

報告

第 29 回 防災セミナー 開催報告
 続く大規模災害から学ぶ

コンクリート建造物の耐震設計変遷と
 平成 28 年 8 月一連台風の中小河川災害から学ぶ

渡 辺 洋 一

1. はじめに

防災委員会では、技術者(行政・民間)および一般市民を対象とした防災セミナーを、毎年開催しています。本稿は、2017 年 10 月 10 日(火)に「続く大規模災害から学ぶ」と題して開催した第 29 回防災セミナーの要点を報告するものです(開催状況は巻頭グラビアをご参照下さい)。

記憶に新しいところですが、2016 年 4 月に発生した熊本地震では多くの死者や住宅をはじめとする建物被害により甚大な災害に至りました。防災委員会では、北海道の地震を含む多様な災害による被害を最小限に食い止めるための防災・減災対策を考える機会として本セミナーを開催しております。

講演者 1 人目は、長岡技術科学大学名誉教授であり、日本コンクリート工学会の会長を務められている丸山久一先生です。土木学会のコンクリート標準示方書を編纂されたご経験から耐震設計法や耐震技術の変遷について、また阪神淡路大震災(1995 年)や新潟県中越地震(2004 年)の被災経験を踏まえた耐震設計法と被災事例についてご講演いただきました。

講演者 2 人目は、北海道十勝総合振興局帯広建設管理部災害復旧推進室長の石黒元昭様です。平成 28(2016)年 8 月の 4 台風によって北海道内は大きく被災しました。発災後、中小河川に特化した被災状況の報告が少ないことに着目して、十勝地方の中小河川災害の状況と、復旧状況についてご講演いただきました。以下、講演の概要を報告します。

2. 講演-1 丸山 久一 様

「コンクリート建造物の耐震設計法と
 中越地震及び東北地方太平洋沖地震」

(1)耐震設計法の変遷

1996 年に発行されたコンクリート標準示方書は、当初 1995 年に発行される予定でした。しかし 1995 年 1 月に阪神淡路大震災(兵庫県南部地震)が発生し、我が国の建造物安全神話は根底から覆される事態となりました。そして、この大地震による教訓を取り入れるため、示方書の発行を 1 年先送りしたという経緯があります。筆者はコンクリート工学が専門ではありませんが、我が国のコンクリート建造物の耐震設計法は、ここから大きく進展したと記憶しております。また、丸山先生は 2002 年のコンクリート標準示方書改定では、耐震設計編の委員長として携わっておられ、その当時の考え方は、現在にも生きていとおっしゃっておりました。

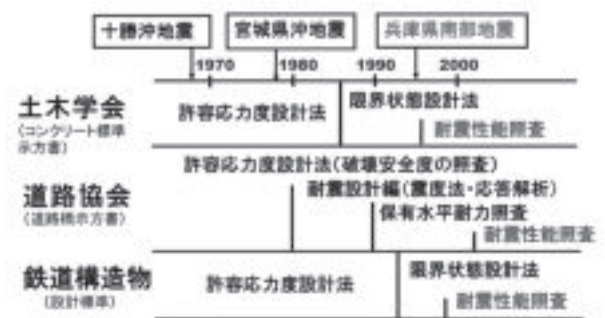


図-1 耐震設計法の変遷

図-1 は、耐震設計法の変遷について示したものです。耐震設計法は、「許容応力度設計法」、「限界状態設計法」、そしてその発展系として終局時までのコンクリートの挙動を連続的に計算できる「耐震性能照査」へと変遷してきました。この流れは、建造物の耐荷性能をどこまで予測できるかという構造解析技術の進展と大きく関係しています。

(2) 耐震設計法の枠組みと耐震技術の変遷

①外力の評価

耐震設計法の枠組みは、①外力の評価、②構造物の耐力の評価、③構造細目に分類できます。外力をどう評価するかということは、振動学的には質量とばねと地盤を揺ると、どのように力や変形が進むかということであり、この「変形に相当する力」が働いていると考えることで評価できます(図-2)。

