嵩上げアースダムにおける傾斜型コア構造の浸透特性および地震時応答に関する基礎的検討

李 永学¹・常田 賢一²・秦 吉弥³・川口 潤⁴・魚谷 真基⁵

¹学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: younghak_lee@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴非会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: jkawaguchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁵学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: muotani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

韓国では水不足の危機から、農業用アースダムの嵩上げが活発化している。そのため、旧コアに継足される新コアの構造安定性およびそれが堤体の透水性、耐震性に及ぼす影響を把握し、継足コア構造の最適化を図ることが必要と考えられる。しかしながら、既存の継足コア構造は画一的であり、安定性評価は震度法に留まっているのが現状である。そこで本研究では、傾斜型コア嵩上げがなされた韓国の鶏龍貯水池をモデルとし、継足コア構造の規模に着目し、4種類のコアモデルに関する浸透流解析および動的解析を実施し、コア構造が浸潤線および新旧コア境界部のせん断応力に及ぼす影響を明らかにした。

Key Words : earth dam, heightened core, seepage analysis, dynamic analysis, shear stress

1. はじめに

(1) 背景と目的

近年韓国では、国土の地形的な問題から新たなダムによる水資源の確保が難しいことや、年間降雨量が6月から9月に集中し、季節による降雨量の偏りが大きいことから、将来的に水不足が起こることが危惧されている¹⁾。このような背景から、韓国では、2010年から2015年にかけて全国110ヶ所の農業用貯水池における堤防の嵩上げが行われる予定である²⁾。対象貯水池のほとんどは、コア、盛土、フィルターから構成されるゾーン型アースダムであり、継足されるコアの構造については、22ヶ所が傾斜型コア、40ヶ所が垂直型コアである³⁾。

ここで、一般に傾斜型コアは、下流側法面のみの拡幅により上部方向へコアを延ばすため、垂直型コアよりも容易に嵩上げ高さが確保できるとされている。その一方で、両側の法面を拡幅する垂直型コア嵩上げと比較すると、傾斜型コア嵩上げでは、嵩上げ盛土部の不同沈下などによる継足コアへの影響およびそれによる浸透特性の変化など、構造的な課題

が多いとされている⁴⁾。

さらに、韓国における有感地震の年間発生回数の推移(マグニチュード別)を図-1に示すが、韓国では近年になって有感地震の頻度が増加している⁵⁾。そのため、嵩上げダムについても耐震性能の向上が急務である。しかし、韓国においてもダムの耐震性評価は考慮されているものの、貯水池のような中小規模ダムの耐震設計では、震度法(静的解析)による安定性の評価に留まっており、継足コア構造の詳細な挙動の把握のためには、動的解析等の実施が必要不可欠である。

すなわち、アースダムの嵩上げ施工法の中でも、課題が多いとされている傾斜型コア嵩上げにおいては、継足コア構造が堤体の浸透特性および地震時応答に及ぼす影響を明らかにするとともに、最適なコア構造の設計法を確立することが必要である。ここで、本研究において継足コア構造に着目した理由は、既存コアと継足コアのジョイント構造が、堤体の浸透特性および地震時の挙動に及ぼす影響が大きいと推察されるためである。

上述した背景を踏まえ、本研究では、傾斜型コア

図-1 韓国における有感地震の年間発生回数の推移

嵩上げアースダムにおける継足コア構造が堤体の浸透特性および地震時応答に及ぼす影響を把握することを目的とし、基礎的な検討を実施した。具体的には、既に嵩上げが完了している韓国の貯水池を基本解析モデルとし、継足コアの規模(新旧コアのジョイント部分補強に関わる幅あるいは高さ)を変化させたパラメトリックスタディを動的解析を用いて実施している。

(2) 論文構成

本稿の構成は次の通りである。本章では研究の背景および目的を述べた。2.では、本研究において用いる解析モデルの設定について述べる。3.では、動的解析の実施に必要なパラメータである堤体内の浸潤線を求めるため、事前に非定常浸透流解析を実施している。4.では、設定した解析モデルを用い、正弦波を入力した動的解析を実施している。5.では、4.において得られた知見を踏まえ、解析モデルに対し実際にフィルダムで観測された地震波形を入力し、その結果を考察する。6.では、本研究で得られた知見をまとめる。

2. 解析モデルの設定

(1) 検討対象貯水池

検討対象は、韓国・忠清南道の鶏龍市北西部に位置する鶏龍貯水池とした。鶏龍貯水池の諸元を表-1に示す。ここで、対象貯水池を選定するにあたり考慮すべき点は、基礎的データ入手の容易さと嵩上げ施工が完了していることの2点である。韓国における傾斜型コア接続による嵩上げ事業の大部分は、施行方法と堤体高さが画一的であり²⁾、嵩上げが既に完了しているゾーン型アースダムのうち、鶏龍貯水池は堤体の基礎的データの入手が容易であったため、検討対象として選定した。

なお、鶏龍貯水池では、嵩上げ施工が実施される前の耐震性評価の一環として、円弧すべり解析が既に実施されている。その結果、安全と判断され施工に至っており、本研究ではそれらの結果を踏まえた上で動的解析を実施する。

