

(45) 動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物系の耐震解析システム SUBSSIP-2Dの開発

岡山大学工学部 正員 竹宮 宏和

1. まえがき

本研究は、地盤-構造物系の耐震解析システム：SUBSSIP-2Dを開発して、2,3の例題解析を試みたものである。地盤-構造物系の耐震解析用プログラムとして、これまでFLUSHあるいはそのバージョン・アップしたものが発表されて使用されているが、これらの解析法は一般に全体系解析法と称され、地震波の基盤面入力に対する応答を振動数応答法で計算している。本研究で開発したプログラムは、動的サブストラクチャ法を根幹としており、地盤-基礎-上部構造物系としての定式化を採っている。以下、その概要およびそれによる解析例を紹介する。

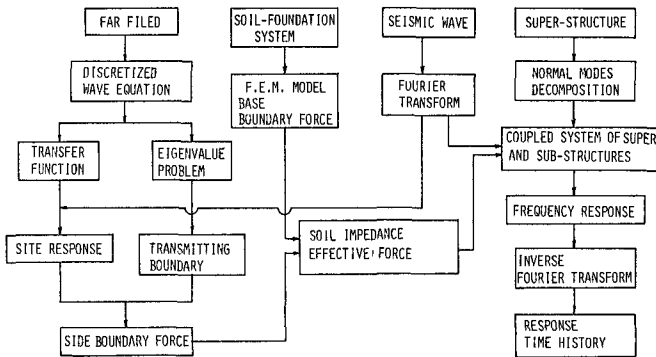


図1 SUBSSIP-2Dの解析フロー

1~4)

2 SUBSSIP-2Dの概要

耐震解析システムSUBSSIP-2Dは大別して、(イ)自然地盤解析、(ロ)地盤-基礎系としての下部構造解析、(ハ)上部構造系の解析、および(ニ)上下部構造の連成系解析から成り立っている。(図1参照)

(i) 自然地盤の波動伝播解析では、実体波(SV波、P波あるいはSV+P波)に対しては、ある深さに入力基盤面を想定する。このとき、表層地盤の影響が入らない深さ、例えば岩盤の上面等では剛基盤面とし、そしてまたそれより以深は一様地盤が続くと見せる場合は半無限基盤と仮定する。いずれの場合も表層地盤に対しては深さ方向に波動方程式を離散化するが、後者の解析では半無限基盤層については弾性波動論解を併用し、基盤面上の連続性から表層部の有限要素解と結合する。つまりハイブリッド方式を採る。従って任意の入射角の実体波が入射波として扱え、入射振幅に関して正規化された表層地盤応答が各振動数ごとに得られる。表面波(レリー波)に対しては、表層地盤下に半無限基盤層を近似的に表現するための各振動数で可変する深さの層を設けてその下端を剛とする。この場合、入力点は地表面とする。

(ii) 基礎およびその周辺の不規則領域の解析に有限要素法を適用するにあたり、仮想境界を設定しなければならない。本定式化では、不規則領域内の波動場を自然地盤内の波動と構造物からの放射波の和として捉えているため、それぞれに対して側方半無限遠への地盤の広がり効果を考慮できる側方伝達境界を導入している。領域内部は、地盤に対するソリッド(アイソパラメトリック)要素、基礎構造物にはソリッドおよび梁要素から構成される。解析法としては、一体解析、動的サブストラクチャ法が選択できる。後者の手法では、地盤と基礎の間の共有節点の採り方によって、さらに接触面モデルと接触体モデルが作成できる。接触面モデルは剛体基礎を対象とする場合に、また、接触体モデルは弾性基礎を扱う場合に使用すると便利である。動的サブストラクチャ法では、上記共有節点に関する地盤インピーダンスおよびそれへの有効地震入力を評価するため、基盤入力下での地盤-基礎系に縮合操作を施し、共有節点のみに関する式に帰着させる。ただし、後者は自然地盤内の波動伝播が得られておれば、これと地盤インピーダンス・マトリックスの積から容易に求まる。従って、異なる地震入力に対する解析には、既に算出済の地盤インピーダンスが使用できるという利点がある。

