

تحلیل رشد ترک در سدهای بتنی به روش افزایش بار استاتیکی

سید علی مرعشی
کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی

محمد تقی احمدی
دانشیار

علی اکبر آقاچوک
استادیار

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی

چکیده

در این مقاله تحلیل غیرخطی سدهای بتنی، تحت اثر بارهای استاتیکی، به روش افزایش بار ارائه شده است. به منظور بالا بردن قابلیت و توانایی این روش از روند تکرار نیوتن - رافسون اصلاح شده در هر قدم بارگذاری استفاده شده است. رفتار غیر خطی بتن در بدنه سد بدون تحمل تنش های کششی و تغییر مکان ها کوچک فرض شده است. از اثرات غیر خطی هندسی در این تحلیل صرف نظر شده است. تنها ترک کششی (مود اول ترک یا گشودگی درز) مورد توجه قرار گرفته است. به لحاظ روش ها و ملاحظات اجرایی سد بتنی یک سیستم سازه ترد و ذاتاً درزدار است. به منظور مدل کردن ترک منفصل در مناطق از پیش تعریف شده از المان میان رویه استفاده شده است. این المان مجازی مسأله تماس بلوک ها را تعریف نموده و امکان جدایی بین دو بلوک مجاور را فراهم می کند. در چنین مدلی اعمال بار مرده وزن سد در حین احداث آبیگری اولیه، نوسانات تراز آب پشت مخزن و تخلیه سد امکان پذیر است. برنامه المان محدود (SAM95) برای این منظور تهیه شده است. در این پروژه وضعیت ترک خوردگی سد کارون (شهید عباسپور) در نواحی زیر مدنظر بوده است: الف) محل تماس بدنه و شالوده تحت بار وزن و افزایش یا کاهش تدریجی فشار هیدرواستاتیک. ب) بین درزهای ساختمانی تحت اثر بارگذاری وزن سد در حین ساختمان.

نتایج به دست آمده از این تحلیل عبارتند از:

- بارهای متداول در سدهای بتنی معمولاً به صورت سیکلی می باشند. استفاده از روش تکرار مستقیم برای اینگونه بارگذاری ها می تواند در جهت عدم اطمینان باشد. به ویژه زمانی که رفتار غیر خطی سازه فراگیر شود، می بایست از روش افزایش بار بهره جست.
- افزایش صلبیت شالوده در سدهای بتنی، رفتار مصالح را به حالت ترد و شکننده نزدیکتر می کند. به طوری که مناطق ترک خورده، پهنای بازشدگی و همچنین خسارت های پس ماند و تغییر مکان های برگشت ناپذیر ناشی از بارگذاری و کاهش تدریجی تراز آب در حالت پی صلب بیش از حالت پی انعطاف پذیر است.
- روش افزایش بار استاتیکی کنترل واضحی بر روی پایداری و ایمنی سازه در تمام مراحل ساخت، آبیگری اولیه، بهره برداری و تخلیه مخزن سد در شرایط بارهای متعارف می باشد.

A Study of Joint-Opening in Concrete Dams Using Incremental Static Loading

Mohammad T. Ahamadi,
Associate Professor

Seyed Ali Marashi
Former Graduate Student

Ali Albar Aghakouchak
Assistant Professor

Tech. & Engineering Faculty, Tarbiat Modarres University

Abstract

In this paper the incremental solution procedure for nonlinear analysis of concrete dams is developed. In order to upward ability, the incremental load method is combined with the modified Newton_Raphson iteration in one step-by-step solution scheme. Since concrete dam is constructed in separate monolithic blocks, it behaves as a jointed structural system, so discrete crack propagation in the predefined location and also block contact problem can be used for Structural Analysis Modelling (SAM). The dam wall and foundation is modelled with 20 node isoparametric curvilinear elements or 15 node in wedges. The joint / interface quadratic elements are 16 node (8 node at top, 8 node at bottom) with zero thickness and the stresses are sampled at 3 x 3 Gauss points. In such a model the weight of dam during construction and the variable reservoir water level are applicable. Foundation joint and vertical contraction joint openings are considered. It's found that the conventional loading in concrete dams, may be a case of non-monotonic loading. For this kind of loading, the use of direct iteration method may result in inadequate margin of safety in design, so this method is not recommended. Instead, specially when nonlinear behavior of structure is considerable, the incremental load method lead to better results in comparison with the others. Furthermore, during the period of the lowering reservoir, the maximum arch residual tensile stresses may be considerably greater than in the operating case. A finite element algorithm (SAM95) for dam monitoring during construction and service load condition is prepared. A general flow diagram for initial stiffness method is given.

۱- مقدمه

اصولاً احداث سدهای بتنی و متعاقب آن مسائل پایداری و ایمنی اینگونه سدها از موضوع های مهمی است که از جنبه های مختلف فنی، اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و زیست محیطی قابل مطالعه و بررسی است. از نظر فنی به دلیل مقاومت ضعیف بتن در برابر کشش و نیز شکننده بودن بتن غیر مسلح، سدهای بتنی از همان ابتدا با مسأله ترک خوردگی مواجه هستند. باید توجه داشت که ترک های ریز سطحی که عمده تاً ناشی از هیدراسیون بتن تازه، خزش، آبرفتگی بتن هستند، نمی توانند تأثیر جدی روی پایداری و ایمنی سدهای بتنی داشته باشند. ولی ترک هایی که در عمق بدنه سد نفوذ می کنند، اثرات قابل ملاحظه ای بر روی کاهش سختی و توان باربری سد دارند. مهمترین عامل به وجود آمدن و رشد اینگونه ترک ها، وجود تنش های کششی ممتد (sustained tensile stresses) است که می تواند ناشی از شکل بهینه نشده سد، روش های ساخت، زیاد شدن طول پیشامدگی (Overhang)، فشارهای هیدرواستاتیک، نشست های ناهمسان در پی و نیز زمین لرزه باشد. از دیگر موارد بروز تنش های کششی می توان از اختلاف درجه حرارت در وجوه بالا دست و پایین دست سد و

