現象が起こる可能性が十分考えられる。地盤-構造物のシステムでは、地盤は構造物に引張応力を直接伝達できないので、本解析にはその接触面に特別なモデルを考えて地震時の滑動現象を表現することとした。StokesとRichartら²⁾、VaughanとIsenbergら³⁾は滑動現象を実験的に究明した。相互作用問題は実験的にその現象を究明するには時間的、経済的問題が考えられる。したがって、現在は、地盤-構造物の相互作用問題を近似的に解析する方法が要求されている。数値解析法で広く使われている方法として有限要素法と境界要素法が挙げられる。

時間領域で境界要素法を適用した最も初期の研究としてはColeら⁴⁾の研究がある。彼らは2次元面外波動場の解析に境界要素法を適用する研究を行い、安定な解を得るために表面力の時間に関する補間関数の次数を0次とする必要があることを示した。Mansurら⁵⁾は面外波動場解析によって、さらに安定な解を求めるため、境界要素の長さや時間積分の大きさについて考察を行った。Underwoodら⁶⁾は、段階別に時間積分による時間領域での地盤-構造物相互作用問題に対して研究を行ったが、彼らの研究は、単に静的境界要素を用いて地盤の剛性マトリックスを求めて構造物の解析を行っているに過ぎない。KarabalisとBeskos⁷⁾は均質、等方、線形弾性の半無限体地盤に柔軟な3次元

矩形基礎を置いて動的応答を求めたが、彼らの研究は変位と表面力分布が一定の直四角要素を用いた。本研究では地震作用時の地盤・構造物の相互作用システムに、滑動現象を考慮した解析を行う。土岐ら⁹⁾は地盤・構造物の接触面に特殊なモデルを考案し、幾何学的非線形のみならず材料的非線形性も考慮した。Chengら⁹⁾は根入れ基礎や杭を対象として地盤の非線形性だけでなく、幾何学的非線形を考慮した研究を行うため地盤を有限要素モデルで離散化した。本研究で用いたインタフェース要素は、一般的に、Goodman、TaylorとBrekke¹⁰⁾のジョイント要素の理論にしたがっている。Zinnkiewiczら¹¹⁾はソリッド要素の相対運動を評価するため、3次元アイソパラメトリック要素のインタフェースを用いた。Katanoら¹²⁾は接触面でのさまざまな変形に着目して、適切な拘束条件面を考慮し、仮想仕事の原理からインタフェースモデルを誘導した。Herrmann¹³⁾は特定な拘束条件を導入してGoodmanらが求めたようなインタフェース要素のアルゴリズムを示した。そして彼は接触面でのすべりと剥離を考慮した。

本研究は立体交差橋梁と周辺地盤を含んだモデルに対して有限要素モデル、有限要素法が適用しにくい半無限地盤に対して境界要素モデルを適用し、境界要素法と有限要素法の結合により離散化を行い、3次元での全体地盤・構造物の動的相互解析と大地震時に発生する可能性があると考えられる滑動現象も考慮に入れた解析を行うことにする。

2. 境界要素法と有限要素法の定式化

2.1 半無限地盤の境界要素モデルの離散化

均質、等方の動弾性体に対するNavier Cauchyの運動方程式を示すと次のようである。

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{j,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

上式でP波の伝播速度CpとS波の伝播速度Csを用いて再び表すと次式となる。

$$(C_p^2 - C_s^2) u_{i,jj} + C_s^2 u_{i,jj} + f = \ddot{u}_i \quad (2)$$

動弾性論によりGraffiの相反定理とStokesの基本解を用い、物体力と初期条件を0と仮定して変位ベクトルと表面力ベクトルの境界積分方程式を次のように表す。

$$0.5 u_k(\xi, t) = \int_{\Gamma} u_{ik}(x, t; \xi | t_i(x, t)) d\Gamma(x) - \int_{\Gamma} t_{ik}(x, t; \xi | u_i(x, t)) d\Gamma(x) \quad (3)$$

ここで、 t_{ik} は表面力基本解、 u_{ik} はStokesの基本解で $u_{ik}(x, t; \xi | f)$ の $f = \delta(t - r)$ である。

境界積分方程式(3)の数値解析では空間領域のみならず時間領域の離散化が要求されるので全体時間領域をN個の時間領域で分けてそれぞれ時間領域での表面力が一定として段階的Gauss積分を行う。表面力の離散化は全体境界がM個の境界要素で構成されており、各境界要素内での変位と表面力はその境界要素の節点で変位、表面力の値と形状関数で示される。表面力は直四角形力積(Impulse)で近似させ、Fig 1のように3次元の半無限地盤を2次元化してM個の4節点アイソパラメトリックス要素で離散化した。一般的に時間領域 $(q-1)\Delta t < t < q\Delta t$ と境界 Γ 上の任意点の表面力 t_i は次のようである。

