Main Menu

درسهائی از شکست سدهای بزرگ

چنگیز فولادی [1]

چکیده :

مرزهای مهندسی سد با به کارگیری درسهای آموخته از طرحهای شکست خورده گسترش بسیاری یافته است . اغلب مسائل قابل انتساب به علتهای ساده و غالبا مربوط به ارزیابی غلط کیفیت و کمیت پارامترهای پی سدها بوده است . نظر باینکه توانائی سازند های طبیعی در محل های احداث سد و مخزن ، برای نگهداری یا هدایت آب بسیار متفاوت می باشند ، هر ساختگاه سد ویژگیهای مختلفی دارد که توجه و بررسی خاطی را طلب می کند .

از مدتها قبل مهندسین زیادی آمار شکست و حوادث پیش آمده در سدهای مخزنی را برای ارتقاء دانش صنعت سد سازی جمع آوری نموده تا این سازه های مسلم مفید را براساس بهره برداری مناسب از یافته های موجود ایمن تر طراحی نموده و یا این سازه ها مناسب تر ساخته شوند . از سالهای ۱۹۷٤ تا ۱۹۸۳ کمیسیون جهانی سدهای بزرگ اقدام به چاپ نشریاتی نموده که در مجموع سعی گردید تا در مطالعات مذکور به سئوالات زیر را پاسخ لازم داده شود :

۱. پروسه های اصلی یا مکانیسم اصلی حوادث چه بوده اند
۲. براساس اطلاعات موجود در طول صد سال گذشته ، چه پیشرفت هائی در مجموع در رابطه با رعایت حفظ ایمنی در طراحی و ساخت سدها حاصل گردیده است .

لکن سئوالات دیگر بدون پاسخ مانده اند . بطور مثال آمار موجود نشاندهنده تعدد حوادث عمدتا در سدهای خاکی بوده اند ولی مشخص نگردید که علت ، بلحاظ آسیب پذیری بیشتر مصالح این نوع سدها بوده و یا واقعیت این است که تعداد این نوع سدها بیشتر از سایر انواع سدهاست ؟

طراحی صحیح سد مستلزم توجه به استعداد تخریب آب مهار نشده است . برای اطمینان از مهار قدرت آن ، آن را باید حذف یا محدود به معابر امن نمود . با احداث هر سد ، تعادل طبیعی در ساختگاه آن هم به هم می خورد و با آبگیری مخزن ، در تمام موانع تشکیل دهنده مخزن ، نفوذ آب رژیم جدیدی پیدا میکند . مشخصات مصالح سد و پی آن تغییر کرده و باعث تغییر در توانائیهای ساده می گردد . ظرفیت سازند طبیعی برای تحمل بارهای اضافه ای که بر آن وارد میشود ممکن است تا حد زیادی بر اثرات نفوذ آب ، از جمله فرسایش ،انحلال و فشارهای منفذی بستگی داشته باشد .

در این مقاله حتی المکان سعی گردید تا عوامل و فاکتورهای مؤثر شکست در انواع سدهای خاکی ، بتنی و سازه های جنبی این سدها مورد اشاره قرار گیرند و اثرات عواملی نظیر مصالح ساختمانی ، ارتفاع ، نوع سد ، نوع سهولت ، کهولت ، بهره برداری و نگهداری و طراحی سد که هر کدام و یا ترکیبی از آنها بنحوی در شکست پروژه ها دخالت دارند مورد اشاره قرار گیرند تا بدینوسیله طراحان ، سازندگان و بهره برداران از نتایج ارائه شده بتوانند اطلاعات مفیدی را در جهت بکارگیری آنها برای دستیابی به نتایج مفید بهره گیری نمایند . هر چند که آمار مورد بحث با کاستی هائی ارائه شده است ، لکن هدف ارائه مسائل اساسی مربوط به طرحهای ناموفق بوده تا بتوان توجه دست اندرکاران را در انجام امور محوله یاری نمود .

---

[1] دکترای مهندسی سیویل - مدیر امور فنی شرکت پیمانکاری پیماب وابسته به وزارت نیرو

۱- مقدمه

حدود ده هزار سد با ارتفاع بیش از ۳۰ متر بنا شده اند ، که اغلب توصیه های موجود ICOLD در رابطه با مبانی ، معیارهای و ضوابط مطالعات ، طراحی ،ساخت ، بهره برداری ، و نگهداری مربوط به این دسته از سدها می باشد . تعداد سدهای کمتر از ۳۰ متر (۱۰ تا ۳۰ متر) تا سال ۱۹۹۵ که طبق تعریف ICOLD از گروه سدهای بزرگ محسوب می شوند. ۳۵۰۰۰ سد گزارش شده است مبانی طراحی ،ساخت و ... این گروه در بسیاری از کشورها با یکدیگر متفاوت بوده که براساس آمار موجود ، اغلب شکست ها مربوط به این گروه از سدها بوده است .

از ٤٥٠٠٠ سد بزرگ ، ۲۰۰۰ سد با ارتفاع بیشتر از ٦۰ متر و ۷۰۰۰ سد بین ۳۰ تا ٦۰ متر موجودند .

از مجموع تعداد ۲۰۰۰ سد بلندتر از ٦۰ متر ، ۳۰ درصد آنها بتنی وزنی ،۲۰ درصد سد بتنی قوسی اند و بقیه از نوع سدهای خاکی که اغلب از نوع خاکی سنگریزه ای اند می باشند .

۹۰ درصد از کل سدها ،روی پی سنگی بنا شده اند و سدهای خیلی بلند عمدتا برای تولید انرژی ساخته شده و سرریز آنها از نوع دریچه دار می باشند . ۸۰ درصد از کل جمعیت سدهای بلند در کشورهای صنعتی بوده که در مجموع این سدها ۱۵ درصد از کل جمعیت سدهای بلند را شـامل می شوند .

مجموع تعداد ۲۰۰۰ سد بلندتر از ٦۰ متر ، نصف سرمایه گذاریهای انجام شده در این صنعت را شامل میشود که بطور تقریب بعد از سالهای ۱۹۳۰ میلادی ، بروشهای مکانیزه و مشابه هم در تمام کشورها ساخته شده اند .

از ۳۵۰۰۰ سد بزرگ کمتر از ۳۰ متر ، حدود ۹۰ درصد آنها از نوع خاکی اند . اغلب روی پی های سنگی ضعیف یا آبرفت بنا شده اند و دارای سرریز آزاد و بدون دریچه اند .

۲۵۰۰ تا از این سدها قبل از سالهای ۱۹۳۰ میلادی و اغلب در کشورهای صنعتی ساخته شده اند ، از سالهای ۱۹۳۰ به بعد (عمدتا بین شالهای ۱۹۳۰ تا ۱۹۸۰ میلادی) بیش از ۲۵۰۰۰ سد در کشورهای غیر صنعتی ساخته شده و عمدتا به روش های مکانیزه ساخته شده اند . هدف اصلی این سدها عمدتا تامین آب کشاورزی بوده و قیمت آنها کمتر از ۱/۵ میلیون دلار برآورد گردیده است . لذا برای مطالعات ، تحقیقات اکتشافی شناخت پی و مصالح ساخت ، کنترل کیفیت و بهسازی پی این سدها در مقایسه با سدهای بلندتر بودجه کافی تامین نشده و در عملیات ساخت و بهره برداری و نگهداری نیز نظارت مستقیم و کافی و تخصصی نیز خیلی ضعیف (برحسب شرایط حاکم در هر کشور) عمل گردیده است .

اگر چه این آمار کامل نمیباشد (شکست سدهای کشور چین و آمار سالهای بعد از ۱۹۹۵) در این مقاله منظور نشده است) لکن در مجموع ، شکست مجموعه سدها که حدود ۲ درصد کل سدهای موجود را نشان میدهند و رقم قابل ملاحظه ای از قربانی ها و افت سرمایه های ملی درکشورهای مختلف را در بر میگیرد . لازم به ذکر است که مجموع خسارات حاصل از شکست سدهای کوتاهتر از ۳۰ متر ۱۰ برابر بیشتر از خسارات حاصل از سدهای بلندتر گزارش شده است .