表-1 鶏龍貯水池の諸元

諸元	嵩上げ前	嵩上げ後
型式	中央コア型アースフィルダム	
堤高	14.30 m	17.10 m
堤頂標高	60.49 m	64.40 m
堤頂長	288 m	300 m
堤頂幅	6.00 m	6.00 m
計画高水位標高	60.95 m	62.00 m
満水位標高	59.43 m	61.00 m
有効貯水量	3,412,410 m ³	4,717,730 m ³

(2) FEMモデル化

堤体のFEMモデル図を図-2に示す。同図は、実際に嵩上げ施工された鶏龍貯水池の堤体をFEMモデル化したものである。なお、新設コアの構造は韓国における嵩上げ施工の設計基準⁶⁾により決定されているが、嵩上げ後の堤高が30m未満の場合、継足コアの幅は1.5m～3.5mと定められており、嵩上げ後の鶏龍貯水池の堤高は表-1に示す通り17.1mであるため、継足コアの幅は2mになっている。

本研究における動的解析(正弦波および地震波入力)では、図-2中に矩形の破線で示した範囲、すなわち嵩上げ堤体のコア境界部を中心とする堤頂付近での地震時応答に着目した。その拡大図を図-3に示す。本研究では、図-3に示すように、浸透流解析および地震応答解析とともに、継足コアの規模を4種類に変化させたパラメトリックスタディを実施する。なお、Case-1のモデルが、従来採用されている画一的なコア構造に相当する。

ここで、既存コアと継足コアの接続方法は、Case-1のモデルを基本ケースとして、既存コアの下流側側面に触れている部分(盛土部分とフィルタ一部分)を下方向へそれぞれ0.7m(Case-2)、1.4m(Case-3)、2.1m(Case-4)の深さまで掘削した後、それぞれ掘削した位置まで継足コアを拡大し、コア境界部分を補強させる構造を模擬した。ここで、継足コア規模に関する各パラメータの定義を図-4に示し、検討ケースごとの規模の詳細を表-2に示す。表-2に示すように、継足コアの断面積はCase-1で11.76 m²、Case-2で13.72 m²、Case-3で17.15 m²、およびCase-4で21.07 m²となる。ここで、堤体FEMモデルのメッシュ形状は、動的解析における誤差を

図-2 堤体のFEMモデル

図-3 各ケースにおける着目部位付近の拡大図

最小化するため、すべて1辺0.7mの格子を基本形状とした。したがって、図-3のように、コアなどはメッシュの寸法・形状に合わせた階段状の形状になっているが、解析の容易さ、現地のコアの施工性を考慮し、その影響は小さいと判断した。

なお、本研究で考える不連続とは、土質およびコア幅の変化に着目しており、構造としては連続しているため、スリップなどの不連続現象を想定していない。

(3) 堤体材料物性値

堤体内の材料の各物性値は、既設部分の物性値と嵩上げ部分の物性値に大別される。ここで、動的解析に際し入力した堤体材料物性値を表-3に示す。

既設部分の粘着力、内部摩擦角、湿潤単位体積重量および飽和単位体積重量については、韓国農漁村公社で実施された鶏龍貯水池の非圧密非排水せん断試験データ⁷⁾を使用した。嵩上げ部分の粘着力、内部摩擦角、湿潤単位体積重量および飽和単位体積重量については、盛土材料およびコア材料は現場で得られたデータを使用しているが、一方で、フィルター材料および捨石材料は、鶏龍貯水池の嵩上げ後の安定性評価についての先行研究⁸⁾からデータを引用している。

なお、上記のように粘着力、内部摩擦角、湿潤単位体積重量および飽和単位体積重量は、嵩上げ部分および既設部分ともに、実際に鶏龍貯水池で得られたデータを用いている。

ポアソン比については、既設部分および嵩上げ部

表-2 各ケースにおけるコア構造の差異

ケース番号	継足コアの規模		
	断面積 A	高さ H	既存コアとの接触長さ a+b
Case-1	11.76 m ²	3.50 m	1.40 m
Case-2	13.72 m ²	4.20 m	2.10 m
Case-3	17.15 m ²	4.90 m	2.80 m
Case-4	21.07 m ²	5.60 m	3.50 m

図-4 コアパラメータの定義

分とともに、上述した鶏龍貯水池に関する先行研究⁸⁾において使用された値を使用した。

各材料のせん断波速度およびせん断弾性係数については、鶏龍貯水池では記録されていないため、ダム規模・形式・堤体の高さが類似した日本のダム実績⁹⁾を参考にして算出した。

堤体における、せん断による復元力特性には修正R-Oモデル¹⁰⁾を用いた。一方で、基礎地盤には弾性モデルを適用している。鶏龍貯水池では、各材料の動的変形特性(G/G_0 , $h \sim \gamma$ 曲線)に関する知見も得られておらず、本研究は基礎的な検討であるため、堤体の全材料(盛土、コア、フィルター、捨石)の動的変形特性について、佐藤ら¹¹⁾により同定された日本

表-3 動的解析における堤体材料物性値

材料	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg.)	湿潤重量 γ_t (kN/m ³)	飽和単位重量 γ_{sat} (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G_0 (kPa)	弾性係数 E (kPa)	構成則
既存盛土	31.00	30	19.70	21.02	0.35	1.06E+05	2.46E+05	修正R-Oモデル
嵩上げ盛土	16.70	24	18.25	19.42	0.35	1.06E+05	2.46E+05	
既存コア	26.00	12	19.28	21.38	0.45	9.00E+04	2.20E+05	
継足コア	34.30	9	17.65	19.57	0.45	9.00E+04	2.20E+05	
既存フィルター	0.00	33	18.63	19.63	0.33	1.06E+05	2.46E+05	
新設フィルター	0.00	33	18.63	19.63	0.33	1.06E+05	2.46E+05	
捨石	0.00	45	22.56	22.56	0.23	7.22E+05	1.61E+06	弾性モデル
基礎地盤	18.19	35	20.62	22.00	0.30	2.61E+06	6.00E+06	

