(77) 地中連壁の地震時応力解析に関する研究

埼玉大学工学部　正会員　　渡辺　啓行
埼玉大学大学院　学生員　○高田　穣

1．はじめに

日本の発電用ダムは、上流の岩盤地盤上に建設されているが、近年このようなダム建設に適する地盤を持つ地点が少なくなってきている。そこで、比較的良質でない（河床堆積物の多い）地盤上での建設が行われつつある。しかしながら、現状の設計基準では河床堆積物は屈削除去することが大ダムでは義務づけられている。一方、諸外国では100 m近い厚さの河床堆積物の上に大ダムが建設されており、地震の際にも著しい被害は出なかったという報告が出されていることを考えると、必ずしもコア部を着岩させる必要はないものと考えられる。そこで、河床堆積物を除去せずにその上にダムを建設する際に河床堆積物中の浸透流を遮るために地中連壁を埋設するということが考えられる。図1がその一例である。しかしながら、地中連壁の地震時挙動については不明な点が多いため本論文ではダム及び河床堆積物と地中連壁との相互作用を明らかにすることを目的として解析的な検討を試みた。

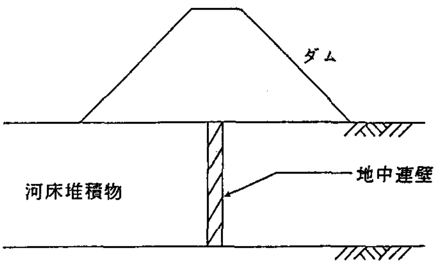


図１　概念図

2．解析方法

ダムとしてはロックフィルダムを想定し、図2のように離散化を行った。すなわち、地盤及びダムは平面ひずみ状態として三角形要素を用い、地中連壁には以下の二つの理由により二次元梁要素の理論を導入して離散化を行った。第一の理由は地中連壁の曲げ特性を十分に表現すること、第二の理由はコンクリートである地中連壁は周辺の地盤よりも剛性が大きいために三角形要素分割をした場合にはかなり細かく要素分割を行う必要があり、細かい要素分割を行うと動的解析を行う際に時間間隔をも細かく取らなければならなくなるということである。

また、地盤と地中連壁との接触面にはGoodmanによって提案されたジョイント要素の概念を導入して不連続性を考慮した。以上のような方法で離散化を行い有限要素法によって解析をおこなった。また、運動方程式を解くには線形加速度法を用いた。

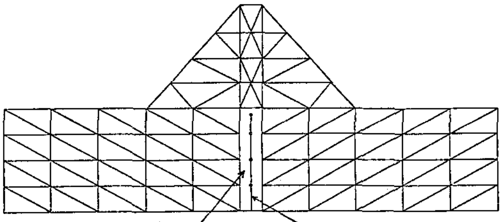


図２　要素分割図

3．Y字形ジョイント要素の概念

地中連壁を軸線で考える梁要素に離散化すると地中連壁上端で図3の(a)のような4節点(i．j．k．l)で構成する従来のジョイント要素が導入することが出来ないので、図3の(b)の

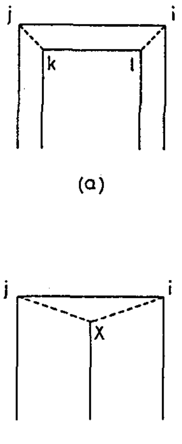


図３　Y字形ジョイント要素

ような3節点(i，j，X)で構成される新しいジョイント要素を考えて地中連壁上端と地盤との接続に導入した。その際、次のような仮定を設けて、従来のジョイント要素との関係づけを行った。

