

بسم الله الرحمن الرحيم

اصول طراحی پی در سد سازی

تألیف

دکتر احمد فهیمی فر

دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندس حامد سروش

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سال ۱۳۸۴

فهیمی فر، احمد، ۱۳۳۱ -

اصول طراحی پی در سدسازی / تألیف احمد فهیمی فر، حامد سروش. -
تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۴.
۴۶۷ ص.: مصور، جدول، نمودار.

ISBN: 964-463-270-2

A. Fahimifar. H. Soroush. Principles of Foundation Desing in Dam Construction.

فهرستتویسی بر اساس اطلاعات فیپا.

واژه‌نامه.

کتابنامه: ص. [۳۸۳] - ۴۰۴.

نمایه.

۱. سدسازی - پی‌سازی. الف. سروش، حامد، ۱۳۵۱ - . ب. دانشگاه
صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران). ج. عنوان.

۶۲۷/۸۱

الف ۸۷ ف / ۴۰ / TC۵۴۰

۱۵۶۱۲ - ۸۴ م

کتابخانه ملی ایران

این کتاب در جلسه مورخ ۸۳/۱۱/۲۷ شورای چاپ و
نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسید.



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب : اصول طراحی پی در سدسازی
تألیف : دکتر احمد فهیمی فر - مهندس حامد سروش
ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ اول : سال ۱۳۸۴
تیراژ : ۱۰۰۰ نسخه
قیمت : ۳۸۰۰ تومان
شابک : ۹۶۴-۴۶۳-۲۷۰-۲
تلفن مرکز پخش: ۶۲۹۸۸۶۸
ISBN: 964-463-270-2

آدرس: خیابان ولی عصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
حق چاپ برای ناشر محفوظ است

پیشگفتار

مطالعات و بررسی‌های انجام شده طی چند دهه اخیر در مورد علل خرابی سدهای بزرگ نشان می‌دهد که دلیل اصلی اکثر این خرابی‌ها، نامناسب بودن شرایط پی و نارسایی‌های سنگ بستری است که سد روی آن قرار گرفته است. در مقایسه با خاک، اکثر سنگ‌ها مقاوم بوده و در مقابل بارهای وارده، از ظرفیت باربری اطمینان بخشی برخوردار هستند؛ اما تفاوت اساسی و عمیقی بین واحدهای سنگی بکر و توده‌های سنگی وجود دارد که رفتار این دو را کاملاً از یکدیگر متمایز می‌سازد. این تفاوت‌ها باعث می‌شوند که توده‌های سنگی برخلاف سنگ‌های بکر حتی تحت بارهای کوچک نیز تغییر شکل‌ها و نشست‌های بزرگی را متحمل شوند.

سدها سازه‌های ژئوتکنیکی عظیم و پیچیده‌ای هستند که بارهای بزرگ و متنوعی را بر بستر سنگی خود وارد می‌کنند. پیچیدگی طراحی این سازه‌ها در مقایسه با سایر سازه‌های سنگین که روی پی‌های سنگی قرار می‌گیرند خیلی بیشتر است. این پیچیدگی از آنجا نشأت می‌گیرد که محیط اطراف یک سد را آب فرا گرفته و پی آن در تماس مستقیم با آب قرار دارد. اساساً وجود آب در محیط‌های سنگی عاملی منفی و مزاحم است و باعث تضعیف ویژگی‌های مقاومتی سنگ می‌شود. در چنین شرایطی، طراحی سازه شکلی بحرانی‌تر به خود گرفته و مستلزم دقت و توجه بیشتری است. این شرایط به خصوص در مورد سدها با اضافه شدن حجم زیادی از بارهای استاتیکی و دینامیکی مختلف بسیار پیچیده‌تر می‌گردد. اصولاً سنگ‌های نسبتاً یک دست و سالم نیز وقتی تحت تأثیر تنش ناشی از سازه‌های بزرگی مثل آسمان خراش‌ها، پایه پل‌ها و سدها قرار می‌گیرند، ممکن است به ظرفیت باربری نهایی خود خود نزدیک شوند. چنان‌چه این گونه سنگ‌ها به دلیل حاوی نقاط ضعف دیگری باشند، تحت اثر بار ناشی از چنین سازه‌هایی دچار مشکل خواهند شد. سنگ‌هایی مانند گل سفید، شیل، ماسه سنگ‌های شکننده، توف و سنگ‌های آهکی با تخلخل بالا از این مقوله هستند.