のアースダムにおける地震観測記録に基づく動的変形特性を適用した。

3. 浸透流解析

(1) 概説

本章では、動的解析に先立って非定常浸透流解析を行い、堤体内での浸潤線の変化を評価した。解析コードには、VG Flow 2Dを用いている。

(2) 堤体材料物性値

浸透流解析に用いた鶏龍貯水池の堤体材料物性値を表-4に示す。

基礎地盤は現場でグラウチングなどの処理を行うため、不透水層と仮定した。

嵩上げ部分(コア、盛土およびフィルター)の透水係数は実際に鶏龍貯水池の嵩上げ施工現場で得られたデータを使用している。

一方、既存部分は築堤から50年が経過しており、盛土内の細粒分が水中に流出している等の原因から、盛土材料とコア材料の透水係数の値が上昇していると推測される。そのため、既存盛土材料については、比較的最近建設された韓国の農業用アースダム4箇所における各々の盛土材料の透水係数¹²⁾を平均化した値を使用した。さらに、既存コア材料は、ダムの老朽化試験に関する既往の研究¹³⁾を参考に、韓国の農業用アースダム3箇所(上述した5箇所とは別のアースダム)における透水係数の変化記録に基づき、50年前に記録された鶏龍貯水池におけるコア材料の透水係数と比較して、その透水係数を仮定した。

また、既存フィルター材料は、韓国におけるダムの設計基準¹⁴⁾を参考にして透水係数を仮定した。堤体材料の透水係数に関しては、新設部分は実測値を用い、既設部分は実測値が無い場合、他のアースダムにおける物性値を引用している。そのため、盛土とコアの透水係数は既存よりも新設の方が小さく、フィルターのそれは既存よりも新設の方が大きい、それぞれ遮水性および排水性の機能としては工学的に合理性がある。

また、各材料の水分特性曲線には、それぞれ代表的な水分特性曲線¹⁵⁾を準用している。具体的には、既存コア、継足コアおよび基礎地盤には粘土の代表的な水分特性曲線を、既存盛土と嵩上げ盛土には砂質土の代表的な水分特性曲線を、そして既存フィル

ターと新設フィルターには砂の代表的な水分特性曲線を準用した。

(3) 解析条件

上流側での水位変化は、堤体における浸潤線・飽和度・間隙水圧・漏水量等に関係し、堤体の安定性に影響を及ぼす。本検討における浸透流解析では、上流側の水位変動における不飽和堤体の挙動を分析するために、非定常解析を採用した。

堤体は不飽和状態であると仮定し、上流側の水位を低水位(6.8m)から計画高水位(14.7m)まで10日間で上昇させ、堤体内の浸潤線の位置が安定するまで計画高水位の状態を維持した。

(4) 解析結果

図-5に解析結果によるケース別の浸潤線を示す。また、既存コアの下流側側面に位置する垂直フィルターを越えた直後の浸潤線の高さを表-5に示す。解析の結果、浸潤線はCase-1で最も高くなり、Case-4で最も低くなった。その差は、浸潤線が垂直フィルターを越えた直後の位置で約1mとなっている。すなわち、継足コアの規模増加に伴い、堤体の遮水性が向上し、コアの下流側での浸潤線が全体的に低下することが確認された。

ここで、図-5に示すように、いずれのケースにおいても浸潤線が継足コア内部で下流側に突出するような形状となっていることが確認できるが、このような浸潤線の分布形状は、継足コアの傾斜構造に起因している。

なお、いずれのケースにおいても、上流側水位が計画高水位に達してから約950日後に堤体内の浸潤線の位置が安定することが確認された。

4. 正弦波による動的解析

(1) 概説

本研究における動的解析では、嵩上げされた傾斜型コア構造がそれ自身および堤体の地震時応答に及ぼす影響を評価するため、まず、正弦波の入力により、基本的な応答特性を把握した。本研究では、堤体の地震時応答として、継足コアの影響が直接的に評価できるせん断応力分布に着目している。3.の浸透流解析の結果を踏まえ、各ケースで得られた浸潤線(図-5参照)をインターフェイスとして、既存コア

表-4 浸透流解析における地盤パラメータ

材料	透水係数 k (m/s)	不飽和状態での土壌水分特性			
		残留体積含水率 θ_r	飽和体積含水率 θ_s	α (1/m)	n
既存盛土	1.57E-06	0.221	0.565	1.470	6.656
嵩上げ盛土	5.75E-07 *	0.221	0.565	1.470	6.656
既存コア	1.14E-07	0.078	0.535	4.760	1.248
継足コア	3.11E-08 *	0.078	0.535	4.760	1.248
既存フィルター	1.00E-05	0.000	0.365	5.478	1.629
新設フィルター	5.45E-05 *	0.000	0.365	5.748	1.629
基礎地盤	5.00E-11	0.078	0.535	4.760	1.248

