

橋梁構造物と周辺地盤を考慮した動的相互作用と地震時保耐法との比較解析

A Study on compare dynamic interaction analysis on bright structure and ground with a method for calculating seismic restoring horizontal force.

青地 知也*

今井 彰**

軟弱な地層では地震時において地盤の非線形性が卓越しその挙動は複雑になると思われる。よって本解析では、泥炭層上に設置された杭基礎の橋梁をモデルとし、地震時における橋梁全体系の挙動をより正確に把握し耐震安定性を検証するため橋梁構造物～基礎～周辺地盤系の動的相互作用の解析を行う。そしてそれらの結果、地震時保有水平耐力法と動的解析の数値を比較する事によって橋梁全体系の耐震安定性を検証する。



1. まえがき

先の阪神・淡路大震災を契機に橋梁構造物の耐震設計法は、大きく変貌してきている。変貌の重心は、橋梁構造物と基礎等を全体系モデルと扱い地震時の動的性状を把握するという方向に移行しつつある。しかし、地震時における橋梁構造物～基礎～周辺地盤との動的相互作用に関する耐震安定性は、まだまだ研究途上の域にあるといっても過言ではない。北海道は地震の頻度の多い環境下にあり、さらに泥炭層等の軟弱地盤を多くかかえている地域でもある。よって泥炭層に基礎を建設しなければならない橋梁を想定した。その地層は、フーチング下面より約 15m程度は N 値 5 程度と非常に脆弱な層で構成する。このような軟弱な地層は、地震時には地盤が非線形的性状を示しかつ、複雑になるのではないかとと思われる。このため本橋では、地震時におけ

る橋梁全体系の挙動特性をより正確に把握し、その耐震性能を検証する必要がある。本文では、その一方法として橋梁構造物～基礎～周辺地盤系の動的相互作用の解析による安全性を照査しここに報告する。

2. 解析の目的

橋梁構造物～基礎～周辺地盤を考慮した全体系を動的解析することによって、地盤の非線形性を考慮した変形、それに伴う杭基礎の挙動、これらの基礎構造の影響を考慮した橋脚および上部工への影響をより詳細な地震時挙動として把握することを目的としている。

また、地震時保有水平耐力法によって算出された数値と比較する事によって静的解析の妥当性を動的解析として検証し、耐震安定性を確認する。

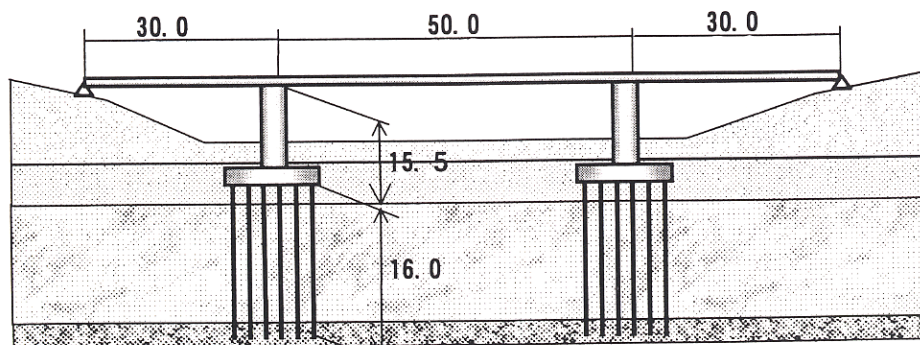


図-1 解析モデル図

*) 企画調査室 Tomoya AOCHI

**) 橋梁部 課長 (RCCM:土質および基礎) Akira IMAI

3. 解析理論

橋梁構造物～基礎～周辺地盤系の動的相互作用解析として動的サブストラクチャー法を用いている。これは地盤の構造物に分離して解析し地盤の効果を構造物に寄与させる方法であり、地盤に複素応答解析、構造物にフレーム解析を用いて解析をおこなっている。

ステップ－1 (SHAKE)

