

基礎構造物における地盤・構造物境界面の実用的な剛性評価法

Practical estimation method of the Rigidity of Joint element of the Contact area between Soil and Structure

松本敏克*, 坂田 勉**, 八木 悟**, 森 聡**, 澤田純男***

Toshikatsu MATSUMOTO, Tsutomu SAKATA, Satoru YAGI, Satoshi MORI, Sumio SAWADA

*工博, (株)ニュージェック, 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

** (株)ニュージェック, 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

***工博, 京都大学教授, 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A practical estimation method of the rigidity of joint element of the contact area between soil and structure is discussed in this paper, when the seismic analysis of the soil and structure interaction system (SSI-system) is carried out. Joint element expresses the phenomena of slip and separation on the contact area between soil and structure. Several FEM case studies are carried out. And it is found that the distribution of subgrade reaction of the joint element of the rigid foundation is close to theoretical solution of elastic half-space, though it depends on structural and geotechnical condition. Then, it is proposed to make some modification to the spring constants for rigid base resting on elastic half-space as a theoretical solution, and apply it to rigidity of joint element.

Key Words: joint element, rigidity, spring constant, elastic half-space, rigid foundation

キーワード: ジョイント要素, 剛性, 地盤バネ, 半無限弾性地盤, 剛体基礎

1. はじめに

最近の耐震設計法の高度化に伴い, 地中構造物や基礎構造物の耐震安定性の評価においては, 構造物のみならず地盤をも有限要素でモデル化し, 地盤・構造物連成系として地震応答解析を実施することが多くなってきている^{1)~3)}. また, 設計地震力も大きなものを想定し, より大きな外力に耐え得ることを設計として担保しつつある. 一方, 強震時の1つの物理現象として, 地盤・構造物の境界面において, 滑りや剥離の現象が観察されている⁴⁾. また, そのような現象を解析的に考慮することが合理的な評価に結びつくこととされ, それを表現する簡便なモデルとしてジョイント要素を用いることが提案されている^{1)~3)}.

ジョイント要素を特徴づける特性は, 変形特性と強度特性が挙げられる. とくに変形特性については, ジョイント要素という, 大きさを有しないがバネの次元を有する, 仮想の構造要素を設けることから, ジョイント要素の「剛性」の意味合いとして, 材料物性だけではなく形状・大きさに係わる属性も有していると考えられる. その設定方法は, 設計基準¹⁾³⁾や専門書⁵⁾に考え方が示されている. 基本的には十分に大きな剛性を設定するということではあるが, 地盤や構造物の条件との兼ね合いで, 用いるべきジョイント剛性の選定が困難になる場合も考えられる. 実務においては, 現実に即した剛性評価法が望まれている.

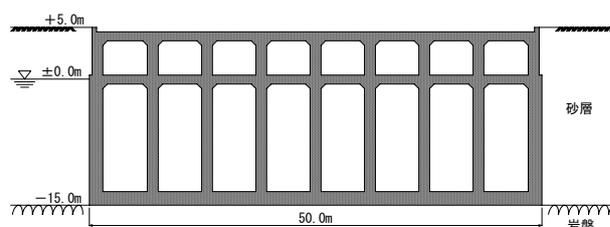


図-1 基礎構造物の例¹⁾

本論では, 実務における広範な条件での適用ができるように, 実用的なジョイント剛性の設定法を構築することを目的として, 既往の研究成果の延長上で基礎的な検討を行った. まず, ジョイント要素周辺の応力分布を確認することを意図して, 半無限弾性地盤上の剛体基礎を対象とした反力分布の理論解等の知見を整理した. 次に, 地盤・構造物境界面にジョイントを配置した有限要素モデルを用いて, 地盤物性や構造物寸法等に関する要因について, 多数の解析を実施し, その影響を把握した. そして, その影響が考慮できるように, 理論解に基づきジョイント剛性を合理的に評価する方法について考察した.

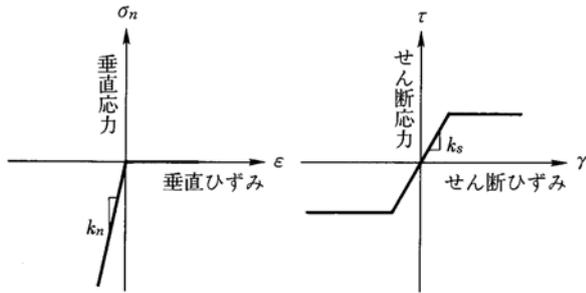


図-2 数値解析上利用するジョイント要素の構成関係⁵⁾

2. ジョイント要素の設定法

地盤と構造物の境界面における滑り・剥離などの現象を表現するために、ジョイント要素を用いることが提案されている。ここでは、代表的なジョイント要素の考え方やその設定方法を整理するとともに、ジョイントの剛性を検討する際の着眼点を整理する。

2.1 代表的なジョイント要素

ジョイント要素は地盤・構造物の境界面に配置され、幾何学的な大きさを有しないにもかかわらず、バネとしての次元を有する仮定の構造要素である。剥離については引張限界応力を超えると応力を伝達せず、滑りについては、Mohr-Coulomb 則等のモデルにより滑りの開始を規定することが一般によく行われる。また、接触面における直剛性およびせん断剛性については、ジョイント要素自身が過大な変形を起こさず、かつ数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に、周囲の材料よりも大きな値を設定しておけばよいとされている¹⁾。大きさを有しないがバネの次元を有するため、ジョイント要素の「剛性」の意味合いとして、材料物性だけではなく形状や大きさに係わる属性も暗に有していると考えられる。

2.2 ジョイント剛性の具体的な設定方法の例

既往の代表的なジョイント剛性の設定方法について、その概要を以下に示す。

(1) 港湾構造物における設定事例⁶⁾

港湾構造物では、地震後の供用性を確保するために、残留変位等の照査が実施される。地盤・構造物連成系の有限要素モデルを用いて地震応答解析が実施される場合があるが、その際に、ジョイント要素が用いられている。ジョイント剛性の設定方法に関する基本的な考え方は、十分に大きな値とすることとされている³⁾。重力式岸壁等を対象とした解析では、構造物の底面や背面(側面)のジョイント剛性として、 1×10^6 [kN/m³] 程度の値が一般的に用いられている。この数値は、兵庫県南部地震により被災した事例のシミュレーション解析により、その妥当性が概ね確認されている⁶⁾。

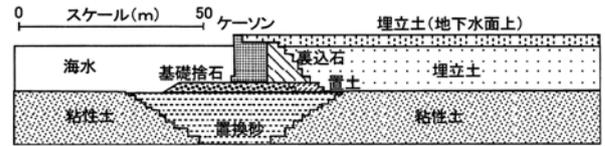


図-3 重力式岸壁の例⁶⁾

表-1 ジョイント要素の設定例⁶⁾

ジョイント位置	法線方向剛性 k_n (kN/m ³)	接線方向剛性 k_s (kN/m ³)	粘着力 c_j (kN/m ²)	摩擦角 ϕ_j (度)
ケーソン底面	1.0×10^6	1.0×10^6	0	31
ケーソン背面	1.0×10^6	1.0×10^6	0	15

