

論文 杭部材のモデル化が RC 杭 - 地盤系の応答性状に及ぼす影響

牧 剛史^{*1}・前川 宏一^{*2}・睦好 宏史^{*3}

要旨：3次元有限要素解析に基づく構造物全体系の動的応答解析を見据え、特に杭部材のモデル化およびその組み合わせによって、結果に現れる解析精度について詳細な検討を行った。用いる地盤構成則と線材要素による杭部材モデルの組み合わせにおいて、杭体に作用する地盤反力の伝達機構と再現性について明らかにした。また、杭側面のせん断応力の寄与分や要素分割幅の影響についても検討を行い、杭 - 地盤系の応答解析のためのモデル作成および結果評価の指針が得られた。

キーワード：3次元 FEM 解析, RC 杭, 地盤反力, 線材要素, 立体要素, 地盤応力分布

1. はじめに

近年、構造物の設計体系が性能照査型へと移行し、耐震性能照査においても高度化した計算手法に立脚した動的応答解析に基づく照査が適用されつつある。平成 14 年に改訂された土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編¹⁾においても、地上構造物のみならず、それを支持する基礎構造物および周辺地盤を一体としてモデル化し、工学的基盤面から照査用地震動を入力する動的応答解析による照査手法が規定されている。最近では、基礎や地盤の挙動を考慮した構造物の耐震性状を把握することを意図した研究事例が急速に増加しつつある^{2), 3), 5)}。

しかしながら、基礎 - 地盤系の地震時性状はまだ十分には明らかにされておらず、かつこれを精度よく予測可能な性能照査手法も完備されたとは言い難い。特に、有限要素解析(以下 FEM 解析)などによって耐震性能照査を行う場合、構造部材や地盤に適用する材料モデルや、部材自体の要素モデルおよびそれらの組み合わせが解析精度に及ぼす影響については、十分に検討された上で照査に用いられることが望ましい。

そこで本研究は、3次元 FEM 解析を用いて構造物 - 杭基礎 - 地盤全体系の動的応答解析を行

う際に有用な指標を得ることを目的として、杭部材のモデル化の相違が杭 - 地盤系の非線形応答性状に及ぼす影響について検討を行った。

著者らは、地盤中における RC 杭の杭頭水平載荷実験を 3次元 FEM 解析によってシミュレートすることを試みており、杭部材を 3次元立体要素および線材(梁)要素でモデル化した時の杭頭荷重 - 変位関係の差異、および線材要素を適用した時の解析精度評価を既に報告した³⁾。すなわち、体積を有しない線材要素を用いた場合、杭頭荷重や杭部材に生じるせん断力が過小評価されることを指摘している。そこで本稿ではこのせん断力の過小評価を念頭に置き、杭 - 地盤系の挙動解析において適用する各要素モデルの組み合わせに伴う解析精度について検討した。

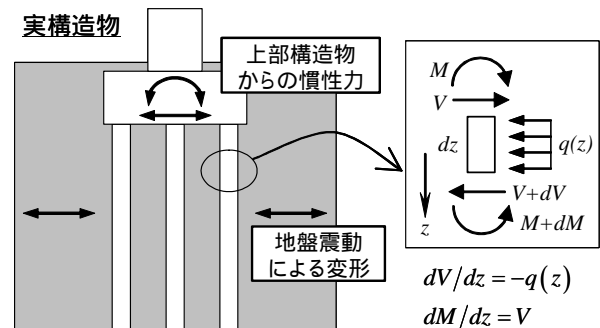


図 - 1 杭部材の支配方程式

*1 埼玉大学 工学部建設工学科助手 工博 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学 工学部建設工学科教授 工博 (正会員)