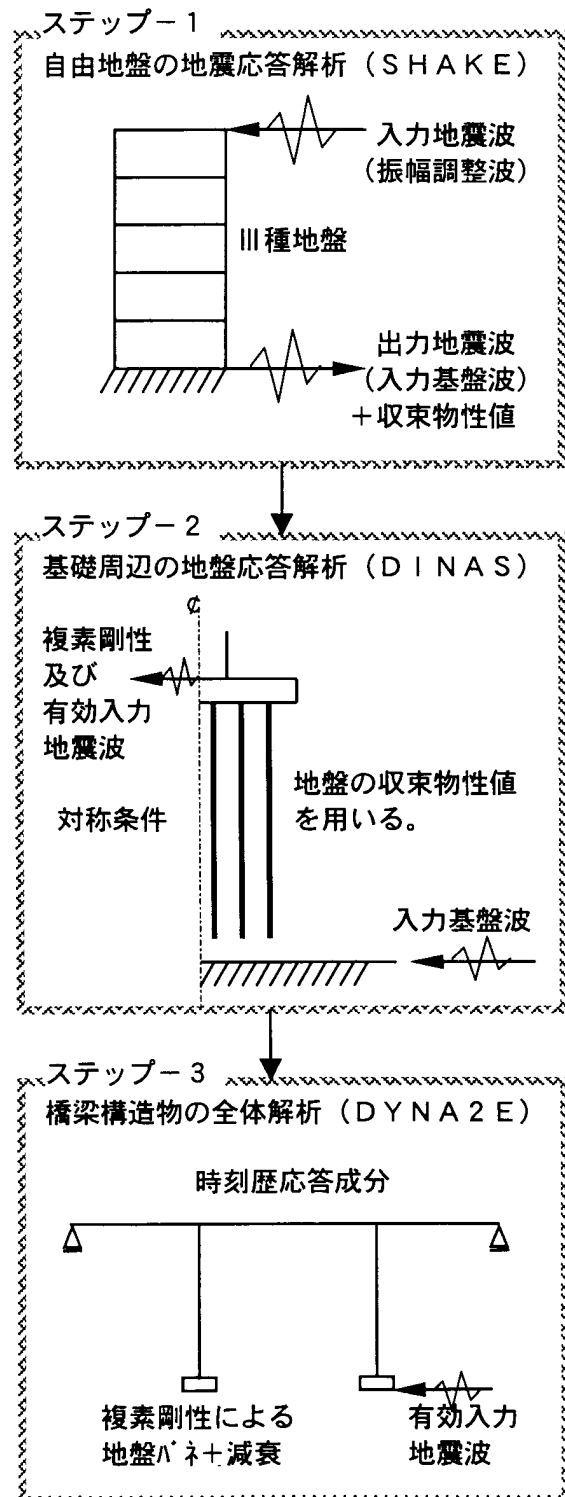
重複反射理論にもとづき1次元地盤波動伝播解析を行う。これは、等価線形法を用いることにより地盤の非線形性を考慮した解析である。これによって振幅調整波を地表面に入力する時の地盤の収束物性値と工学的地盤での入力波（入力基盤波）を求めるものである。

ステップ－2 (DINAS)

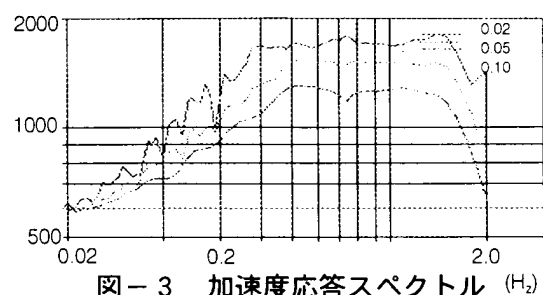
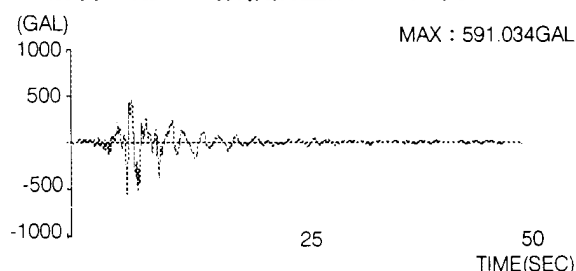
ステップ－1で求めた地盤の収束物性値と入力基盤波を用いて地盤、杭基礎の変形を求めるとともにフーチング上面中央部の複素剛性（インピーダンス）と有効入力地震動を複素応答解析にて算出する。この算出方法は工学的基盤面より上の周辺地盤および杭基礎等をFEMメッシュにモデル化しFEM解析を行う。

ステップ－3 (DYNA2E)

ステップ－2より求められた複素剛性（インピーダンス）と有効入力地震動を用いて、橋梁構造物全体系の非線形動的応答解析を行い橋脚基部や各部材応力等の時刻歴応答の非線形成分を算出する。