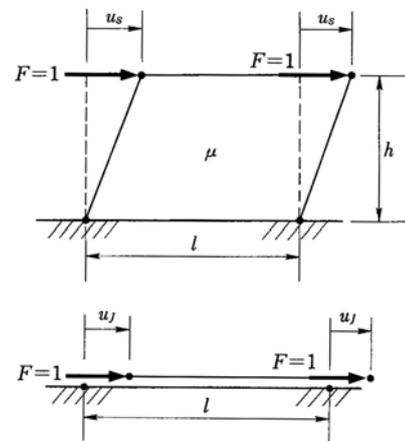


図-4 ジョイント要素のせん断ばねの決定方法⁵⁾

(2) 剛性マトリックスの作成方法に準じた方法^{5,7)}

Miura は⁷⁾、有限要素法におけるソリッド要素の剛性マトリックスの成分からジョイント剛性を導出する方法を提案している。すなわち、図-4に示すように、水平力 ($F=1$) を受けたとき、ソリッド要素の変形 u_s に対して、ジョイント要素の変形 u_j が工学上問題にならない程度に小さく抑えようとする考え方である。この考え方に基づき、 u_j を u_s の $1/a$ 以下にする場合のジョイント要素の剛性 k_s は式(1)で与えられる。同様に垂直方向に関して、 v_j を v_s の $1/b$ 以下にする場合の k_n は式(2)で与えられる。

$$k_s \geq \frac{\mu}{h} a = \frac{1}{h} \cdot G \cdot a \quad (1)$$

$$k_n \geq \frac{\lambda + 2\mu}{h} b = \frac{1}{h} \cdot \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot E \cdot b \quad (2)$$

ここに、 h はソリッド要素の高さ、 λ 、 μ はラーメの定数、 G はせん断弾性係数、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 a 、 b は任意の定数である。すなわち、ジョイントの剛性はソリッド要素の弾性係数や要素寸法(要素高さ h) 等に依存

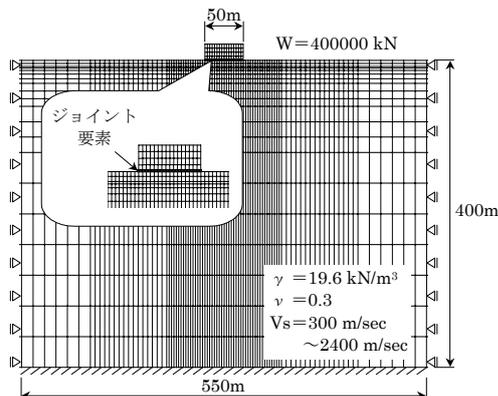


図-5 剛体基礎構造物の解析モデル

し、バネとしての次元を有している。また、専門書⁵⁾では、極端に大きな剛性を与えるのではなく、剛な構造物の場合にはそれと同程度の剛性を与える。もしくは、周辺地盤の剛性に対して5~10倍程度の剛性を与えれば、ほぼ、必要な精度は得られるとしている。

2.3 ジョイント剛性の検討方針

以上のように、既往の事例では、ジョイント剛性として確定的な値が設定されているものもあれば、物性や寸法を与えることにより適宜剛性を算出するものもある。前者は実用的であるが適用できる条件が限られる可能性があるため、ここでは後者の立場で検討を行うこととする。後者の評価手法では、ジョイント剛性が要素高さに依存するために解析者により設定値がばらつく可能性があること、要素単位で剛性を決定するためにモデル全体の剛性とのバランスが崩れる可能性があること、等に配慮する必要がある。そして、幅広い地盤条件と構造条件についてその影響を把握し、系全体での剛性のバランスを確認するために、理論解との照合を行うものとする。また、この問題は、構造物と地盤の相対的な剛性比に依存する問題と考えられるが、手始めに地盤剛性に基づいた評価を行うこととする。

3. 剛体基礎構造物の地盤反力分布

ジョイント要素は、地盤・構造物の境界面において、直成分・せん断成分の力を伝達し、引張やせん断に関する限界応力に基づき、滑りや剥離の現象を表現するのがその機能である。そのため、接地面における応力分布を詳細に観察することは重要である。ここでは、基礎構造物を対象として、半無限弾性地盤の理論解や有限要素法による解析解に基づき、接地面における地盤反力分布を分析するとともに、ジョイント剛性の影響や、それに関わる地盤・構造物の要因とその影響を把握する。

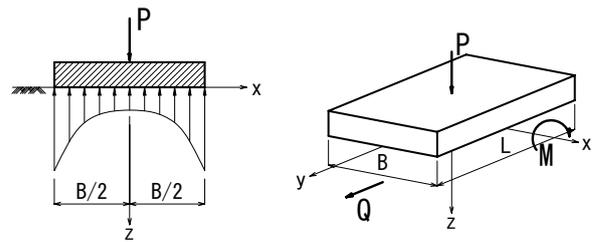


図-6 剛体基礎構造物 (B×L)

3.1 対象構造物

図-1に示すような基礎構造物を参考として、半無限地盤上に50m×50mの底面を有する基礎構造物を考える(図-5参照)。簡単のため、構造物は剛体とする。地盤条件は等方均質な弾性地盤とし、工学的基盤、軟岩、中硬岩、硬岩程度の条件を想定し、せん断波速度をVs=300, 600, 1200, 2400 [m/sec]と設定した。また、構造物の寸法の影響を考慮するために、基本ケースの1/2や1/4の寸法の構造物についても検討を行った。なお、荷重条件については、後述する理由で鉛直荷重のみを考慮するものとし、構造物の寸法に依らず、接地面における単位面積当たりの荷重が一定となるように設定した。

3.2 地盤反力分布の理論解

半無限弾性地盤の理論解については、種々の荷重条件に対して解かれている。地表面に荷重が作用する場合には、集中荷重を対象としたBoussinesqの解⁸⁾や、Cerrutiの解⁹⁾に基づき、応用的な理論解が得られている。ただし、基礎構造物に作用する地盤反力分布については、多くが剛体構造物を対象としたものである。

矩形断面を有する剛体基礎構造物については、荷重条件に応じて、反力分布が得られているもの、近似解が得られているもの等々である¹⁰⁾。構造物の中心に鉛直荷重Pが作用する場合には(図-6参照)、反力分布p(x,y)が得られている¹¹⁾。

$$p(x, y) = 4P / \pi^2 BL \sqrt{(1 - 4x^2 / B^2)(1 - 4y^2 / L^2)} \quad (3)$$

ここで、Bは基礎幅、Lは基礎長さである。上式からわかるように、地盤反力分布は構造物や地盤の物性には依存せず、構造物の形状や寸法のみ依存する形となっている。剛体基礎構造物の一般的な地盤反力分布は、図-6の左図のように、基礎中央部では比較的平坦で小さな値であるが、基礎端部の近傍になると急な勾配で大きな値となる(一般には剛板分布と称す)。また、鉛直荷重P、水平荷重Q、モーメントMが作用する場合の近似解としての変位と傾角は^{12),13)}、図-7の形状係数を用いて次のようになる。なお、水平変位については、接地面におけるせん断応力分布が一様であるとの仮定をおき、接地面の水平変位の平均値を求めたものである¹²⁾。