2. 杭体に作用する水平地盤反力に関する検討

2.1 杭部材の断面力と地盤反力

図 - 1 に示すように、構造物が基礎面からの地震動に曝される場合、杭部材には周辺地盤の震動に伴う地盤慣性力（地盤変形）と、地上構造物からの応答慣性力が作用する。この時、部材や周辺地盤が非線形材料であっても、原則として図中に示す支配方程式が成立する。ここで地盤反力 $q(z)$ は、深さ z において杭体が地盤から受ける合力である。すなわち、部材に生じる断面力が精度よく算定されるためには、杭体と地盤との間の地盤反力の伝達が、適切に評価されるようなモデル化を行うことが肝要であると言える。著者らは既往の報告³⁾において、砂地盤中における RC 杭の杭頭載荷実験⁵⁾を対象として杭部材を立体要素および線材要素でモデル化した解析を行い、立体要素モデルでは実験結果を良好に追跡出来るのに対し、線材要素を用いて解析自由度を低減したモデルでは、実験値を過小評価することを示している。このような杭頭載荷解析の場合は、図 - 2 に示すように、杭頭部から最大モーメント点までの地盤表層部区間で作用する地盤反力が、杭頭荷重の支配要因となる。そこで本章では、既往の解析³⁾において実験結果と整合したモデルを適用して、杭部材のモデル化が地盤反力の発現に及ぼす影響を詳細に検討することを試みた。

2.2 解析モデルとパラメータ

本解析は東京大学で開発された 3 次元有限要素解析プログラム COM3⁴⁾を用いた。適用した有限要素モデルを図 - 3 に示す。既往の砂地盤中における RC 杭の杭頭載荷実験⁵⁾を対象として、地盤表層部 1 層のみを要素分割し、地盤要素として 20 節点立体要素、杭体の要素モデルとして立体要素および 3 節点線材（梁）要素を用いた。各々の解析メッシュを Model SL および Model FB とし、以下この 2 つを基本モデルとする。モデルの厚さ H は、杭寸法を考慮して 10cm とした。これは、杭 - 地盤系の解析を行う際に、地盤の要素分割における 1 層の厚さを杭程度

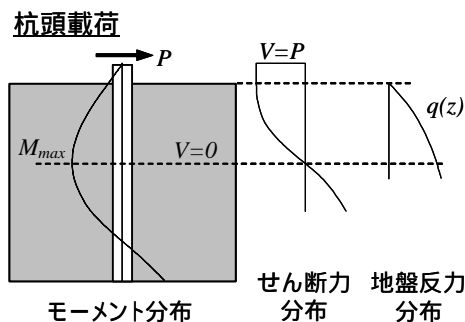


図 - 2 杭頭載荷下における杭の断面力分布

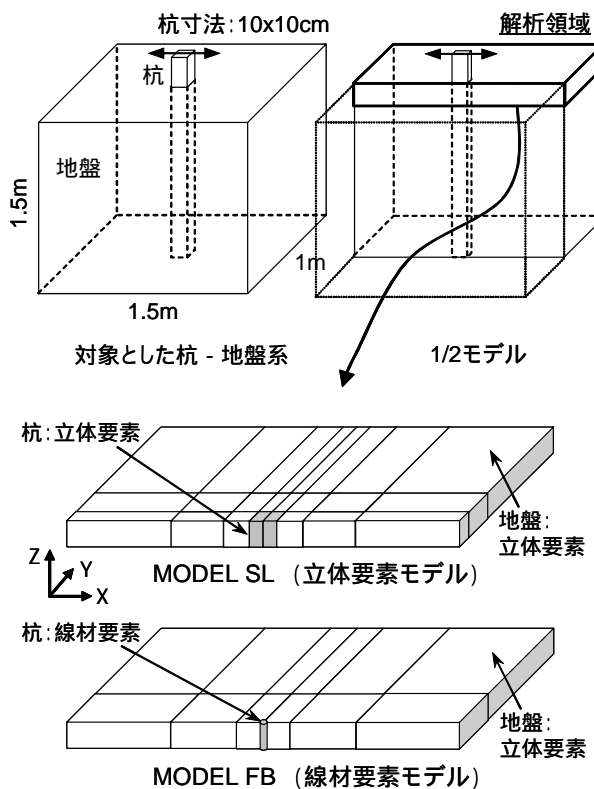


図 - 3 解析に用いた基本モデル

表 - 1 解析ケース一覧

ケース名	要素タイプ	接合要素	分割幅	ガウス次数
SL	立体	×	粗	2
SL-J				
FB	線材	×	粗	5
FB-J				
FB-fine		×	細	
FB-J-fine				
FB-g5		×	粗	
FB-J-g5				