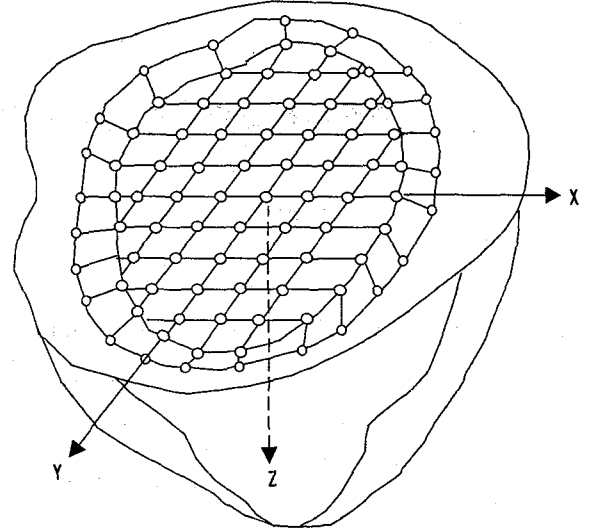


Fig.1 境界要素モデルによる半無限地盤の離散化

$$t_i(x, t) = t_i^q(x) [H(t - (q-1)\Delta t) - H(t - q\Delta t)] \quad (4)$$

ここに、 H はHeaviside Functionである。

境界積分方程式(3)にStokesの基本解 U_{ik} と T_{ijk} を適用し、境界面をM個のアイソパラメトリックで離散化させ、変位と表面力の関係式を示すと次のように連立方程式となる。

$$\frac{1}{2} \{u^{N,R}\} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M ([G^{n,S}] \{t^{(N-n+1),S}\} - [T^{n,S}] \{u^{(N-n+1),S}\}) \quad (5)$$

式(5)の $[G^{n,S}]$ と $[T^{n,S}]$ は解析的に積分できないのでGauss法を用いて積分する。しかし、ここで積分上の特異性問題が生じる。この場合は観測点Rと原点S要素が一致するとき、即ち、 $r=0$ で生ずるためまず、解析的に積分し、その特異性を無くしてから数値解析を行う必要がある。さらに、式(5)をマトリックスで示すと次のとおりである。

$$\frac{1}{2} \{u^N\} = \sum_{n=1}^N ([G^n] \{t^{N-n+1}\} - [T^n] \{u^{N-n+1}\}) \quad (6)$$

2.2 有限要素モデルの離散化

弾性波動方程式に対する有限要素表示、重み付き残差法を利用することにより次のような式が得られる。

$$[M] \{\ddot{u}^N\} + [C] \{\dot{u}^N\} + [K] \{u^N\} = \{P^N\} \quad (7)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰そして剛性マトリックスである。

本研究は立体交差橋梁と周辺地盤に対しては有限要素モデルにより離散化し、それぞれ8節点アイソパラメトリック要素を用いてモデル化する。

2.3 境界要素法と有限要素法の結合

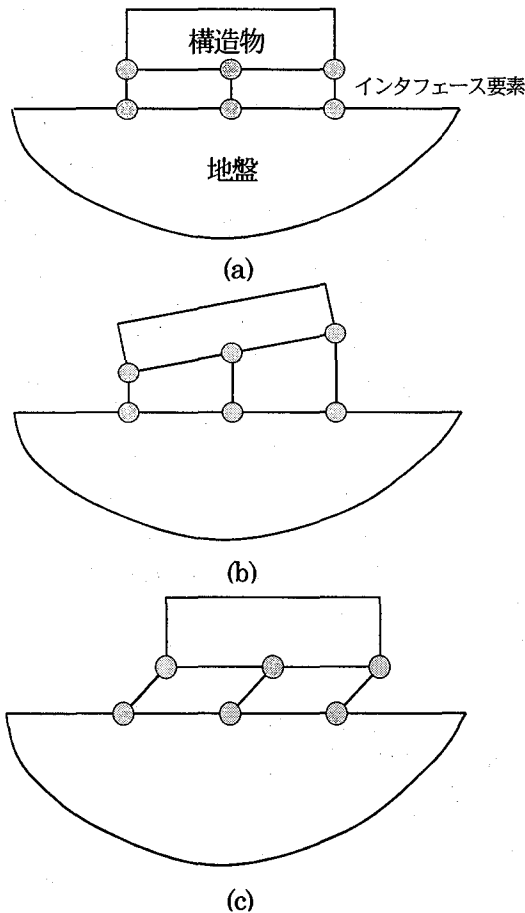
前節で誘導した境界要素モデルと有限要素モデルに対して、その両モデルの境界面における変位の適合方程式と表面力のつりあい方程式を用いて両者を結合する。

$$\begin{bmatrix} D_{ff}^n & D_{fb}^n \\ D_{bf}^n & D_{bb}^n + K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_f^n \\ u_b^n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f^n \\ P_b^n \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、添字f, bは有限要素領域と境界要素領域である。そして、有効マトリックスは $D^n = -\omega^2 M^n + i\omega C^n + K^n$ である。式(8)の運動方程式の積分にはNewmark- β 法を用いた。

2.4 地盤-構造物の接触面でのインタフェース要素

本研究で用いたインタフェース要素は、地盤と構造物の間の接触面における剥離とすべりを評価するために導入した薄板要素(thin-layer element)である。本研究で地盤と構造物の接触面に導入したインタフェース要素はFig. 2 のような3つのモードで表される。



(a) 固着モード (b) 剥離モード (c) すべりモード

Fig.2 地盤-構造物の接触面で変形モード

(a) 固着モード(Stick Mode)

$$\begin{aligned} \sigma_n &\geq 0 \\ F_s &\leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