کمتر توده سنگی را می‌توان یافت که بخش‌هایی از آن هوازده نبوده و یا حاوی رگه‌ها و میان لایه‌هایی از سنگ‌هایی با خواص متفاوت نباشد. وجود درزها، شکاف‌ها، گسل‌ها و سطوح لایه‌بندی در توده‌های سنگی و همچنین وجود لایه‌هایی از جنس سنگ‌های انحلال‌پذیر موجب پیچیدگی زیادی در رفتار توده سنگ شده و پیش‌بینی رفتار آن را بسیار مشکل می‌سازد. بنابراین مقایسه غیراصولی خاک و سنگ مقایسه‌ای صحیح نیست و صرفاً مقاوم‌تر بودن سنگ نمی‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی باشد. بدیهی است سازه‌ای که با این دیدگاه روی بستر سنگی بنا می‌شود از سطح ایمنی کافی برخوردار نبوده و دچار مشکل خواهد شد. از این رو است که طراحی پی و درک صحیح و جامع از شرایط توده سنگی که بستر سد را تشکیل می‌دهد از پر اهمیت‌ترین موضوعات مرتبط با صنعت سدسازی است.

کتاب «اصول طراحی پی در سدسازی» با این هدف تألیف و تدوین گردیده است که ابعاد مختلف طراحی پی را در ارتباط با احداث سدهای خاکی و بتنی تبیین نماید. در این کتاب سعی شده است عوامل مهم و تأثیرگذار در طراحی و اجرای پی سنگ سدها به طور مشروح مورد بررسی قرار گرفته و با آرایه مثال‌های کاربردی از مسائل اجرایی، روش‌های ارزیابی آنها گوشزد گردیده و راه حل عملی آرایه شود.

علی‌رغم تلاش فراوان برای آرایه بدون نقص این اثر، بی تردید کتاب حاضر خالی از ضعف و خطا نبوده و انتظار می‌رود صاحب‌نظران، اساتید، کارشناسان و دانشجویان گرامی، خطاهای احتمالی را به مؤلفین منعکس نموده و با آرایه پیشنهادات اصلاحی خود مؤلفین را در بهبود اثر یاری نمایند.

در خاتمه صمیمانه از همکاری کلیه عزیزانی که بهر نحو مؤلفین را در تدوین، تصحیح، تکمیل و نهایتاً حروفچینی و چاپ کتاب یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌نماییم و امیدواریم این کتاب گامی مؤثر در پیشبرد علم و فناوری در جامعه فکری، علمی و مهندسی کشور بوده و در جهت دانایی محور شدن جامعه کارساز باشد.

احمد فهیمی‌فر

حامد سروش

تابستان ۸۴

فهرست

۱	مقدمه‌ای بر سد سازی و ملاحظات پی
۱-۱-۱	تاریخچه و کلیات
۱	مقدمه
۲-۱-۱	تاریخچه
۳-۱-۱	عمر مفید سدها
۴-۱-۱	خطرات زیست محیطی
۵-۱-۱	کاربری مخازن
۶-۱-۱	ایمنی سد
۷-۱-۱	سازه‌های جانبی سد
۲-۱	سدهای خاکی
۱-۲-۱	مقدمه
۲-۲-۱	پایداری خاکریز
۳-۲-۱	تراوش در سدهای خاکی
۴-۲-۱	هسته سد خاکی
۵-۲-۱	سدهای خاکریزی
۶-۲-۱	سدهای سنگریزه‌ای
۳-۱	سدهای بتنی وزنی
۱-۳-۱	مقدمه
۲-۳-۱	طراحی
۳-۳-۱	فشار بالابر
۴-۳-۱	تنش‌ها
۵-۳-۱	گالرن‌ها
۶-۳-۱	درزهای انقباض
۷-۳-۱	سدهای وزنی بیش تنیده
۴-۱	سدهای بتنی قوسی