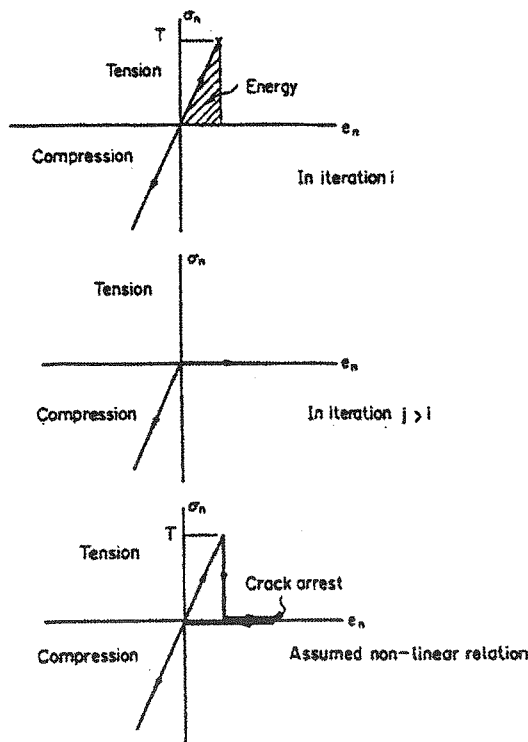
تغییر وضعیت مصالح به لحاظ واکنش های شیمیایی سنگدانه های آکالی (Alkali aggregate reaction) نام برد. در یک مدل کامل باید به وضعیت و جهت سیستم درزه در پی (Bedding system) نیز توجه نمود. [۲] محتمل ترین نقاط ترک خوردگی در سدهای بتنی، عبارت است از [۴]:

الف) محل تماس بدنه سد و شالوده: این پدیده به دلیل اثر خروج از مرکزیت نیروهای ناشی از فشار هیدرواستاتیک و وزن مرده سد در دراز مدت است. این مسأله به ویژه در دره های با دهانه وسیع حائز اهمیت می باشد. در این حالت افزایش صلبیت پی موجب تشدید پدیده ترک خوردگی در این محل ها می گردد.

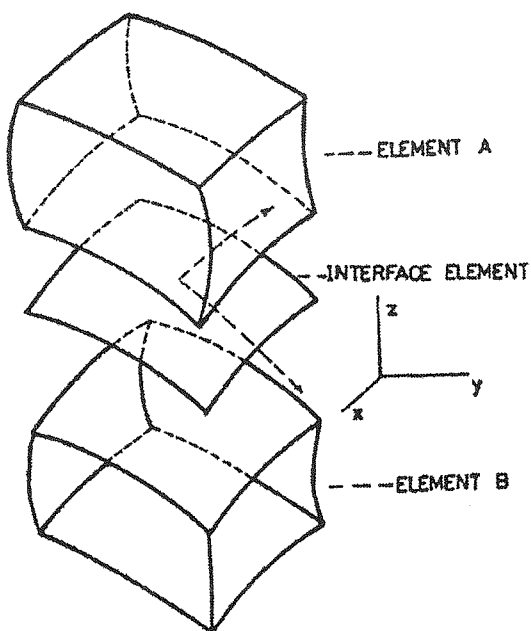
ب) محل درزهای ساختمانی قائم: در سدهای بتنی دو قوسی تحت اثر وزن مرده سد در حین احداث، پیش از آگیری اولیه و نیز به هنگام تخلیه مخزن یا زمین لرزه، این محل ها پتانسیل ترک خوردگی بالایی دارند.

ج) محل درزهای ساختمانی افقی: این مورد به دلیل پیوستگی ضعیف بتن ناشی از قطع بتن ریزی در هنگام اجرای سد می باشد. اینگونه ترک ها به ترک های کنسول نیز موسومند.

ز) تنها به مود اول ترک خوردگی (ترک کششی) به صورت جدایی بلوک‌های مجاور توجه شده است. از اثر شکست برشی (مود دوم و سوم ترک) صرف‌نظر شده است.



شکل (۱) رفتار در نظر گرفته شده برای مصالح



شکل (۲) المان درز (میان رویه)

تاکنون پژوهش‌های زیادی درخصوص تحلیل غیرخطی سدهای بتنی و مدلسازی ترک انجام گرفته است. در این مقاله نتایج به دست آمده از تحلیل سد کارون با استفاده از برنامه SAM95 (Structural Analysis Modelling)، با روش تکرار مستقیم [۱] به طور اجمال مقایسه شده است. این برنامه المان محدود به زبان فرترن ۷۷ نوشته شده است و دارای ۲۰ زیر برنامه است [۲].

۲- خصوصیات و فرضیات مدل تحلیلی

از آنجایی که سدهای بتنی به صورت بلوک‌های مجزا و غیر مسطح ساخته می‌شوند، لذا سد بتنی یک سیستم سازه ترد (Brittle) و ذاتاً درزه دار است. بنابراین استفاده از مدل ترک منفصل (Discrete crack) به صورت سه بعدی در مناطق از پیش تعریف شده (Predefined crack) به منظور مدلسازی ترک در سدهای بتنی بسیار مناسب است [۷]. با استفاده از المان میان رو به (Joint/Interface element) می‌توان رفتار محلی سازه را از نظر تغییرات تنش یا کرنش و مقدار پهنای بازشدگی زیر نظر داشت. در این مدل نیازی به تغییر هندسه و تعریف مجدد شبکه المان محدود نیست و ابعاد ماتریسی سازه در طول تحلیل تغییر نمی‌کند. با استفاده از این مدل می‌توان فشار برکنش (Uplift) و نفوذ آب را به سطوح باز ترک اعمال نمود [۹] فرضیات مدل به قرار زیر است:

- الف) تغییر مکان‌ها کوچک هستند.
- ب) تحلیل غیر خطی صرفاً بر مبنای رفتار غیرخطی مصالح استوار است. از اثرات غیرخطی هندسی در این تحلیل صرف‌نظر شده است.
- ج) رفتار مصالح بدون تحمل تنش‌های کششی [۱۰] فرض شده است. به این ترتیب که رفتار بتن در فشار و برش خطی و در کشش تا حد معینی خطی و پس از آن مقاومت کششی صفر فرض می‌شود (شکل ۱).
- د) تنش کششی نرمال در سطح ترک معیار بازشدگی درز می‌باشد، این تنش با تنش مجاز کششی مصالح درزه مقایسه شده و در صورت تجاوز از آن، ترک باز شده و نقطه گوس مربوطه از روند محاسبات سختی حذف می‌گردد. تنش کششی نرمال به تنهایی برای گشودگی مجدد درزه کافی است [۲].
- هـ) کرنش فشاری نرمال در عرض ترک معیار بسته شدن یا دوباره بسته شدن درز است [۸].
- و) اصلاح مصالح پس از باز شدن درز با صرف نظر نمودن از سختی نقاط گشوده شده قابل حصول است.

۳- روش تحلیل منتخب

روش افزایش بار استاتیکی توأم با روش تکرار نیوتن - رافسون اصلاح شده در نوع خود کاملترین و جامعترین روش تحلیل غیر خطی باتوجه به نحوه اجرا و خصوصیات بارگذاری تدریجی در سدهای بتنی می باشد.

درمدل المان محدود از المان های خمیده ایزوپارامتریک ۲۰ گرهی در بدنه و شالوده استفاده شده است. این المان در مجاورت لبه ها و کناره ها به صورت ۱۵ گرهی معرفی گردیده است. جهت مدل کردن ترک در مناطق از پیش تعریف شده از المان های خمیده ایزوپارامتریک ۱۶ گرهی (۸ گره در بالا و ۸ گره در پایین) به ضخامت صفر با نقاط گوس ۳×۳ استفاده شده است [۵]. این المان های مجازی مسأله تماس بلوک ها را تعریف نموده و امکان جدایی یا بازشدگی (مود اول ترک) بین دو بلوک مجاور را فراهم می کنند (شکل ۲). در ادامه باتوجه به شکل ۳ جزئیات روش سختی اولیه توضیح داده شده است. در صورتی که ΔP^0 بردار نیروهای خارج از تعادل و F بارنهایی، و n تعداد افزایش ها باشد، در ابتدای مسأله داریم:

$$\Delta P^0 = \frac{1}{n} F \quad (1)$$

اگر F_n بردار نیروهای خارجی و K_n ماتریس سختی کل سیستم در قدم n بارگذاری باشد، داریم:

$$F_n = F_{n-1} + \Delta P^0 \quad (2)$$

K_{3D} و K_{2D} ماتریس های سختی المان های سه بعدی و دو بعدی که به ترتیب ثابت و متغیر فرض می شوند.

$$K_n = K_{3D} + K_{2D} \quad (3)$$

سپس عملیات اصلاح شده تکرار نیوتن - رافسون را خواهیم داشت:

Δa^i بردار تغییر مکان های مجهول در هر تکرار و a^i بردار تغییر شکل کل تا این مرحله می باشد.

$$\Delta a^i = K_n^{-1} \Delta P^{i-1} \quad (4)$$

$$a^i = a^{i-1} + \Delta a^i \quad (5)$$

اگر B و D به ترتیب ماتریس های انتقال کرنش و ماتریس الاستیسیته باشند، آنگاه تنش در هر نقطه در تکرار i ام محاسبه می شود:

$$\sigma^i = DBa^i \quad (6)$$

P_{3D}^e و P_{2D}^e بردار نیروهای داخلی المان های سه بعدی و دو بعدی که در مورد المان های دو بعدی از روی تنش σ^i و با انتگرال گیری از سطح (Ω) حاصل می شود.

$$P_{3D}^e = K_{3D}^e a^e \quad (7)$$

$$P_{2D}^e = \int_{\Omega} B^T \sigma^i d\Omega \quad (8)$$

سپس P^i بردار نیروهای داخلی کل به دست می آید:

$$P^i = \sum_{e=1}^{ne1} (P_{3D}^e + P_{2D}^e) \quad (9)$$

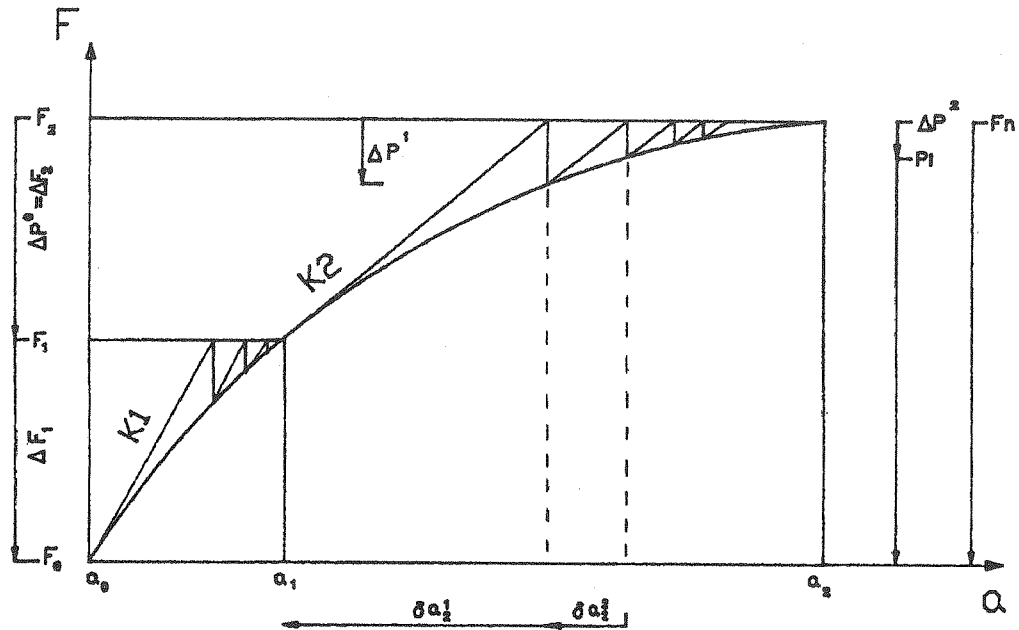
به این ترتیب بردار نیروهای خارج از تعادل در تکرار i ام محاسبه می شود:

$$\Delta P^i = F_n - P^i \quad (10)$$

سپس ضابطه همگرایی انرژی کنترل می شود که در آن ϵ عددی است کوچک و ضریب همگرایی نامیده می شود:

$$(\Delta a^i)^T \Delta P^{i-1} \leq \epsilon (\Delta a^1)^T \Delta P^0 \quad (11)$$

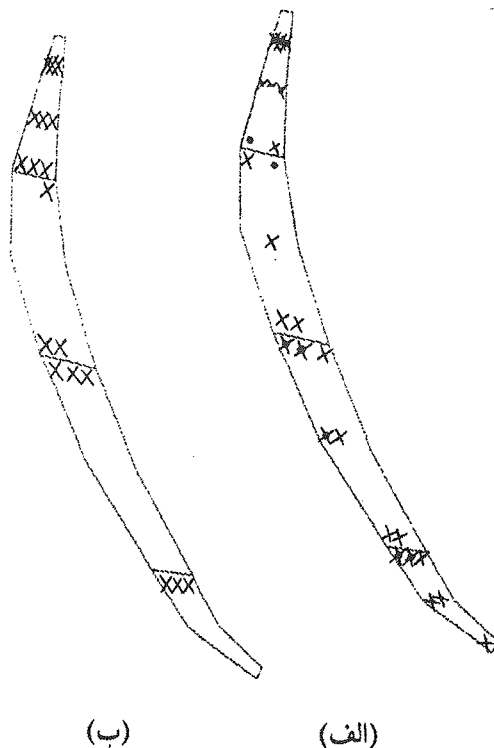
در صورتی که معیار (۱۱) ارضا نشود، عملیات تکراری آنقدر ادامه می یابد تا اینکه بردار نیروهای خارج از تعادل به اندازه کافی کوچک شود. در صورت ارضای ضابطه (۱۱) و تحقق همگرایی قدمهای بعدی بارگذاری تا رسیدن به بارنهایی ادامه می یابد. در شکل ۴ نمای کلی روش سختی اولیه نشان داده شده است [۲].