① 図3において節点k及び節点lの垂直，水平変位は等しく、節点Xの垂直，水平変位と同一である

② 節点k及び節点lの節点力の和が節点Xの節点力に等しい

この3節点からなるジョイント要素を以下ではY字形ジョイント要素と呼ぶことにし、その導入の妥当性について検討した。

4．Y字形ジョイント要素の導入の妥当性の検討

妥当性の確認にはこのY字形ジョイント要素を用いた系の解析結果と従来のジョイント要素を用いた系の解析結果とを比較し両者がほぼ等しくなることを確認すればよいと考えられる。しかしながら、以下に述べるように地中連壁を三角形要素に分割した場合と梁要素に分割した場合とでは見かけ上の剛性が違ってしまうので、まず、地中連壁のみを取出して考えることにする。

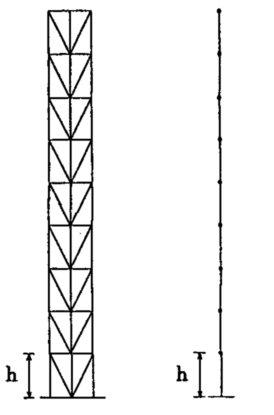


図4　地中連壁の分割

地中連壁のみを取出し図4のように三角形要素及び梁要素の2通りに分割し、分割数を数通り変えてそれぞれの場合について曲げ振動の固有角振動数を求め、その比較を行うと図5のようになる。図で横軸hは分割した一つの要素の高さを表している。したがって、原点に近い程分割の仕方が細かいということである。また、縦軸ωは地中連壁の固有角振動数を表している。この図から判るとおり一番細かく分割した場合でも三角形要素の分割の粗さのために両者は一致せず三角形要素分割の場合の方が見かけ上硬いことを示している。

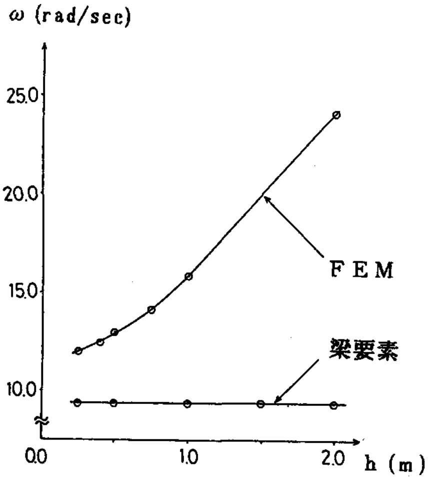


図5　梁要素と三角形要素の固有角振動数

そこで、梁要素分割と三角形要素分割との見かけ上の剛性の同一化を考えてみる。地中連壁を基盤に剛に固定された一本の片持ち梁として考えて、その片持ち梁の曲げ振動の固有角振動数の厳密解を求めると次式のようになる。

$$\omega_i = \frac{\mu_i^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

ω_i：固有角振動数　μ_i：第i次固有値　L：はりの長さ　E：ヤング率

I：断面2次モーメント　ρ：材料密度　A：断面積

この式から判るように片持ち梁の固有角振動数は形状及び材料密度が一定であるとするとヤング率の平方根に比例している。したがって、梁要素のヤング率を次式のように変化させ、これを便宜上のヤング率として用いた梁要素の場合と本来の地中連壁のヤング率を用いた三角形要素の場合とでの固有角振動数の比較を行うと梁要素分割の場合の値が三角形要素分割の場合の値に等しくなり、両者の見かけ上の剛性が等しくなったといえる。

$$E' = \omega_F^2/\omega_B^2\ E$$

E′：梁要素の便宜上のヤング率　　E：梁要素の本来のヤング率

ω_F：三角形要素分割時の固有角振動数　ω_B：梁要素分割時の固有角振動数

次に、以上のような方法で見かけ上の剛性を等しくした三角形要素と梁要素との2通りの場合の連壁を全

体系に持込んで地中連壁上端と地盤との接続に、三角形要素の場合には従来の4節点のジョイント要素を、便宜上のヤング率を用いた梁要素の場合にはY字形ジョイント要素を使用して動的解析を行い両者の時刻歴応答の比較をした。それぞれの場合の地中連壁上端部のジョイント要素のせん断ひずみの時刻歴応答は図6のようになりほぼ一致した。