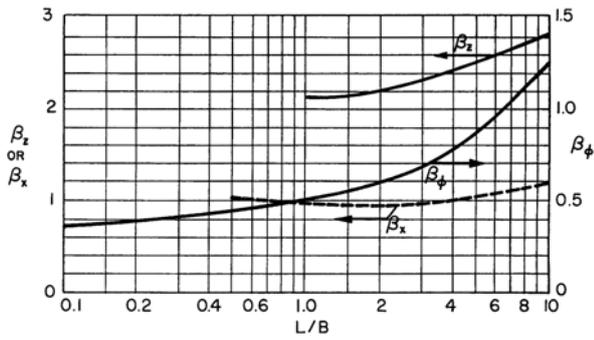


図-7 バネ定数算定のための形状係数¹²⁾

$$w \text{ (鉛直)} = P(1-\nu)/G\beta_z\sqrt{BL} \quad (4a)$$

$$u \text{ (水平)} = Q/2(1+\nu)G\beta_x\sqrt{BL} \quad (4b)$$

$$\phi \text{ (傾角)} = M(1-\nu)/G\beta_\phi BL^2 \quad (4c)$$

2次元の帯状基礎の場合には、式(3)は以下のようになる¹¹⁾。
なお、式(3)とは異なり、 P は単位奥行きあたりの鉛直荷重を表している。

$$p(x) = 2P/\pi B\sqrt{1-4x^2/B^2} \quad (5)$$

簡単のため、以下の検討では2次元の扱いとする。

3.3 有限要素解析による地盤反力分布

ジョイントに発生する応力(地盤反力)を分析するとともに、ジョイント剛性がそれに与える影響、地盤剛性や構造物寸法が与える影響を把握するため、剛体基礎構造物に対して有限要素解析を実施した。

(1)有限要素解析および評価の概要

2次元の扱いをするものとし、構造物を平面応力要素、地盤を平面ひずみ要素でモデル化し、接地面にジョイント要素を設けた。図-5に解析モデルを示す。基礎構造物の要素分割は基礎幅 B の1/16としている。これは、4.3で後述するように、解析精度を確保すべき領域や地震応答解析における実績等を考慮して定めたものである。ジョイント剛性は底面内で一様とし、これをパラメータとして、多数の解析を行った。また、地盤のせん断波速度や構造物寸法の影響についても考察した。なお、寸法の異なる構造物についてはメッシュの形状は相似とした。

地盤反力の分析の趣旨を踏まえると、解の定式化の段階で一様な応力分布を仮定している水平成分での検討は望ましくなく、回転成分については、鉛直成分を積分して算出することになるため、以下では、鉛直成分についての検討を行う。構造物底面に作用する地盤反力の鉛直成分の分布を図-8、9に示す。

(2)ジョイント剛性による地盤反力分布の変化

図-8は、底面寸法が $50\text{m}\times 50\text{m}$ の基礎構造物の地盤反力分布である。ジョイント剛性については、 $k_n=1.0\times 10^5\sim 10^8$ [kN/m³]の範囲でその影響を観察している。

有限要素解析による地盤反力の分布状況は、剛板分布を示しており理論解の傾向に類似している。また、ジョイント剛性が大きくなると、反力分布の勾配変化が大きくなり、基礎端部の地盤反力度も大きくなる傾向にある。しかし、ジョイント剛性を桁違いで変化させていることを勘案すると、地盤反力度のジョイント剛性に対する感度は、あまり大きくはないと考えられる。

$V_s=300$ [m/sec] で $k_n=1.0\times 10^5$ [kN/m³] のケースや $V_s=1200$ [m/sec] で $k_n=1.0\times 10^6$ [kN/m³] のケースのように、ジョイント剛性を調整すれば、解析解が理論解と概ね一致することが確認できる。このようなケースでも若干の差異が生じているようにも見えるが、剛体基礎の変位が一定であることを考慮すると、厳密に式(5)を満たす反力値を得るには、構造物底面で一様にジョイント剛性を設定するのではなく、剛板分布に類似した形状を有する剛性分布を設定する必要があると考えられる。しかし、一様な剛性のジョイントを配置しても差異はこの程度であり、実用上は、理論解と遜色ない程度の反力分布が算出できている。

図-9は、底面寸法が $12.5\text{m}\times 12.5\text{m}$ の規模が小さい基礎構造物の地盤反力分布である。 $V_s=600$ [m/sec] で $k_n=1.0\times 10^6$ [kN/m³] のケースで理論解との整合が良いが、ジョイント剛性に関するその他の傾向は構造物が大なる場合と概ね一致している。

なお、基礎端部における地盤反力度については、理論解の変化が大きく、要素分割や要素回数によっては有限要素解析の離散化誤差が生じやすいところでもあるため、この部分における反力分布の近似程度に関する判断は慎重にすべきと考えられる。これに関しては、4.3において考察することとする。

(3)地盤のせん断波速度の影響

構造物が大なるケース(図-8)によると、理論解については、式(3)や式(5)からも明らかのように、地盤のせん断波速度 V_s にかかわらず地盤反力度が変動していない。解析解については、同一のジョイント剛性のケースに着目すると、 V_s が大きくなるに伴い、基礎端部の地盤反力度が低下し、反力分布の勾配変化が小さくなる傾向にある。解析解が理論解に一致するためには、 V_s が大きくなるに伴い、ジョイント剛性も大きくする必要があることがわかる。たとえば、 $V_s=300$ [m/sec]の工学的基盤を想定したケースでは、 $k_n=1.0\times 10^5$ [kN/m³]程度のジョイント剛性であれば理論解との整合が良い。また、 $V_s=2400$ [m/sec]の硬岩を想定したケースでは、 $k_n=1.0\times 10^7$ [kN/m³]程度の剛性であれば理論解に近いようである。

構造物が小なるケース(図-9)でも、同様な傾向が見受けられる。ただし、後述するように構造物寸法も影響している。工学的基盤を想定したケースでは、 $k_n=1.0\times 10^5\sim 10^6$ [kN/m³]程度のジョイント剛性であれば理論解と概ね調和的である。また、硬岩を想定したケースでは、 $k_n=1.0\times 10^7$ [kN/m³]程度の剛性であれば理論解に近いようである。