2.1 耐震技術の変遷：外力の評価

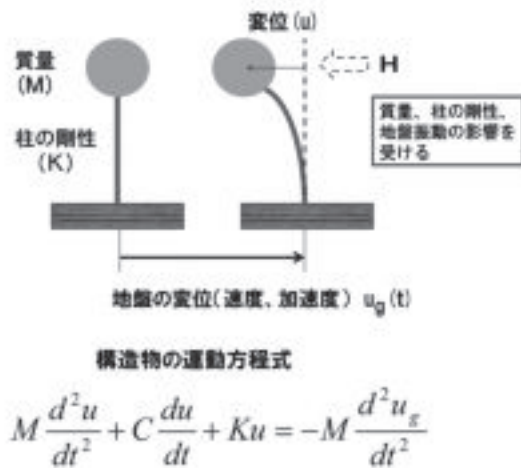


図-2 外力の評価

②構造物の耐力の評価

一方、構造物の耐力の評価とは、「どの荷重レベルでどのように変形が進むか」ということであり、多くの実験を重ねた結果、一定の技術レベルに達しました。一例ですが、軸方向鉄筋の配筋量が同じ場合、帯鉄筋量が少ないと、終局時には図-3の右上にあるような斜めせん断ひび割れによって破壊します。このようなせん断破壊を防ぐことが、設計の基本となります。

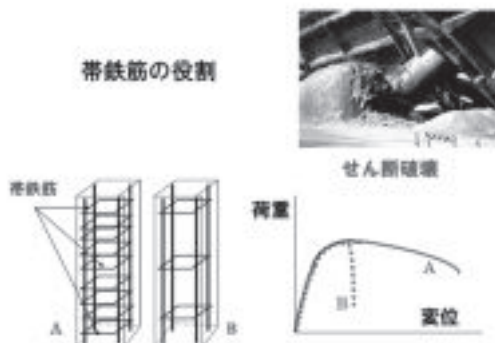


図-3 帯鉄筋の役割

せん断破壊を防ぐことによって図-3のAのよう

な荷重変位曲線となり、構造物の急激な破壊を防ぐことができます。

鉄筋コンクリート構造物が図-3のAのような荷重-変位曲線を示す場合においても、終局変位時にどのような挙動を示すかを知ることは重要です。応力がピークを越えて終局状態になった場合、一度伸びた鉄筋が元に戻ろうとするので、つかい棒のような状態になり、鉄筋は曲がらざるを得なくなります。その時に鉄筋が周りのコンクリートを弾き飛ばすことによって、コンクリートの断面の一部が欠損して、図-4のように逆S字のような荷重-変位曲線になります。

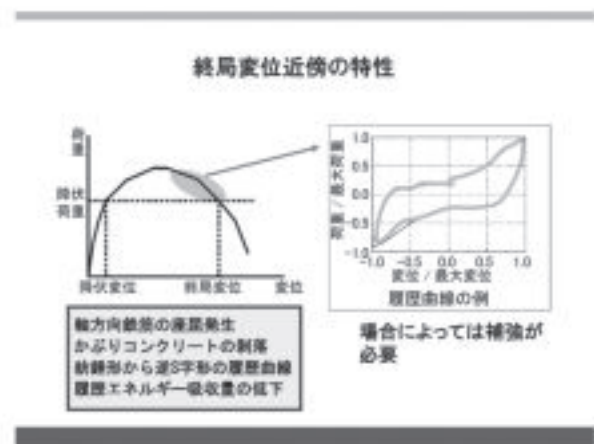


図-4 終局変位近傍の特性

コンクリートの一部が欠損すると構造物は急激に破壊するため、ひびの入ったコンクリートが飛び散るのを防ぐことは、設計の重要なポイントになります。そのため帯鉄筋は、スパイラル筋が一番良いと考えていますが、さらに良いのは鋼板で巻いて鋼板の接合部が切れないように溶接もしくはかみ合うような接合方法とすることです。このように、鋼板が座屈してもコンクリートが飛び出ないようにすれば、耐震性能は各段に向上します。