とすることを想定したものである。荷重は杭体要素に X 方向の単調増加強制変位を与える形式で行った。

検討した解析パラメータを表 - 1 に示す。杭部材の要素モデルの他に、杭体 - 地盤間の接合要素の有無、杭体近傍のメッシュ分割幅、要素のガウス積分次数をパラメータとした。接合要素の有無については、立体要素モデル・線材要素モデルの両方を対象とし、分割幅、ガウス積分次数については、線材要素モデルのみを対象として、接合要素を配置したケースと配置しないケースの両方について検討した。

接合要素は杭体と地盤との接触・開口を考慮するものであり、立体要素モデルに対しては 2 次元 16 節点要素、線材要素モデルに対しては 1 次元 6 節点要素を用いた³⁾。各接合要素の概要を図 - 4 に示す。いずれの要素も接触方向の圧縮剛性は非常に高く、開口およびせん断剛性は微小な値を設定した。また、要素分割幅の影響については、図 - 5 に示すように、載荷方向と直交する方向の分割幅を小さくしたケース（細メッシュ）について検討した。また、本解析においては通常、地盤立体要素のガウス積分次数を 2 とする低減積分を採用しているが、線材要素から地盤要素に伝達される局所応力の感度を検討するために、立体要素のガウス積分次数を 5 としたケースも併せて検討した。

適用した材料構成則について、杭部材をモデル化した立体要素および線材要素については、ここでは弾性要素として扱っている。また、地盤要素に対しては、偏差応力第 2 不変量 J_2 と偏差ひずみ第 2 不変量 J_2 に対して大崎モデル⁶⁾を導入している。体積成分は線形弾性とし、体積引張応力も許容する構成則となっている。解析対象地盤は砂地盤とし、初期せん断剛性 $G_0=19.6 \text{ N/mm}^2$ 、せん断ひずみ 1% 時のせん断強度 $S_u=0.00294 \text{ N/mm}^2$ として解析を行った。

3. 解析結果

3.1 荷重 - 変位関係

基本モデルの Model SL と FB、およびこれらに接合要素を設置した SL-J、FB-J の 4 ケースにおける荷重 - 変位関係を図 - 6 に示す。ここで、

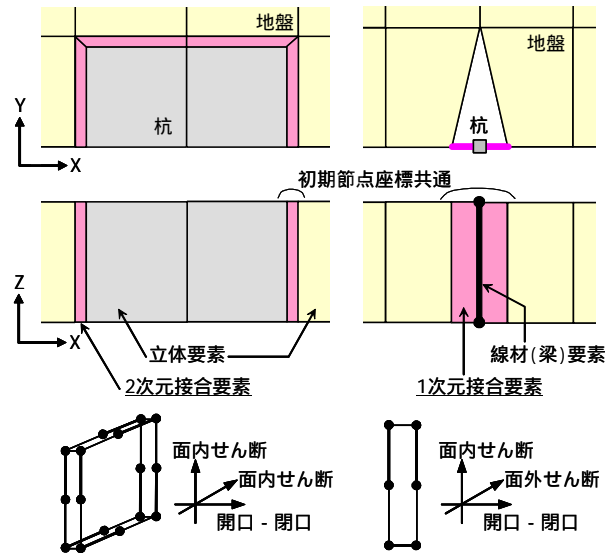


図 - 4 杭体 - 地盤間の接合要素
(左：2次元要素，右：1次元要素)