(b) 剥離モード(Separation Mode)

$$\sigma_n < 0 \quad (10)$$

(c) すべりモード(Sliding Mode)

$$F_s > 0 \quad (11)$$

ここに F_s は以下の式(12)であり、 C は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

$$F_s = \text{sgn}(\sigma_n) - (C + \tan \phi) \quad (12)$$

本研究でインタフェース要素を含んだ境界要素法と有限要素法の数値解析フローはFig. 3 のようである。

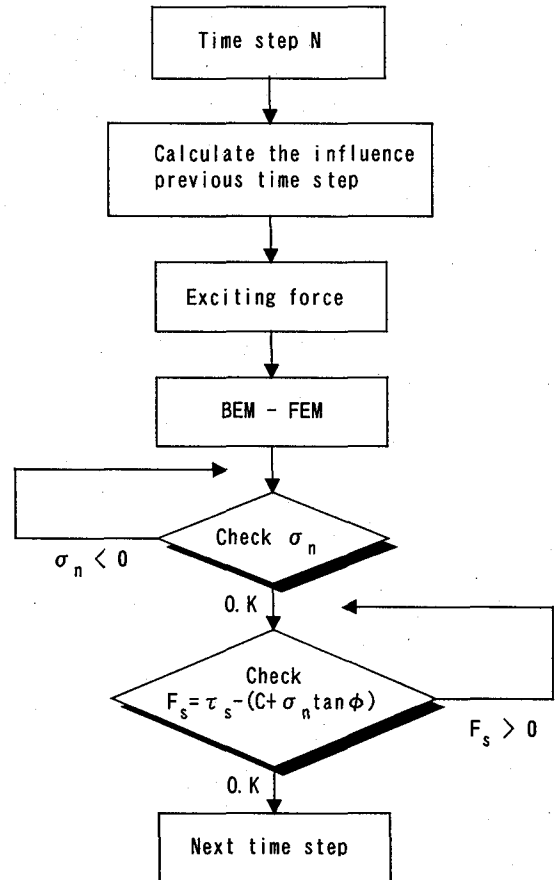


Fig.3 インタフェース要素を用いた解析プログラムのフロー

3. 解析モデルと入力加速度

3.1 解析モデル

本研究では、3次元にモデル化した新立体交差橋梁とその周辺の地盤に対して有限要素モデルを用い、半無限体地盤においては境界要素モデルを用いた。さらに、両モデルはアイソパラメトリック要素で離散化した。Fig.4(a)は解析に用いた3次元立体交差橋梁の解析モデルであり、周囲の地盤は各方向につき20m含めたモデルとした。Fig.4(b)は解析モデルの側面図であり、半無限体地盤は境界要素モデルで離散化した。有限要素モデル部は、周辺地盤、フーチング、支持ばり、および上部工である。Fig.4に示すI1~I8 (Inner)はモデルの地盤と構造物の接触面の左側、O1~O2(Outer)は右側を示している。Table 1に解析に用いた構造諸元を示す。

3. 2 解析に用いた入力加速度

解析に用いた入力加速度は、1995 年兵庫県南部地震波形で JR 鷹取駅で観測された波形であり、最大加速度が NS 成分 642Gal となっている (Fig.5)。さらに、200Gal を超えるような加速度が 13 秒程度続いているのが特徴である。

本研究では全長 251m の立体交差橋梁に対する全体解析を行うため入力地震波の位相差入力を考慮に入れている。解析における地震力の位相差は、構造物と隣接している地盤のせん断波速度を基準とし、波が立体交差橋梁の橋軸方向に伝達する時間を計算して入力することになるため、地震波の位相差時間は次の式のようなものである。

t_{phase} = \frac{B_{element}}{C_s} \tag{13}

ここに、B_{element} は地震波が入力される地盤の要素の橋軸方向の長さであり、C_s は隣接地盤のせん断波速度である。

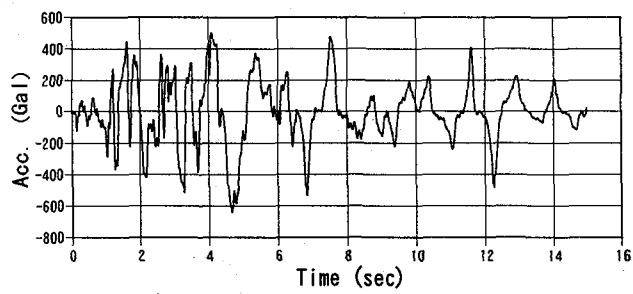


Fig.5 鷹取地震波

Table 1 解析に用いた構造諸元

		質量密度	ポアソン比	減衰定数
周辺地盤	Cs=100 m/s	17.65 kN/m ³	0.4	0.2
フーチング	鉄筋コンクリット	24.52 kN/m ³	0.167	0.1
支持梁	SS400	76.98 kN/m ³	0.3	0.05
上部工	SS400	76.98 kN/m ³	0.3	0.05

Cs はせん断波速度

4. 解析結果と考察

4. 2 入力地震波の位相差入力を考慮した結果

本解析では Fig.4 のモデルに地震波を橋軸直角方向に入力して地震応答を求めている。そのときの標準時間刻みは、0.005sec である。

Fig.6 は地震波を同時に入力した際の応答と位相差入力を考慮した際の地震応答の比較である。Fig.6 (a)は地震波の導入部に近い部分で同時に入力した応答とほとんど一致している。Fig.6 (b)は立体交差橋梁の右側の地震応答であり、入力地震波の位相差入力により時刻遅れが見られる。いずれも最大変位応答はほぼ同様な応答を示している。

4. 2 地盤と構造物の接触面での滑動を考慮した解析

本研究で導入した地盤と構造物間の接触面におけるインタフェース要素により両者間の相対運動を解析で評価した。インタフェース要素は内部摩擦角は 30、粘着力は 49.03 と 98.07kN/m² を考慮した。そのとき、地震波形を橋軸直角方向に入力するこ