③構造物のモデル化

荷重変形曲線が追跡できるようになったあとは、構造物のモデル化が必要になります。土木学会は、2種類のモデルを提案しています(図-5)。一つは、鉄筋コンクリートを有限の要素に分割して解析する有限要素法です。もう一つは、従来から用いられてきた質点とばねのモデルです。ばねには、応力ひずみ曲線から得られた荷重変形特性を反映します。

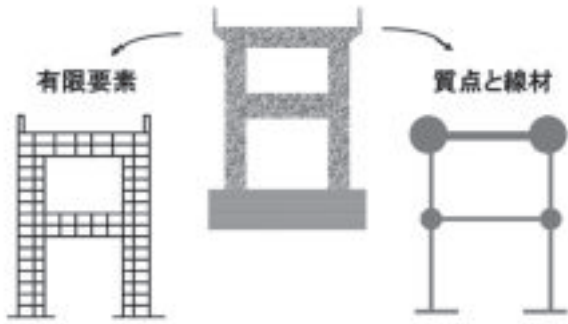


図-5 構造物のモデル化

④耐震補強

耐震補強は、鋼板巻立て、RC 巻立て、FRP 巻立てなどがありますが、構造物のモデル化と同様の手法で解析することができます。耐震補強することでせん断破壊を防ぎ、数値解析で評価することが望ましいと考えます。図-6 に補強の一例として、上越新幹線の橋脚を示します。中越地震の時に写真の位置より少し先で上越新幹線は脱線しましたが、消雪パイプの排水溝にはまって新幹線は横転しませんでした。またトンネル内部のコンクリートは一部落下していましたが、新幹線が通過した後だったので直接的な被害はありませんでした。図-6 は、鋼板巻立てで補強したところであり、この補強によって橋脚の損傷は全くありませんでした。



図-6 鋼板巻立てによる補強(上越新幹線)

(3)耐震設計法と地震被災事例

①外力レベルと耐震性能

耐震設計における外力のレベルは、日本では土木構造物、建築構造物ともに2段階、つまり荷重のレベルを二つ考えるというのが共通認識となっています。レベル1地震動というのは、約100年に1回以上経験する地震で、震度は4～5程度を想定し

ています。レベル2地震動は、「極めて稀であるが非常に強い地震動」と定義されており、発生確率は1,000年オーダーとなります。次に構造物の耐震性能は3段階を考えていて、耐震性能1は「地震後に多少の点検は要るが、何も手を加えなくてもそのまま使える状態であること」とし、耐震性能2は「多少の補修・補強をすれば使用可能になるもの」で、耐震性能3は「急激に壊れて人命が損傷しないようにするもので、再使用は必ずしも考慮しなくてもよい」という考え方です(図-7)。レベル2地震動はかなり大きい地震なので、構造物によって耐震性能2か3を選択することが多くなります。

3.1 耐震設計法(耐震性能照査:土木学会)

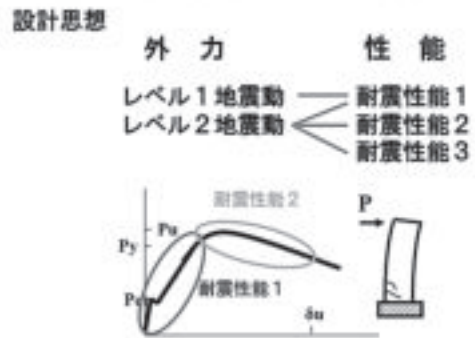


図-7 耐震設計法の設計思想

②耐震設計の原則

耐震設計の原則は、せん断破壊を防止することです。せん断破壊しなければ、変形が大きくても多少の補強で再度使えるようになります。そのためには部材の靱性を大きくすることが重要です。先生は、2002年の改定版のときに耐震照査に用いる標準地震動を提案されています。この地震波を用いて阪神大震災の時に被災した建造物をモデル化して解析を行い、その妥当性を検証しておられます。加えてコンクリートと鉄筋が一体となって挙動するために、鉄筋コンクリートの構造細目が重要となります。