(iii)上下部構造物の慣性連成の動的解析には、動的サブストラクチャ法の接触面モデルから定式化している。つまり上部構造物は軽減衰系であるため、一時完全固定支持状態として固有モード分解を実施する。そして下部構造系との連成は、上の一時固定支持を基礎との切断面での自由度でもって解除する。この手法では入力地震動の振動数成分を考慮して、応答評価に必要な上部構造物の固有モードのみを抽出することができ、大きな多自由度系上部構造物に対しても連成系解析のための自由度を大巾に、かつ合理的に縮小することができる。また、上部構造物系と複数の下部構造物系との連成解析も可能で、長大な構造物に対する入力地震波の伝播効果を評価できる。

以上、いずれの部分解析においても、応答計算にはフーリエ変換法を採用しており、そのため時間領域と振動数領域の間の変換には高速フーリエ変換アルゴリズムを使用する。また、絶対座標系での振動数応答は加速度あるいは変位の応答倍率を表わしていること、および地震入力、通常、加速度記録で与えられるため、加速度応答の評価ではそれほど問題は生じないが、変位応答を算出する場合は、地震波の変位成分を、基線修正を経て求めている。

3. 地盤-基礎系の解析

最近の橋梁構造物は長大化する傾向にあり、それらの基礎は深い軟弱地盤上に構築されることが多く、そしてそれ相応の耐化力を必要とするため、必然的に大規模なものとなっている。ここでは、図2の2層3径間連続桁橋の橋軸直角方向の挙動を対象とした。基礎構造形式として、代表的な連続地中壁基礎と群杭基礎を仮定して、そのときの応答性状について調べている。

(i)連続地中壁基礎：同基礎は、連続壁を支持層まで深く根入れし、頂部で井筒状に閉じた構造である。解析対象物として、図3(a)の基礎を取り挙げ、同図(b)に示すように橋脚部を多質点(5自由度)、そして基礎および地盤をソリッド要素の平面歪モデルとした。上部構造物の効果としては、それを支持する径間部の桁の質量を橋脚の天端に附加している。さらに井筒内部の土砂の挙動を明確にとらえる目的から、地盤と壁面それぞれに2重の平面を取り、それらには摩擦抵抗を考慮するためのせん断バネを介在させた。側壁と地盤は完全密着の状態にあるとしている。解析手法としては基盤面入力に対する地盤-基礎系としての一体解析を実施し、基礎天端における下部構造インピーダンスおよびそれへの有効入力を評価する計算過程を採った。図4は、そのときのインピーダンスを描いたもので、内部土砂についての検討を行なっている。今回の場合は、その質量効果が非常に卓越していることが判る。図5は、地盤と構造物の動的相互作用を調べるため、自然地盤の地表面応答、基礎天端応答および橋脚天端応答の振動数応答において比較したものである。対象とした連続地中壁基礎は、1Hz付近に地盤との慣性連成で生じる振動モードが卓越している。橋脚の曲げ剛性が高いことを考え併せて、この卓越振動モードはロッキング振動と判断される。