*実測値

図-5 各ケースにおける堤体内の浸潤線

と継足コアの境界部に着目し、その部位における正弦波入力時のせん断応力分布を動的FEM解析を用いて算出した。解析コードにはUWLCを用いている。

(2) 解析条件

境界条件は、初期応力解析においては底面を固定支点、側面を鉛直ローラー支点とし、動的解析においては底面および側面ともに粘性境界とした。また、地震動が堤体に作用した時の貯水による動水圧については、Westergaardの付加質量法¹⁶⁾を採用した。地震動作用時の付加質量 m_w は上流側法面の各節点に作用する。

(3) 入力地震動

韓国における耐震設計の基準¹⁴⁾によれば、鶏龍貯水池の設計水平震度は0.1584である。ここで、設計水平震度と最大加速度の関係はダム堤体の動的特性や入力地震動の周波数特性に応じて変化するとされており、その換算手法は野田式¹⁷⁾を代表に多々提案されている。しかしながら、一般に最大加速度振幅は200Gal以下の場合、設計震度と重力加速度の積で表現してもよいとされている¹⁷⁾。さらに、鶏龍貯水池における設計水平震度 $k_H=0.1584$ を1/3乗則(野田式)を用いて換算した場合、単純に重力加速度を乗じた値よりも最大加速度が過小評価されることが確認できる。そのため、本研究における入力波形の最大加速度はすべて150Galとした。

また、入力する正弦波の周期については、地震時応答が顕著に把握できる堤体の固有周期付近とするため、4ケースの解析モデルについて堤体の固有周

期を評価した。具体的には、ホワイトノイズ波(図-6)による水平方向の微小振幅加振(Peak=15Gal)を行い、ダム底部に対するダム天端の伝達関数を算定し、そのピーク周波数に基いて固有周波数とした。ここで、加速度応答を評価したダム底部および天端の位置を図-7に示す。また、図-8に伝達関数の算定結果を示す。図-8に示すように、4ケースの異なる継足コア構造を持つアースダムではあるが、その固有周波数はいずれも約6.2Hzとなった。すなわち固有周期は全ケースで約0.16秒となり、継足コア規模が堤体の固有周期に及ぼす影響はほとんど無いことが確認された。

ここで、アースダムにおける堤高と固有周期を関係づけた経験式である岡本の式¹⁸⁾によれば、鶏龍貯水池の堤体(高さ17.1m)は、固有周期が下限で0.024秒、上限で0.28秒と推定される。推定固有周期の範囲が広がっているが、これは鶏龍貯水池の堤高が比較的低いことに起因し、妥当な範囲であるといえる。したがって、本検討により算出された固有周期約0.16秒はこの範囲に収まるため、岡本の経験式と調和的であることが確認された。

以上より、入力する正弦波の最大加速度振幅は150Gal、周期は0.16秒とし、正弦波の入力時間は41秒(≒40.96秒)とした。

(4) 解析結果

傾斜型の非対称な継足コア構造では、地震動の入力方向により堤体の挙動が異なる可能性があるため、加速度振幅が同じ正弦波入力での動的解析では、入力方向の差異に着目した。具体的には、堤体が下流側

図-6 ホワイトノイズ波形

図-7 伝達関数を求める際の応答加速度算定位置

図-8 伝達関数 (天端/底部)

に応答する際と上流側に応答する際の動的応答の差異に着目した。

動的解析の結果を図-9、図-10および図-11に示す。ここで、堤体の動的応答の評価のための時間断面の設定は、正弦波入力と同様な新旧コアの境界の着目部位(図-10参照)においてせん断応力が最大となる時点とした。図-9は、Case-1において、上段から、入力加速度、応答加速度およびせん断応力の入力開始から2秒間の時刻歴である。

さらに、図-9に示すように、応答加速度の6つ目の波群について1周期(0.16秒)の間での着目部位におけるせん断応力の最大応答値を検討した。具体的には、正弦波入力開始の0.88秒後から1.04秒後までの0.16秒間に発生するせん断応力を0.01秒ごとに追跡し、堤体が下流側方向に応答する時間断面(加速度応答値が正)と上流側方向に応答する時間断面(加速度応答値が負)の2パターンに分類して、それぞれの時間断面での着目部位におけるせん断応力の最大応答値とその時間断面を評価した。その結果、図-9に示すように、着目部位におけるせん断応力の応答の最大値について、下流側方向の加速度入力に対しては入力開始0.96秒後であり、上流側方向の加速度入力に対しては同0.88秒後であることがわかる。

同様の検討をCase-2、Case-3、およびCase-4においても実施したが、図-10および図-11は、堤体がそれぞれ下流側方向および上流側方向の加速度入力時において着目部位で最大せん断応力が発生した時間断面(図-10：0.96秒後、図-11：0.88秒後、以下、それぞれ下流側応答時および上流側応答時と呼ぶ)における継足コア付近のせん断応力分布であり、4ケースの比較である。

ここで、図-10は正のせん断応力(赤色系)、図-11

は負のせん断応力(青色系)の分布であるが、いずれも最大値(絶対値)はほぼ等しいことに注意が必要である。

また、本来ならばある時間断面におけるせん断応力分布のみならず、全時刻を通じての最大せん断応力分布等も考慮すべきであるが、本研究は嵩上げアースダムのコア境界部分に着目した基礎的検討であるため、コア境界部分での最大せん断応力に焦点を合わせた評価を実施している。