شکل (۳) روش سختی اولیه و اصلاح ماتریس سختی در ابتدای هر قدم بارگذاری

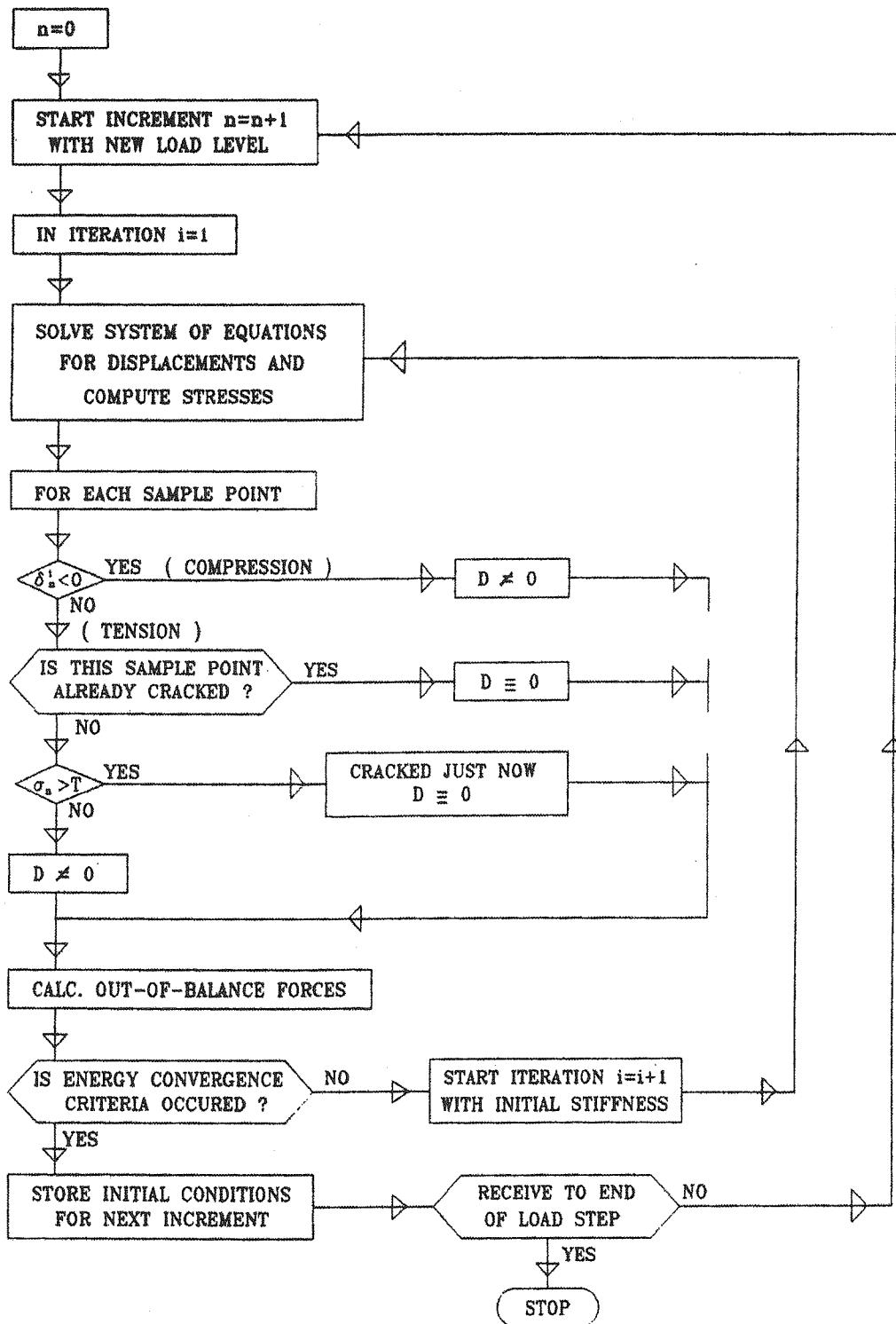
۴- تحلیل سد کارون

در این قسمت به عنوان یک مثال عملی و واقعی سد کارون ۱ (شهید عباسپور) به ارتفاع ۲۰۰ متر در حالت های خطی و غیرخطی با پی صلب و پی انعطاف پذیر ($\frac{E_d}{E_f} = 2$) تحت اثر بار وزن مرده سد به همراه فشار هیدرواستاتیک تدریجاً افزایشی و کاهشی به منظور بررسی اثرات گشودگی درزها در محل تماس بدنه و شالوده مورد تحلیل قرار گرفته است. تراز نهایی آب ۱۸۸ متر می باشد که در افزایش های مساوی به بدنه سد اعمال شده است. در شکل های ۵ و ۶ نقاط گوس باز شده در افزایش اول و دوم و نقاط بازمانده پس از باربرداری و تخلیه تدریجی مخزن به ترتیب برای حالت های پی صلب و پی انعطاف پذیر نشان داده شده است. در این تحلیل نقاطی را می توان یافت که در تراز میانی مخزن (۹۴ متر) باز و در تراز نهایی آب (۱۸۸ متر) بسته شده اند. این امر نشان دهنده بارگذاری غیر یکنواخت در هنگام آبیگیری اولیه سد کارون است. همانطوری که مشاهده می شود، شدت ترک خوردگی همچنین خسارت های پس ماند در حالت پی صلب بیش از حالت پی انعطاف پذیر است.



شکل (۵ - الف) نقاط گوس باز شده در افزایش اول و دوم
شکل (۵ - ب) نقاط گوس بازمانده پس از باربرداری تدریجی در حالت پی صلب

INITIAL STIFFNESS FLOW DIAGRAM



شکل (۴) نمای کلی روش سختی اولیه

سد در حالت پی انعطاف پذیر (چهار افزایش) با سایر مدل‌ها مقایسه شده است. نتایج به دست آمده پس از رسیدن آب به تراز نهایی عبارتند از:

- تنش‌های فشاری کنسول در پایین دست بدنه سد افزایش و در بالا دست کاهش یافته است.

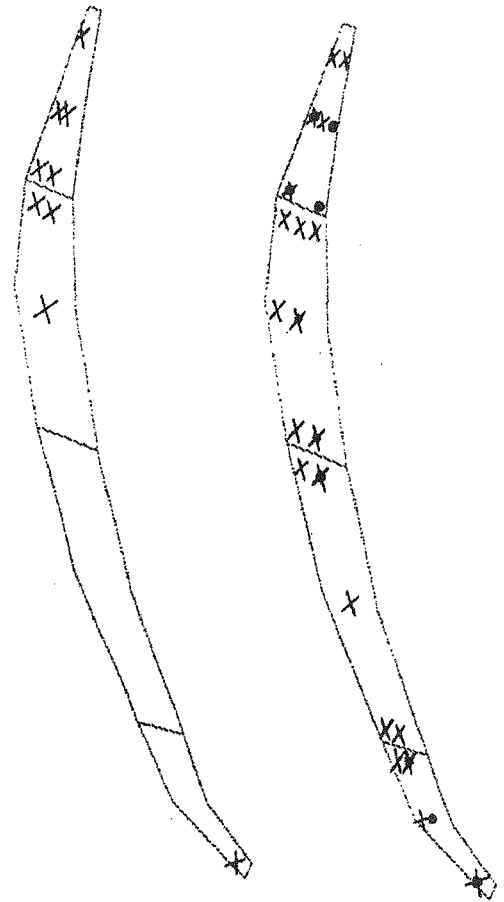
- تنش‌های قوس به دلیل اثر بازشدگی درزها نسبت به حالت خطی افزایش نشان می‌دهد.

- با افزایش صلبیت فونداسیون، رفتار مصالح به حالت شکننده و ترد نزدیکتر شده، در نتیجه مناطق ترک خورده، پهنای بازشدگی و همچنین عدم اطمینان نسبت به گسترش ترک در حالت پی صلب بیش از حالت پی انعطاف پذیر است. تغییر مکان باقیمانده (برگشت ناپذیر) به سمت بالا دست پس از کاهش تدریجی تراز آب، می‌تواند ناشی از شدت ترک خوردگی در حالت پی صلب باشد.

- در تحلیل غیرخطی، تنش‌های کششی به صورت موضعی آزاد شده و عمل باز توزیع تنش‌ها در بخش‌های فشاری انجام می‌گردد. این عملکرد موجب می‌شود که تنش‌های کششی حداکثر مطلق در بدنه سد به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و تنش‌های فشاری افزایش یابد.

پس از تخلیه تدریجی مخزن در چهار پله کاهشی ملاحظه شده است که تنش‌های کششی مطلق در حالت پی انعطاف پذیر وجه پایین دست حدوداً ۵ برابر افزایش داشته است.

در قسمت بعد به منظور بررسی اثر درزهای قائم ساختمانی سد کارون، سه حالت یکپارچگی درز/کامل/آزاد (Jointed / Perfect / Free monoliths) تحت اثر بارگذاری افزایشی وزن سد، مورد مطالعه قرار گرفت از میان سه روش ذکر شده، روش یکپارچگی آزاد مقادیر تنش و جابجایی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌دهد و از همه دست بالاتر است. نتایج روش یکپارچگی درز و یکپارچگی کامل به یکدیگر نزدیک می‌باشند. در شکل ۸ تغییر مکان‌های شعاعی و کنسول مرکزی برای حالت‌های مختلف یکپارچگی تحت اثر وزن مرده سد پس از احداث ترسیم شده است. در شکل ۹ درزهای گشوده شده و مناطق ترک خورده در کنسول‌ها نمایش داده شده است.