۶۳	۱-۴-۱- مقدمه
۶۴	۱-۴-۲- طراحی
۶۶	۱-۴-۳- پایداری کرانه‌پایه‌ها
۶۷	۱-۴-۴- شکل هندسی سدهای قوسی
۶۹	۱-۴-۵- درزهای انقباض
۷۰	۱-۴-۶- پیش‌تنیدگی
۷۲	۱-۵-۵- سدهای بتنی پشت‌بنددار
۷۲	۱-۵-۱- مقدمه
۷۳	۱-۵-۲- عرشه‌های لوجی بتنی
۷۳	۱-۵-۳- پشت‌بندها (یا پایه‌ها)
۷۴	۱-۵-۴- فشار بالابر و لغزش
۷۵	۱-۵-۵- سدهای پشت‌بنددار سرریزی
۷۶	۱-۵-۶- پیش‌تنیدگی
۷۷	۱-۶-۶- سرریزها
۷۷	۱-۶-۱- مقدمه
۸۱	۱-۶-۲- سرریزهای بدون کنترل (بدون دریچه)
۸۳	۱-۶-۳- سرریزهای دریچه‌ای
۸۶	۱-۶-۴- شوت سرریز
۸۷	۱-۶-۵- اتلاف انرژی آب
۸۸	۱-۶-۶- شبیه‌سازی سه بعدی سرریزها
۹۱	مطالعات و بررسی‌های صحرائی
۹۱	۱-۲- مطالعات ساختگاه
۹۱	۲-۱-۱- مقدمه
۹۲	۲-۱-۲- مطالعات دفتری
۹۳	۲-۱-۳- بررسی‌های اولیه
۹۵	۲-۱-۴- بررسی‌های ژئوفیزیکی

۹۷	۲-۱-۵- بررسی های اکتشافی
۹۸	۲-۱-۶- بررسی های تفصیلی ساختگاه انتخابی
۹۹	۲-۱-۷- بررسی لرزه خیزی ساختگاه
۱۰۱	۲-۱-۸- رفتار سنجی ساختگاه
۱۰۳	۲-۲- زمین شناسی مهندسی ساختگاه
۱۰۳	۲-۲-۱- مقدمه
۱۰۵	۲-۲-۲- طبقه بندی زمین شناسی سنگ ها
۱۰۸	۲-۲-۳- طبقه بندی مهندسی سنگ ها
۱۱۲	۲-۲-۴- ویژگی های مهندسی برخی سنگ ها
۱۱۹	۲-۲-۵- تعیین خصوصیات سنگ های ساختگاه
۱۲۵	۲-۲-۶- روش های آزمایشگاهی برای بررسی سنگ ساختگاه
۱۳۳	۲-۲-۷- آزمون های صخرایی ساختگاه سد
۱۳۹	۲-۲-۸- مخاطرات زمین شناسی
۱۴۱	۲-۳- هیدرولوژی ساختگاه
۱۴۱	۲-۳-۱- مقدمه
۱۴۱	۲-۳-۲- چرخه هیدرولوژیکی
۱۴۳	۲-۳-۳- ظرفیت مورد نیاز مخزن
۱۴۴	۲-۳-۴- ارتفاع آزاد مخزن
۱۴۵	۲-۳-۵- سیلاب
۱۴۶	۲-۳-۶- شبکه های جریان هیدرودینامیکی
۱۴۸	۲-۳-۷- هیدرولوژی سنگ بستر ناهمسان گرد
۱۵۱	۲-۳-۸- هیدرولوژی مخازن پر شده
۱۵۴	۲-۴- انتخاب نوع سد
۱۵۴	۲-۴-۱- وضعیت ظاهری دره ها
۱۵۶	۲-۴-۲- تشکیل دره ها و فرایندهای ثانویه
۱۵۹	۲-۴-۳- انتخاب نوع سد با توجه به شرایط زمین شناسی و توپوگرافی