- ☆ 主コンクリート部材のせん断破壊を防ぐ。(せん断耐力を高く設定する)
- ☆ コンクリート部材の靱性率を大きくする。(圧縮側でひび割れたコンクリート片を適切に拘束する。)
- ☆ 構造細目(鉄筋の継手、定着、配置間隔等)

図-8 耐震設計の原則

③構造細目

構造細目の一例として軸方向鉄筋を挙げると、従来静的な応力を満足すれば途中定着していましたが、現在道路橋示方書では途中定着は行っていません。途中定着は、温度応力や乾燥収縮によってもひびが入りやすいことが言われています。帯鉄筋は、しっかりフックをつけて定着するようにするほか、フレア溶接でしっかりつなぐ、ひびが入っても外れない構造とする、これは阪神大震災の教訓です。

④地震被災例

図-9は、耐震設計に影響を与えた大きな地震の一覧です。

コンクリート構造物の設計に影響を与えた地震	
1923年	関東地震(関東大震災)
1968年	十勝沖地震
1994年	ノースリッジ地震(米国)
1995年	兵庫県南部地震(阪神大震災)
(2004年)	新潟県中越地震)
(2007年)	新潟県中越沖地震)
(2011年)	東日本大震災・・・津波被害大)

図-9 構造物の設計に影響を与えた地震

関東大震災は当時木造家屋が多かったため、火事で亡くなった人が多いという特徴があります。十勝沖地震では、函館大学の1階がせん断破壊で倒壊しています。これを教訓に建築学会が検討を進め、8年後の1976年に新耐震設計法が建設省から出されています。この設計法に従った建築物は、阪神淡路大震災でもあまり被害が出ていません。阪神淡路大震災の1年前に米国でノースリッジ地震が発生し、高速道路が倒壊しています。この時日本の技術者の中には、日本では起こらない事象だろうという人もいたため、1年後に阪神淡路大震災で橋梁が倒壊した際、過信は禁物であることをしみじみ感じられたそうです。阪神淡路大震災は直下型で、強度が強くなおかつ構造物が壊れやすい地震周期であったために、コンクリート構造物や高架橋がせん断破壊した象徴的な災害となりました(図-10)。新潟県中越地震では、丸山先生自身も被災され、2日ほど避難所生活をされたそうです。当時丸山先生はコンクリート委員会の委員長をされていたので、被災

している現場から連絡して調査団を派遣してもらったとのことです。

調査の結果上越新幹線は、橋梁の柱が曲げ破壊していましたが被害は軽微で、補強済みの橋脚は全く被害が見られなかったとのことです。東日本大震災では津波の被害が甚大でしたが、海洋型地震であったこともあり、橋梁の支承以外のコンクリート構造物の被害は少ないものでした。阪神淡路大震災以降の設計のものはほとんど被害がなく、それ以前の設計では多少の被害が発生しています。鉄道・道路構造物は、耐震補強された構造物には被害は見られず、補強されていなかったものに被害が発生していました。



図-10 阪神高速道路3号神戸線の倒壊

(4)本講演で学んだこと

本講演において学んだことを以下に要約します。コンクリート構造物の解析技術の進展にともなう、耐震設計法が進化してきたこと、それによって現在では構造物の破壊に至る全過程が解析可能になっていること。また耐震設計法では、a)人命にかかわる構造物の急激な破壊をさせないためにせん断破壊を防止すること、b)必要な帯鉄筋の配置や鋼板巻立てなどのせん断補強対策をしっかり行うこと、c)そのためには構造細目が重要になること、の3点を学びました。さらに阪神淡路大震災によって失われた信頼を取り戻すべく、先生がコンクリート標準示方書の改定などにご尽力されたこと、最終的に耐震補強された構造物やその後設計された構造物が、新潟県中越地震や東日本大震災においても安全性が確認されたことがとても印象深い講演となりました。