نویسنده مقاله تاکید می نماید که علارغم اینکه امروزه با آگاهی از وقوع شکست تعداد خیلی معدود از سدها ی ساخته شده و آگاهی از روند کاهشی و رضایتبخش از خطرپذیری شکست سدها در ۲۰ سال گذشته مواجه ایم ، همچنان میبایست به آموزه ها و تجربیات آموزنده ای که از این وقایع به ما منتقل گردیده بنحو شایسته ای بهره برداری نموده تا حداقل ها را به حداقل ممکن برسانیم و هر چه بیشتر در جهت رفع نواقص سدهای موجود و سدهای آینده گام های مؤثر برداشته و بدین وسیله از سرمایه های ملی خود نگهداری و حمایت لازم را بعمل آورده و وظایف قانونی خود را برای نسل های امروز و فردای کشورمان بانجام برسانیم

۲- یافته های حاصل از مطالعات شکست سدها

یافته های حاصل از شکست سدها بشرح زیر می باشند :

الف – درصد شکست سدهای بزرگ

- ۲/۲ درصد شکسته شده مربوط به سدهای ساخته شده قبل از سالهای ۱۹۵۰ میلادی (۱۳۲۹ شمسی) بوده اند .
- درصد سدهای شکسته شده ساخته شده بعد از ۱۹۵۱ کمتر از ۰/۵ درصد بوده اند

ب ـ به بیان مطلق ، بیشترین شکست مربوط به سدهای کوچک است که در هر حال نسبت بزرگی از سدهای در حال بهره برداری می باشند .

ج ـ بیشتر شکست ها مربوط به سدهای ساخته شده جدید بوده اند . جالب توجه اینکه ۷۰ درصد از شکست ها در ۱۰ سال اول بهره برداری از سد رخ داده است و از این تعداد ، چندین سد دقیقا در همان سال اول بهره برداری شکسته شده اند .

د ـ بیشترین میزان شکست سدها در سدهائی رخ داده که در ۱۰ سال بین ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰ ساخته شده اند که قابل تفسیر است .

ذ ـ مسائل پی ، بیشترین عامل شکست در سدهای بتنی بوده است . این مسائل همراه با فرسایش درونی در پی (piping) و خلل در نیروی مقاومتی برشی در پی بوده اند (هر کدام ۲۱ درصد دخالت داشته اند)

ر ـ در سدهای خاکی و سنگریزه ای ،بیشترین عامل شکست ، لبریزی از سدها ، فرسایش در بدنه سد و ضعف در پی سد ها بوده اند .

س ـ در سدهای بنائی عامل اصلی شکست ،لبریزی از سد که همراه با فرسایش درونی در پی بوده است گزارش گردیده است .

ش ـ سدهای که بدلیل پدیدار شدن عارضه ای در سازه های وابسته شکسته شده اند . در این دسته از سدها بیشترین آمار مربوط به عدم کفایت ظرفیت آبگذری سرریز گزارش شده است [۱].

۳ – نتایج آنالیز یافته های موجود

۳-۱ ابعاد سد و ظرفیت مخزن

بیشتر شکست سدها مربوط به سدهای باارتفاع متوسط بوده است . حدود ۷۰ درصد از این سدها با ارتفاع کمتر از ۱۵ تا ۳۰ متر ارتفاع بوده که حجم مخزن آنها بیش از ۱ میلیون متر مکعب بوده است .(نمودار شماره ۱و۲) همانطوریکه در شکل نشان داده شده است بیشترین شکست مربوط به سدهای با ارتفاع کمتر می باشد . در شکل ۲ شکست سدهای با ظرفیت تا یک میلیارد مترمکعب نشان داده شده است که بیشترین تعداد مربوط به حجم های کمتر میباشد .

۳-۲ شکست سدها برحسب ارتفاع سد

نتایج نشان میدهند که حادثه شکست سدها بطور قابل ملاحظه ای در سدهای با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر بیشتر از سدهای با ارتفاع بیشتر از ۶۰ متر بوده است

(رجوع شود به شکل –۳)

۳-۳ شکست سدها برحسب نوع سد

در اشکال ٤ و ٥ و ٦ بیشترین تعداد سدهای شکسته شده را مربوط به سدهای خاکی نشان میدهد که در بخش های بعدی به آنها پرداخته خواهد شد .

۳-٤ تاثیر عامل کهولت سد در شکست سدها

شمار زیادی از سدهای جدید نیز مانند سدهای قدیم با شکست مواجه شده اند . در شکل۸، تعدادی سدهای ساخته شده در مدت ۱۰ سال را نشان میدهد . شکل -۸ گویای جزئیات بیشتری از شکست سدها که در یک دوره صفر تا ۱۰ ساله اتفاق افتاده است را نشان میدهد . همانطوریکه در شکل نشان داده شده بیشترین تعداد سدها با کمتر از یکسال بهره برداری با شکست مواجه بوده اند .

۳-۵ شکست سدهای بتنی

در سدهای بتنی همانطوریکه در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده ناهنجاریهای پیش آمده در فوندانسیون ها از قبیل فرسایش داخلی در پی و بدنبال آن ضعف در پایداری و مقاومت برشی آن از عمده عوامل مؤثر در شکست سدهای بتنی بوده اند لازم به ذکر است که چهار شکست پیش آمده در سدهای بتنی قوسی نظیر سد Malpasset ، Vaughn و Idbar بلحاظ شکست سازه ای بدنه نبوده ، بلکه بلحاظ وقوع ناهنجاری در پی ، فرسایش درونی ، نشست در پی و ضعف مقاومت برشی بوده است و یا مانند سد ، Moyie River ، بلحاظ لبریز شدن جریان سیلاب از تکیه گاههای سد بوده است یادآوری میشود که شکست این سد بطور کامل اتفاق نیافتاده و بخشهائی از آن تخریب گردیده است .

۳-٦ شکست سدهای خاکی

در سدهای خاکی عامل لبریز شدن از سد از جمله مهمترین عامل شکست این سدها محسوب میشود . همچنین فرسایش داخلی در بدنه نظیر پدیده پایپینگ (piping) نیز از عوامل مؤثر محسوب می گردند . شکل II لبریزی از سد را عامل مهم شکست این نوع سدها بیان مینماید .

۳-۷ شکست سدها بلحاظ عدم کارکرد سازه های جنبی آنها

در سدهائیکه سازه های جنبی باعث شکست آنها شده اند ، عدم کفایت سرریز از عمده ترین عامل مؤثر شکست بوده است . (رجوع شود به شکل ۱۲)

۳-۸ اقدامات انجام شده

در شکل ۱۳ اغلب اقدامات انجام شده بطور شماتیک نشان داده شده است براساس نتایج موجود ۵۰ سد از ۱٤۰ سد شکسته شده بحالت خود باقیمانده است . ۲٤ سد از ۱٤۰ سد با طرح جدید در محل دوباره ساخته شده اند . ۲۲ از ۱٤۰ سد با طرح قبلی دوباره ساخته شد و در ۱۸ سد از ۱٤۰ سد بازسازی نواحی خراب شده صورت پذیرفت .

۳-۹ شکست سدها در حین ساخت

بجز شکست فرازبند یا سد اصلی در اثر لبریز شدن ، حالات دیگری گزارش نشده است . این شکست ها می تواند تاخیرات زیادی در ساخت مجدد پروژه و هزین های اضافی گزافی را برای بازسازی به پروژه تحمیل نماید.

سد COCOROBOدر برزیل ، از نوع خاکی با ارتفاع ۳۳/۵ متر از بستر رودخانه و طول تاج ٦۳٤ متر با حجم مخزن ۲٤۳×۱۰^{٦} متر مکعب بلافاصله بعد از ساخت مصالح بالادست بدنه سد به حجم ۳۰۰۰۰۰ مترمکعب قبل از آبگیری لغزیده بطوریکه بهره برداری از سد امکانپذیر نبوده است .(۱۹٦۷ میلادی)

در سد MARMARIK در آمریکا ،از نوع خاکی با ارتفاع ٦٤ متر از بستر رودخانه و ۵۰۰ متر طول تاج ، حجم ۳۵×۱۰^{٦} مترمکعب حجم در ایام پایانی ساخت بدنه سد لغزشی قبل از آبگیری سد و ۱۰ تا ۱۲ متر نشست بدنه (که حدود ۳۰۰ متر از تاج را در بر میگیرد) بوقوع پیوست این شکست در شیب پائین دست شامل تکیه گاه راست تا عمق پی و سایر بدنه سد تا تراز پی گسترش یافت

. فعالیت پتانسیل زمین لغزش خیلی قدیمی در تکیه گاه چپ و اشباع هسته رسی بدنه سد را از جمله عوامل مهم این واقعه ایجاد دانسته اند .