(5) せん断応力分布の傾向

下流側の応答時(図-10)と上流側の応答時(図-11)の比較によれば、継足コア内部、旧コア内部、上流側堤体(旧コアの上流側に位置する盛土部分)、および下流側堤体(継足コアの下部に位置する盛土部分)において生じるせん断応力についてそれぞれ以下の考察ができる。

a) 継足コア内部

継足コア内部におけるせん断応力の分布について、下流側応答時では、コア上部でのせん断応力は小さいのに対し、コア下部の下流側ではせん断応力が集中するように大きい。また、継足コアの規模拡大に伴い、コアの上流側でせん断応力が小さい領域も拡大する効果が見られる。他方、上流側応答時では、コア下部近傍でのせん断応力が小さいのに対し、コアの中間から上部にかけてせん断応力の大きい領域が見られる。さらに、継足コアの規模拡大に伴い、コア下部近傍のせん断応力が小さい領域も拡大する傾向にある。以上より、継足コア内部では、継足コア規模の拡大により、せん断応力の低減効果が確認できる。

b) 旧コア内部

旧コア内部でのせん断応力分布について、下流側

図-9 Case-1における着目部位(コア境界部)の応答時刻歴

図-10 下流側応答時の継足コア付近のせん断応力分布：0.96秒後

図-11 上流側応答時の継足コア付近のせん断応力分布：0.88秒後

応答時では、コアの下流側におけるせん断応力が大きいのに対し、上流側は比較的小さくなる。他方、上流側応答時では、コア全体のせん断応力が大きく、分布傾向が下流側応答時と異なる。しかしながら、いずれの応答時も継足コア構造の規模拡大によるせん断応力の変化は見られない。

c) 上流側堤体

上流側堤体におけるせん断応力の分布について、下流側応答時では、せん断応力は小さく、継足コアの規模拡大によるせん断応力の変化も見られない。他方、上流側応答時では、継足コア付近でのせん断応力は小さいものの、旧コア付近では比較的大きくなっている。こちらも、継足コア構造の規模によるせん断応力の差異は見られない。

d) 下流側堤体

下流側堤体におけるせん断応力の分布について、下流側応答時では、大きなせん断応力が発生しているが、継足コアの規模拡大による変化は見られない。他方、上流側応答時では、新旧コアに沿った直近においてせん断応力が小さい領域があるが、継足コア構造の規模による差は見られない。

図-10に示すように、コア境界付近における、下流側応答時のせん断応力分布では、下流側堤体でのせん断応力が最も顕著に大きくなる(同図中の赤い範囲)。これは、継足コアの傾斜構造に起因すると考えられる。具体的には、継足コアは下流側に向かい傾いているため、堤体下流側に応答する際に、継足コアがその下部に位置する盛土部分(下流側堤体)を圧縮する形となり、その結果として下流側堤体のせん断応力が上昇すると推察される。

(6) コア境界におけるせん断応力の変化

図-12に、着目部位であるコア境界部分において生じるせん断応力絶対値の変化を示す。図-12に示すように、下流側応答時および上流側応答時ともに、継足コアの規模拡大に伴ってコア境界部分でのせん断応力は減少していることが確認できる。さらに、せん断応力絶対値は、すべてのケースにおいて下流側応答時に、より大きくなっている。すなわち、本研究で扱う解析モデルにおいては、下流側応答時に注意が必要である。

(7) 上下流方向による差異

以上のように、正負同じ振幅である正弦波の入力に対して、下流側の応答時と上流側の応答時で堤体あるいはコアのせん断応力に差異があるのは、非対称な継足コアの構造に起因しているためと推察される。つまり、継足コアは下流側に伸びているため、下流側応答時は継足コアが下流側に変形しやすいことから、コア下流側部に大きなせん断力が発生し、他方、上流側応答時は継足コアが上流側に変形し難いことから、コア下流側部にはせん断力が発生し難いと考えられる。

図-12 継足コア規模の増加に伴うせん断応力の変化

5. 地震波入力による動的解析

(1) 概説

4.における正弦波を入力した動的解析の結果を踏まえ、本章では、実際にフィルダムで観測された地震波形(振幅調整波)を堤体に入力し、その際の堤体内部に生じるせん断応力を比較検討した。なお、各ケースにおける解析条件は、4.における正弦波入力時とすべて同じとした。

(2) 韓国における地震の傾向

韓国において、地震波形の計器観測が実施され始めたのは1978年であり、震源深さについては1995年以降の記録しか現在公開されていない。1978年から2013年までの35年間に朝鮮半島で記録された地震について、マグニチュード4以上の地震が発生した箇所を図-13に示す。図-13に示すように、鶏龍貯水池付近における大規模地震の発生は比較的少ない。さらに、鶏龍貯水池付近において記録されたマグニチュード3以上の地震について、発生箇所、規模および震源深さ(1995年以降のみ)を図-14に示す。図-14に示すように、鶏龍貯水池付近において発生した地震のほとんどは規模が小さく、かつ震源が浅い。

朝鮮半島はユーラシアプレートの南東部に位置し、プレート境界から数百km離れた、プレート内部の地域に該当する¹⁹⁾。このようなプレート内部で断層のずれにより発生する地震は、内陸地殻内地震と呼ばれるが、鶏龍貯水池付近では内陸地殻内地震を検討対象とすればよいと考えられる。