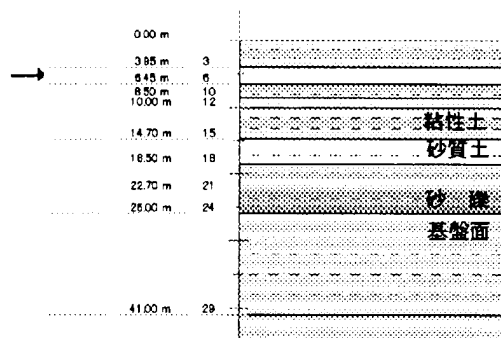
4. 解析に用いた振幅調整波と加速度スペクトル



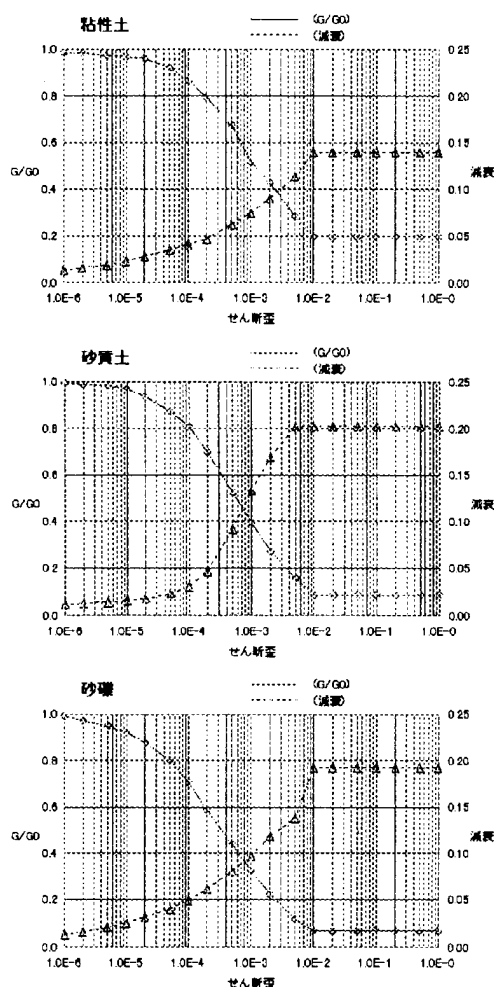
5. 地盤構成と地盤物性値

地盤構成は、図－4に示す。地盤の物性値として、表－1に示す値とした。ただし、せん断剛性 G は動的なものとし、せん断波速度より求めた。(道路橋示方書Ⅴ p. 27 参照)ポアソン比については、自然地盤(無限縁)のため、せん断変形による上下動を無視するため0.49の固定値とした。

また、地盤の非線形特性は、粘土、砂質土、砂礫の3種類に分類し一般的な値として図－5に示すものを仮定した。なお、基盤面は線形である。ここに示す非線形特性、せん断剛性比 $G/G_0 \sim$ 歪み γ ・減衰 $h \sim$ 歪み γ 曲線は、歪みが大きくなるにつれて、剛性は低下し、減衰定数は大きくなることを表している。



図－4 自然地盤の解析概要図



図－5 地盤の非線形特性

6. 自由地盤の応答解析(ステップ－1)

6-1 目的

重複反射理論にもとづき1次元地盤波動伝播解析を行う。これにより地盤の歪みレベルに対応した収束物性値及びステップ－2でインプットされるべき工学的基盤面への入力基盤面波を求める。

6-2 解析条件

- ・入力物性値は表－1に示すものを用いる。
- ・地震動は図－2に示す波形を地表面に入力する。
- ・地盤の非線形性は図－5に示すものを用いる。

6-3 解析結果

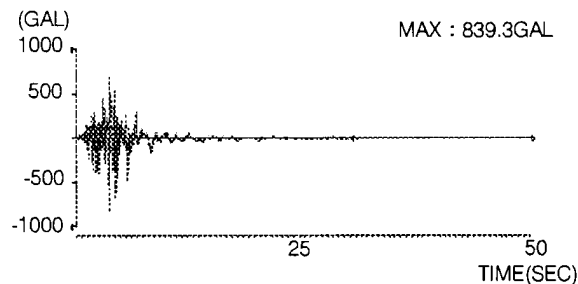
- ・表－2に地盤の収束物性値を示す。
- ・図－6に地盤の最大応答値を示す。
- ・図－7に入力基盤面の波形図、図－8に加速度応答スペクトル図を示す。