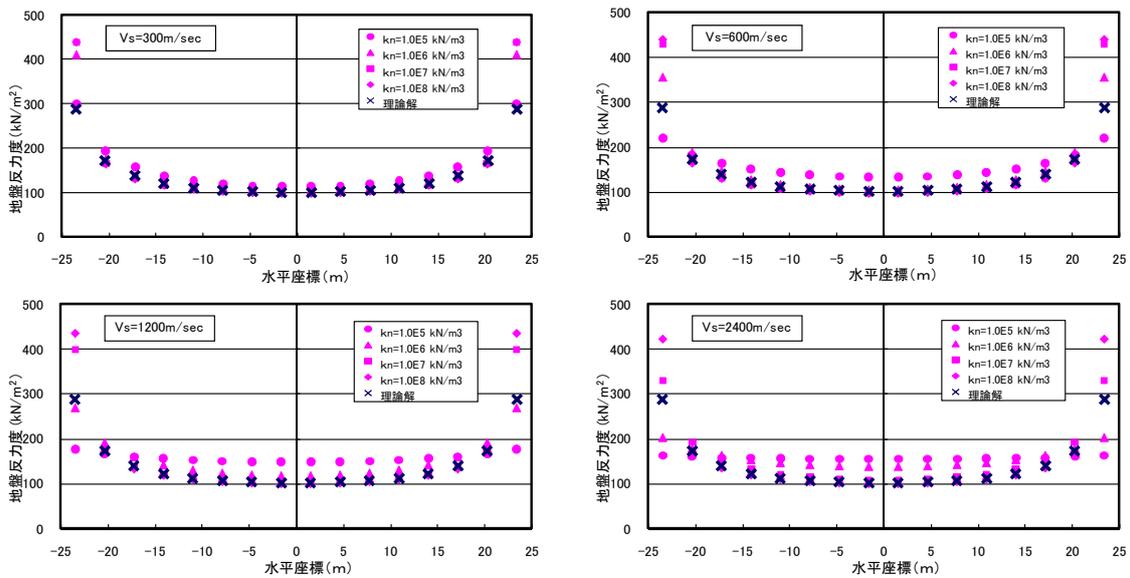


図-8 剛体基礎構造物の底面の地盤反力分布 (構造物大: 50m×50m)

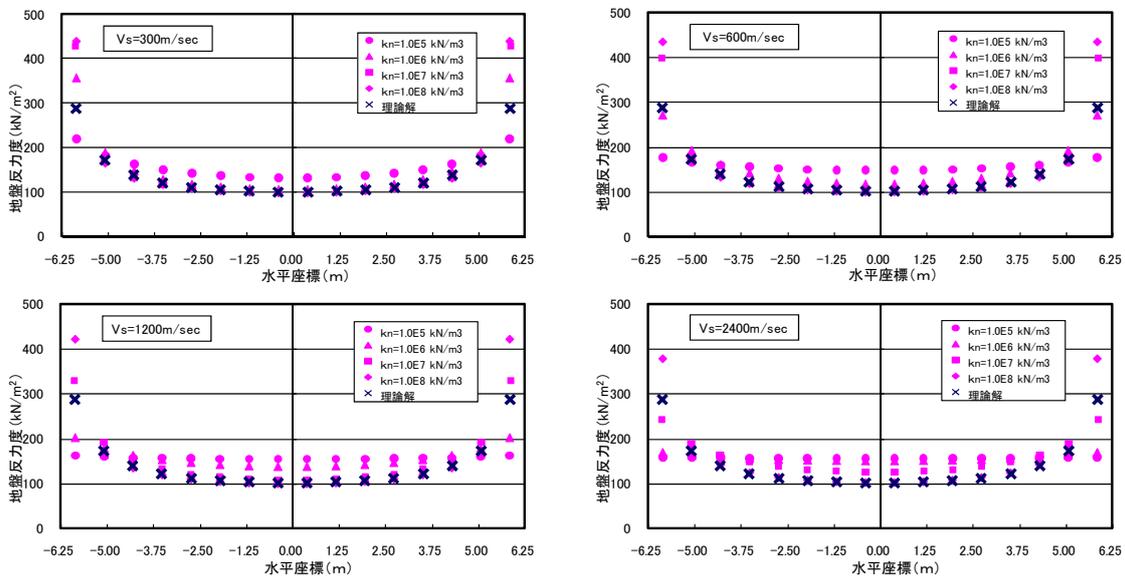


図-9 剛体基礎構造物の底面の地盤反力分布 (構造物小: 12.5m×12.5m)

(4) 構造物寸法の影響

構造物が大なるケース (図-8) と、構造物が小なるケース (図-9) を比較すると、理論解については、構造物寸法によらず地盤反力度が変動していない。これは、接地面における単位面積当たりの鉛直荷重が一定となるように荷重条件を設定し、構造物寸法を考慮して横軸を調整したことがその理由である。解析解については、同一のジョイント剛性のケースに着目すると、構造物の底面積が小さくなるに伴い、反力分布の勾配変化が小さくなるとともに、基礎端部の地盤反力度が小さくなっていることが分かる。そのため、理論解に一致する解析解を得るためには、構造物の底面積が小さくなるに伴い、ジョイント剛性を大きく設定する必要があると考えられる。

(5) まとめ

ジョイント剛性を主たるパラメータとして、多数の解析を行った。ジョイントに発生する応力 (地盤反力) の分布状況は理論解と類似し、剛版分布となった。また、ジョイントの剛性を調整することにより地盤反力分布を理論解に概ね一致させることができた。

ジョイント剛性は周辺の地盤剛性や構造物の底面寸法にも依存する傾向にある。地盤剛性が大きくなるに伴い、ジョイント剛性を大きめに設定し、底面寸法が大きくなるに伴い、ジョイント剛性を小さめに設定する。というような配慮が必要になると考えられる。

地盤反力度のジョイント剛性に対する感度は大きくはないようである。また、底面に一様なジョイント剛性を配置しても、実用上は理論解と遜色ない程度の反力分布が算出できると考えられる。

表-2 半無限弾性地盤のバネ定数

構造物	せん断波速度 V_s (m/sec)	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	底面のバネ		単位面積あたりのバネ	
			直バネ剛性 K_z (kN/m)	せん断バネ剛性 K_x (kN/m)	直バネ剛性 k_z (kN/m ²)	せん断バネ剛性 k_x (kN/m ²)
構造物大 50m×50m	300	180000	2.751E+07	2.387E+07	1.101E+04	9.547E+03
	600	720000	1.101E+08	9.547E+07	4.402E+04	3.819E+04
	1200	2880000	4.402E+08	3.819E+08	1.761E+05	1.528E+05
	2400	11520000	1.761E+09	1.528E+09	7.044E+05	6.110E+05
構造物中 25m×25m	300	180000	1.376E+07	1.193E+07	2.201E+04	1.909E+04
	600	720000	5.503E+07	4.774E+07	8.805E+04	7.638E+04
	1200	2880000	2.201E+08	1.909E+08	3.522E+05	3.055E+05
	2400	11520000	8.805E+08	7.638E+08	1.409E+06	1.222E+06
構造物小 12.5m×12.5m	300	180000	6.879E+06	5.967E+06	4.402E+04	3.819E+04
	600	720000	2.751E+07	2.387E+07	1.761E+05	1.528E+05
	1200	2880000	1.101E+08	9.547E+07	7.044E+05	6.110E+05
	2400	11520000	4.402E+08	3.819E+08	2.817E+06	2.444E+06

4. 半無限弾性地盤の地盤バネによる反力分布

これまでの検討で、ジョイント剛性は、周辺地盤の剛性、構造物の寸法、等に依存することが明らかになった。その一方で、構造物の耐震解析においては、地盤のモデル化として、半無限弾性地盤上の理論解に基づいて地盤バネを設定することが、従来より行われている。ここでは、この地盤バネの算定式を応用してジョイント剛性を設定する方法について、基礎的な考察を行うものとする。