سد GONCALVES در کشور برزیل ، از نوع خاکی و سنگریزه ای با ارتفاع ٤٠ متر از بستر رودخانه و ٣٤٠٠ متر طول تاج و حجم مخزن ۲٤٤۰×۱۰^{٦} متر مکعب با لغزش شیب بالادست سد ماههای پایانی ساختمان سد مواجه می شود .

سدهای دیگر از جمله CARSINGTON (انگلستان ١٩٨٤)سد MIRGENBACH (فرانسه ١٩٨٢) و سد TRONERAS (کلمبا ١٩٦٣) نیز از جمله سدهائی هستند که در حین ساخت با شکست مواجه شده لکن اطلاعات دقیقی از علل شکست این سدها در دست نیست .

٤- طبقه بندی علل شکست سدها

الف – سدهای بتنی شامل سد و پی آن

١- طراحی ناقص

١-١ نقص در طراحی پی سد شامل :

- عدم کفایت مطالعات اکتشافی در ساختگاه
- تغییر شکل و فرو نشست زمین پی سد
- مقاومت برشی
- نشست
- فرسایش داخلی در پی و در تکیه گاهها
- نیروهای کششی در پاشنه بالا دست
- سیستم آب بندی در پرده آب بند و سایر سیستمهای آن
- نشت در سیستم زهکشی

٢- کیفیت بتن

- مقاومت در مقابل یخ زدگی
- نفوذ پذیری
- کهولت

٣- وقوع پدیده های پیش بینی نشده و یا وقوع پدیده هائی با مقادیر غیر مجاز مانند

- زیر فشار
- لبریزی از بدنه سد و از تکیه گاهها

٤- ناهنجاری در رفتار سازه ای قوس (قوسها) شامل پی و تکیه گاههای ساخته شده (بلوکهای اطمینان).

٥- رفتار سازه ای سدهای پایه دار و وزنی شامل نیروهای تنشی فشاری (Tensile stress) .

ب - سدهای خاکی

١- طراحی ناقص

١-١ نقص در طراحی پی سد شامل :

- تغییر شکل و فرونشست زمین پی سد

- مقاومت برشی در پی
- نشست در پی
- فرسایش درونی پی piping
- فعالیت لغزش زمین های با پتانسیل لغزشهای قدیمی محدود سد

۲- مصالح خاکی بدنه سد و روش ساخت (منهای فیلترها و زهکش ها) شامل :

- مصالح رسی تورم زا
- مصالح یکنواخت ماسه و سیلت
- ضعف در تراکم مصالح

۳- موارد پیش بینی نشده یا پدیده های با مقادیر غیرمجاز شامل :

- افزایش در فشارهای هیدرواستاتیکی با رسوبگذاری در مخزن
- بارندگیهای تندو فرسایشی روی مصالح بدنه سد
- وقوع امواج در مخازن
- زلزله ها
- حفاریهای انفجاری قوی در نزدیکی بدنه سد
- لبریزی از بدنه سد
- شکست درشیروانی بالادست
- تاخیر در ساخت بدنه سد و اتمام پروژه در دوره های پیش بینی شده

٤- شکست بلحاظ رفتار سازه ای سد خاکی

- هسته نفوذ ناپذیر
- سیستم آب بندی سد
- مصالح نواحی Transition در بدنه سد
- حفاظت شیب بالادست سد و پائین دست
- اتصال بین بدنه خاکی و سازه های بتنی در مجاورت بدنه سد
- حرکت نامتقارن بدنه شامل ترک ، ، شکست هیدرو لیکی بدنه سازه و ...
- نشست های پیش بینی نشده در بدنه که موجب ترک میشوند
- نشت آب
- پدیده piping
- پدیده روانگرانی در پی
- لغزش در شیروانیهای بالادست و پائین دست

ج ـ سازه های خروجی وابسته به سد

۱- نقص در طراحی مجاری انتقال آب و تجهیزات و اجراء آن شامل :

- نقص در پی (در صورتیکه مشخصات پی این سازه ها ،پی سد متفاوت باشند) شامل : تغییر شکل و حرکت زمین پی و فرسایش در پی
- بلحاظ خرابی در پوشش فلزی یا بتنی مجاری انتقال آب
- بلحاظ عدم مقاومت کافی تجهیزات مکانیکی
- بلحاظ رفتار سازه ای شامل :
- رفتار سازه ای سرریز
- عدم کفایت ظرفیت سرریز
- فرسایش غیر مجاز در پایاب سرریز و
- نقص در طراحی سرریز
- ایجاد امواج عرضی جریان روی سرریز (شوت و ورودی)
- جریان با رسوبات همراه با کنده های بزرگ درخت باشد

چ ـ بلحاظ نگهداری ، تجهیزات تخلیه سیلاب و

ح ـ مخازن سدها که عمدتا لغزش زمین در حریم مخازن موجبات اصلی عامل مخرب را فراهم کرده اند .

۵ – نتیجه گیری

از مجموع سدهای شکسته شده که هر گـروه به نوعی به عوامل و فاکتورهای مؤثر مرتبط بوده اند درسهای آموزنده کسب گردیده است .

استفاده از آمار و ارقام سدهای شکسته شده و تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر در شکست نتایج بشرح زیر را حاصل نموده اند :

۱- به طراحی و مطالعات میبایست توجه لازم نمود . بودجه کافی در اختیار کارفرما و مشاور قرار گرفته شود تا برای سدهای با ارتفاع کمتر (کمتر از ۳۰ متر) نیز مطابق استانداردها و ضوابط لازم تحقیقات و اکتشافات ضروری صورت پذیرفته و مانند سدهای باند تر از ٦۰ متر کلیه موارد مطالعاتی بطور دقیق کندوکاو گردد .

۲- آبگیری از سدها میبایست مطابق استانداردها و دستورالعمل های مشاور صورت پذیرد . بخش اعظم شکست سدها در سالهای اول تا دهم دوره بهره برداری اتفاق افتاده است .

۳- بهره برداری صحیح و نصب سیستم های هشدار دهنده در بالادست و پائین دست سدها الزامی است

٤- تحلیل های اقتصادی و فنی بنحوی در طرحها صورت پذیرد که مطابق برنامه زمانبندی اجرا شوند تا بدینطریق از ریسک کمتر در مقابل وقوع سیلاب در امان باشد .

۵- به سدهای خاکی بیشتر توجه شود . در زمان مطالعات ،طراحی ، طرح سازه های وابسته سد و بهره برداری از سد توجه به ضوابط و معیارهای بین المللی شده تا خطر تخریب این نوع سازه ها کمتر شود .

٦- به سدهای کوتاه در بهره برداری و نگهداری توجه لازم مبذول گردد و بر اساس شرایط طرح تمهیدات لازم در طرح گنجانیده شود .

٦- مراجع :

1- DAM FAILURES STATISTICAL ANALYSIS ICOLD BUL.NO.99

2- DAMS LESS THAN THIRTY METERS HIGH , ICOLD BUL .NO.109

3- DAM – BREAK FLOOD ANALYSIS ICOLD , BUL.NO.111

CLASSIFICATION OF CAUSES DAM FAILURES

(Used codes)

1. Concrete dams including foundations

1.0 Inadequate design
1.1 Due to foundations
1.1.1 Inadequacy of site investigation
1.1.2 Deformation and land subsidence
1.1.3 Shear strength
1.1.4 Seepage
1.1.5 Internal erosion
1.1.5.1 In foundation
1.1.5.2 In abutment
1.1.8 Tensile stresses at the upstream toe
1.1.11 Grout curtains and other watertight systems
1.1.14 Leak of drainage system

1.2 Due to concrete
1.2.3 Resistance to freezing and thawing
1.2.8 Permeability
1.2.13 Ageing of concrete

1.3 Due to unforeseen actions or to actions of exceptional magnitude (as a principle when the case dose not fall under other headings)
1.3.2 Uplift
1.3.7 Overtopping
1.3.7.2 of abutment
1.3.7.3 of main section
1.3.8 Deterioration of concrete-rock interface

1.4 Due to structural behavior of the arch and multiple arch dams (Including the Construction period)
1.4.5 Artificial abutments and foundation

1.5 Due to structural behavior of gravity and buttress dams
1.5.2 Tensile stresses
1.5.6 Facings

2. Embankment dams, including foundations

2.0 Inadequate design
2.1 Due to foundations
2.1.2 Deformation and land subsidence
2.1.3 Shear strength
2.1.4 Seepage
2.1.5 Internal erosion (piping)
2.1.12 Strengthening treatment
2.1.17 Sliding of ancient landslide