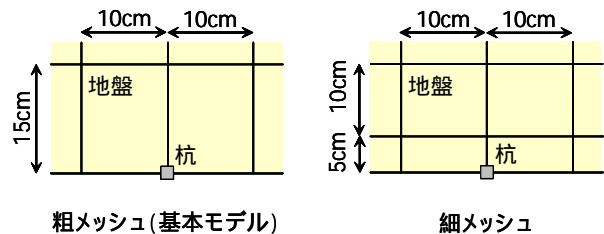


図 - 5 要素分割幅の違い

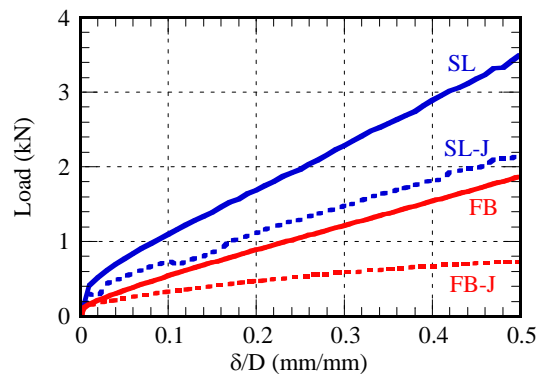


図 - 6 荷重 - 変位関係

水平変位 δ は杭寸法 D ($=100\text{mm}$) で正規化した無次元量で表している。

立体要素モデルに比べて、線材要素モデルでは荷重が約 1/2 程度しか発生しておらず、かつ接合要素を導入した時の荷重低下率が、Model SL では 1/3 程度であるのに対して、Model FB では 1/2 程度である。接合要素を設置したモデルで荷重が低くなる挙動は、杭体背面に作用する引張応力が排除されることに起因するが、詳細は後

述する。

図 - 7 に、要素分割幅を小さくした FB-fine とガウス積分次数を 5 とした FB-g5、およびこれらに接合要素を設置した FB-J-fine、FB-J-g5 を含めた全解析ケースの荷重 - 変位関係を、接合要素なしのケースと設置したケースとに分けて示す。接合要素を用いていないケースでは、杭近傍の要素分割幅の影響はほとんど見られない。また、同一のメッシュを用いても、ガウス積分次数が大きいケースの方が荷重は大きくなる。これは、積分次数を増加させたことによってガウス点座標が杭体要素に近くなり、杭体前背面における局所的な応力分布がガウス点での応力値に反映されやすくなったためと考えられる。この FB-g5 の計算結果は、立体要素モデルに接合要素を併用した SL-J の結果とかなり近い値を示している。

一方、接合要素を用いたケースでは、分割幅の影響が顕著に現れる。杭前面の地盤要素には、杭に与えた強制変位に基づく線荷重が作用するため、要素幅が小さい場合は局所的に地盤の塑性化が進行し、荷重増加が頭打ちとなることが原因であると考えられる。

3.2 杭体周囲の地盤反力分担

(1) 地盤応力の積分による地盤反力の分解

3.1 では、杭体に作用する荷重を地盤反力と見なして検討を行ったが、実際の杭には、杭体前面だけでなく、側面や背面からも反力が作用する。これらの総和が 3.1 で検討した地盤反力であると見なすことが出来る。そこで、杭体近傍地盤を前面・側面・背面の 3 つに分類し、各面で作用する地盤反力の分担率について検討する。

立体要素モデルに関しては、図 - 8 に示すように、杭体要素の近傍の全てのガウス点における応力値を積分して反力の総和を算定する。線材要素モデルでは、特に接合要素を用いたモデルにおいて、杭体前面地盤と背面地盤とが切り離されたモデルとなっているため、ここでは杭体要素近傍の地盤立体要素の外側にある全てのガウス点応力を積分することによって地盤反力の総和を算定した。Model SL および Model FB-J