4.1 理論解に基づく半無限弾性地盤の地盤バネ

半無限弾性地盤上の基礎構造物に作用させるバネは、荷重と変位に関する理論解である式(4)を整理して、以下のように表わすことができる¹²⁾。

$$K_z = \frac{G}{1-\nu} \beta_z \sqrt{BL} \quad (6a)$$

$$K_x = 2(1+\nu)G\beta_x \sqrt{BL} \quad (6b)$$

これらの式は、Barkanの式として多用されているが、原式の表記は式(6)とは異なっている¹⁴⁾。また、回転成分についても同様に整理されている¹⁵⁾。式(6)では、周辺地盤の剛性や構造物の形状の影響が陽な形で考慮されており、底面積の平方根に比例する形となっている。3.1に示される種々の基礎構造物についての水平や鉛直方向のバネ定数を表-2に示す。ここで、単位面積当たりのバネ定数は、上記のバネ定数を構造物の底面積で除したものであり、底面積の平方根に反比例する形となる。鉛直バネに着目すると、概ね $k_n = 1.0 \times 10^4 \sim 10^6$ [kN/m²] の範囲にあることがわかる。

4.2 地盤バネのジョイント剛性への適用

3.3での考察により、ジョイント剛性が概ね $k_n = 1.0 \times 10^5 \sim 10^7$ [kN/m²] 程度であること、4.1での考察により、地盤バネ定数が概ね $k_n = 1.0 \times 10^4 \sim 10^6$ [kN/m²] 程度であることから、ジョイント剛性は周辺地盤の剛性に対して、1桁程度大きな値になることが推察される。

半無限弾性地盤のバネ定数は、BoussinesqやCerrutiの解等に基づき定式化されている。定式化の際、地盤内の応力場については、多次元的な広がり、荷重からの距離に応じた応力低減、等の影響が考慮されている。また、基礎の接地面の形状に応じて、躯体荷重が考慮される。それらの結果として、半無限地盤としての地盤剛性、構造物の形状や寸法、等の影響を直接的に考慮できる。したがって、このバネ定数に基づいてジョイント剛性を設定することにより、合理的なジョイント剛性の評価が可能と考えられる。

このような観点で、3.3と同様に有限要素解析を実施した。地盤反力分布を図-10~12に示す。なお、各図は基礎中央における理論解の値にて無次元化している。

(1)ジョイント剛性による地盤反力分布の変化

たとえば、図-10に着目した場合、バネ定数(Barkanの式)に基づいたジョイント剛性を用いた解析解は、バネ定数に補正を加えずにそのままジョイント剛性として与えた場合には、反力分布の勾配変化が小さく、基礎端部の地盤反力度が小さめに評価されている。この原因は、半無限地盤を平面ひずみ要素としてモデル化しており、ジョイント要素に半無限地盤と同程度の剛性を付与することで、2つの地盤バネを直列に配置したのと類似の効果が生じ、系全体の剛性としては、見かけ上小さくなってしまったと考えられる。そこで、ジョイント剛性を大きく設定することとし、バネ定数に5、10倍の補正係数を乗じこれをジョイント剛性として与えた。その結果、地盤反力分布は改善され、理論解に整合する結果となった。

(2)地盤のせん断波速度の影響

地盤のせん断波速度 V_s の影響について着目すると、バネ定数には、地盤剛性の影響が直接的に考慮できるため、バネ定数に5~10倍の補正係数を単に乘じるだけで、いずれの V_s の場合においても地盤反力分布は理論解に整合する結果となった。

(3)構造物寸法の影響

構造物寸法の影響について着目すると、理論解については、構造物寸法によらず地盤反力度が変動していないが、この理由は3.3(4)で考察したとおりである。解析解については、ジョイント剛性として構造物の底面寸法が直接的に考慮できるため、バネ定数に5~10倍の補正係数を単に乘じるだけで、いずれの規模においても地盤反力分布は理論解に整合する結果となった。

このように、ジョイント剛性として半無限弾性地盤のバネ定数に基づくことで、地盤剛性や構造物寸法の影響が適切に考慮されることになり、理論解との整合も良好であることがわかった。また、剛性の大きさもバネ定数の5~10倍程度の値で良く、周辺地盤の剛性の5~10倍程度という従来の知見とも調和的であることがわかった。

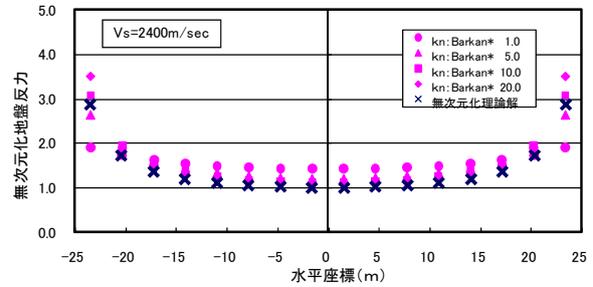
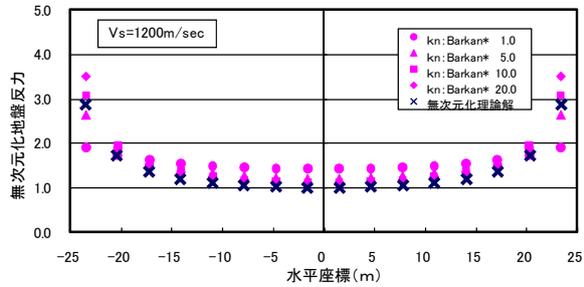
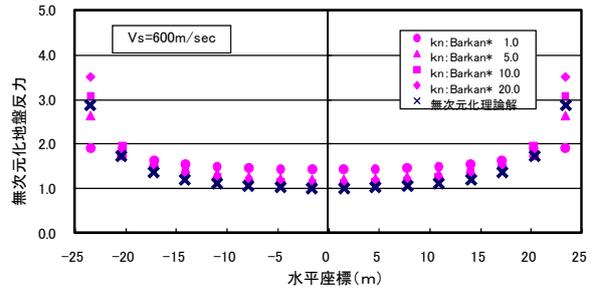
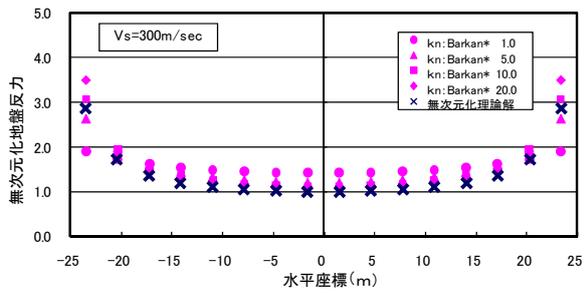


図-10 半無限弾性地盤の地盤バネに基づくジョイントに生ずる地盤反力分布 (構造物大: 50m×50m)