۱۶۳	طراحی پی.....
۱۶۳	۱-۳- اهمیت پی سازی.....
۱۶۸	۲-۳- بارگذاری و ضریب اطمینان.....
۱۶۸	۱-۲-۳- مقدمه.....
۱۶۹	۲-۲-۳- نیروهای وارد بر سد.....
۱۷۳	۳-۲-۳- ترکیب های بارگذاری.....
۱۷۶	۳-۲-۴- شرایط بارگذاری دینامیکی.....
۱۷۹	۳-۲-۵- ضرایب اطمینان.....
۱۸۱	۳-۳-۱- گسیختگی پلاستیک پی.....
۱۸۳	۳-۳-۲- پایداری در مقابل لغزش.....
۱۹۴	۳-۳-۳- پایداری در مقابل واژگونی.....
۱۹۶	۳-۳-۴- تنش و کرنش در پی سنگ.....
۱۹۸	۳-۴- محاسبه ظرفیت باربری سنگ پی.....
۱۹۸	۳-۴-۱- تعیین ظرفیت باربری سنگ های ترک دار.....
۲۰۲	۳-۴-۲- تعیین ظرفیت باربری پی های مدفون.....
۲۰۳	۳-۴-۳- تعیین ظرفیت باربری سنگ های ضعیف.....
۲۰۶	۳-۴-۴- تعیین ظرفیت باربری پی های شیب دار.....
۲۱۰	۳-۴-۵- تعیین ظرفیت باربری توده سنگ های حاوی دسته های ناپیوستگی.....
۲۱۱	۳-۴-۶- تعیین ظرفیت باربری سنگ های لایه ای.....
۲۱۴	۳-۴-۷- ظرفیت باربری تشکیلات کارستی.....
۲۲۰	۳-۵- محاسبه نشست الاستیک سنگ.....
۲۲۰	۳-۵-۱- سنگ های همگن و همسان گرد.....
۲۲۲	۳-۵-۲- سنگ های مطبق (لایه ای).....
۲۲۶	۳-۵-۳- سنگ های همسان گرد عرضی.....
۲۳۳	۳-۶- محاسبه نشست غیر الاستیک سنگ.....
۲۳۳	۳-۶-۱- عوامل و مکانیزم نشست غیر الاستیک.....

۲۳۵	۳-۶-۲- نیست ناشی از فرونشست زمین
۲۳۸	۳-۷-۷- تحلیل‌های عددی برای تعیین توزیع تنش و کرنش در پی
۲۳۸	۳-۷-۱- تحلیل اجزای محدود توزیع تنش
۲۳۸	۳-۷-۲- تحلیل 3DEC جابه‌جایی در سنگ‌های درزدار
۲۴۱	۳-۷-۳- تحلیل اجزاء محدود کرانپایه‌های درزدار
۲۴۳	۳-۷-۴- تحلیل اجزاء محدود سه بعدی کرانپایه‌های سد قوسی
۲۴۴	۳-۸-۸- طراحی و تحلیل پی سد در شرایط لرزه‌ای
۲۴۴	۳-۸-۱- مقدمه
۲۴۶	۳-۸-۲- اندازه‌گیری حرکات سنگ پی
۲۴۷	۳-۸-۳- تحلیل پایداری لغزشی و واژگونی در شرایط لرزه‌ای
۲۵۰	۳-۸-۴- تحلیل دینامیکی اجزاء محدود
۲۵۱	۳-۸-۵- تحلیل جا به جایی در شرایط لرزه‌ای
۲۵۸	۳-۹-۹- اندرکنش بتن - توده‌سنگ در سدهای بتنی
۲۵۸	۳-۹-۱- مقدمه
۲۵۹	۳-۹-۲- روش تحلیل و ارایه نتایج
۲۶۳	۳-۱۰-۱- تحلیل پی در سدهای وزنی
۲۶۳	۳-۱۰-۱- مقدمه
۲۶۵	۳-۱۰-۲- جریان آب در پی سنگ
۲۶۹	۳-۱۰-۳- تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در توده‌سنگ
۲۷۲	۳-۱۱-۱- تحلیل پی در سدهای قوسی
۲۷۲	۳-۱۱-۱- مقدمه
۲۷۲	۳-۱۱-۲- بررسی یک سد قوسی نمونه
۲۸۲	۳-۱۱-۳- بررسی نحوه گسیختگی سد مالپاست
۲۹۰	۳-۱۱-۴- ارزیابی پایداری سد قوسی به روش مدل انشعافی
۲۹۵	آماده‌سازی و بهسازی سنگ پی
۲۹۵	۴-۱- مقدمه