2.2 Due to embankment materials and method of construction, excluding filters and Drains (see 2.4)
2.2.3 Dispersive clays

2.2.4 Silts and fine uniform sands
2.2.12 Placing
2.2.13 Compaction

2.3 Due to unforeseen actions or to actions of exceptional magnitude (as a principle , When the case dose not fall under headings)
2.3.1 Hydrostatic pressure and pressure due to silt accumulation (including Pressure and impact of ice in the reservoir)
2.3.4 Precipitation
2.3.5 Waves in the reservoir
2.3.7 Earthquakes (natural or triggered)
2.3.7.1 Strong blasting nearby
2.3.8 Overtopping
2.3.9 Rupture of dam upstream
2.3.10 Delay in construction

2.4 Due to structural behavior of the dam
2.4.2 impervious core
2.4.3 other watertight systems – including steel, wood and concrete
2.4.4 Transition zones
2.4.9 Bonding between concrete (masonry, steel, …) structures and adjoining embankments
2.4.10 Differential movement (including load transfer, cracking, arching Hydraulic fracture)
2.4.10.1 unexpected settlement in the body producing cracks
2.4.11 Seepage
2.4.12 Internal erosion (piping)
2.4.13 Liquefaction
2.4.14 Upstream slips
2.4.15 Downstream slips
2.4.16 Rupture or exceptional flow of conduits inside the body of the dam

2.6 Due to maintenance
2.6.6 Sam cut to prevent overtopping

3. Masonry dams including foundations

3.1 Due to foundations
3.1.3 Shear strength
3.1.4 Seepage
3.1.5 Internal erosion
3.2 Due to mortar
3.2.9 Masonry construction (including order of placement)
3.4 Due to unforeseen actions or to actions of exceptional magnitude (as a Principle, when the case dose not fall under other headings)
3.4.2 Uplift
3.4.6 Overtopping

4. Appurtenant works

4.0 Inadequate design
4.0.1 Tunnels and canals
4.1 Due to foundations (when these ones do not have the same characteristics as

foundations)
4.1.2 Deformation and land subsidence
4.1.5 Internal erosion
4.4 Due to steel and other materials
4.4.4 Mechanical strength
4.5 Due to unforeseen actions or to actions of exceptional magnitude (as a Principle, when the case dose not falls under other headings)
4.5.6 Delay in construction at the time of flood
4.6 Due to structural behavior
4.6.1 Structural behavior of spillways
4.6.2 insufficient capacity of spillway
4.6.3 Erosion of spillway basement
4.6.4 inadequate design of spillway
4.6.4.2 of canal or tunnel
4.7 Due to water flow, water level and water-borne debris (including Construction periods)
4.7.1 Excessive rates of flow
4.7.4 Waves
4.7.8 Solid materials carried by water flow
4.7.9 Discharge of floating materials
4.7.10 Piping outside inserted conduit
4.9 Due to operation
4.9.2 inadequate instructions for operating the discharge equipment
4.11 Due to maintenance
4.11.6 Malfunction of discharge equipment