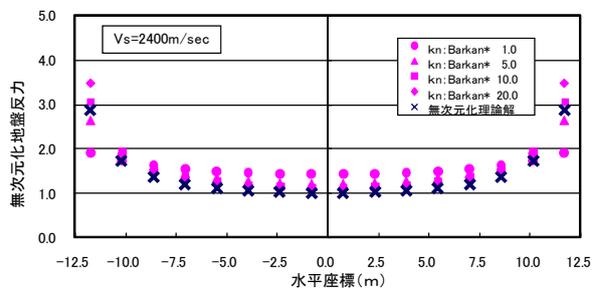
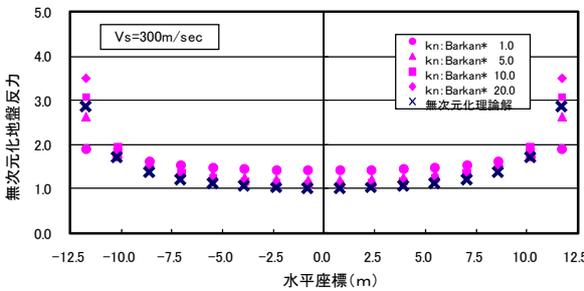


図-11 半無限弾性地盤の地盤バネに基づくジョイントに生ずる地盤反力分布 (構造物中: 25m×25m)

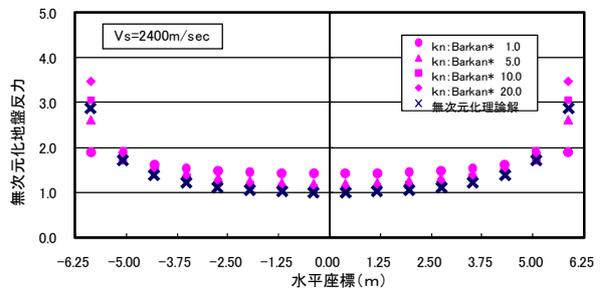
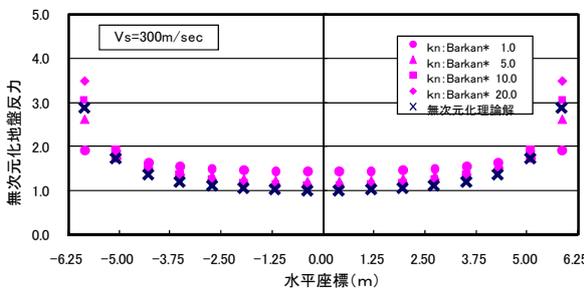


図-12 半無限弾性地盤の地盤バネに基づくジョイントに生ずる地盤反力分布 (構造物小: 12.5m×12.5m)

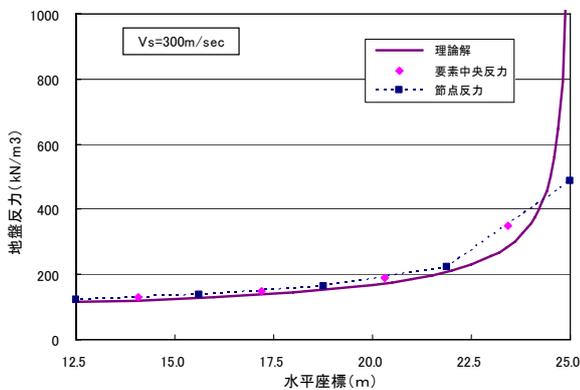


図-13 基礎端部における地盤反力分布の状況 (構造物大: 50m×50m)

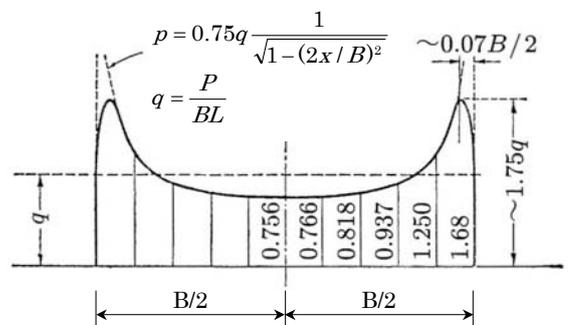


図-14 弾塑性的な地盤反力分布 (文献¹⁶⁾に加筆)

4.3 ジョイント剛性の評価における

基礎端部の解析・評価の精度に関する考察

基礎端部における地盤反力度については、理論解の変化が大きく、要素分割や要素次数によっては有限要素解析の離散化誤差が生じやすいところでもある。ジョイント要素の場合は構成上1次要素とされることが多い。そのため、解析精度を向上させるには要素分割を細かくすることが考えられる。そこで、要素分割がジョイント剛性の評価に与える影響について考察することとする。

(1)基礎端部の地盤反力分布の近似状況

構造物大、 $V_s=300$ [m/sec] の場合の基礎端部の地盤反力の分布状況を図-13 に示す。なお、ジョイント剛性については Barkan バネの20倍、すなわち $k_n=2.202 \times 10^5$ [kN/m³] としている。これまでの解析解の出力は、ジョイント要素の中央における応力度を出力していた。ここでは、縁端部 ($x=B/2=25$ m) における解析解を詳細に検討するため、要素端の構造物節点と地盤節点の2点間の相対変位に、ジョイント剛性を乗じて算出した地盤反力度も併せて示している。

これによると、縁端部において、理論解は、下に凸の曲線形状を保持しながら $x=B/2$ の直線に漸近し、反力度は無限大となっている。一方、解析解は、縁端部において有限の値を示し、縁端部とそれに隣接する節点間の反力度は一定勾配の直線となっている。また、ジョイント要素中央での出力値もその直線上に載っている。

下に凸の理論解と一定勾配の解析解との兼ね合いで、基礎端部のジョイント要素中央での出力値は、理論解よりも上方に位置している。これは、基礎端部の要素寸法（とくに要素幅）の設定により変化するものであり、ジョイント要素を用いた解析解の近似程度が変化する可能性があることを意味している。

(2)要素寸法（要素幅）の設定

弾性論による解析では、縁端部の地盤反力度が無限大になるが、実際には反力度が大きくなると変形は弾塑性的になるため、縁端部の反力度は有限となる。Ohde は縁端部で有限の値となる地盤反力度の分布形状を提案している¹⁰ (図-14 参照)。この分布は縁端部より $0.07B/2$ の距離で反力度が最大となる。これを精度よく解析するには、要素重心が $0.07B/2$ の位置に近くなるように要素を配置する必要がある。具体的には、基礎幅 B の $1/15$ 程度の要素分割が必要と考えられる。

また、地中構造物や基礎構造物の耐震安定性評価においては、地盤・構造物の動的相互作用や非線形性を考慮するが故に、地盤・構造物連成系に対して、時間領域での地震応答解析を実施することが多くなってきている。構造物だけではなく、広範な地盤領域をも有限要素でモデル化することになるので、モデルとしては大規模なものとなる。その結果、解析容量、解析時間が膨大となるため、現実には構造物の要素分割の細分化には限度がある。基準類等での解析事例を参考にすると、数個から30個程度に要素分割されることが多く、これが実情のようである。