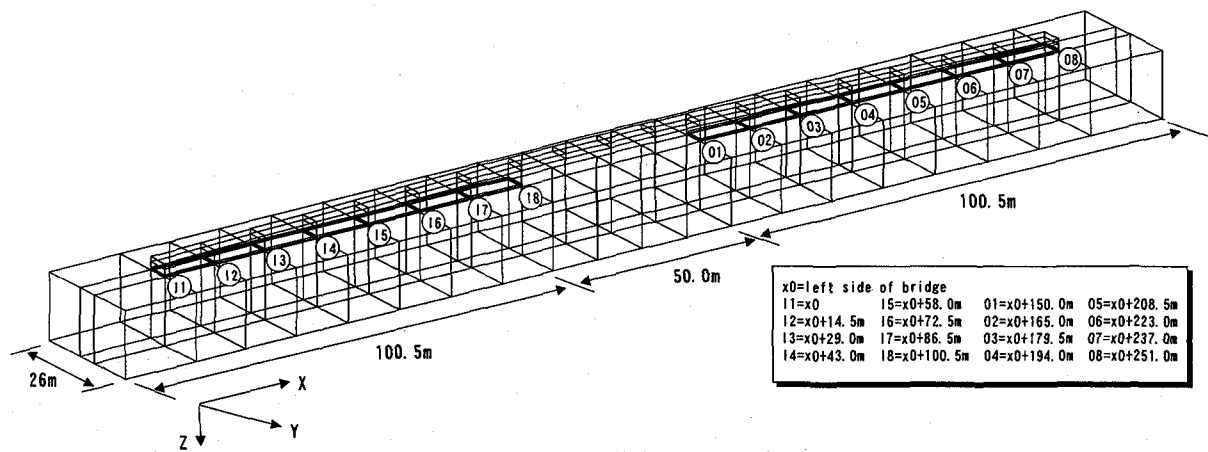


Fig.4 (a) 周辺地盤を考慮した立体交差橋梁の解析モデル

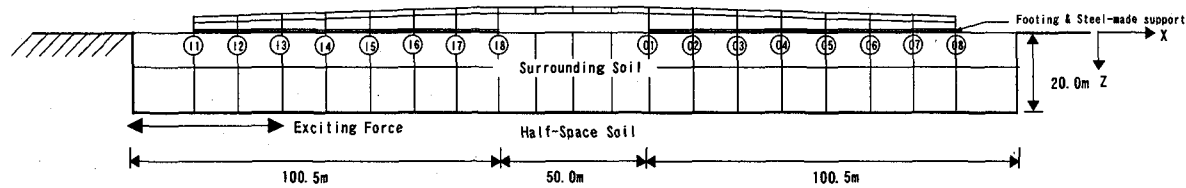


Fig.4 (b) 解析モデルの側面図

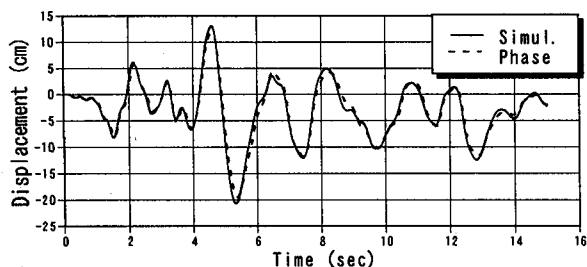


Fig. 6(a) 同時に入力した応答と位相差入力
した I1 での応答比較

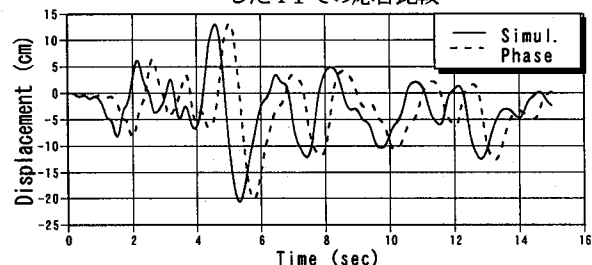


Fig. 6(b) 同時に入力した応答と位相差入力
した O8 での応答比較

とで地震波の位相差入力を考慮している。全解析に用いた時間
刻みは 0.005sec である。Fig.7 は地盤と構造物の接触面が完
全に固着と仮定したケースの地震応答と比較した結果である。
Fig.7(a)~(c)は、橋梁左側の I1, I4, I8 での滑動による変位応
答を完全固着と仮定したモデルの応答と比較したものであり、
滑動が生じていない時刻の両応答は全く同じ応答を示している
が、滑動が生じていると見られる時刻 2 秒付近から地盤と構造
物の間の接触面で滑動が発生し、その後の接触面での応答は滑

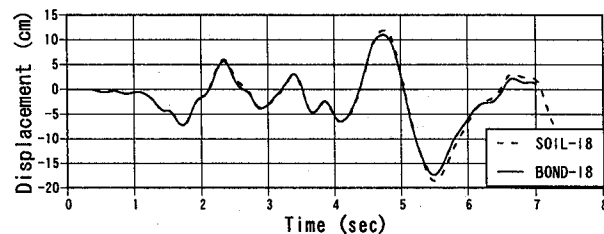
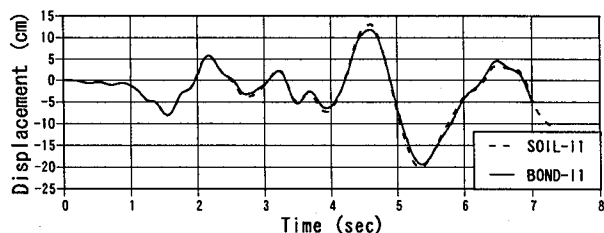
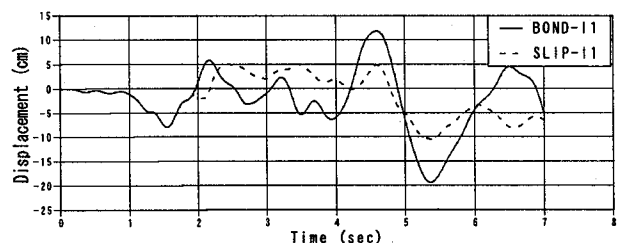