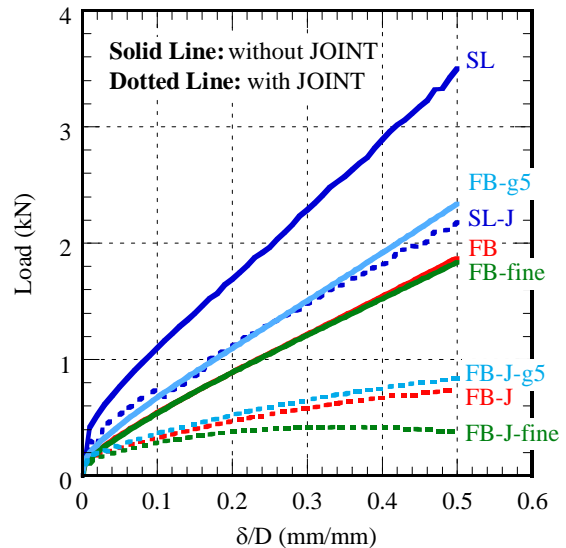


図 - 7 荷重 - 変位関係

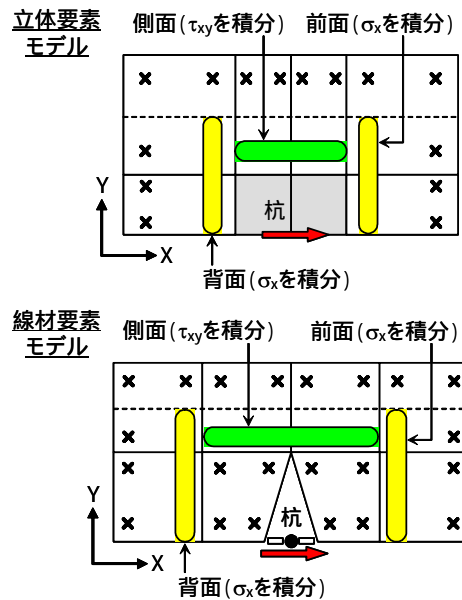


図 - 8 杭体近傍地盤の応力積分方法

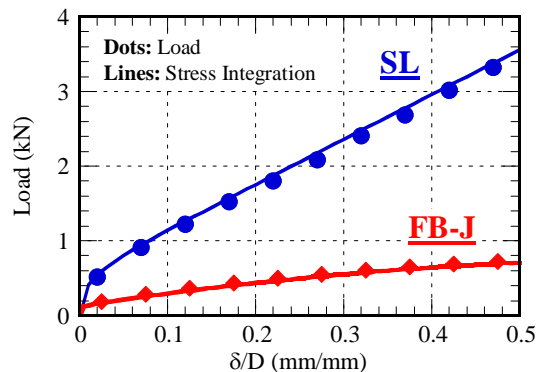


図 - 9 応力積分による荷重算定結果

を例として算定結果を図 - 9 に示すが、全てのケースにおいて、応力の積分結果が荷重と非常

によく一致した。したがって、この算定方法の妥当性が示されたものと考え、以下、各ケースにおける杭体前面・側面・背面地盤が負担する地盤反力の分担率を算定した。

(2) 接合要素と地盤の引張応力

3.1 で挙げた荷重 - 変位関係が比較的近似していた SL-J と FB の荷重分担を図 - 10 に示す。SL-J では接合要素を設置しているために、背面の地盤反力が小さくなっており、代わりに前面における反力が非常に大きくなっている。これに対して、FB では、前面・背面にほぼ同程度の地盤反力が発生しており、側面の反力は SL-J と同程度である。SL-J が実際の杭の条件に最も近いモデル化であることを勘案すると、FB では線材要素を用いたことによって前面の反力が過小評価されるが、背面の引張を許容していることによって、トータルの地盤反力はほぼ現実に近い値が生じているものと考えられる。

(3) 要素分割幅の影響

同様のグラフを FB と FB-fine についてプロットしたものを図 - 11 に示す。これらのケースも荷重 - 変位関係はほぼ同等であったが、この結果から分かるように、前面・側面・背面の反力分担は全く異なっている。すなわち、要素寸法が小さい FB-fine では前背面における反力が小さく算定されるが、その分を側面地盤が分担しているものと考えられる。

(4) 杭体前面の直応力分布

(2)および(3)で示した3ケースについて、杭前面地盤の直応力分布を図 - 12 に示す。FB-fine よりも FB の方が SL-J に近い応力分布を生じていることが分かる。すなわち、地盤応力解析の観点からは、杭体モデルとして線材要素を適用する場合、FB のように比較的粗い要素分割(この場合は杭寸法の3倍程度)の方が再現性が高い。本解析で用いた地盤構成則の特性および(2)の結果と合わせると、線材モデルを適用する場合は、杭体背面の引張応力を許容し、かつ杭近傍地盤の要素分割を敢えて粗くすることによって、立体要素を用いた場合とほぼ同程度の地盤反力を