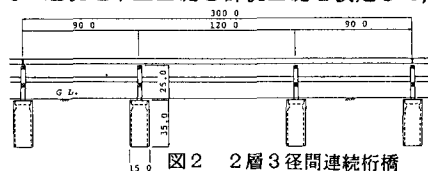


図2 2層3径間連続桁橋

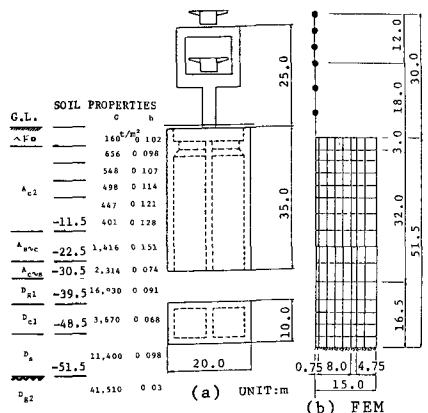


図3 地盤-連続地中壁基礎-橋脚系

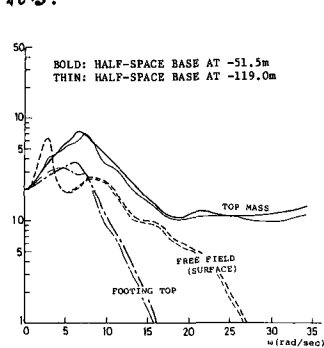


図5 振動数応答

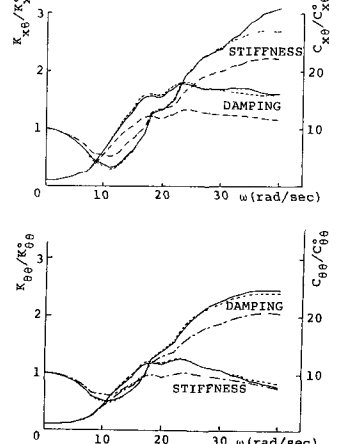
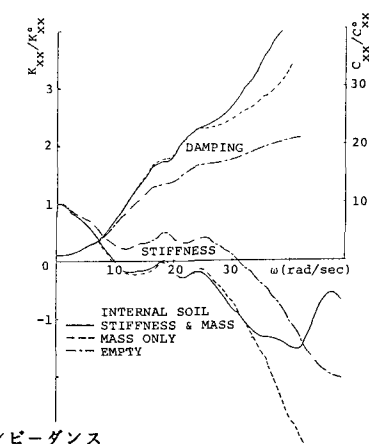


図4 下部構造インピーダンス



(i) 群杭基礎：軟弱地盤に対する基礎形式として、従来、支持層まで先端支持杭を複数本打設し、それらの頂部を剛な頂版に結合する群杭基礎が良く採られる。同基礎の解析に際して、杭をはり要素、頂版をソリッド要素として解析した(図6)。解析モデルは前述の連続地中壁基礎と同一の耐荷力を有するように静的設計条件から得られたものである。図7はフーチング天端での地盤-基礎系としてのインピーダンスを評価したもので、連続地中壁基礎の場合と比較して、回転剛性が非常に小さくフレキシブルな構造となっている。地盤と基礎と上部構造物の間の相互作用を調べたのが図8の振動数応答である。上部構造物の多質点系モデルは、図3のものと同じである。同図より、杭基礎は、主要な低振動数領域ではほとんど地盤の1次振動に追随していること、橋脚天端も大きくこの振動モードの影響を受けていること、そして下部構造系との慣性連成には、2次の地盤振動が関係していることが判かる。以上の応答性状は、前述の連続地中壁基礎のそれとは全く対称的である。

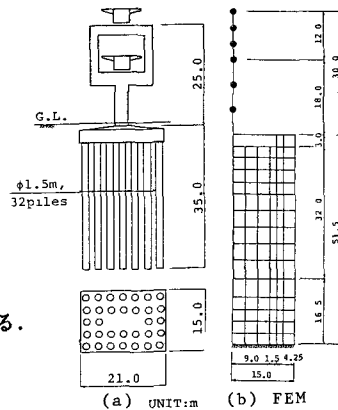


図6 地盤-群杭-橋脚系

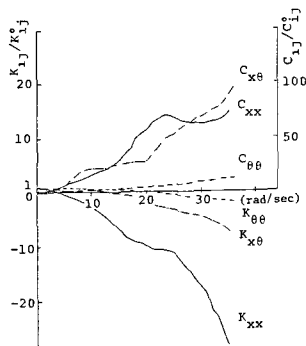


図7 下部構造インピーダンス

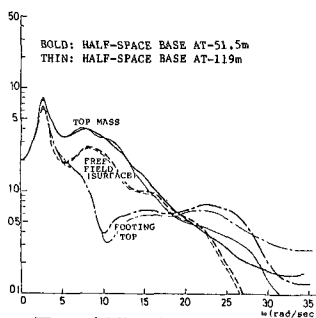


図8 振動数応答

4. 上下部構造連成系の解析

地盤との動的相互作用を取り入れた現行の実務耐震設計法との比較において、SUBSSIP-2Dによる例題解析を実施した。対象系は、図2の橋梁である。その多質点系モデルを図9に示す。本研究の解析着目点は、地盤との動的相互作用効果、および地震波の伝ば効果に置いてあるので、上部構造への地震入力法、また解析法として、次の5通りを考えた。(i)一様な基礎面入力、(ii)位相差入力：これは橋軸方向のSH波としての伝ばを基礎面に与える。(iii)地表面応答入力(一様入力状態)：これは地盤-基礎系のインピーダンスは考慮するが、基礎への地震入力に地表面応答を採る。従って、入力地震波には地盤の増幅作用は考慮されるが、地盤と基礎との間のキネマチックな相互作用は考慮されない。(iv)完全固定支持系としての解析法(一様入力状態)(v)簡易応答法：これは、まず地盤-基礎-簡易上部構造物系の応答を評価し、その基礎天端応答を再び上部構造物の解析へ導入するため、上部構造物からの下部構造系への慣性力のフィードバックに問題がある。