5. Reservoirs
5.1 Slope sliding

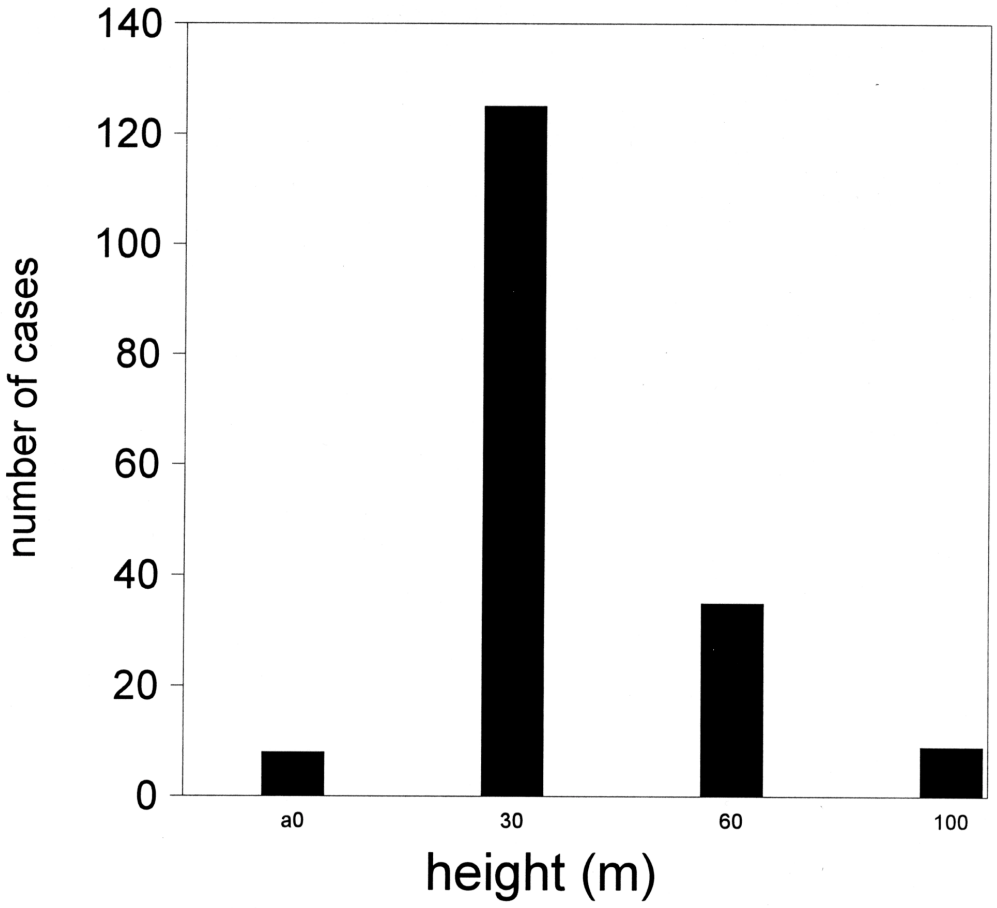

Fig.1

Failures by height of dams

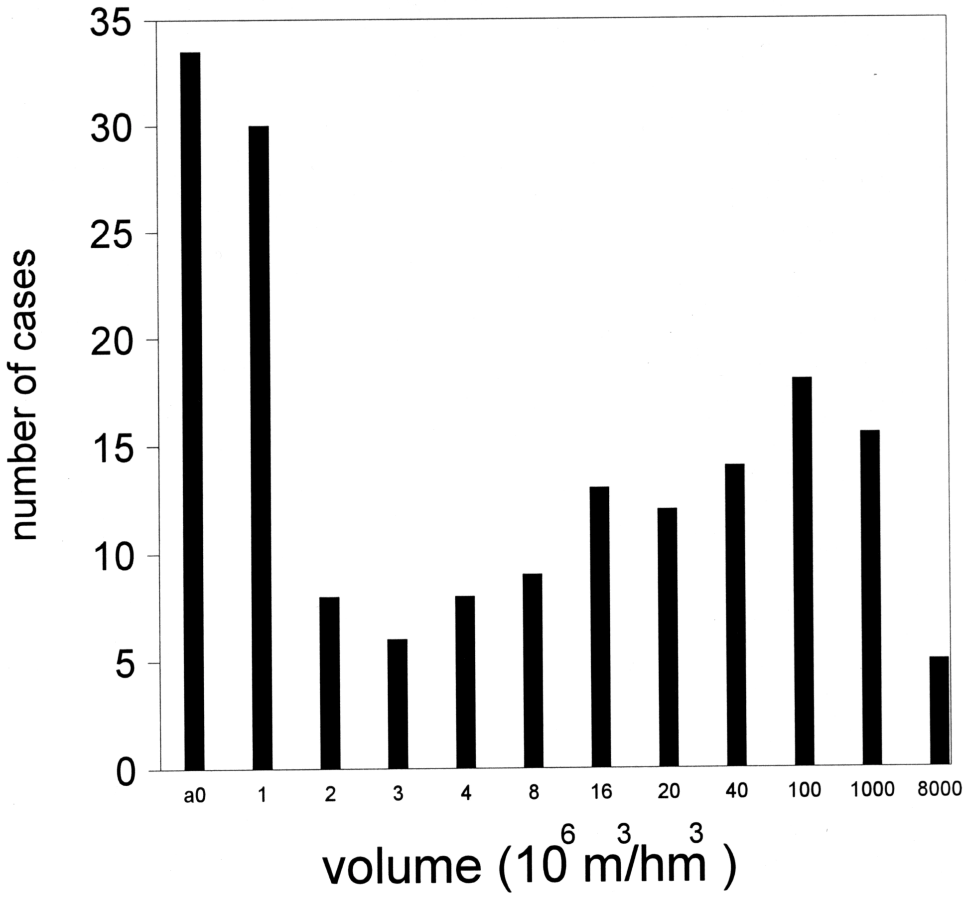

Fig.2

Failures by reservoir capacity

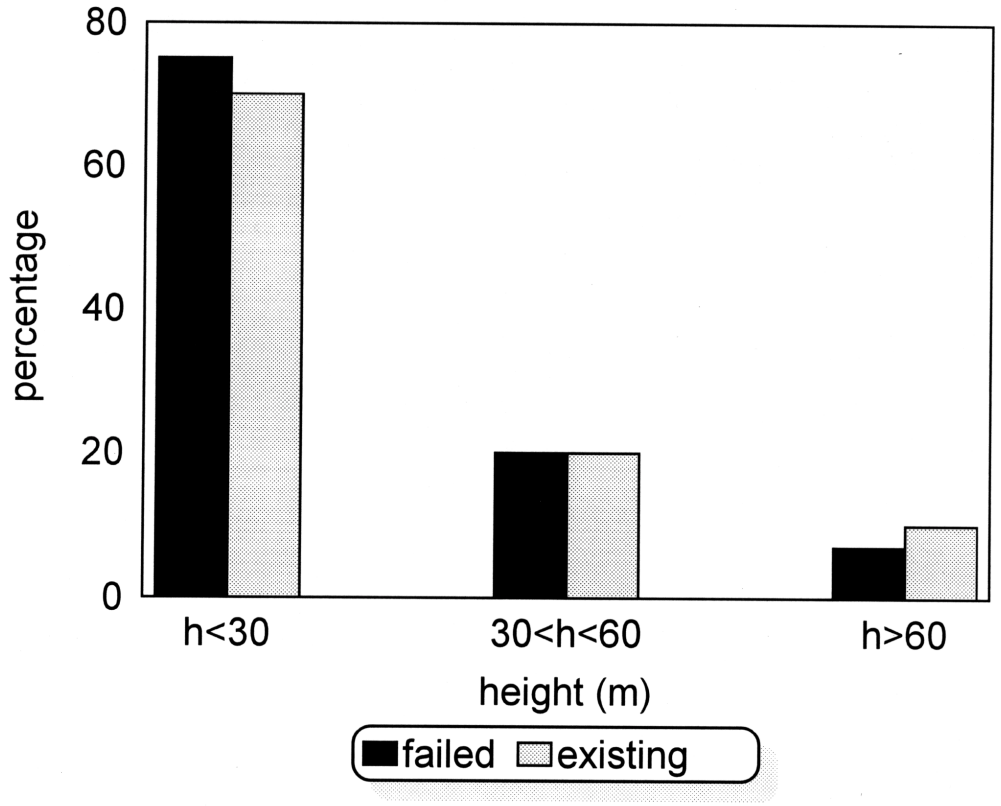

Fig.3

Comparison of ratios

$$\frac{\text{failed dams of height H}}{\text{total failed dams}} \quad \text{and} \quad \frac{\text{existing dams of height H}}{\text{total existing dams}}$$

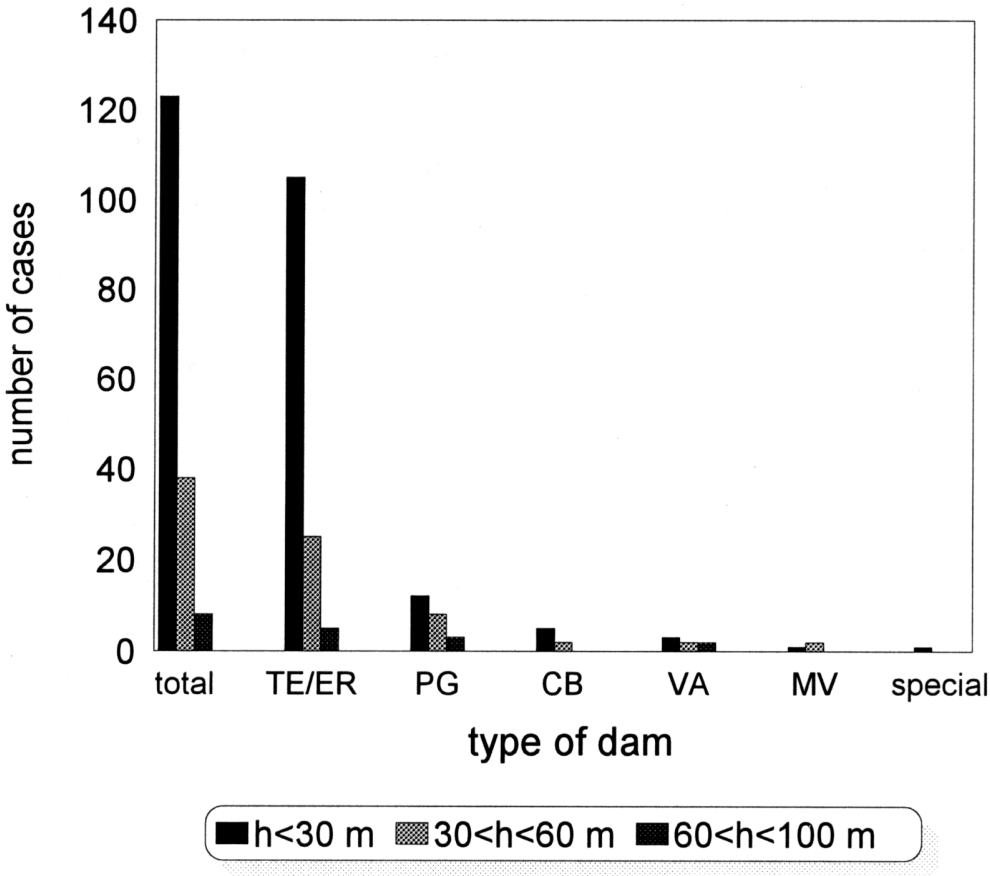

Fig.4

Number of failures by type
and height of dams

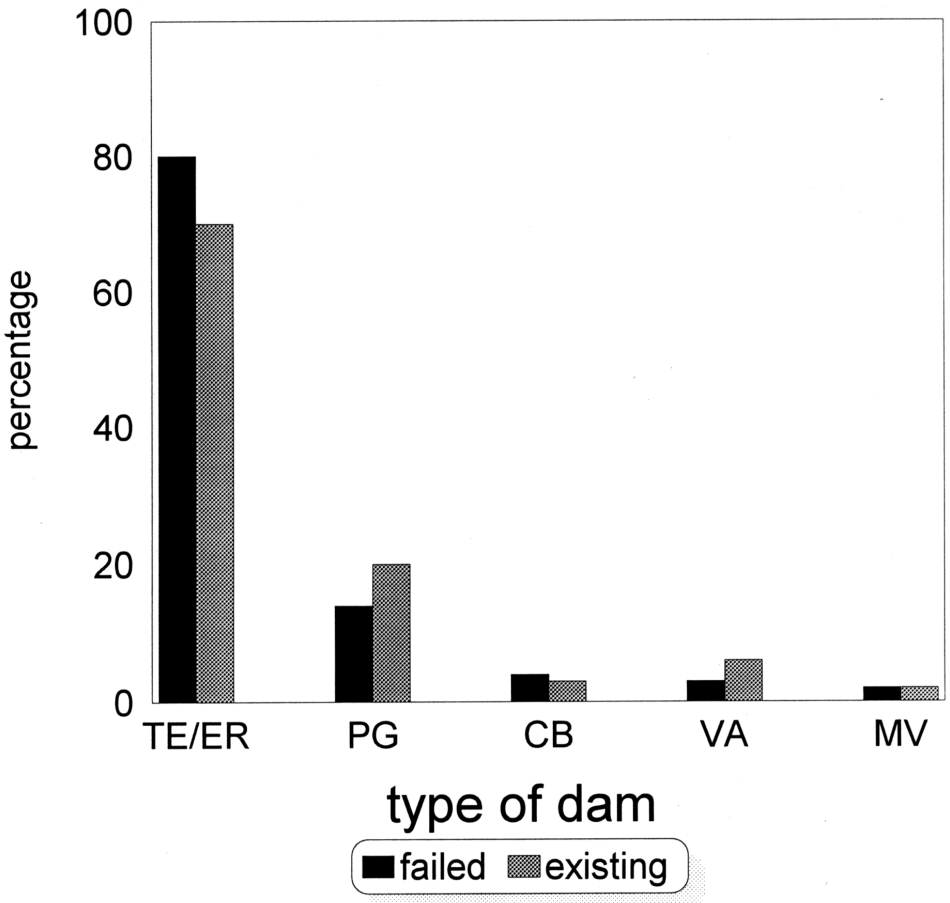

Fig.5

Comparison of ratios

$$\frac{\text{failed dams of type T}}{\text{total failed dams}} \quad \text{and} \quad \frac{\text{existing dams of type T}}{\text{total existing dams}}$$