(3) 入力地震動

5.(2)での地震環境を考慮して、鶏龍貯水池の嵩上げ堤体に入力する地震動波形は、内陸地殻内地震によりフィルダムで観測された地震波形を用いるこ

ととした。しかしながら、上述の通り韓国において地震波形が観測され始めたのは最近であり、フィルダムにおける観測波についても十分な記録が得られていない。そのため本研究では、日本における内陸地殻内地震発生時の、フィルダムでの観測波形を活用した。具体的には、権現ダム波(1995年兵庫県南部地震)²⁰⁾、箕面川ダム波(1995年兵庫県南部地震)²⁰⁾、荒砥沢ダム波(2008年岩手・宮城内陸地震)²¹⁾、石淵ダム波(2008年岩手・宮城内陸地震)²¹⁾の4波形を採用している。表-6に、各ダム波形の諸元を示す。表-6に示すように、これらの4波形はすべてダム基礎で観測された波形であり、本研究において動的解析を実施する際にもすべてモデルの基礎地盤の下面から入力している。

図-13 朝鮮半島における地震の記録

ここで、前述のように、基礎地盤のせん断波速度およびせん断弾性係数は、日本のダム実績を参考にして設定しており、ダム形式は異なるが、入力地震動が観測された4ダムの基礎地盤と類似であると考えることができる。

なお、本研究では、上述の4波形について、それぞれ正転波(採用したオリジナル波形)と反転波(採用波の正負を逆にした波形)を入力している。したがって、入力波形は全8種となる。ここで、正転波と反転波を入力した理由は、本研究における解析モデルが断面の非対称な傾斜型コア嵩上げアースダムであることから、波形入力方向の差異による堤体の応答の変化を比較検討するためである。実際に、国土技術政策総合研究所が実施した大規模地震時におけるダムの性能照査²⁰⁾においても、地震波形は正転波と反転波の両者が採用されている。

入力した8つの地震動波形の振幅調整波を図-15に示す。さらに、入力した4種類の地震動波形のフーリエ振幅スペクトルの比較を図-16に示すが、各地震動波形の特徴は以下の通りである。

権現ダム波は、図-15によれば最大加速度に近い振幅の波が約10秒間と比較的長く続く波形である。また、図-16(a)によれば、1.5Hz付近にピーク周波数を有する地震動である。箕面川ダム波は、図-15によれば、最大加速度相当の波が短時間で集中的に作用する衝撃的な波形であり、図-16(b)に示すように、0.8~1.8Hz付近で卓越した周波数を持つ地震動である。荒砥沢ダム波は、図-15によれば、16秒付近において振幅が大きくなるが、図-16(c)に示すように、顕著に卓越した周波数は見られず、0.4Hz以上の周波数帯域で幅広い周波数成分を含んだ地震動である。石淵ダム波は、図-15によれば、波形形状が権現ダム波と比較的類似しており、12~20秒の間で主要動が確認できる。しかし、図-16(d)に示すように、2~3Hz付近において卓越する比較的高周波の地震動である。

なお、堤体の動的応答評価のための時間断面の設定は、正弦波入力と同様に、新旧コアの境界の着目部位(図-10参照)においてせん断応力が最大となる時間とした。ただし、正弦波入力とは異なり、同

図-14 鷄龍貯水池付近の地震における地震の記録

表-6 観測ダム of 諸元

諸元	権現ダム	箕面川ダム	荒砥沢ダム	石淵ダム
型式	ロックフィルダム	ロックフィルダム	ロックフィルダム	コンクリート フェイシングフィルダム
堤高 (m)	32	47	74	53
PGA (Gal)	103	134	1023	1382
観測位置	ダム底部	ダム底部	ダム底部	ダム底部

図-15 入力地震波形 (振幅調整波): それぞれ上段が正転波, 下段が反転波

図-16 入力地震動波形のフーリエ振幅スペクトル

一方向(下流側応答時)における地震動の差異を把握するため, 正転波および反転波のいずれの場合も下流側応答時のせん断応力の分布に着目した。

(4) 解析結果

検討した全32ケースについて, 下流側応答時, コア境界部分のせん断応力が最大となる時間断面における継足コア周辺のせん断応力分布を図-17(権現ダム波), 図-18(箕面川ダム波), 図-19(荒砥沢ダム波), および図-20(石淵ダム波)に示す。

なお, 本研究はコア構造の拡大に伴うせん断応力の変化についての研究であるが, 変位応答も検討し

図-17 権現ダム波入力時のせん断応力(上; 正転波, 下; 反転波)

図-18 箕面川ダム波入力時のせん断応力(上; 正転波, 下; 反転波)

図-19 荒砥沢ダム波入力時のせん断応力(上; 正転波, 下; 反転波)

図-20 石淵ダム波入力時のせん断応力(上; 正転波, 下; 反転波)