表－1 地盤の物性値

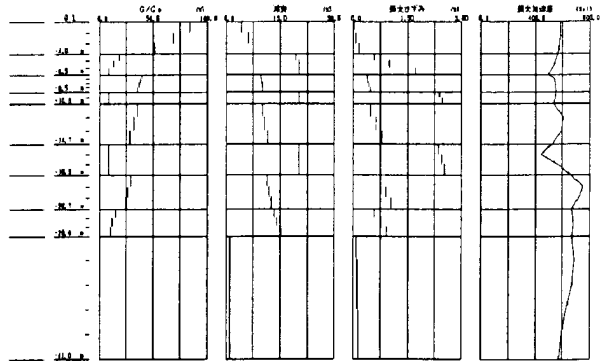
層厚 (m)	地質	せん断波速 度(m/s)	単位重量 (t/m^3)	ポアソ ン比	せん断剛 性(t/m^2)
3.950	粘性土	158.740	1.7	0.49	4371.1
2.500	砂質土	153.034	1.8	0.49	4301.5
2.050	粘性土	158.740	1.7	0.49	4371.1
1.500	砂質土	145.370	1.8	0.49	3381.5
4.700	粘性土	167.507	1.7	0.49	4867.3
3.800	砂質土	177.918	1.8	0.49	5814.1
4.200	粘性土	191.293	1.7	0.49	6347.8
3.300	砂礫(沖積層)	284.551	2.4	0.49	19829.2
15.00	砂礫(沖積層)	300.000	2.4	0.49	22040.8

表－２ 地盤の収束物性値

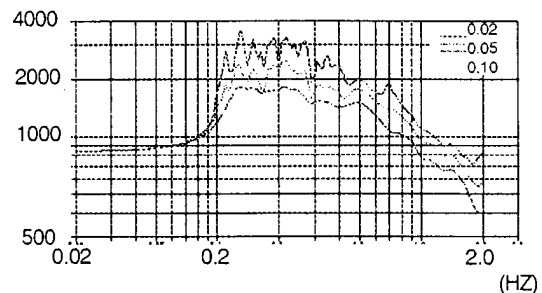
層厚 (m)	地質	単位重量 (γ/m^3)	ポアソン比	減衰比	せん断剛性(γ/m^2)
3.950	粘性土	1.7	0.49	0.05933	3075.0
2.500	砂質土	1.8	0.49	0.19900	743.6
2.050	粘性土	1.7	0.49	0.09800	1754.0
1.500	砂質土	1.8	0.49	0.20200	337.7
4.700	粘性土	1.7	0.49	0.10800	1683.4
3.800	砂質土	1.8	0.49	0.20200	505.8
4.200	粘性土	1.7	0.49	0.11900	1966.5
3.300	砂礫(沖積層)	2.4	0.49	0.14133	3464.3
15.00	砂礫(沖積層)	2.4	0.49	0.01000	22040.8



図－７ 入力基盤波



図－６ 地盤の最大応答図



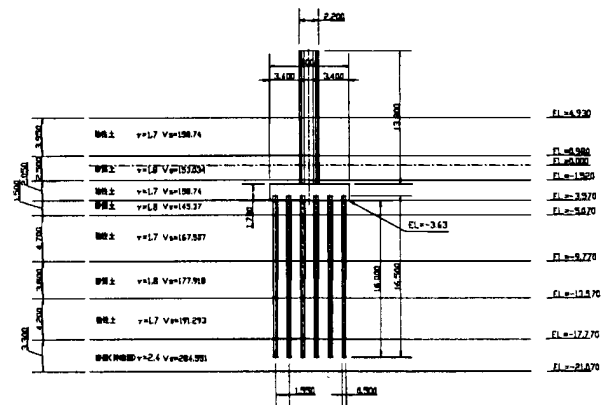
図－９ 加速度応答スペクトル

7. 基礎周辺地震応答解析（ステップ－２）

自由地盤地震応答解析で得られた工学的基礎への入力加速度（入力基盤波）及び収束物性値を用いて、複素応答解析を行い橋脚部への有効入力地震動を求めるものである。

周波数応答解析を行い、地盤～橋脚間の複素剛性（インピーダンス）を求める。

また、地盤の応答変位、杭の応答変位なども算出される。



図－１０ 基礎周辺応答解析概略図

7-1 解析条件

- ・解析モデルの奥行きは上部工との整合性を考慮してフーチング幅の２倍（18m）とした。（非対称条件のため、慣性力を補正する必要がある。）
- ・表－３には杭・フーチングの物性値及び、断面定数を示す。
- ・表－４には基盤面における粘性減衰定数を示す。
- ・収束物性値は表－２に示すものを用いる。
- ・入力基盤波は図－７に示すものを用いる。