3. 講演-2 石黒 元昭 様

「平成28年8月一連台風による十勝地方の 中小河川災害と復旧」

帯広建設管理部は平成29年4月に災害復旧推進室を設置し、石黒様は災害復旧推進室長として災害復旧に当たられています。平成28年8月の台風被害は全道に及び、特に十勝地方では甚大な被害が発生しています。以下に、石黒室長からご講演いただいた内容の概要を報告します。

(1) 十勝地方の気象状況

8月17日～23日の1週間で、台風7号、11号、9号の3つの台風が北海道に上陸、また8月30日に台風10号が渡島半島に接近しました。この影響で糠平では8月の降水量が978mmとなり、帯広の年間降水量約1,200mmに匹敵する量となりました。図-11の左は、8月15日～24日までに降った台風7号、11号、9号の影響による一週間の降水量を示すもので、太平洋側や内陸部を中心に400mmを超える記録的な大雨となっています。図-11の右は、8月29日～31日までの台風10号による降水量を示すもので、日高山脈周辺は地形性降雨により、500mmを超える大雨となりました。特に戸蔭別観測所、札内川ダム観測所では72時間雨量がそれぞれ532mm、471mmとなり既往最大を記録しています。

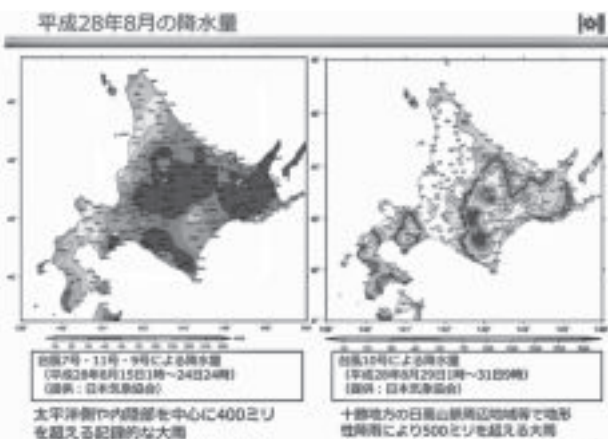


図-11 平成28年8月の降水量

(2) 公共土木施設災害の状況

発災後2ヶ月程度で災害査定を終わらせるのが通常であるのに対して、今回の場合は規模が大きかったため、帯広建設管理部での災害査定は12月22

日の9次査定までの時間を要し、合計371箇所、350億円程度の査定決定を受けました。帯広建設管理部では、被災前の治水系部署では、4出張所と1事業課において、主査と担当職員が12人配置されていましたが、被災後は本庁や他建設管理部から総勢82名の職員の応援を受けています。また昨年より災害アドバイザー派遣制度が創設されたことにより、計53名のOBの方々の派遣を要請し、ノウハウやアドバイスをもらったとのこと。8月の台風に関する査定の決定額は、全道で約545億、そのうち帯広建設管理部は既述の通り350億となり、約6割を占めています。市町村を含めると全道で654億円になるのに対し、帯広建設管理部管内では391億となっています。またその内訳をみると、全道の河川は431億で、帯広建設管理部管内の河川が274億となっており、約64%を占めています。