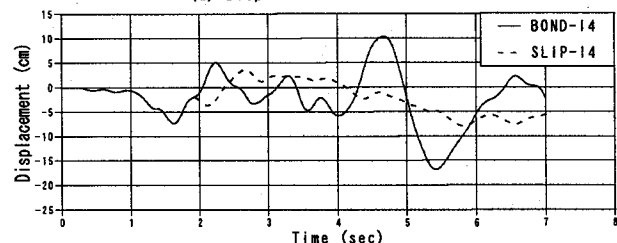
Fig.8 完全固着の地盤応答と滑動を考慮した
解析の地盤応答の比較

動現象により若干相違な傾向を示している。Fig.7 (d)~(f)は橋梁
の右側の地盤との接触面での変位応答であり、地震力の位相差
入力のため滑動の発生時刻がともに若干遅れており、同様に滑
動が発生する時刻を超えると完全固着としたケースの地震応答
と相違な結果を示している。Fig.8 は、地盤と構造物の間が完全
固着と仮定したモデルと滑動を考慮したモデルに対する地盤の
時刻歴応答の比較を示している。本解析では地盤は線形、弾性
体として仮定して解析を行っているので構造物の滑動に関わら
ず地盤の応答はほぼ一致していることを示している。

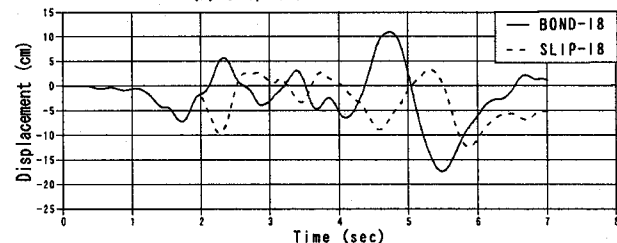
Fig.9(a), (b), (c)は位相差入力地震波を与えたとき地盤と構造
物の接触面での変位応答を時刻歴で示したものである。Fig.9(a)



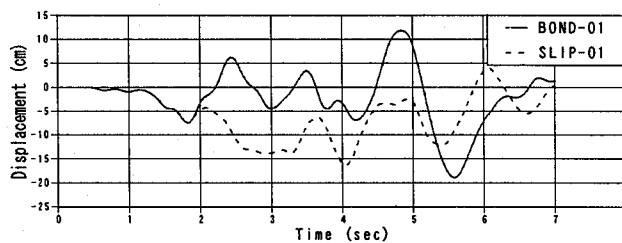
(a) Displacement at I1



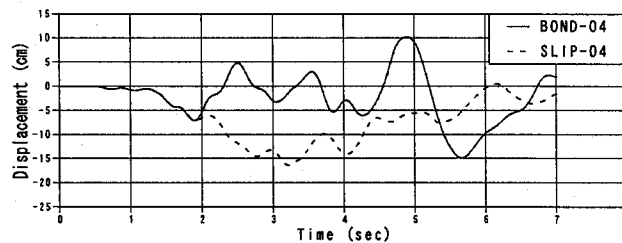
(b) Displacement at I4



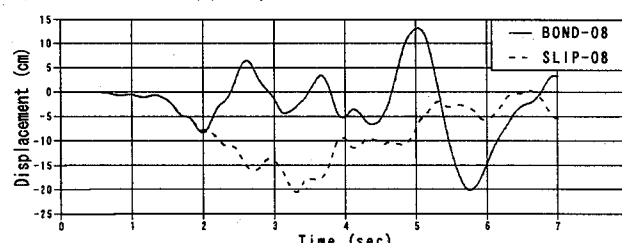
(c) Displacement at I8



(d) Displacement at O1



(e) Displacement at O4



(f) Displacement at O8

Fig.7 完全固着と仮定したケースとの応答比較 ($C=98.07\text{kN/m}^2$)