表－３ 杭・フーチングの断面定数
および、物性値

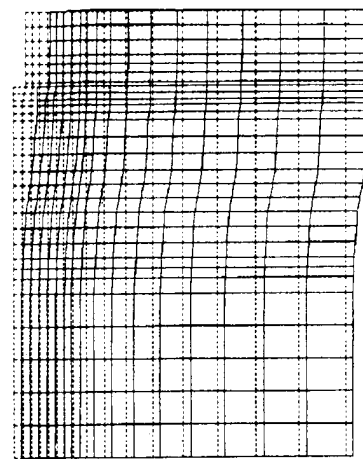
部位	フーチング	杭
断面積(m^2)	—	16.65×10^{-2}
断面 2 次モーメント(m^4)	—	50.16×10^{-4}
ヤング係数(N/m^2)	2.35×10^8	2.10×10^7
ポアソン比	0.2	0.30
減衰比	0.05	0.03
単位重量(γ/m^3)	2.5	7.85

表－４ 基盤面における減衰定数

水平 (ρVst) 1sec/m	鉛直 (ρVpt) 1sec/m
1322.45	9444.17

7-2 解析結果

- ・図-11に最大応答変位図を示す。
- ・図-12に橋脚部への有効入力地震動を示し、図-13には加速度応答スペクトルを示す。
- ・図-14に地盤～橋脚間の複素剛性を示す。
- ・表-5に杭体の応答塑性率を示す。ここでの応答塑性率とは、杭先端と杭頭での相対水平変位を杭の変形による変位と考え、杭基礎の降伏変位との比をとったものである。
- ・表-6に杭頭での水平変位と回転変位を示す。ここでの水平変位とは杭頭の絶対変位を表し、回転変位(m)とはフーチング下面における回転変位(rad)である。



Dis Scale 2.310m
Gio Scale 0.292m

図-11 最大応答変位図

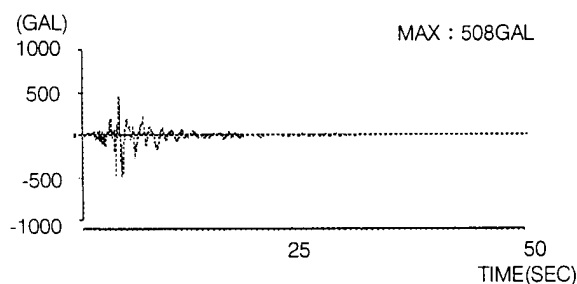


図-12 有効入力時振動（水平成分）

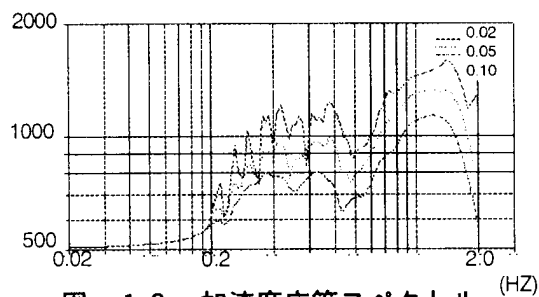


図-13 加速度応答スペクトル (HZ)

(水平成分)

(回転成分)

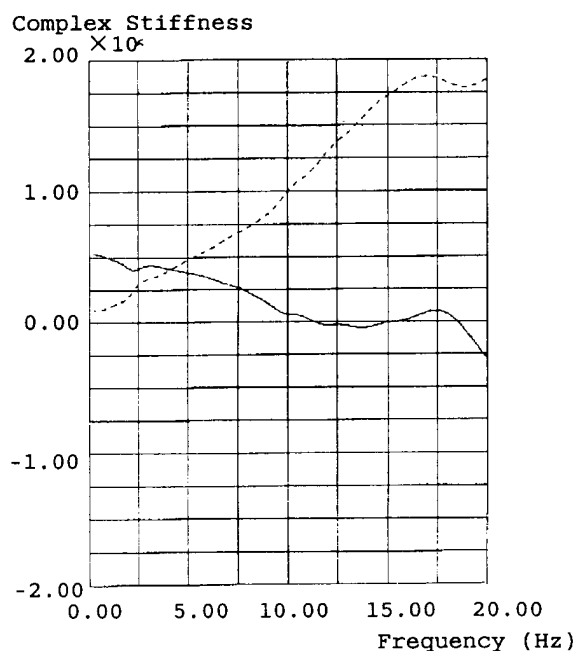
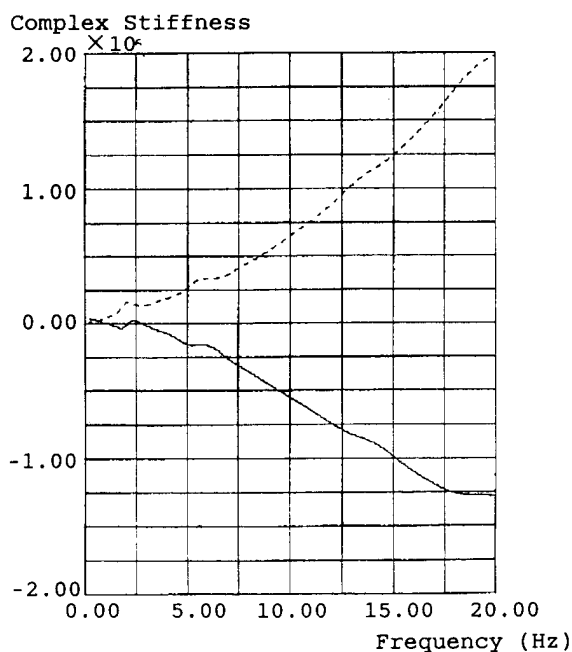