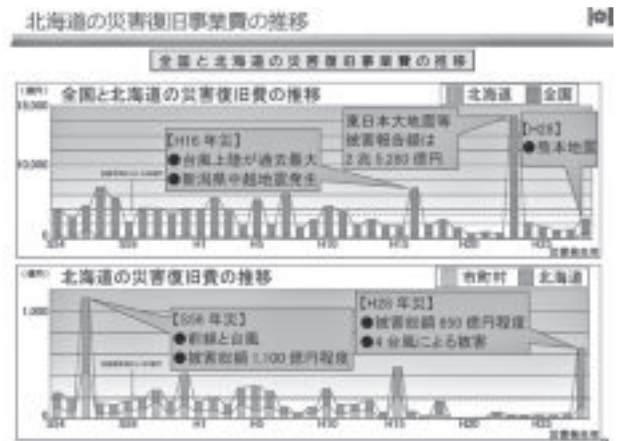


図-12に昭和54年～平成28年までの災害復旧事業費の推移を示しました。上が全国を、下が北海道と市町村を合わせたものです。全国平均は年間3,400億円程度ですが、平成23年の東日本大震災では、2兆5,000億となり大きく増えています。平成28年の全国災害復旧事業費は平均値よりもやや少ないですが、北海道だけでは、道と市町村あわせて1,100億円程度の被害となった昭和56年の被害に次ぐ650億円程度の事業費となっています。

(3) 主な被災箇所と復旧状況

① 利別川・足寄川

台風7号による被害であり、溢水により約50戸の浸水被害が発生。溢水区間に大型土のうを

1,070m 設置。現在は、市街地の下流側で河川改修を行っている最中で、完成までの間は暫定的に河道内の樹木伐採を行っています。足寄川については、堆積土砂の掘削や樹木の伐採を行っています。下流側から本格的な河道掘削を行っている最中です。

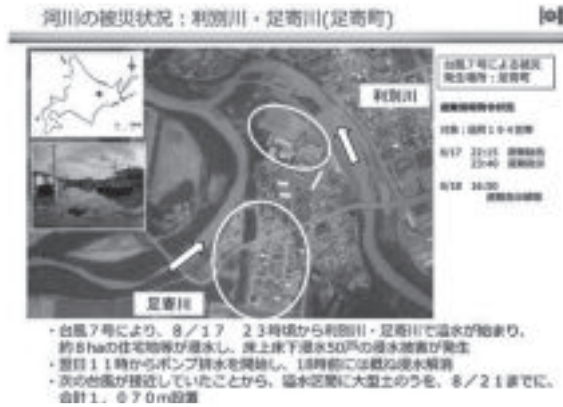


図-13 河川の被災状況(利別川・足寄川)

②芽室川

図-14 の芽室市街地のやや上流になる白の破線で描いた部分に堤防がありましたが、台風 10 号による越水によって破堤しました。越流水は、畑を経由して下流の住宅地へ流れ込みました。破堤後は大型土のうやコンクリートブロックによる仮締切を行って堤防の機能を確保しました。

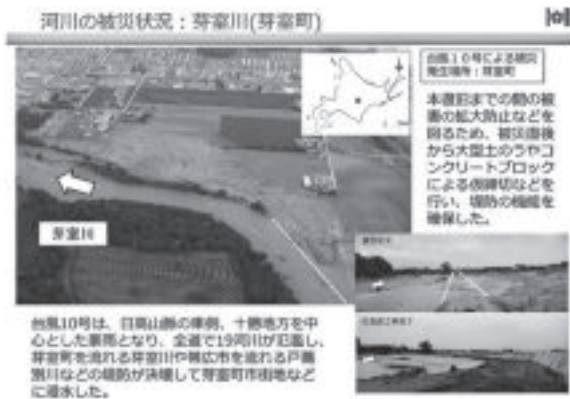


図-14 河川の被災状況(芽室川)