このような知見や事情を勘案して、基礎端部の要素幅に

ついては、基礎幅 B の $1/16$ 程度の要素分割を基本として解析的検討を行うこととした。

(3)要素分割（要素幅）の変動の影響

基礎幅 B の $1/16$ の要素分割を基本ケースとして、その $1/2$ 倍、2倍程度の変動を想定し、基礎端部の要素幅が $B/32$ 、 $B/8$ なる場合について、解析的検討を行った。

構造物が大なるケースの要素分割の影響を図-15 に示す。要素分割の大小により、地盤反力度に多少影響が出ている。これは、出力位置がずれるために反力度の差異が大きくなるように思われる。しかし、ジョイント剛性としては大きな差異は生じていない。具体的には、基礎端部のジョイント要素中央において、理論解と整合する出力値を得るためには、要素幅を小さくするに伴い、ジョイント剛性を大きくする必要がある。しかし、要素幅を基本ケースの $1/2$ 倍、2倍と変化させても、ジョイント剛性もそれに対応して $1/2$ 倍～2倍程度で変化するだけである。3.3(2)の知見に基づくと、感度は大きくないと考えられる。3.3(2)では、縁端部から $0.07B/2$ の位置の近傍にある基礎端部のジョイント要素中央での出力に着目しており、この位置での感度が大きくはないことを意味している。

図-16 は、地盤せん断波速度 V_s を変更したものであるが、 V_s の大小により傾向が変化することはない。また、図-17 は、構造物が小なるケースを示したものであるが、構造物の大小により傾向が変化することはない。すなわち、要素分割の大小により、地盤反力度の分布状況に多少の影響は出ているが、これは構造物幅と要素幅の比が地盤反力度に影響しているものと考えられる。半無限弾性地盤の地盤バネを用いて説明できるような地盤剛性や構造物寸法等の属性とは直接的には関係がないようである。

したがって、要素分割の違いにより生じるジョイント剛性に関する評価の差異についての感度が大きくはないこと、地盤や構造物の属性に基づく評価には直接的には関係しないことを考慮すると、実用的なジョイント剛性を評価する際には、必要な要素分割を満たせば、要素分割の多少の変動については、その影響は大きくはないものと考えられる。

4.4 まとめ

このように、ジョイント剛性として半無限弾性地盤のバネ定数に基づき評価を行うことで、地盤剛性や構造物寸法の影響が適切に考慮されることになり、地盤反力分布も理論解と良好に整合するものとなることがわかった。そして、一般的なジョイント剛性の目安としては、バネ定数の5～10倍程度の剛性を見込めば良いと考えられる。これは、周辺地盤の剛性の5～10倍程度という従来の知見とも整合するものである。

また、基礎端部の要素分割の違いがジョイント剛性の評価に影響を及ぼすことが懸念されたが、弾塑性挙動等に配慮した必要な要素分割を満たせば、要素分割の多少の変動については、その影響は大きくはないものと考えられる。

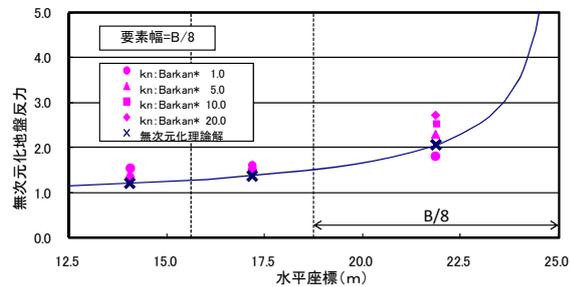
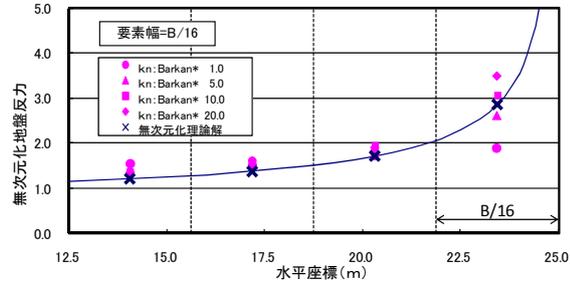
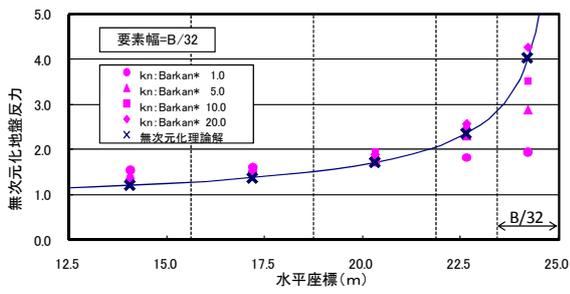


図-15 端部の要素分割の影響 (構造物大: $V_s=300\text{m/sec}$)

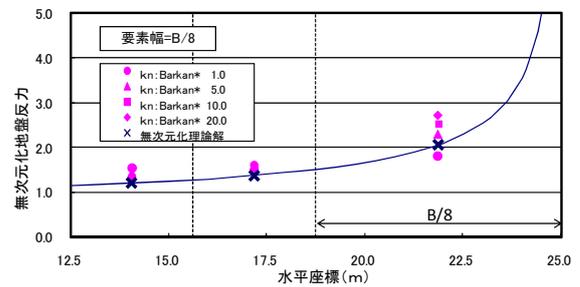
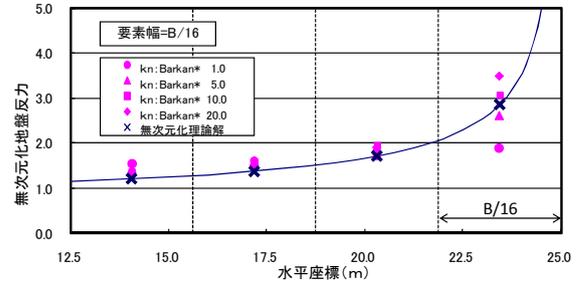
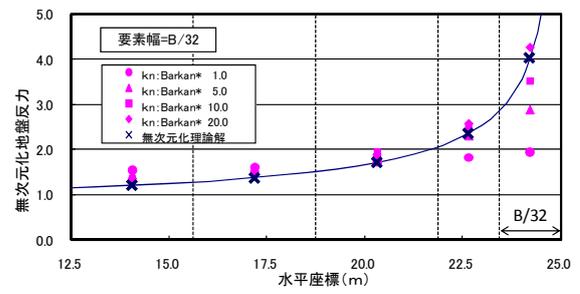


図-16 端部の要素分割の影響 (構造物大: $V_s=2400\text{m/sec}$)