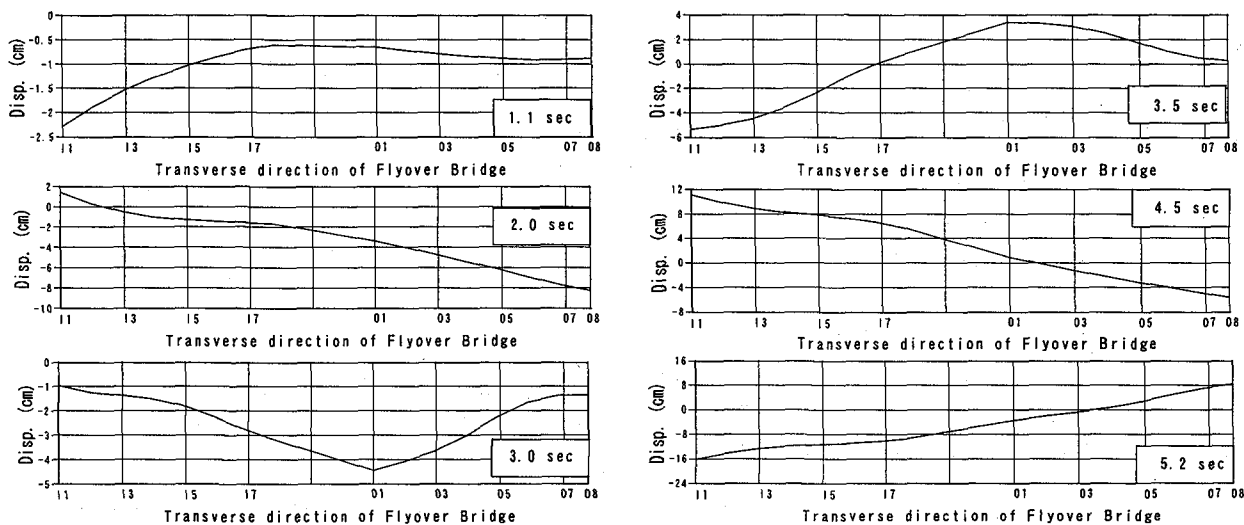


Fig.9(a) 立体橋梁の橋軸方向の時刻歴応答 (完全固着)

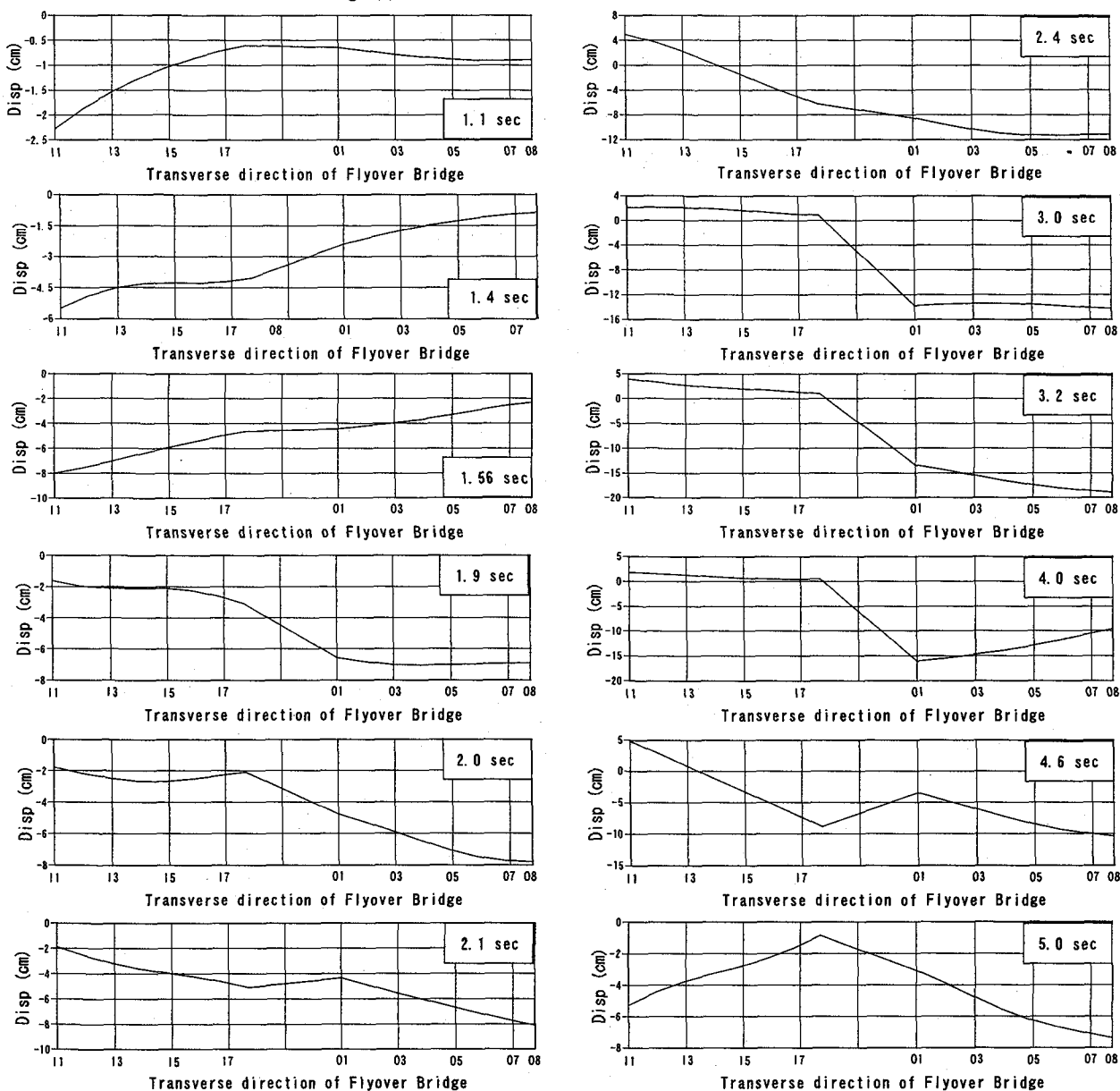


Fig.9(b) 滑動を考慮したケースの橋軸方向による時刻歴応答 ($C=98.07\text{kN/m}^2$)