(الف) (ب)

● نقاط کوس باز شده در افزایش اول
× نقاط کوس باز شده در افزایش دوم

شکل (۶ - الف) نقاط گوسی باز شده در افزایش اول و دوم
شکل (۶ - ب) نقاط گوسی بازمانده پس از باربرداری تدریجی در حالت پی انعطاف پذیر

بنابراین در این حالت مسیر بارگذاری در حل مسأله تأثیرگذار است. به عبارت دیگر تحلیل وابسته به مسیر بارگذاری (Path dependent) خواهد بود. یعنی در یک سطح بارگذاری مشخص بسته به مسیر بارگذاری تغییر مکان‌های مختلفی به دست می‌آید. در شکل ۷ تغییر مکان‌های شعاعی و کنسول مرکزی سد کارون با ۱، ۲ و ۴ قدم افزایش تراز آب در حالت‌های پی صلب و پی انعطاف پذیر نشان داده شده است. در جدول ۱ تنش‌های کششی و فشاری مطلق در بالا دست و پایین دست بدنه

جدول (۱) تنش های کششی و فشاری مطلق در بالا دست و پایین دست سد کارون در حالت پی انعطاف پذیر

Face Condition	Absolute Stresses	Linear	Incremental Load	Direct Iteration	Model Test	ADAP	After lowering
Max U/S Stresses (T/m ²)	σ_t	256	147	55	130	270	166
	σ_p	-334	-589	-517	-430	-370	-364
Max D/S Stresses (T/m ²)	σ_t	351	49	39	30	120	240
	σ_p	-765	-1288	-1029	-900	1270	-741

مصالح به حالت ترد و شکننده نزدیکتر شود. به این ترتیب مناطق ترک خورده، پهنای بازشدگی و نیز عدم اطمینان نسبت به گسترش ترک در حالت پی صلب بیش از حالت پی انعطاف پذیر است.

۳- بارگذاری وزن سد در حین احداث، آبیگری اولیه، نوسانات تراز آب پشت مخزن و تخلیه مخزن سد، منجر به اعمال بارگذاری رفت و برگشتی به سد می گردد. استفاده از روش تکرار مستقیم برای اینگونه بارگذاری ها می تواند در جهت عدم اطمینان باشد. بنابراین استفاده از روش تکرار مستقیم در تحلیل غیر خطی سدهای بتنی توصیه نمی شود.

۴- در مورد بارگذاری وزن مرده سد کارون پس از احداث، هر دو روش افزایش بار استاتیکی و تکرار مستقیم نتایج مشابهی به دست داده است. این مطلب نشان دهنده صحت فرض بارگذاری یکنواخت در این خصوص باتوجه به وضعیت مدل فیزیکی می باشد.

۵- پس از باربرداری و کاهش تدریجی تراز آب، تعداد نقاط گوس بازمانده و مناطق ترک خورده در حالت پی صلب بیش از حالت پی انعطاف پذیر است. به عبارت دیگر با افزایش صلبیت شالوده در سدهای بتنی خسارت های پس ماند و تغییر مکان های برگشت ناپذیر بیشتر خواهد شد.

۶- به هنگام تخلیه مخزن سد یا زمانی که تراز آب پشت

همانگونه که در شکل ۹ دیده می شود، به دلیل تأثیر وزن مرده قسمت های فوقانی کنسول و خمیدگی این قسمت ها به سمت پایاب، قوس تمایل به بسته شدن دارد. در قسمت های پایینی کنسول تحت اثر وزن مرده بخش های فوقانی قوس تمایل به باز شدن دارد. در نتیجه درزهای قائم در قسمت های تحتانی و نزدیک به تکیه گاه در معرض تنش های کششی هستند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل بازشدگی درزها در حالت سه بعدی برای سدهای بتنی تحت اثر بارهای استاتیکی تدریجاً افزایشی یا کاهش ارائه شد. نتایج اصلی این کار به قرار ذیل است:

۱- روش افزایش بار استاتیکی توأم با روش تکرار نیوتن - رافسون اصلاح شده در هر قدم بارگذاری در مورد هر نوع سیستم سازه ترد و ذاتاً درزه دار با رفتار غیرخطی قابل ملاحظه، نظیر سدهای بتنی، از صحت و اعتبار لازم برخوردار است. البته باید توجه داشت که ماهیت بارگذاری می بایست به صورت آهسته و تدریجی باشد. این امر در مورد بار وزن در حین احداث و نیز تغییرات تراز آب پشت مخزن کاملاً صادق است.