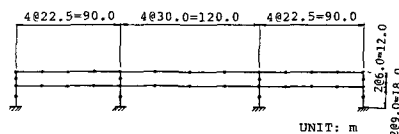


図9 上部構造物の多質点モデル

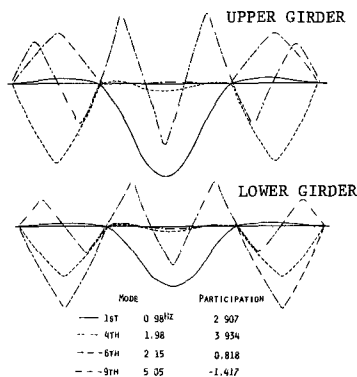


図10 上部構造物の固有振動モード

上部構造物の振動特性として、固有値解析から応答寄与率の高いものについて抽出した固有振動モードを図10に示した。但し寄与率は一様入力状態での値である。同図からは、橋脚部の剛性が非常に高いため、桁部には各橋脚天端での水平並進はほとんど見られない。以下の下部構造系との連成解析では、これらの固有振動モード減衰定数は、それぞれの限界減衰の2%を仮定した。そして下部構造形式として、全ての基礎が連続地中壁基礎である場合(全体解析例1, 図11)と、第2橋脚のみに連続地中壁基礎を残し、他は全て図6の杭基礎で置換した混合基礎の場合(全体解析例2, 図12)を対象とした。図13, 14は、1つの強震記録に対して上記の全体系解析の最大応答値を加速度と断面力について示したものである。

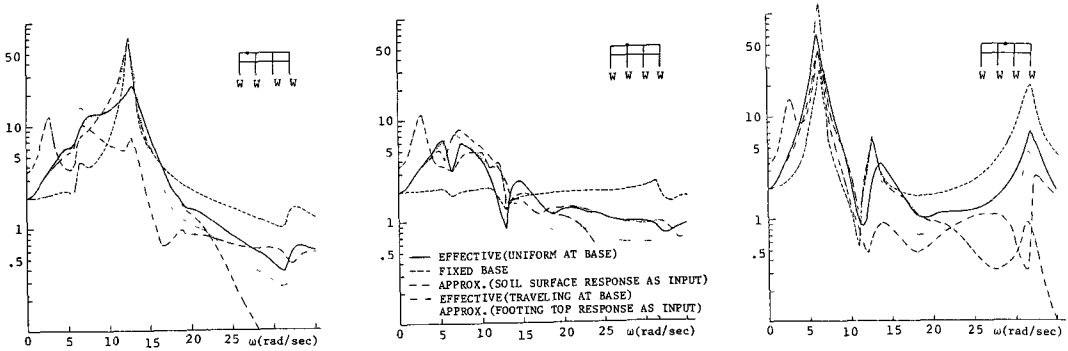


図 11 振動数応答 (全体解析例 1)

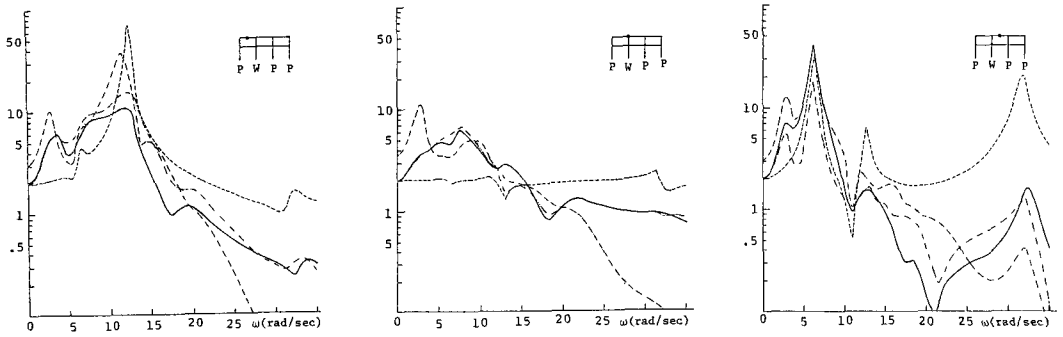


図 12 振動数応答 (全体解析例 2)