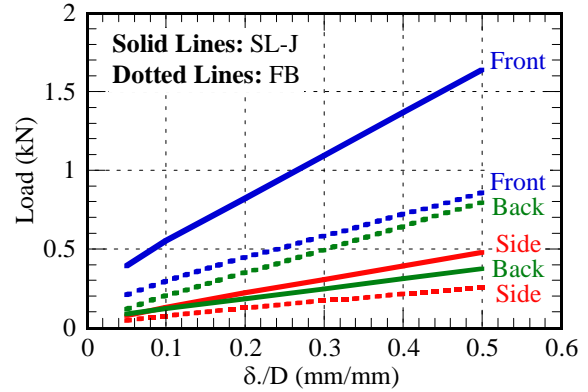


図 - 10 地盤反力分担の比較

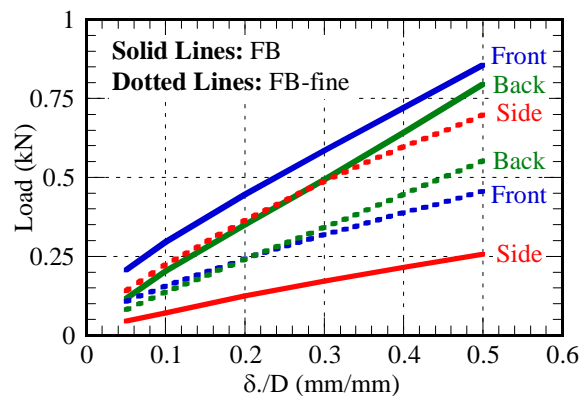


図 - 11 要素分割幅の影響

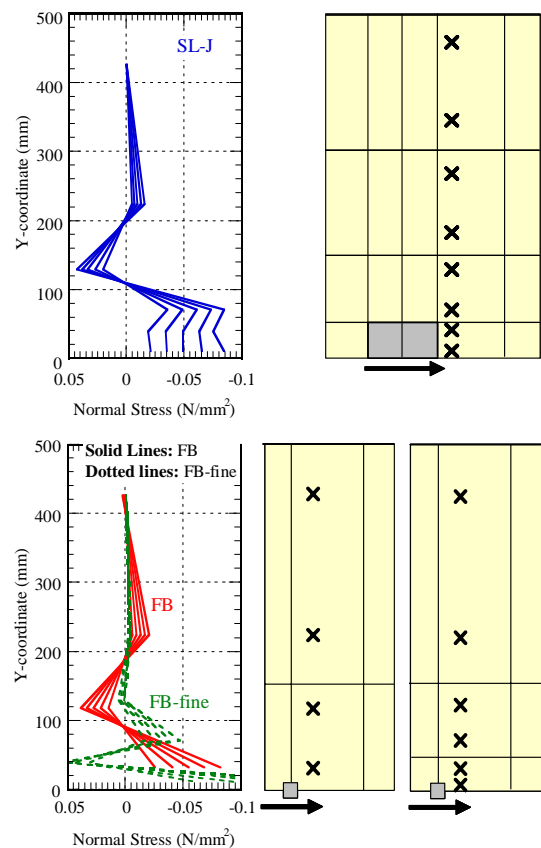


図 - 12 前面地盤の直応力分布

擬似的に再現可能であると考えられる。

(5) ガウス積分次数の影響

ガウス積分次数を 5 とした FB-g5 の地盤反力分担を FB と比較したものを図 - 13 に示す。図 - 7 の荷重 - 変位関係では、FB に比べて荷重が増大していたが、これが過度の背面引張応力の増加に起因していることが、図 - 13 から分かる。一方、前面の地盤反力に軟化傾向が見られるが、これは線状荷重による局所的なせん断塑性化が生じていることを示している。これら 2 ケースについて、図 - 14 に杭体側方地盤におけるせん断応力分布を示す。(1)は杭体が接している要素のガウス点応力、(2)は図 - 8 に基づいて積分に用いたガウス点のせん断応力である。FB-g5 では FB に比べてなだらかなせん断応力の分布が再現された。この分布形状は Model SL でも見られた分布であり、ガウス積分次数の変更によって、緩やかな裾広がり応力分布形状を再現することが可能である。杭の極近傍ではいずれのケースも 0.03N/mm^2 程度のせん断応力が生じていたが、FB-g5 では(2)の位置でほぼ消失していることが分かる。すなわち、図 - 13 にも示したように、要素分割幅が今回のモデル程度の場合、杭体側方のせん断応力が地盤反力として杭体に作用する度合いは極微小であると言える。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論をまとめる。

- (1) 杭体を線材要素でモデル化した場合、杭体前面の圧縮地盤反力が過小評価される。このとき、接合要素を用いずに杭体背面地盤の引張が許容される場合、トータルの地盤反力は立体要素を用いた解析結果に近似する。