は完全固着ケースの時刻歴応答であり、1秒から5秒間の応答を橋軸方向に示している。橋軸の変位応答は時刻の変化にかかわらず、ほとんど一定に動揺している。Fig.9(b)、(c)は地盤と構造物の間に滑動を考慮した解析であり、橋梁底面における時刻歴により変位応答を示したものである。それぞれインタフェース要素の粘着力は 98.07kN/m^2 と 49.03kN/m^2 とし、内部摩擦角は 30° である。Fig.9(b)の粘着力 98.07kN/m^2 の変位応答は2秒以前には橋梁全体に一定に動揺しているし、また滑動が生じていないことが考えられる。しかし、滑動が発生する2秒付近から、応答は徐々に乱れが生じ、一定な動揺は見られない。Fig.9(c)はインタフェース要素の粘着力を 49.03kN/m^2 と考慮した際の時刻歴の変位応答を示している。橋軸方向の応答は同様に滑動が生じないと一定に動揺しているが、時刻1.6秒付近から滑動が起こり始め、それ以後の応答は滑動による橋梁全般に影響を与えられ、橋軸方向の変位応答に乱れが生じる。

5. 結論

本研究では、交通量の多い交差点において、道路交通の円滑化と安全な交通空間の確保を目的とした、立体交差化に有利な構造形式である立体交差橋梁を対象として、地震時の地盤と構造物間の動的相互作用のうち、大地震時に発生する可能性があると考えられる滑動現象について動的解析を行ったものである。地盤と構造物の相互作用問題を扱った既存の研究では、対象になる地盤に有限要素モデルを用いているのに対し、本研究では、地盤から伝播される地震波を適切に評価すべく、半無限体地盤に境界要素モデルを用いた。本解析で得られた成果を以下に示す。

1. 半無限体地盤を含んだ地盤－構造物相互作用問題について、半無限体地盤に境界要素法を用いた。そのため解析モデルの簡素化と、地盤境界面での波の問題の処理が可能となった

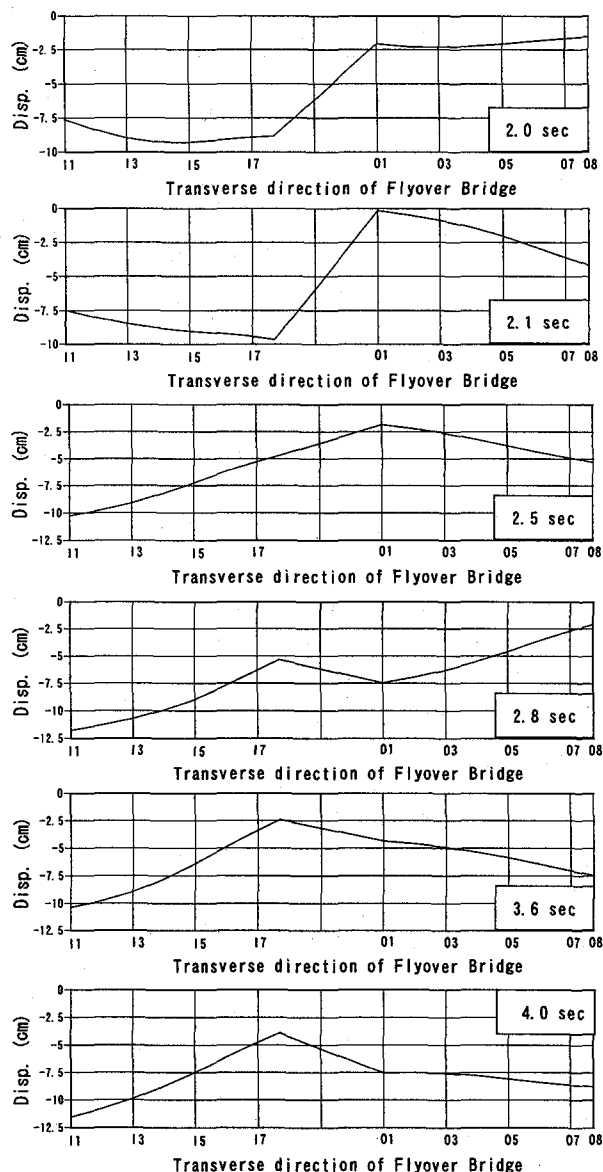
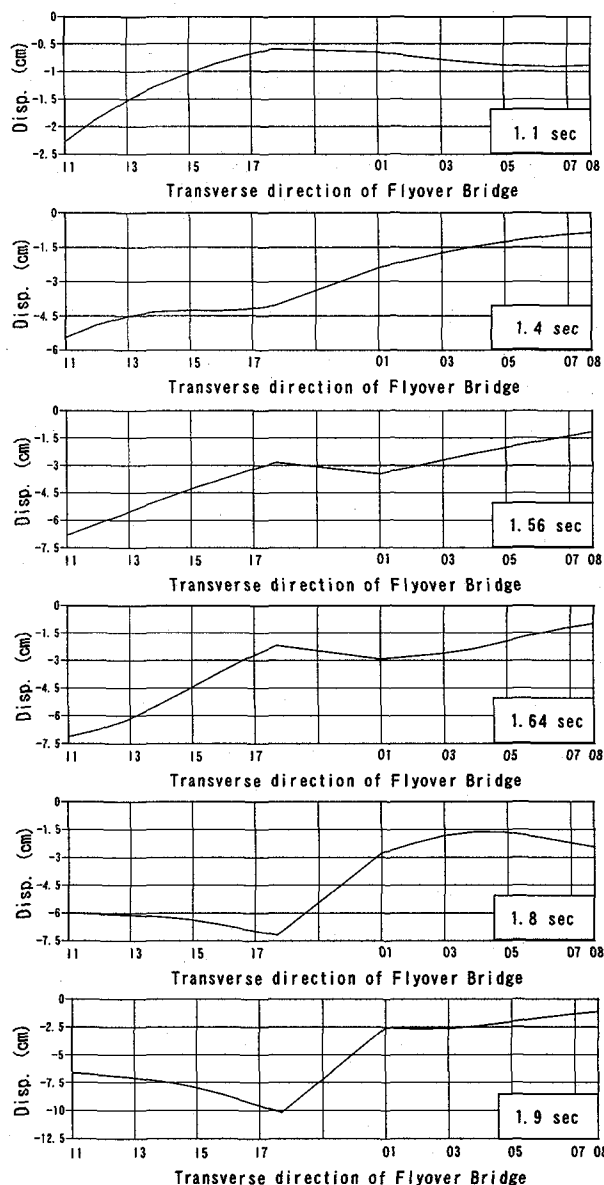