表-6 コア境界部分におけるせん断応力の最大応答値とその時間断面

ケース番号	コア境界部におけるせん断応力の最大応答値 (kPa) 【時間断面 (s)】							
	権現ダム波		箕面川ダム波		荒砥沢ダム波		石淵ダム波	
	正転波	反転波	正転波	反転波	正転波	反転波	正転波	反転波
Case-1	14.48 【9.23】	13.39 【8.76】	13.17 【5.79】	16.73 【5.41】	14.04 【15.29】	13.39 【14.63】	12.76 【13.35】	11.81 【13.48】
Case-2	12.89 【9.23】	11.78 【8.76】	12.46 【5.79】	14.51 【5.41】	14.03 【15.29】	11.57 【14.63】	11.74 【13.35】	10.83 【13.48】
Case-3	12.84 【9.23】	11.48 【8.76】	11.83 【5.79】	13.80 【5.41】	13.58 【15.29】	10.71 【14.63】	10.98 【13.35】	10.06 【13.48】
Case-4	11.82 【9.23】	10.16 【8.76】	11.20 【5.79】	13.59 【5.41】	9.08 【15.29】	10.48 【14.63】	10.50 【13.35】	9.90 【13.48】

図-21 継足コア規模の増加に伴うせん断応力の変化

ている。しかしながら、本研究において採用した波形を入力した際には、その値は小さく、堤体の沈下、堤体天端での亀裂の発生などはないと考えられる。

これらの結果から、継足コア内部、旧コア内部、上流側堤体および下流側堤体におけるせん断応力分布について、以下のことがわかる。

a) 継足コア内部

継足コア内部において生じるせん断応力は、いずれの波形を入力した際もその分布に大きな偏りが見られた。具体的には、継足コア上部におけるせん断応力と比較して、下部に生じるせん断応力は非常に大きな値となっている。

さらに、いずれの波形入力時でも、継足コアの規模拡大に伴い、継足コア自身の上流側におけるせん断応力の小さな領域が拡大する傾向が見られた。

b) 旧コア内部

旧コア内部において生じるせん断応力は、継足コア同様その大きさに偏りが見られ、分布が一樣ではないことが確認できる。具体的には、いずれの波形を入力した際も、旧コア内部における上流側部分で発生するせん断応力と比べ、下流側部分におけるせん断応力はより大きな値となる傾向が見られた。しかしながら、継足コア規模の拡大に伴うせん断応力の減少および分布変化は、いずれの波形においても見られなかった。

c) 上流側堤体および下流側堤体

上流側堤体におけるせん断応力については、いずれの波形を入力した際もその値が小さく、分布傾向に差異は無いことが確認された。さらに、継足コア規模の拡大に伴うせん断応力減少等も見られなかつ

た。

一方、下流側堤体において発生するせん断応力は非常に大きく、本研究で着目しているコア境界部分周辺においては、他の部分と比較して、よりせん断応力が大きな値となっていることがわかる。これは、継足コアの傾斜型構造に起因すると考えられる。すなわち、継足コアは下流側方向に傾いた構造であるため、堤体が下流側に応答する際に継足コアがその下部に位置する下流側堤体を圧縮する形になり、その結果として下流側堤体におけるせん断応力が継足コア内部よりも大きくなったと推察される。また、下流側堤体においては、いずれの波形を入力した際も、継足コア規模の拡大に伴ってせん断応力が減少する傾向が確認された。

(5) 継足コアの規模拡大とその効果

本研究において着目している新旧コアの境界部分に生じるせん断応力は、いずれの波形を入力した際も正弦波入力時と同様、継足コアの規模拡大に伴い減少する傾向が確認された。ここで、各ケースにおけるコア境界部分でのせん断応力の最大応答値およびその時間断面を表-7に示す。さらに、各地震波形を入力した際の、継足コア構造の規模とコア境界部分におけるせん断応力の関係を図-21に示す。図-21に示すとおり、上述したいずれの波形を入力した際も、継足コア構造の規模拡大に伴って、コア境界のせん断応力は減少する傾向にあることが確認できる。ここで、その減少度合いを見ると、箕面川ダム波および石淵ダム波入力時には、コア規模の拡大に比例してせん断応力も単調な減少傾向が確認できる。しかしながら、権現ダム波ではCase-2で低減し、Case-3ではほとんど変化を見せず、Case-4で再び大きく減少する。同様に、荒砥沢ダム波入力時も、Case-3まではほとんど減少せず、Case-4で大きく減少する。これらの結果より、継足コアに関しては単に規模を拡大すればよいのではなく、施工性および施工費も考慮した最適な構造および規模が存在する可能性が示唆される。

6. まとめ

本研究では、アースダムの嵩上げに伴う傾斜型継足コア構造の浸透特性および動的特性の影響に關す

る基礎的研究として、韓国の鶏龍貯水池を基本モデルとし、継足コア構造(4種類)に対する浸透流解析および正弦波・地震動(4種類)による動的解析を行った。得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 継足コア構造の規模が浸透特性に及ぼす影響に関して、上流側水位が計画高水位に達した時点の浸潤線は、継足コアの規模拡大に伴い低下する。
- (2) 継足コア構造の規模の増加に伴う堤体の固有周期の変化はごく僅かであり、継足コア構造の影響は見られない。
- (3) 正弦波入力による新旧コア境界部および周囲の堤体におけるせん断応力は、上流側の応答時に比べ下流側応答時により大きくなる。これは、非対称な傾斜型コア構造の挙動に起因しており、その影響はコア周辺の堤体および旧コアに対しては小さいが、継足コア構造自体には大きく、継足コア構造の規模が大きくなるほど、コア全体としてのせん断応力が低減する。
- (4) 異なる周期特性の地震動入力による新旧コア境界部および周囲の堤体における動的特性(せん断応力)は、いずれも地震動(正転波および反転波)においても、新旧コアの下流側の堤体、上流側の堤体、旧コアおよび継足コアにおけるせん断応力の分布はほぼ類似であり、継足コア構造の規模が大きくなると、継足コアにおけるせん断応力が低減する。これは、正弦波入力と同じ傾向である。
- (5) 継足コア構造の規模の増加に伴って、コア境界の着目部位のせん断応力が減少するが、その減少の度合いは一定ではないため、最適な継足コア構造の規模が存在する可能性が示唆されている。