۲- افزایش صلبیت فونداسیون موجب می شود که رفتار

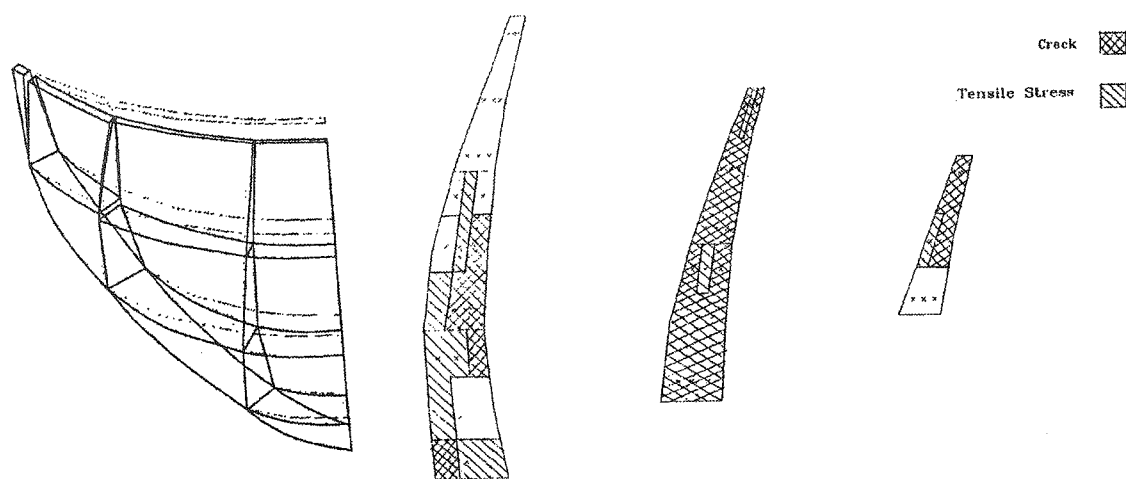
مخزن سد به علی پایین برود، تنش های کششی باقیمانده در جهت قوس به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. به طوری که این تنش ها در بدنه سد کارون با پی انعطاف پذیر حدود ۵ برابر افزایش نشان داده است.

مراجع

۷- در نهایت روش افزایش بار استاتیکی کنترل واضحی بر روی پایداری و ایمنی سازه در تمامی مراحل ساخت، آگیری اولیه و بهره برداری از سد در شرایط بارهای متعارف می باشد.

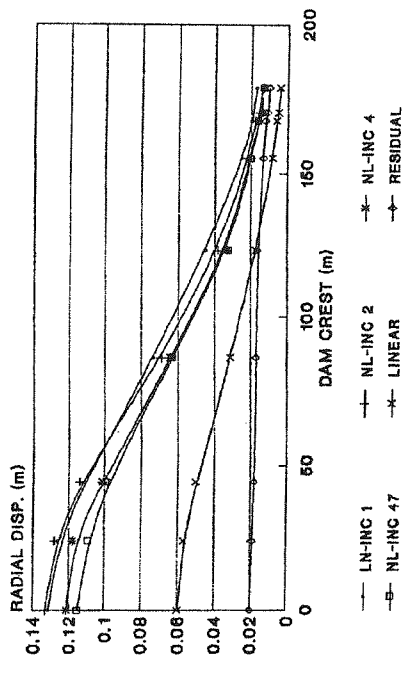
- [۱] رضوی دربار، سهیل، پایان نامه «بررسی اثرات ترک در پایداری سدهای بتنی قوسی» دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۶۹.
- [۲] مرعشی، سید علی، پایان نامه «تحلیل رشد ترک در سدهای بتنی به روش افزایش بار استاتیکی» دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۴.
- [3] Ahmadi M. T., "New method of analysis for arch dam", chapter 6, "Arch dam static joint opening", Ph. D. dissertation, School of Engineering Tohoku University, 1988.
- [4] Ahmadi M. T., Razavi S., "A three dimensional joint opening analysis of an arch dam", Computers & Structures, Vol, 44, No. 1/2, 1992.
- [5] Beer G., "An isoparametric jointinterface element for finite element analysis", International journal for numerical method in engineering, Vol, 21, 1985.
- [6] Buragohain D. N., shah V. L., "Curved surface

- isoparametric interface element", Journal of Soil Mechanics and Foundation, Div. ASCE, 1978.
- [7] O'Connor J.P.F., 'Static analysis of double curvature thin arch dam to arch gravity incorporating the effect of vertical joints", the MWA International Conference of Dam Engineering, Malaysia 1995.
- [8] Shaw-han Kuo, "On the nonlinear dynamic response of arch dams to earthquake", Part II, "Joint opening nonlinear mechanism-Interface crack model" Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 1982.
- [9] Simic M., Taylor C. A., "Numerical modelling of limited tension nonlinearities in concrete gravity dam foundation system subjected to static loading, "Dam Engineering, Vol. 6, Issue 2, 1995.
- [10] Zienkiewicz O.C., Valliappan S., King I.P., "Stress analysis of rock as a no-tension material", Geotechnique, Vol. 18, No. 1, 1968.



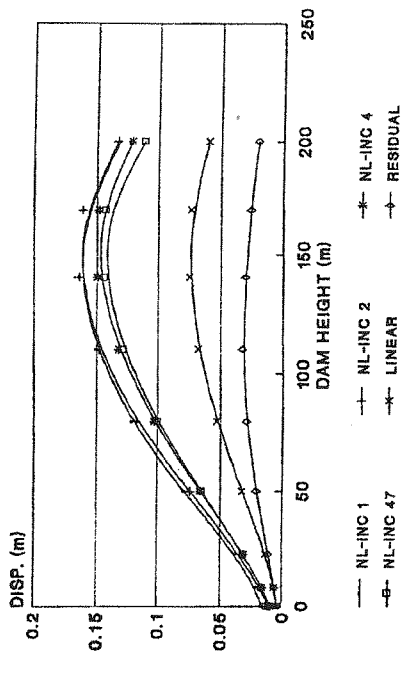
شکل (۹) نمای درزهای گشوده شده و مناطق کششی و ترک خوردگی در حد فاصل کنسول ها تحت بار وزن