③ペケレベツ川

台風 10 号によって被災し、住宅 59 戸に被害が発生。河川改修は終わっていましたが、それを上回る流量によって溢水氾濫し、被害が発生しました(図-15)。

④戸蔦別川

上流堤防が破堤し、その氾濫流が札内川との合流部堤内側から侵食して破堤しました(図-16)。講演

当時は、暫定堤防を設置して堤防護岸と低水路護岸を実施しており、さらに水制工を実施する予定です。

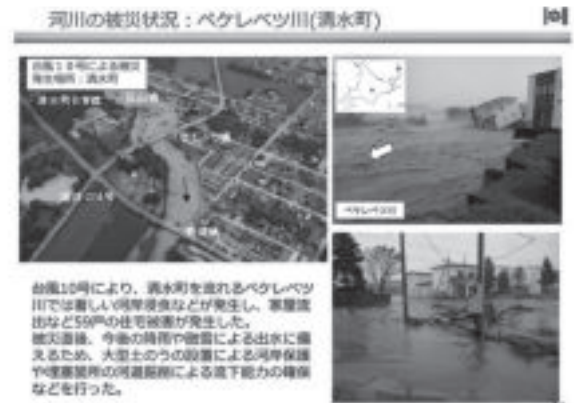


図-15 河川の被災状況(ペケレベツ川)



図-16 河川の被災状況(戸蔦別川)

⑤ペンケオタソイ川(砂防)

流路の蛇行により、8号床止工の左岸袖部が流出。



図-17 砂防の被災状況(ペンケオタソイ川)

⑥道道旭山線(道路)

記録的な降雨による出水により、久山川が氾濫し道路の冠水・欠壊が発生。その後、復旧しています(図-18)。



図-18 道路の被災状況(道道旭山線)

(4) 改良復旧事業

被災箇所の災害復旧事業のみでは、再度災害の防止が十分でない場合に、被災していない箇所を含む一連区間において川幅を広げたり堤防の高上げを行うなど施設機能の強化を図る事業を改良復旧事業といいます。全道で6河川が選定され、そのうち帯広は芽室川、ペケレベツ川、パンケ新得川の3河川が対象となっています。原形復旧の災害費を親災といいますが、たとえば芽室川では8億円、そのほかに改良復旧費が4億円となり全体で12億円の事業費となっています。

① ペケレベツ川

ペケレベツ川では、住宅が数軒押し流されました。下流側では、昭和47年から災害関連事業が行われており、中流域では昭和51年～平成8年まで小規模河川改修事業が行われていました。被災前は樹木が鬱蒼と繁茂していましたが、出水により多くが消失しました。今後佐幌川合流点から約4.7kmの改修を行う予定です。



図-19 ペケレベツ川の被災状況

310m³/sの現況流下能力(1/10年～1/30年)を370m³/s(約1/50年規模)に向上させます。基本的には河道掘削により必要な河道断面を確保し、被災流量410m³/sは河道満杯流量で流下させる計画です。河床勾配が急(1/66)なので帯工や落差工、根固工などを設置し緩流化による河床低下を防止するほか、平面的には直線的な河道としました。事業費が大きいので5ヶ年計画で、平成32年の完成予定です。

② 芽室川

昭和40年代に改修されていましたが、今回の出水で破堤し家屋の床下浸水が260戸発生しました。その中には日本缶詰工場が含まれていました。現況流下能力600m³/sに対して被災流量は、1,400m³/s程度でしたので満杯流量で流すこととし、1,100m³/sを整備目標としています。引堤・河道掘削を行うほか水制工などを設置します。

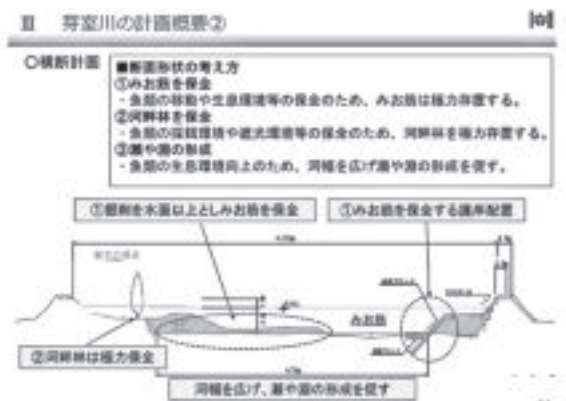


図-20 芽室川の計画概要(横断計画)