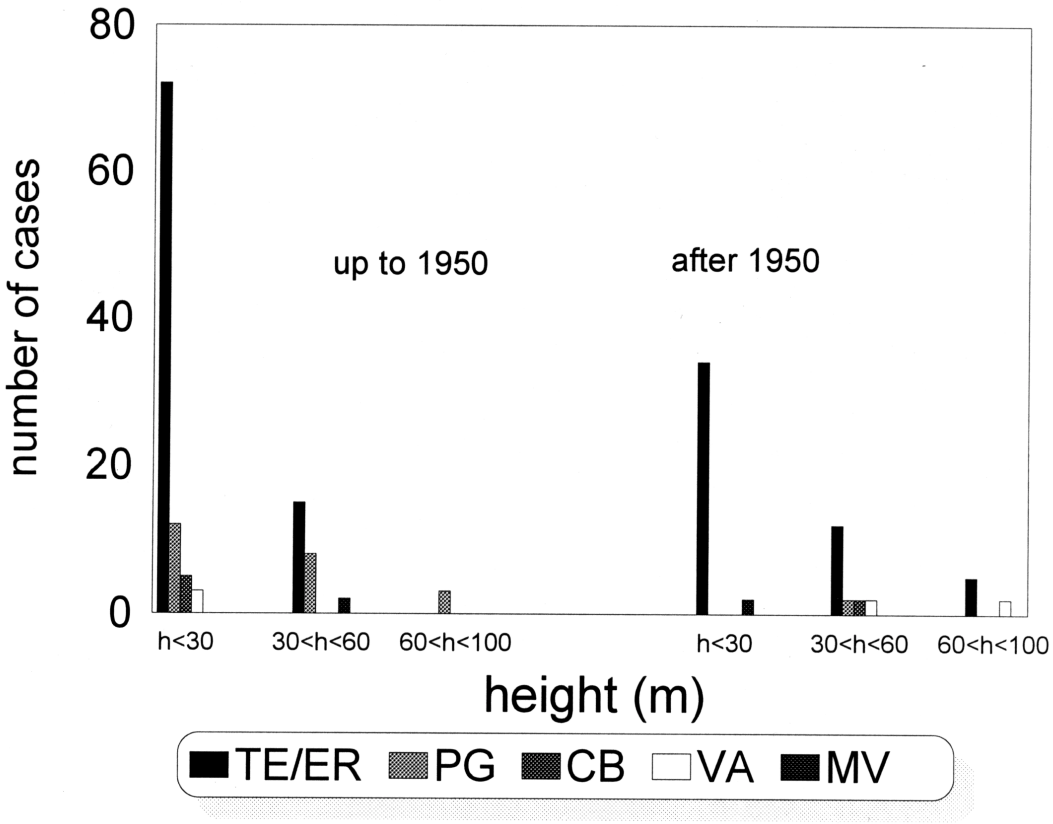

Fig.6

Number of failures by type, height and year of construction

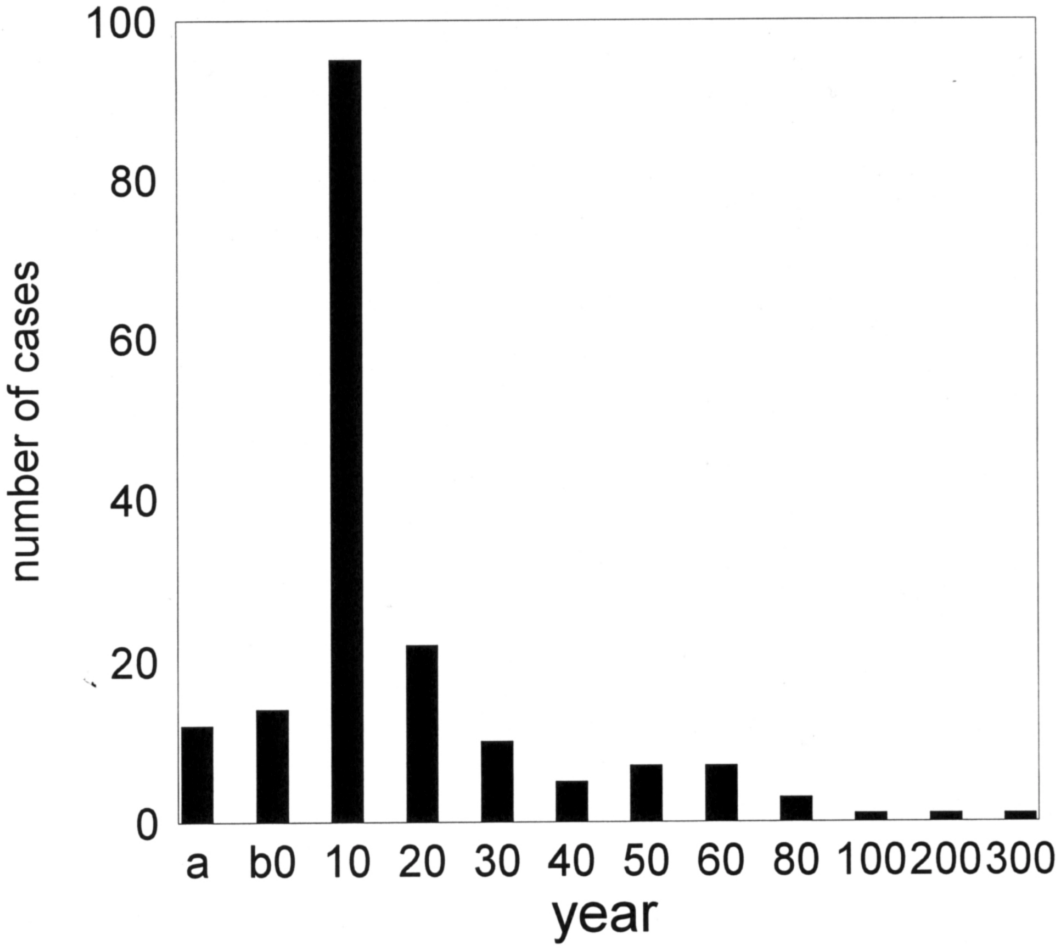

Fig.7

Failures by age of failed dams

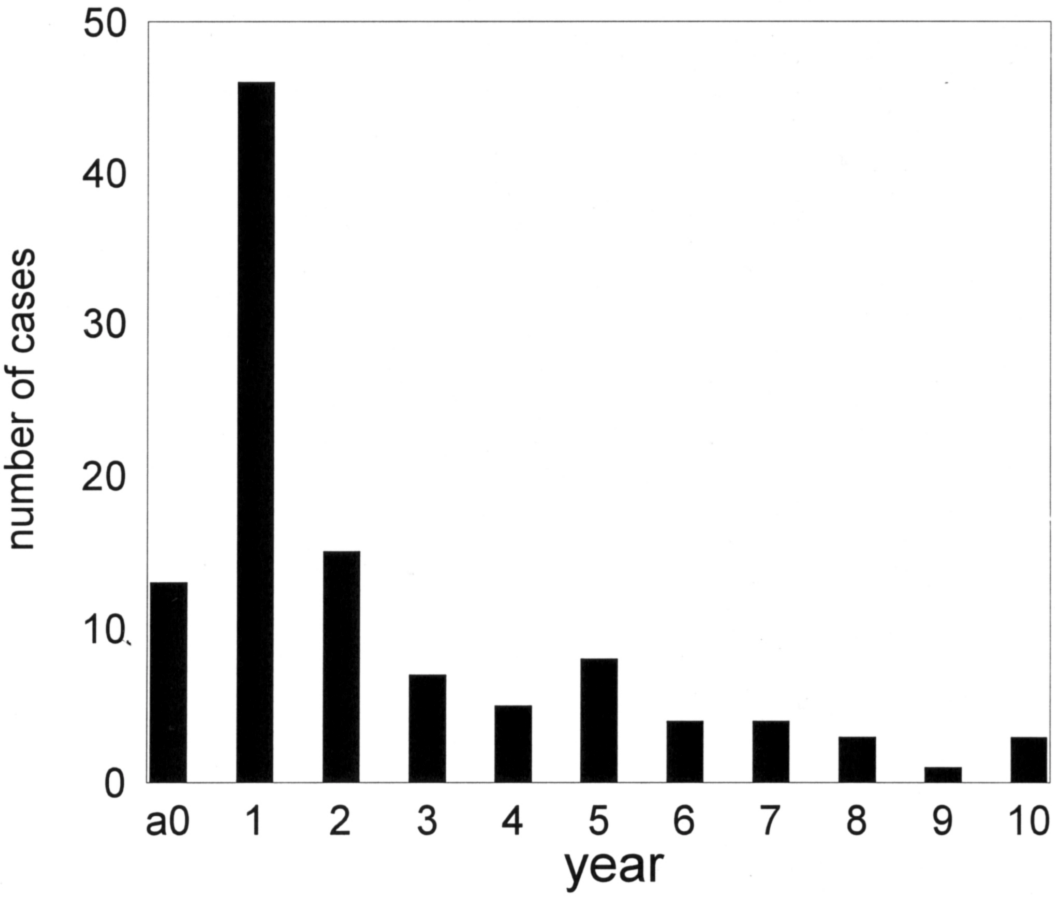

Fig.8

Failures by age of failed dams
(less than 10 years old)