KARUN DAM WITH FLEXIBLE FOUNDATION CREST RADIAL DISPLACEMENTS



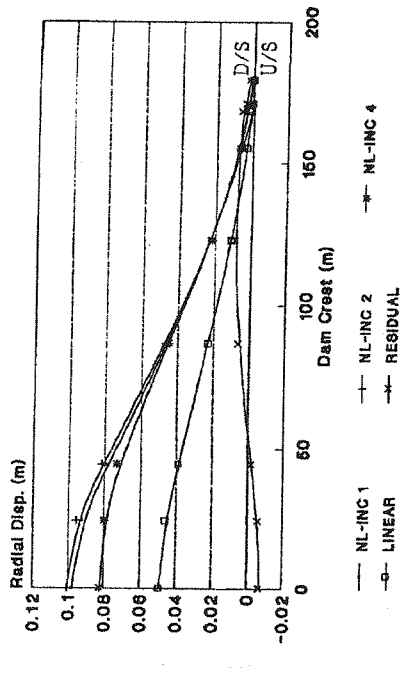
MAX WATER LEVEL = 188. m Ed / Ef = 2

KARUN DAM WITH FLEXIBLE FOUNDATION CENTRAL CANTILEVER DISPLACEMENTS



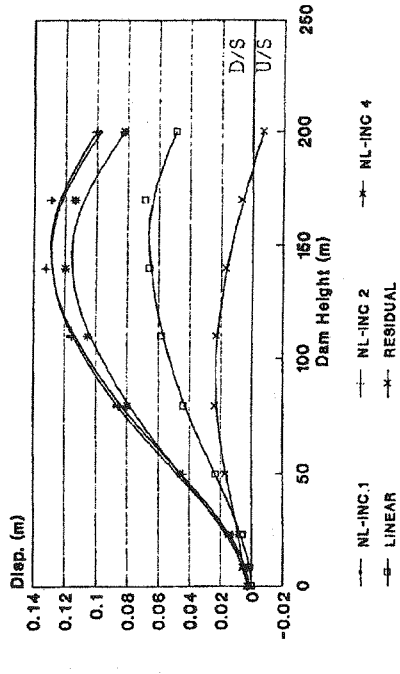
MAX WATER LEVEL = 188. m Ed / Ef = 2

KARUN DAM WITH RIGID FOUNDATION CREST RADIAL DISPLACEMENTS



WATER LEVEL = 188. m

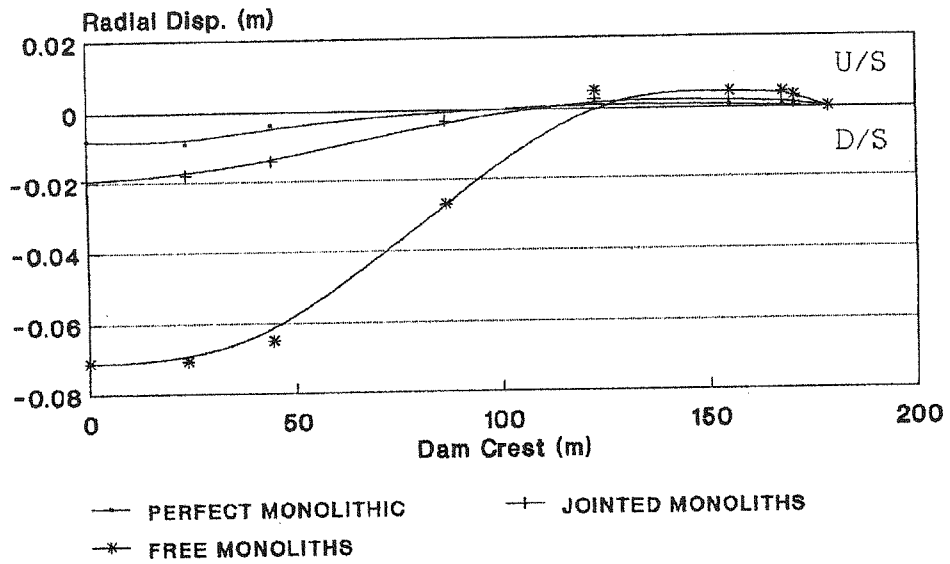
KARUN DAM WITH RIGID FOUNDATION CENTRAL CONSOLE DISPLACEMENTS



WATER LEVEL = 188. m

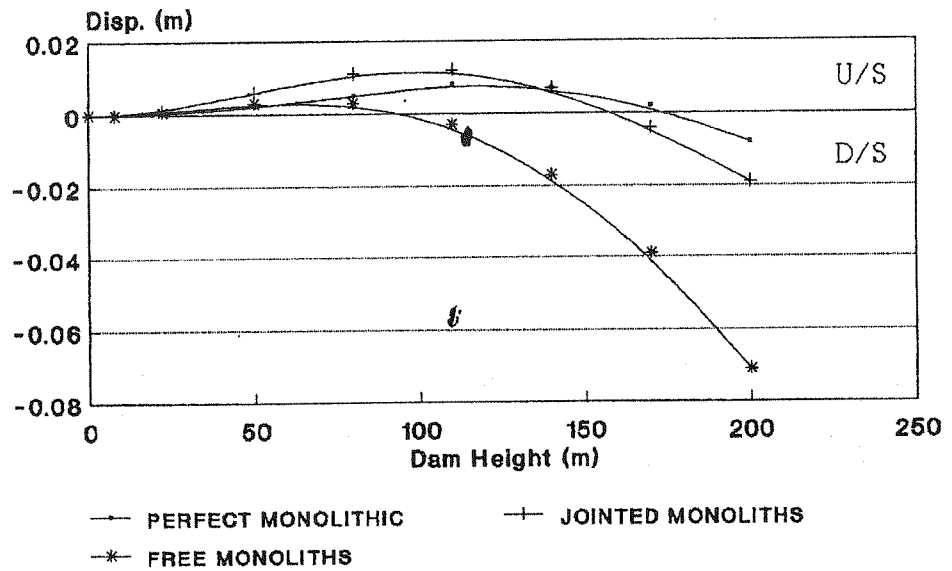
شکل (۷) تغییر مکان های شعاعی تاج سد و کنسول مرکزی سد کارون در حالت های پی صلب و پی انعطاف پذیر تحت بار وزن و افزایش (کاهش) تدریجی فشار هیدرواستاتیک

KARUN DAM AFTER CONSTRUCTION CREST RADIAL DISPLACEMENTS



CREST EL. = 200. m

KARUN DAM AFTER CONSTRUCTION CENTRAL CONSOLE DISPLACEMENTS



شکل (۸) تغییر مکان های شعاعی و کنسول مرکزی سد کارون در حالت های مختلف یکپارچگی پس از احداث تحت بار وزن