以上の応答解析結果から、次の結論が導かれる。(イ)連続地中壁基礎は、剛な基礎となり地盤との慣性連成を形成する。既に述べたように有効地震入力は大きく振動数成分において修正を受けているので、近似地震入力において自然地盤の地表面応答を探ると、地盤振動を強調し過ぎることとなり誤った応答評価となる。位相差入力に対しては、上部構造物の高次振動モードの応答相殺効果に関係して、中間橋脚上の桁ではわずかに大きな応答結果を与えているが、他の桁断面では一様入力時に比べて小さい応答となっている。(ロ)杭基礎は、柔かな構造であるため、低振動数領域においては地盤の1次振動に支配され、地表面入力はかなりの程度の近似度となることが全体解析例2から推察できる。同解析例において、位相差入力は端橋脚に対して一様入力時より大きな応答を与え、一方、桁の中央部では小さくなる傾向がある。(ハ)簡易応答法は、上部構造物の固定支持としての固有振動モードをかなり過大評価する傾向にあり、適正な解析法とは言い難い。

255	216	216	255	65	2046	40	2471	65	2046
239	238	238	239	107	2617	37	2418	107	2617
179	176	176	179	64	1952	29	1400	64	1952
237	263	227	270	28	948	31	1639	26	829
247	248	248	247	98	2744	57	3622	98	2744
832	599	832	832	43	1363	32	1979	43	1363
1023	512	1023	1023	55	1742	32	1912	55	1742
189	799	161	436	48	1426	26	1390	48	1426
197	358	196	376	24	648	22	1262	22	564
182	1119	181	863	65	1812	46	2907	65	1812
177	1119	204	863	178	1119	178	1119	178	1119
177	1119	179	179	179	179	179	179	179	179
550	500	550	550	250	6306	314	7777	250	6306
711	678	711	711	330	8314	395	9908	330	8314
634	403	634	634	248	6341	325	7981	248	6341
247	300	229	229	118	2934	235	6055	118	2934
736	694	736	736	351	8875	561	14028	351	8875
122	115	115	123	250	6306	314	7777	250	6306
133	133	133	133	330	8314	395	9908	330	8314
185	185	185	185	248	6341	325	7981	248	6341
118	121	113	127	118	2934	235	6055	118	2934
120	120	120	120	351	8875	561	14028	351	8875

図 13 最大加速度応答
INPUT EARTHQUAKE: TAFT 1952, N21W;
Max. Accel. 100 gal at Base as Normal SV Incidence

255	216	216	255	65	2046	40	2471	65	2046
239	238	238	239	107	2617	37	2418	107	2617
179	176	176	179	64	1952	29	1400	64	1952
237	263	227	270	28	948	31	1639	26	829
247	248	248	247	98	2744	57	3622	98	2744
832	599	832	832	43	1363	32	1979	43	1363
1023	512	1023	1023	55	1742	32	1912	55	1742
189	799	161	436	48	1426	26	1390	48	1426
197	358	196	376	24	648	22	1262	22	564
182	1119	181	863	65	1812	46	2907	65	1812
177	1119	204	863	178	1119	178	1119	178	1119
177	1119	179	179	179	179	179	179	179	179
550	500	550	550	250	6306	314	7777	250	6306
711	678	711	711	330	8314	395	9908	330	8314
634	403	634	634	248	6341	325	7981	248	6341
247	300	229	229	118	2934	235	6055	118	2934
736	694	736	736	351	8875	561	14028	351	8875
122	115	115	123	250	6306	314	7777	250	6306
133	133	133	133	330	8314	395	9908	330	8314
185	185	185	185	248	6341	325	7981	248	6341
118	121	113	127	118	2934	235	6055	118	2934
120	120	120	120	351	8875	561	14028	351	8875

図 14 最大断面力応答

本研究に関して、プログラム開発ではセンチリー・リサーチ・センター (大阪支社) の長巳・片山両氏、構造物の資料提供では建設技術研究所の島田氏にお世話になったことを表す。

参考文献

1. 竹宮：地盤-基礎-上部構造物の地震応答解析-動的サブストラクチャ法の適用、土と基礎、Vol. 29-9, 1982, pp. 27-34
2. 竹宮他：動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物の耐震解析システム、第37回土木学会年次学術講演会概要、1-265, 昭57年10月
3. 竹宮他：地盤と構造物の動的相互作用解析法の現状、基礎工、Vol. 10, No. 12, 1982, pp. 13-25
4. 竹宮他：地盤と構造物の耐震解析システム-SUBSSIPの開発、地盤と基礎の地震災害に関するシンポジウム論文集、土質工学会、昭58年5月 pp.61-70