- (2) 線材要素でモデル化した杭体の周囲は比較的粗い要素分割によって、地盤の応力分布が再現される。
- (3) 側方地盤のせん断応力が、線材要素でモデル化された杭の水平荷重に及ぼす寄与は非常に小さい。

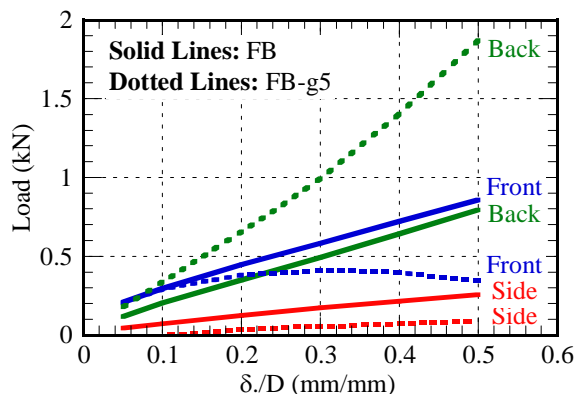


図 - 13 ガウス積分次数の影響

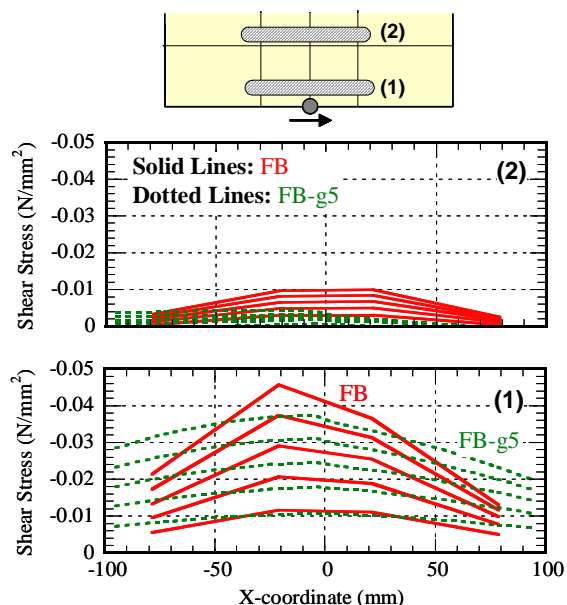


図 - 14 杭体側方地盤のせん断応力分布

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編，2002.12
- 2) 石崎，長島，高木，真島：模型杭の杭頭水平静加力試験と 3 次元有限要素法によるシミュレーション，大成建設技術センター報，第 36 号，pp.16-1~7，2003
- 3) 牧 剛史，睦好宏史，前川宏一：RC 杭体-地盤相互作用解析における線材モデルの適用性，土木学会論文集，No.746/V-61，pp.57-70，2003.11
- 4) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990
- 5) 牧 剛史，睦好宏史：鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形性状に関する研究，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.103-118，2001.8
- 6) Ohsaki, Y.: Some Notes on Masing's Law and Non-Linear Response of Soil Deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol. 35, No. 4, pp. 513-536, 1980