図-14 地盤～橋脚間の複素剛性

表－５ 杭体の応答塑性率の検討

	杭先端の絶対変位(m)	杭頭の絶対変位(m)	杭の水平相対変位(m)	基礎の降伏変位(m)	基礎の応答塑性率	保有耐力法での値	基礎の塑性率の制限値	判定
外側より1本目	0.094398	0.26589	0.17149	0.060	2.722	塑性しない	4	OK
2本目	0.094007	0.26588	0.17187	0.060	2.728	塑性しない	4	OK
3本目	0.093809	0.26577	0.17196	0.060	2.730	塑性しない	4	OK

※基礎の塑性率の制限値 4 : 道路橋示方書・同解説 V P.186

表－６ 杭頭での水平変位と回転変位の検討

水平変位は上記の表より、杭頭での変位は、0.26589m～0.20643m となっている。また、地表面での地盤の変位も最大 0.292m (図3-1 参照) となり、基礎変位の制限値、水平変位 40cm (道路橋示方書・同解説 P.64) 以内の値となっている

	フーチング下面回転変位(rad)	回転変位の制限値(rad)	判定
P1 橋脚	0.001579	0.025	OK
P2 橋脚	0.001612	0.025	OK

※ 回転変位の制限値 0.025rad
: 道路橋示方書・同解説 P.64

8. 橋梁構造物の全体解析 (ステップ－3)

8-1 橋梁全体地震応答解析の設定条件

- ・解析モデルは、橋軸方向の2次元フレーム解析とした。

動的解析を行ううえで固有値解析をハウスホルダー法、直接積分の方法として NEW-MARK のβ法を用いた。減衰は道路橋示方書 V に従い、ひずみエネルギー比例減衰とした。同モデルは、総節点数 39、総要素数 42 要素からなり、上部工、橋台、フーチング部を線形要素、橋脚躯体を武田モデルの非線形要素とした。分散支承はバネとし、地盤バネは杭基礎を考慮した水平バネ、回転バネ、水平回転の連性バネを設置した。なお鉛直方向については固定とした。

・インピーダンスの取り扱い

今回、非線形解析にあたり、時刻歴直接積分解析をするため基礎周辺地震応答解析で求めた複素剛性図より複素剛性と減衰を評価する。

複素剛性：着目周波数 (今回は 5Hz 程度) に対しての複素剛性図実線部の値を剛性とする。ただし、複素

剛性図の解析結果が、各地震波ともに差がほとんどないため共通とした。

減衰係数：着目周波数付近の複素剛性図破線部の傾きを減衰係数とする。

・有効入力波について

回転変位の影響は、小さいため回転変位による上部工への有効入力波を無視し水平方向の加速度のみ入力する。

8-2 解析結果

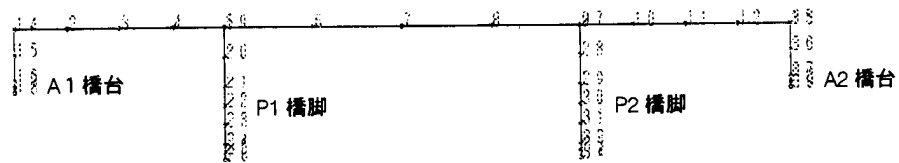
- ・図－15 に解析モデル、図－16 にモードベクトルを示す。
- ・図－17 に時刻歴応答値および残留変位の検討を示す。
- ・図－18 に最大応答値を示す。図－19 に橋脚のモーメント曲率曲線を示す。
- ・表－9 に支承のせん断変形についての検討を示す。
- ・表－10 に橋脚の応答塑性率についての検討を示す。