以上から、嵩上げ時の継足コア構造の規模の増加に伴って、漏水等の浸透性が改善されるとともに、地震時の動的応答(せん断応力)が抑制される可能性が得られたが、他方、継足コアの体積の増加は、施工性あるいは工事費に関わるため、設計・実務のための継足コア構造の最適化法について、今後、更なる検討が必要である。

謝辞：(公社)韓国農漁村公社から、本研究で解析に用いた現場調査データ及び基礎資料等貴重なデータを提供して頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM): Water Vision2006~2020 Report, pp.8-11, 2006 [in Korean].
- 2) The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM): Master Plan for the Four Major Rivers, pp.159-162, 2009 [in Korean]
- 3) Korea Rural Community Corporation (KRC) : Korea Public Information Disclosure System, (https://www.open.go.kr/pa/html/eng_main.htm), 2013 [in Korean], 最終閲覧日：2014年2月20日。
- 4) Karbor-e-shyadeh, A. H. and Soroush, A.: A comparison

- between seismic behaviors of earth dams with inclined and vertical clay cores- a numerical analysis approach, *Proc. of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.457, Beijing, China, 2008.
- 5) Korea Meteorological Administration (KMA): Earth-quakes Trends of Korea, (<http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/domestictrend.jsp>), 最終閲覧日：2014年2月20日。
- 6) Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA): Design of the Agricultural Production Infra Improvement Project plan, pp.265-267, 2002 [in Korean].
- 7) Korea Rural Community Corporation (KRC): Report of Pr edisaster Effect Examination System, 2009 [in Korean].
- 8) Lee, D. W., Lee, K. S. and Lee, Y. H.: Seepage Analysis of Agricultural Reservoir due to Raising Embankment, *CNU Journal of Agricultural Science*, Vol.38, No.3, pp.493-504, 2011 [in Korean with English abstract].
- 9) 岡本大樹, 吉久寧: 長期間安定経過しているアースフィルダムの耐震性の検討, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.636-637, 2008.
- 10) Jennings, P. C. : Periodic response of general yeilding structure, *J.Eng. Mech. Div.*, ASCE, EM2, pp.49-59, 1995.
- 11) 佐藤信光, 曾田英揮, 太田垣 晃一郎: 実測地震記録による既設ダム堤体の動的特性および物性値の推定と適用, *ダム技術*, No.321, pp.40-47, 2013.
- 12) Kim, M. H. and Lee, D. W.: Safety evaluations of reservoir embankment by instrument system, *Jour. of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.50, No.2, pp.37-44, 2009 [in Korean with English abstract].
- 13) Kim, S. H.: Research on the characteristics of aging effect in dam core material and hydraulic fracturing in homogenous dams by dismantling and investigating a real dam, *Korea Advanced Institute of Science and Technology (Master's Thesis)*, 112p., 2011 [in Korean with English abstract].
- 14) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM): Guidelines for Dam Design 2011, Korea Water Resource Association, 2011 [in Korean].
- 15) 西垣誠, 竹下祐二: 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学工学部土木工学科, 1993.
- 16) Westergaard, H. M.: Water pressure on dams during earthquake, *American society of civil engineers transactions*, No.1835, pp.418-433, 1931.
- 17) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.4, pp.67-111, 1975.
- 18) S. Okamoto.: Introduction to Earthquake Engineering. *University of Tokyo Press*, 1973.
- 19) Jun, M. S. and Jeon, J. S.: Focal Mechanism in and around the Korean Peninsula, *Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists*, Vol.13, No.3, pp. 198-202, 2010 [in Korean with English abstract].
- 20) 猪股純, 安田成夫, 金銅将史, 佐野貴之, 吉岡英貴, 川崎秀明, 平山大輔, 稲垣謙司, 永山功, 山口嘉一, 佐々木隆, 富田尚樹, 佐藤弘行, 金縄健一: 大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料, 国土交通省国土技術政策総合研究所資料, No.244, 192p., 2005.
- 21) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.

(2013.11.14.受付, 2014.2.20.修正, 2014.2.22.受理)

**BASIC STUDY ON EFFECTS OF INCLINED CORE STRUCTURE
ON SEEPAGE AND DYNAMIC PERFORMANCE
OF HEIGHTENED EARTH DAM**

**Younghak LEE, Ken-ichi TOKIDA, Yoshiya HATA,
Jun KAWAGUCHI and Masaki UOTANI**

In Korea, the heightening the earth dams have been performed for securing the water resource and preventing the disasters such as flood and drought. In addition, the consideration on the safety of heightened earth dam is required as the frequency of earthquake increases in recent years. Therefore, this study was carried out on analyses on the seepage flow and the dynamic response induced by both the sinusoidal wave and earthquake motions as for the 4 kinds of changing the volume of the added core, and the influence on the seepage flow and the dynamic shear stress was discussed. As the results, the seepage line becomes lower and the shear stress, especially in the added core can be reduced, and it can be indicate that the seismic performance of heightened earth dam can be improved.