Fig.9(c) 滑動を考慮したケースの橋軸方向による時刻歴応答 ($C=49.03\text{kN/m}^2$)

た。さらに、大地震時の地盤と構造物間の接触面に発生する可能性のある滑動に対する評価が、本研究で導入した幾何学的非線形性を有するインタフェース要素を用いることで可能となった。

2. 地盤と構造物の間の接触面にインタフェース要素を設置し、本解析モデルのような線状構造物に対する地震波の位相差入力を考慮して解析した結果、滑動の発生によって、地震応答が地盤と構造物を完全に固着と仮定した時刻歴応答とかなり違った結果が得られた。滑動が生じていない時間内の地震応答は固着と仮定した応答とほぼ一致しているが、両者間に滑動が生じ始めると両応答の顕著な差異が見られた。
3. 地震波の入力により立体交差橋梁の橋軸方向についての時刻歴応答を求めた結果、滑動が生じていない時刻での地震応答は橋梁全体に対してほとんど一定に動揺しているが滑動が生じる時刻の以後の応答は一定な動揺の傾向が見られない。

本研究では、良好な地盤上に設置される立体交差橋梁を対象に地盤-構造物の相互作用解析を行ったが、すべての地盤を線形弾性体と仮定している。しかし、大地震時には地盤は非線形挙動を呈すると考えられている、そして、今後は、本研究で行った地盤と構造物間の接触面における滑動現象に対する地盤の非線形性を考慮した相互作用解析と地震時の滑動による構造物の安全性問題について進みたい。

【参考文献】

- 1) 災害科学研究所、大阪大学構造研究室、大阪府鳳土木事務所、日立造船株式会社、建設技術研究所：北花田交差点立体高架橋における上部構造、基礎、地下鉄カルバートの相互作用に関する調査研究報告書、Oct., 1997.
- 2) Stokes, K.H. & Richart, F.E.: Dynamic response of Embedded machine foundation, J. Geotech. Div. ASCE, 100, pp.427-47, 1974.
- 3) Vaughan, D.K. & Isenberg, J.: Non-linear rocking response of model containment structures, Earthq. Engng Struct. Dyn., 11, pp.275-96, 1983.
- 4) Cole, D.M., Kosloff, D.D and Minister, J.B.: Numerical Boundary Integral Equation Method for Elastodynamics I B.S.S., Vol.68, No.5, pp.1331-1357, 1978.
- 5) Mansur, W.J. and Brebbia, C.A.: Numerical Implementation of the Boundary Element Method for two dimensional transient scalar wave propagation problems, Appl. Math. Modelling, Vol. 6, pp.299-306, 1982.
- 6) Underwood, P. and Geers, T.L.: Doubly Asymptotic Boundary Element Analysis of Dynamic Soil-Structure Interaction, Int. J. Solids Struct. Vol.17, pp.687-697, 1981.
- 7) Karabalis, D.L. and Beskos, D.E.: Dynamic Response of 3-D Flexible Foundation by Time Domain BEM and FEM, Int. J. Soil Dyn. Earth. Engng., Vol.4, pp.91-101, 1985.
- 8) 土岐憲三, 佐藤忠信, 三浦房紀: 強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動, 土木学会論文報告集, No.302, pp.31-41, 1980.
- 9) Cheng, F.P., Ressel, J.M. and Tassoula, J.L.: Dynamic Response of Circular Foundations in an Elastoplastic Soil Medium, Report GR86-3, Civil Eng. Dept., The Univ. of Texas at Austin, Texas, 1986.
- 10) Goodman, R.E., Taylor, R. L. and Brekke, T. L. : A Model for the Mechanics of Joints Rock, J. Soil Mech. And Found. Div. ASCE, 94, SM3, 1968.
- 11) Zienkiewicz, O. C. et al. : Analysis of Nonlinear Problems with Particular Reference to Jointed Rock System, Proc. 2nd Intl. Conf. Society of Rock Mech. Belgrade, Vol. 3, pp.501-509, 1970.
- 12) Katano, M. G. : A Simple Contact-Friction Interface Element with Applications to Buried Culverts, in C. S. Desai and S. K. Saxena, Proc. Symp. on Impl. Of Computer Procedures and Stress-Strain Laws in Geotech. Eng., Chicago, Illinois, Vol. 1, pp.45-63, 1981.
- 13) Hermann, L. R. : Finite Element Analysis of Contact Problems, J. Eng. Mech. Div., ASCE, 104, EM5, pp.1043-1057, 1978.

(1999年9月17日受付)