表－7 橋脚・上部工の断面定数及び物性値

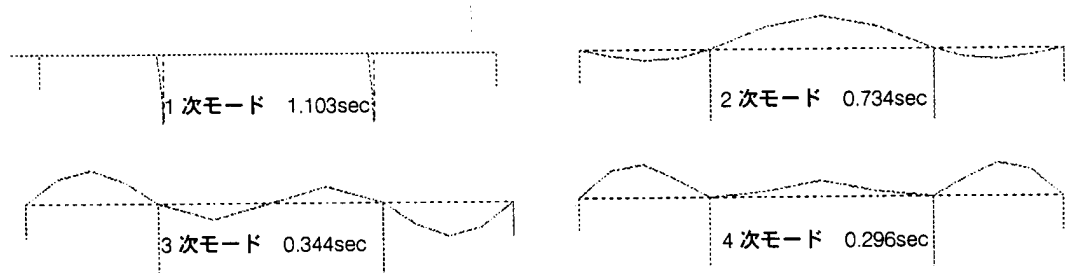
部位	橋台	橋脚	上部工(端)	上部工(中央)	フーチング(橋台)	フーチング(橋脚)
断面積(m ²)	13.5613	16.5613	3.3467	3.0784	61.8000	81.0000
断面2次モーメント(m ⁴)	2.81258	6.29643	0.91515	1.25460	289.688	546.749
ヤング係数(tf/m ²)	2350000	2350000	2350000	2350000	2350000	2350000
減衰定数	0.05	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05
単位体積重量(tf/m ³)	2.5	2.5	3.2702	3.0080	2.5	2.5

表－8 塑性剛性及び減衰

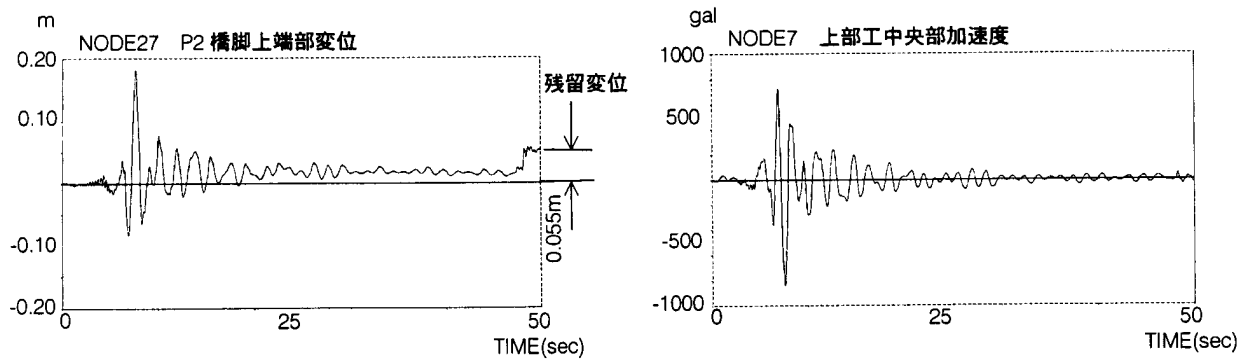
橋脚部基礎	水平方向	回転方向	水平－回転連性
塑性剛性(tf/m)	150000	3800000	-170000
減衰係数(tf・sec/m)	100000	1140000	-50000