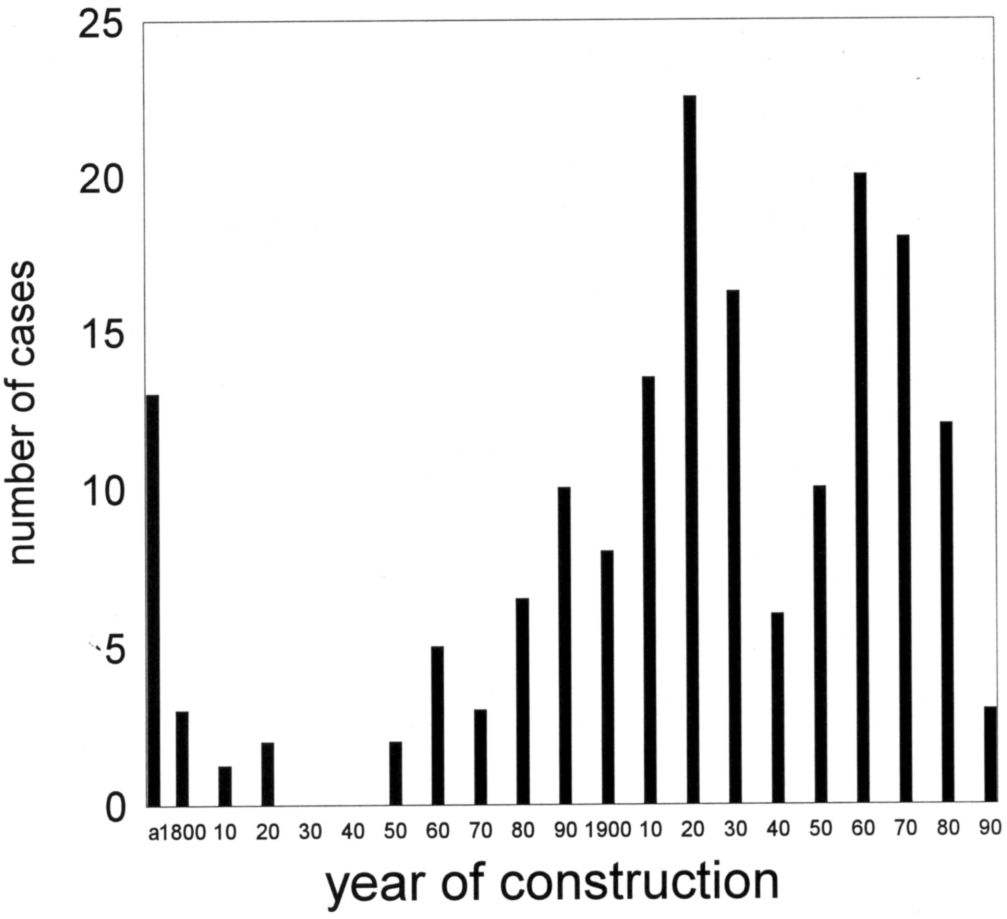

Fig.9

Failures by year of construction

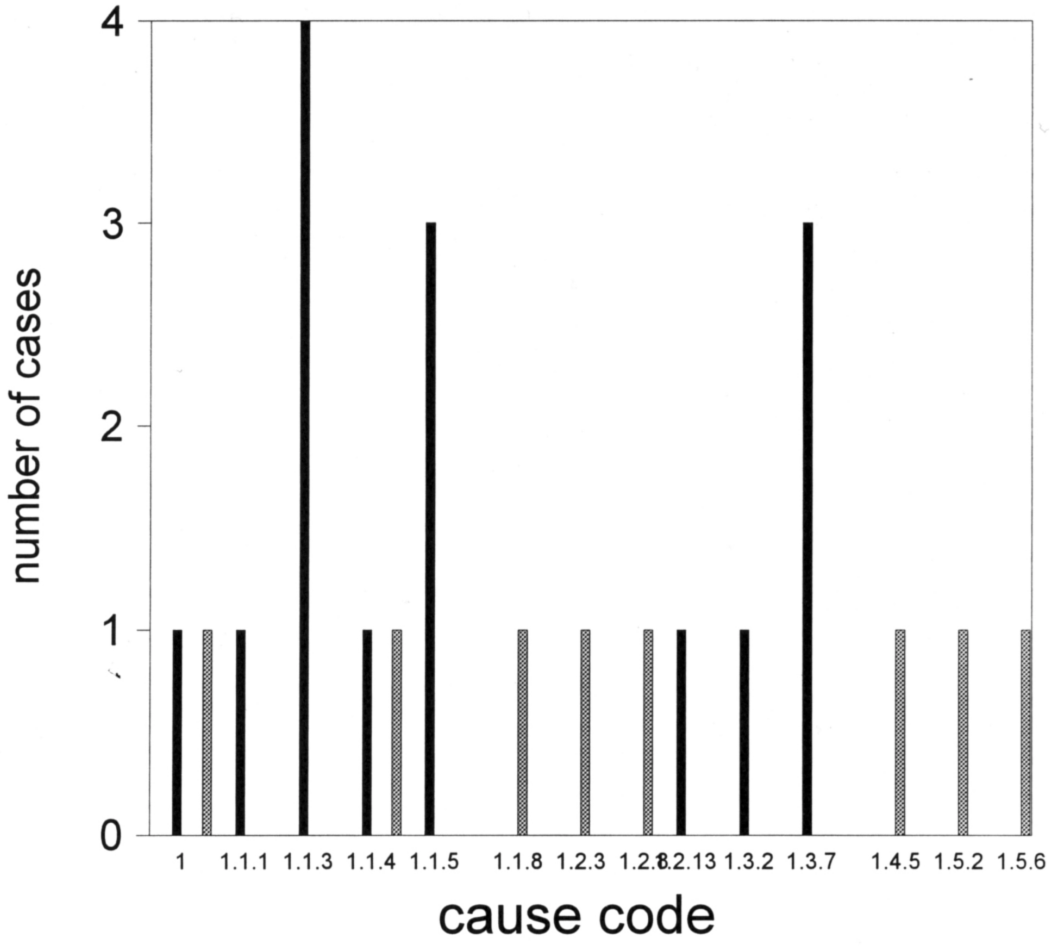

Fig.10

Causes of failure in concrete dams

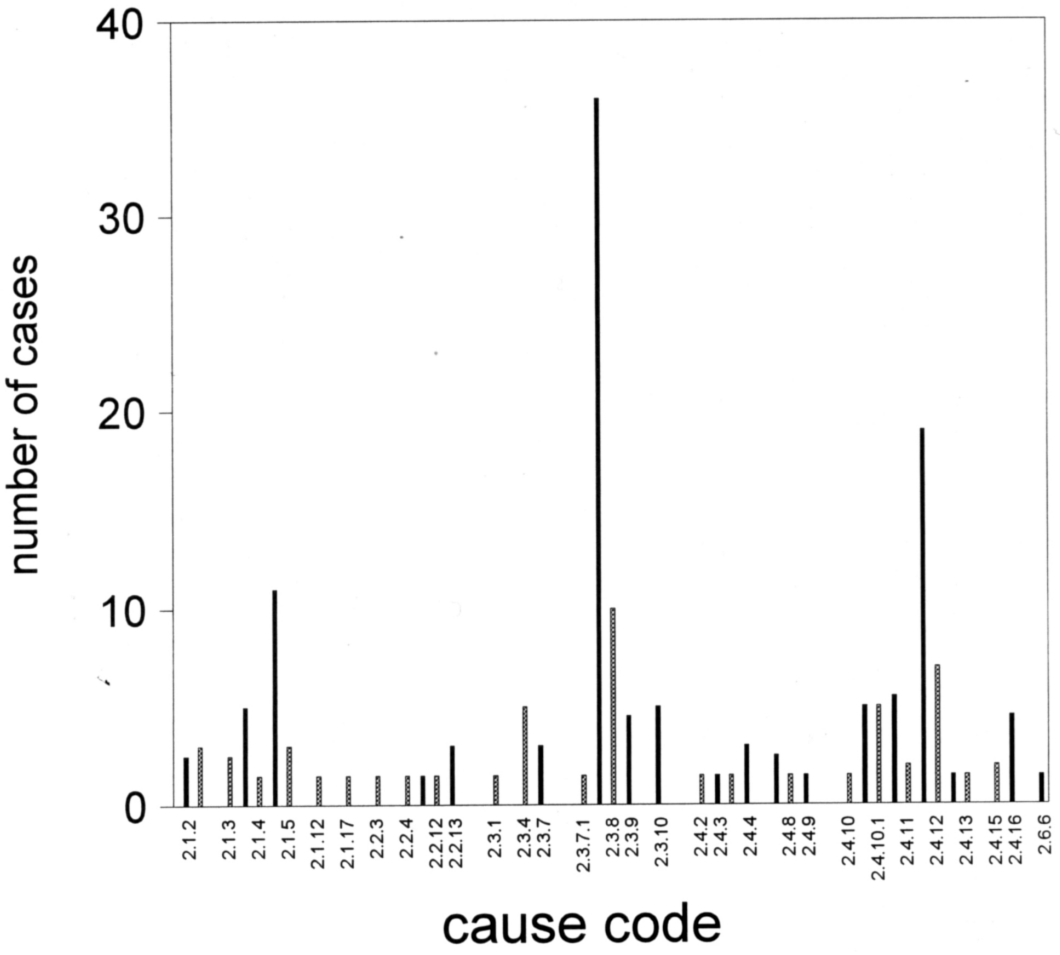