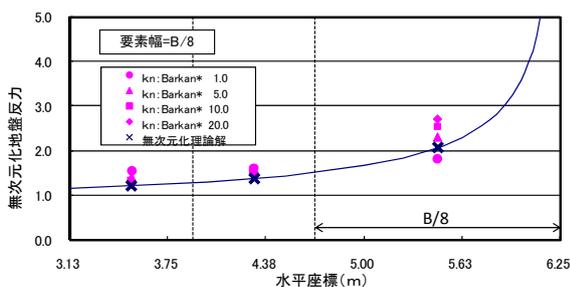
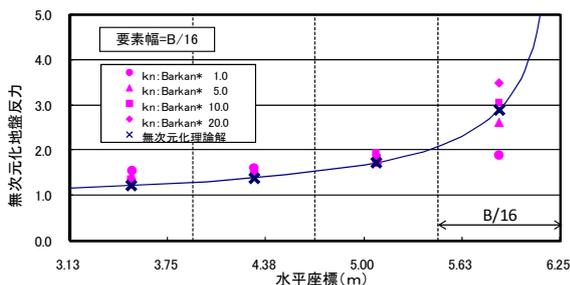
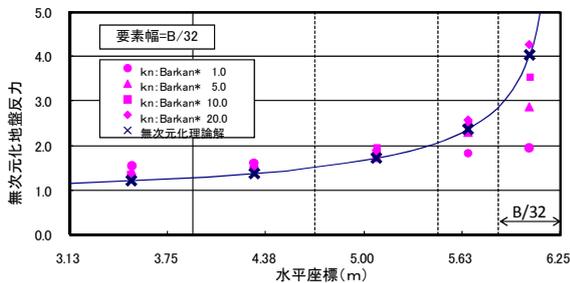


図-17 端部の要素分割の影響 (構造物小: $V_s=300\text{m/sec}$)

5. 実用的なジョイント剛性の実構造物への適用性

(1) ジョイント剛性のせん断成分の評価法

ジョイント剛性のせん断成分については、弾性地盤を想定する限りにおいては鉛直成分とせん断成分がポアソン比を介して完全に対応がつくことから、鉛直成分と同様に半無限弾性地盤の地盤バネ定数式(6b)に基づく評価が可能と考えられる。また、せん断弾性係数がヤング率の $1/2 \sim 1/3$ の範囲の値であり、地盤反力分布のジョイント剛性に対する感度は大きくないことを考慮すると、せん断剛性は直剛性と同程度と解釈することもでき、せん断成分の解の傾向も鉛直成分の傾向と類似するものと考えられる。

(2) 弾性構造物への適用性

弾性構造物への適用性については、以下のように考えることができる。文献¹⁴⁾によれば、完全に剛な載荷版と完全に柔な載荷版に対するバネ定数を比較しており、このように極端な剛性設定であっても両者の差は数パーセント程度であることが記されている。本論におけるジョイント剛性は、構造物に作用するこのようなバネ定数を底面積で除して一様な剛性として表現するため、ジョイント剛性にはほとんど差が生じない。そのため、解析解に与える影響は小さいと考えられる。したがって、本評価法を弾性構造物に適用することも可能と考えられる。

6. おわりに

本論では、実務における広範な条件での適用ができるように、実用的なジョイント剛性の設定法を構築することを目的として、既往の研究成果の延長上で基礎的な検討を行った。具体的には、半無限弾性地盤上の剛体基礎を対象とした反力分布の理論解等の知見を整理するとともに、地盤・構造物境界面にジョイントを配置した有限要素モデルに対して多数の解析を実施し、ジョイント剛性を合理的に設定する方法について考察した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① ジョイントに発生する応力分布（地盤反力分布）状況は理論解と類似し剛板分布となった。また、ジョイントの剛性を調整することにより地盤反力分布を理論解に概ね一致させることができた。
- ② ジョイント剛性は周辺の地盤剛性や構造物の底面寸法にも依存する。地盤剛性が大きくなるのに伴い、ジョイント剛性を大きめに設定する必要がある。また、底面寸法が大きくなるのに伴い、ジョイント剛性を小さめに設定する必要がある。
- ③ 地盤反力度のジョイント剛性に対する感度は大きくはなく、また、底面に一樣なジョイント剛性を配置しても、実用上は理論解と遜色ない程度の反力分布が算出できる。
- ④ ジョイント剛性として半無限弾性地盤のバネ定数に基づき評価を行うことで、地盤剛性や構造物寸法の影響が適切に考慮されることになり、地盤反力分布も理論解と良好に整合するものとなることがわかった。
- ⑤ ジョイント剛性の一般的な目安の値としては、バネ定数の5～10倍程度の剛性を見込めば良いと考えられる。これは、周辺地盤の剛性の5～10倍程度という従来の知見とも整合するものである。
- ⑥ 基礎端部の要素分割の違いがジョイント剛性の評価に影響を及ぼすことが懸念されたが、弾塑性挙動等に配慮した必要な要素分割を満たせば、要素分割の多少の変動がジョイント剛性の評価に及ぼす影響は、大きくはないものと考えられる。
- ⑦ 本評価法のせん断成分の評価や弾性構造物への適用については、理論解による直接的な検証という意味では十分ではないが、類似条件での理論解の存在、弾性論の実績、地盤反力分布の感度、等を勘案すると、本評価手法により、実用上は問題のない精度の解が得られるものと考えられる。

実務での適用という意味では、現実に即した合理的なジョイント要素の剛性評価法が提案できたと思われる。しかし、本論では、地盤剛性に着目した評価を行っているが、地盤と構造物の相対的な剛性比に依存する問題としても

検討が必要と考えられる。また、水平な半無限地盤上の構造物に限定した検討を行っており、地中構造物の側壁や頂版のように、構造物や部材によっては荷重の作用状況が異なり、地盤の半無限性の状況に違いが生ずることから、これらの問題への適用については配慮が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・同マニュアル，2002.5
- 2) 土木学会：トンネルライブラリー第9号，開削トンネルの耐震設計，1998.10
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾構造物設計事例集（上），1999.4
- 4) 大友敬三，末広俊夫，河井 正，金谷賢生：強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究，土木学会論文集，No.724，pp.157-175，2003.1
- 5) 土木学会：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法，pp.123-125，1989.7
- 6) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾構造物設計事例集（上），2007.4
- 7) Miura F. : Studies on the non-linear seismic response of soil - structure interaction systems, Thesis for Doctor of Engineering of Kyoto University, 1983.
- 8) Boussinesq, J. : Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques, Gauthier - Villars, Paris, France, pp.100, 1885.
- 9) Cerruti, V. : Ricerche intorno all'equilibrio dei corpi elastici isotropi, Reale Accademia dei Lincei, Vol.13, Rome, Italy, 1882.
- 10) 地盤工学会：土質工学ハンドブック，pp.115-117，1982.11
- 11) Szechy, K. : Der grundbau, Springer - Verlag, Erst. Bd., s.276, 436, 280-283, 1963.
- 12) Whitman, R.V. and Richart, Jr., F.E. : Design procedure for dynamically loaded foundations., Proc. ASCE, Vol.93, SM6, pp.169-193, 1967.
- 13) Giroud, J-P. : Stresses under linearly loaded rectangular area, Proc. ASCE, Vol.96, SM1, pp.263-268, 1970.
- 14) Barkan, D.D., : Dynamics of Bases and Foundations, translated from the Russian by L. Drashevskaya, McGraw-Hill Book Co, New York., 1962.
- 15) Gorbunov-Possadov, M. I., and Serebrjany, R. V. : Design of Structures upon Elastic Foundations, Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. I. pp.643-648, 1961.
- 16) 岡二三生：土質力学，pp.218-220，2003.9

(2009年4月9日 受付)