۲۹۸	۲-۴- قواره‌دهی به سطح باربری
۲۹۹	۳-۴- پاکسازی و آب‌بندی
۳۰۰	۴-۴- تغییرشکل‌های برگشتی
۳۰۱	۵-۴- حفرات انحلالی
۳۰۲	۶-۴- پیش تحکیم کردن
۳۰۳	۷-۴- متراکم کردن خاک‌های غیر چسبنده
۳۰۴	۸-۴- تراکم دینامیکی
۳۰۵	۹-۴- تزریق
۳۰۶	۱-۹-۴- اهداف تزریق
۳۰۷	۲-۹-۴- انواع دوغاب
۳۰۹	۳-۹-۴- مکانیزم تزریق
۳۱۲	۴-۹-۴- انواع تزریق
۳۱۲	۵-۹-۴- روش حفاری
۳۱۴	۶-۹-۴- آرایش گمانه‌ها
۳۱۷	۷-۹-۴- تزریق بدون الگو
۳۱۹	۸-۹-۴- طرح اختلاط دوغاب
۳۲۱	۹-۹-۴- مقاومت دوغاب
۳۲۱	۱۰-۹-۴- فشار تزریق
۳۲۲	۱۱-۹-۴- روش‌های تزریق
۳۲۴	۱۲-۹-۴- کنترل عملیات تزریق
۳۲۴	۱۳-۹-۴- شویش دوغاب
۳۲۷	۱۰-۴- زهکشی سنگ پی
۳۲۹	طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ساختگاه سد به روش DMR
۳۲۹	مقدمه
۳۳۰	پایداری عمومی سد در مقابل لغزش
۳۳۲	تعین رابطه E_m و RMR

۳۳۷	تأثیر ناهمسان‌گردی و رطوبت بر E_m
۳۳۸	تأثیر تغییر شکل‌پذیری پی روی رفتار سد
۳۴۱	توصیف طبقه‌بندی RMI و کاربری آن در مهندسی سنگ
۳۴۱	مقدمه
۳۴۲	شاخص نوده سنگ
۳۵۰	مثال‌هایی برای به دست آوردن RMI و ρ_L
۳۵۲	جمع‌بندی
۳۵۴	سایر روش‌های مشابه با RMI برای ارزیابی مشخصات کمی نوده سنگ
۳۵۵	کاربردهای احتمالی RMI
۳۵۷	تعیین ظرفیت باربری مجاز پی‌های سنگی با استفاده از معیار شکست غیرخطی
۳۵۷	مقدمه
۳۵۸	قابلیت کاربرد روش
۳۶۲	جداول و نمودگرام‌های مربوط به حالت‌های ساده شده
۳۶۴	نسبت ظرفیت باربری نهایی به مقاومت تک محوری (N_{σ})
۳۶۷	نکاتی در مورد ضریب اطمینان
۳۷۶	مقایسه با مسائل رایج
۳۸۱	بلندترین سدهای جهان
۳۸۲	بزرگترین پروژه‌های برقایی جهان
۳۸۳	منابع و مراجع انگلیسی
۴۰۳	منابع و مراجع فارسی
۴۰۵	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
۴۳۳	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۴۶۱	فهرست راهنما