Fig.11

Causes of failure in embankment dams

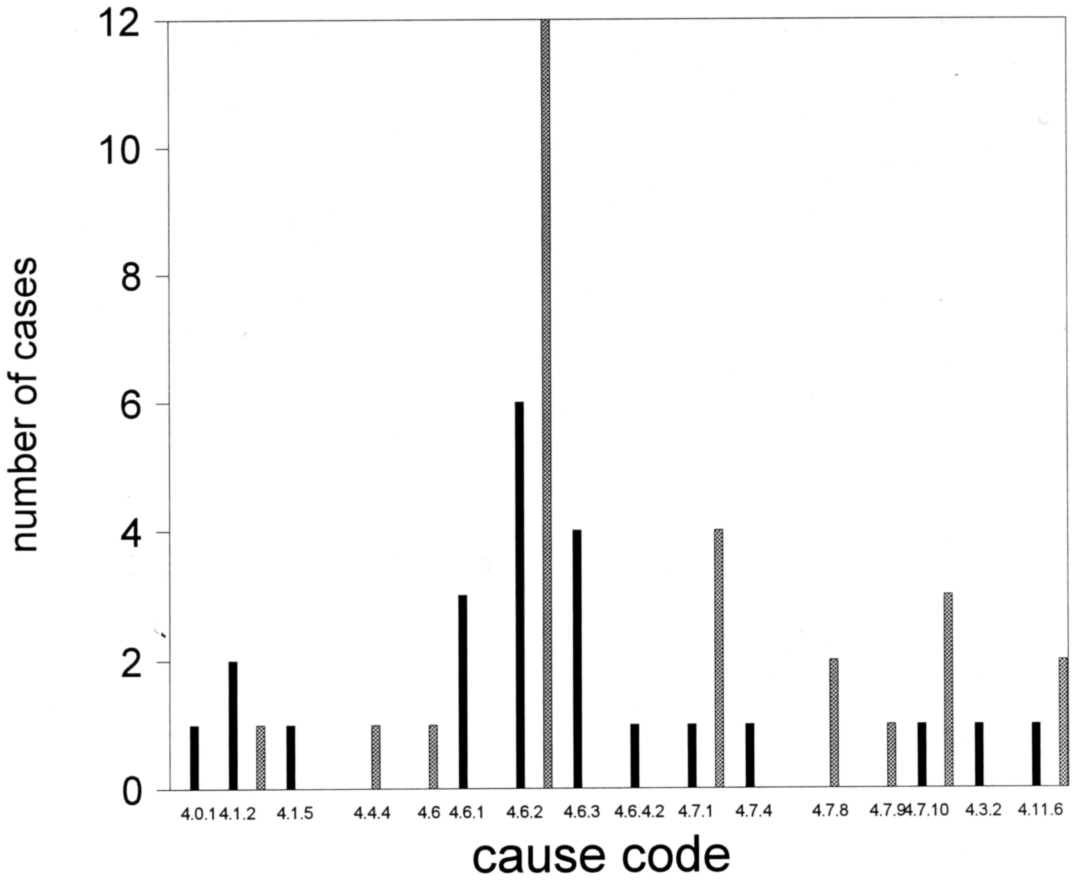

Fig.12

Causes of failure in appurtenant works

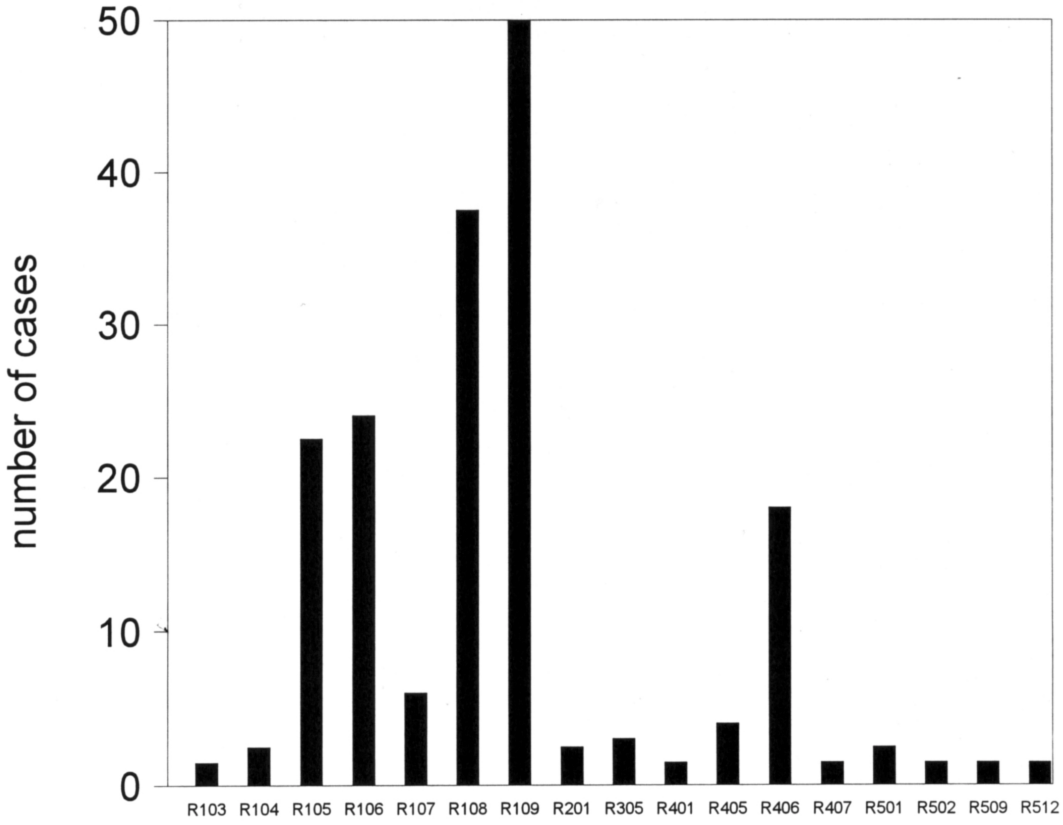

Fig.13

Remedial Measures