以上のように、三角形要素の場合の見かけ上の剛性と等しい剛性を持たせた梁要素を用いた解析の結果、Y字形ジョイント要素のひずみ応答と従来のジョイント要素のひずみ応答とが一致したので、Y字形ジョイント要素の導入の妥当性が確認されたと考えられる。

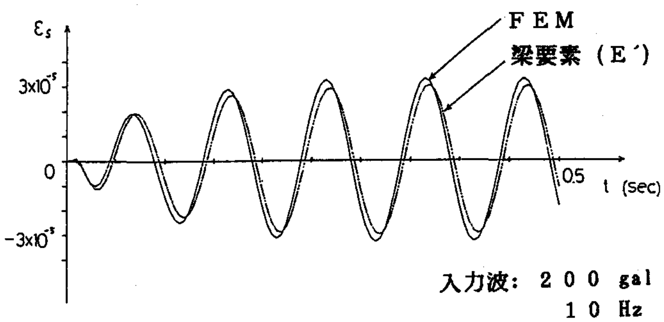


図6　せん断ひずみ応答の比較

ゾーン	弾性係数 (kgf/cm²)	ポアソン比	乾燥密度 (t/m³)	粘着力 (kgf/cm²)
ロック	380	0.35	1.95	
コア	265	0.40	1.85	0.1
河床堆積物	1,700	0.35	1.85	0.2
ベントナイト混入コンクリート	15,000	0.30	2.10	
普通コンクリート	350,000	0.17	2.10	

表1　解析に用いた諸数値

5．数値実験

前述のY字形ジョイント要素を用いて、現在建設計画が進行中のAダムの場合の物性値を用いて数値実験を行った。その際、Aダムで実際に地中連壁の材料として使用される剛性の小さいベントナイト混入コンクリートと、これとの比較のために普通コンクリートとの2通りの材料を地中連壁の使用材料とした場合についての検討を行い、地中連壁の剛性の違いによる影響の比較を行った。この時に使用した諸数値は表1に示すとおりである。

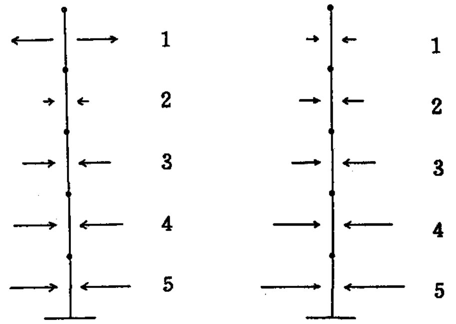
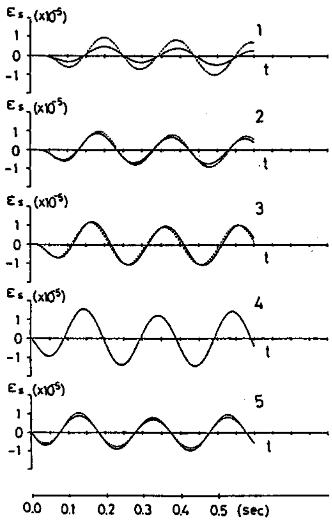