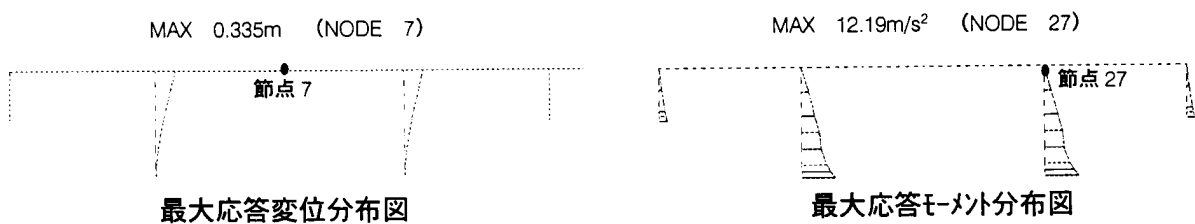
図－15 解析モデル図



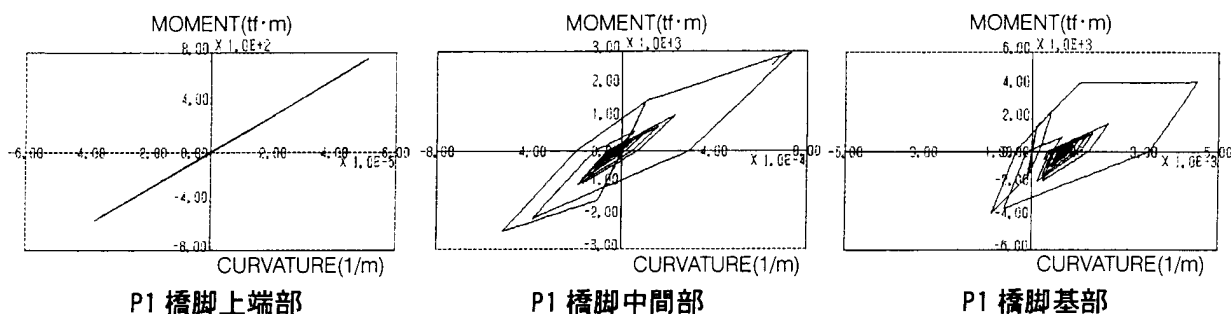
図－16 モードベクトル図



図－17 時刻歴応答図



図－18 最大応答分布図



図－１９ 橋脚のモーメント-曲率曲線

表－９ 支承のせん断変形についての検討

	支承上端の変位 (mm)	支承下端の変位 (mm)	支承のせん断変形 量(mm)	支承の 厚さ(mm)	支承のせん 断歪み(%)	保有耐力法 での値(%)	許容せん断歪 み(%)	判定
P1 橋脚部支承	0.334432	0.192191	0.142241	0.060	237	134.5	250	OK
P2 橋脚部支承	0.334389	0.181957	0.152432	0.060	254	134.5	250	NG

※ 許容せん断歪み 250% : 道路橋示方書・同解説 V 8.4.2 参照

表－１０ 橋脚の応答塑性率についての検討

	最大曲率(1/m)	最大モーメント (tf·m)	降伏曲率(1/m)	応答塑性率	保有耐力法 での値	橋脚の許容塑性 率	判定
P1 橋脚基部	0.0044215	4215.9	0.0012608	3.507	4.237	5.297	OK
P2 橋脚基部	0.0040141	4209.8	0.0012608	3.184	4.237	5.297	OK

９．考察

橋梁構造物～基礎～周辺地盤を考慮した全体系の動的応答解析の結果は、地震時保有水平耐力法の数値と比較し橋梁の耐震安定性を検証した。以下に、それらの検証結果を考察する。

１）杭体の応答塑性率に対する検証

杭基礎などの基礎構造物の場合、地震時保有水平耐力法は地震時の慣性力と地盤が、杭体の剛性の関係から変位や応力を求めるが地盤の変形が考慮されていない。杭は基本的に地盤の変形に追従するように変形するので、慣性力と言うより地盤からの強制変位により変形する。動的解析ではこのような基礎～周辺地盤の関係を考慮し解析を行っているため結果に違いが生じる。よって一概に結果を比較するのは難しい。ただし動的解析の結果のような変形が生じたとしても、杭体の応答塑

性率は許容値以内に収まっていることから、杭体は十分な耐震性を有していることを照査することが出来たといえる。

２）杭頭変位に対する検証

表－６に示してあるように、水平、回転ともに制限値を満足する。

３）支承の変位に対する検証

表－９では、動的解析によって求められた結果として支承部のせん断変形量からせん断歪み率を示している。その動的せん断歪み率は、保有耐力法の値を上廻っているが支承自身が、保持している許容せん断歪み率以下であり、これらも十分な耐震安定性を有している。

4) 橋脚基部の応答塑性率に対する検証

表-10 に示してあるように、動的解析によって生じる応答塑性率は保有耐力法による結果よりも小さく、耐震設計として十分な耐震安定性を保有している。

5) 橋脚の残留変位に対する検証

残留変位は図-17において、P2の $\delta = 0.055\text{m}$ をみると、これは許容変位($\delta = 0.138$)以下であり十分な耐震安定性を有している。

3) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，1996年4月

4) 土質工学会：土質地震工学

5) 土木学会：動的解析と耐震設計シリーズ

10. あとがき

構造物の目標とすべき耐震性能は、地震時にどの部材がどのような変形性状なのか、どこに応力集中が発生するのか、又どのような過程で塑性状態になっていくのか等を検証していくことが重要である。

本解析は、橋梁構造物～基礎～周辺地盤系の相互作用解析を試み泥炭層の軟弱地盤を意識した橋梁全体の耐震安定性の検討を行い有意義な結果を得た。

今回は、軟弱地盤の歪み-減衰特性をある一定の仮定を用いて解析しているが、今後は現場試験、あるいは動的3軸試験において20%クラスの減衰特性や10%クラスのせん断歪みデータを採取し、液状化や間隙水圧等を考慮した軟弱地盤と構造物との相互作用解析を試みたいと考えている。北海道における軟弱地盤は、3種地盤ではあるが極軟弱地盤層と言われる地層が点在している。本報告が、それらの地盤との相互作用対策として技術研鑽の一助になれば誠に幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），平成8年12月
- 2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成9年3月