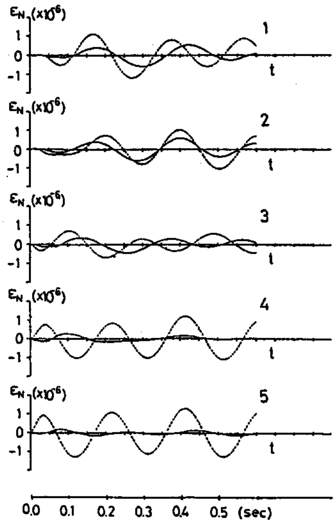
図7　自重によるジョイント要素の垂直応力

まず、地盤と地中連壁との接触面の系の自重による挙動について調べることにする。このとき、接触面での地盤と地中連壁との結合は実際には剛であると考えられるのでジョイント要素の剛性係数を十分に大きな値とするべきであるが動的解析では収束性などの点を考慮して地盤の剛性の5～10倍程度とするのが通例であるが、この自重による静的な解析ではその点の問題がないので、ジョイント要素の剛性係数を十分に大きな値（周辺地盤の剛性の10^5倍程度）として解析することにした。その結果が図7である。この図は地中連壁側面のジョイント要素に働く垂直応力を表し、図中の番号は地中連壁上部から順番に1～5で応力の働く位置を示している。また、図中の矢印はその向きが垂直応力の働いている向きを、その大きさが応力の相対的な大きさを示している。この図よりベントナイト混入コンクリートの場合では接触面を圧縮するような向きに働き、普通コンクリートの場合では上部で接触面を引っ張るような向きに働いて剥離が生じていることが判る。これは普通コンクリートがベントナイト混入コンクリートよりも剛性が大きいために系に働く外力（重力）が一定ならば系内で受け持つ力が普通コンクリートの方が

相対的に大きくなり、その分地盤が受け持つ力が相対的に小さくなる。そのために接触面で地盤が横方向にはらみ出そうとする力に地盤が抵抗しきれずに剝離が生じたものと考えられる。剝離するとそこに浸透流が入り込みその部分から崩壊する危険性があるので自重の作用による接触面の挙動という観点から見ると地中連壁の材料としてはベントナイト混入コンクリートの方が有利であると考えられる。

次に、この全体系において動的解析を行い地盤と地中連壁との接触面のひずみ応答への地中連壁の剛性の違いによる影響を考える。その解析結果の代表例を図８及び図９に示す。図で点線が普通コンクリートの場合のひずみ応答を表し、実線がベントナイト混入コンクリートの場合のひずみ応答を表している（図中の番号１～５は図７と同様である）。この二つの図から、せん断ひずみ応答では上部で普通コンクリートの場合の方がベントナイト混入コンクリートの場合よりもかなり大きな値をしめしていることが判り、垂直ひずみ応答ではそのような差がさらに大きくなり下方で著しい差を生じていることが判る。このことから、ベントナイト混入コンクリートの場合の方が耐震性の面においてひずみ応答の点から考えると優れているといえる。





――― ：ベントナイト混入コンクリート　入力波： ２００ gal
………… ：普通コンクリート　5 Hz

図８　剛性の違いによる せん断ひずみ応答の比較

図９　剛性の違いによる 垂直ひずみ応答の比較

６．まとめ

ロックフィルダムを河床堆積物上に建設する場合にコア部の下に遮水壁として地中連壁を埋設することを想定して解析を行った。その際、地中連壁のモデルとして二次元梁要素の概念を導入し、地盤と地中連壁との接触面の不連続性を表現するためにジョイント要素を導入した。このとき地中連壁上端部と地盤の三角形要素との接続に３節点で構成するＹ字形ジョイント要素を導入することを提案し、このＹ字形ジョイント要素を用いたモデルの解析を行ってその導入の妥当性についての検討を行った。また、Ａダムの物性値に基づいた解析の結果から、地中連壁の剛性の違いによる接触面の静的及び動的な挙動の差から考えた場合には剛性の小さいベントナイト混入コンクリートを地中連壁の材料として用いる方が、普通コンクリートを用いるよりも有利であると考えられるという結論を得た。

また、現在までの解析は地盤部分では全て線形範囲内で行ったので今後はより詳細な検討をするために非線形の範囲にまで拡張した解析を行う予定である。

７．参考文献

1) 渡辺啓行，「有限要素法による粘弾性体の震動解析」，電力中央研究所第二報告No71004，1971年8月

2) (財)地震予知総合研究振興会,「1985年メキシコ地震の被害とその復旧」,土木学会メキシコ地震調査団報告 昭和62年12月

3) R．E．Goodman原著,赤井,川本,大西訳，「不連続性岩盤の地質工学」，森北出版

4) 三好俊夫，「有限要素法入門」，培風館

5) 川井忠彦，「マトリックス法振動および応答」，日本鋼構造協会編，培風館