(5) 十勝地方における土砂動態の概況

① 調査概要

砂防学会では北海道大学の小山内特任教授を団長にペケレベツ川、パンケ新得川、戸蔭別川などの現地調査を行いました。9月5日は現地踏査、9月7日はヘリ調査を実施しています。深層崩壊のような大規模な崩壊および天然ダムの発生は見られませんが、砂防堰堤が整備されている付近より上流の源頭部付近で土石流が多く確認されています。

② 土砂動態状況

日高山脈東麓の地形的特徴は、扇状地の発達です。最上流の溪流区間では、土石流の発生が多く見られましたが巨石などは砂防施設によって捕捉されてい

ました。その下流の扇状地区間では河川が蛇行し、主に下流の土地利用が進んだ区間において、浸食や氾濫による被害が発生した。扇状地からさらに下流の河川区間では、自然流路は溪岸浸食と氾濫が発生しています。レーザープロファイラ(LP)を使って、ペケレベツ川において、平成 18 年と 28 年の河道の変化を調べた結果が図-21 です。浸食と堆積別に表しており、ペケレベツ川砂防堰堤整備区間では堆積、その下流の河川区間では浸食と堆積が繰り返されています。ペケレベツ川の土砂動態は推定発生土砂量が 1,400 万 m³ で河道内堆積が 370 万 m³、砂防堰堤(2 基)による補足量が 630 万 m³、流出した細粒土が 400 万 m³ 程度と推定されており、砂防堰堤の効果が確認できました。

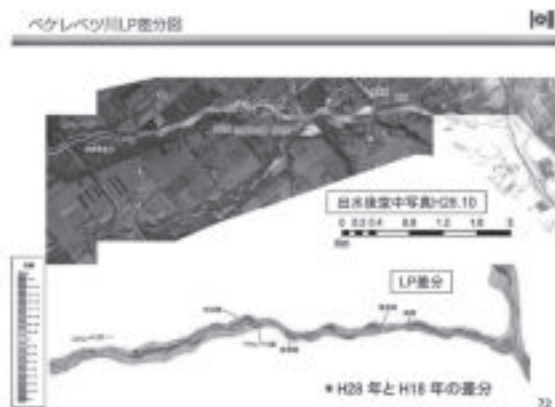


図-21 ペケレベツ川の LP データの差分図

③十勝川流域砂防技術検討会

北海道開発局と北海道は、学識者や専門家などで構成する「十勝川流域砂防技術検討会」を共同で設置し、平成 28 年 8 月の台風などにより発生した大規模な土砂移動現象を踏まえ、十勝川流域の土砂の流出や堆積の特徴を検証するとともに、今後の施設整備に向けた検討を行っています。

(6)本講演で学んだこと

- 1) 台風 7 号、11 号、9 号による降水量(平成 28 年 8 月 15 日 1 時～ 24 日 24 時)は、内陸部を中心に 400mm を超える記録的豪雨であった。また台風 10 号による降水量(平成 28 年 8 月 29 日 1 時～ 31 日 9 時)は、十勝地方の日高山脈地域などで地形性降雨により 500mm を超える大雨となった。
- 2) 平成 28 年災害の災害復旧事業費は、昭和 56 年洪水に次ぐ史上 2 番目の 650 億円程度であった。

- 3) 河川の被害は、河岸浸食、堤防決壊、浸水被害、家屋流出、JR 橋落橋などであった。砂防施設の被害は、砂防堰堤や床固工の流出などであり、道路の被害は、道路冠水、橋台背面洗掘・傾倒、道路欠壊、土砂崩落被害などであった。
- 4) 砂防学会による調査の結果、最上流の溪流区間では土石流の発生と浸食が、扇状地区間では河岸浸食や河床低下、河川区間では浸食と堆積・氾濫などが確認されています。今後の砂防計画や河川改修計画を策定するうえで重要な情報が得られました。またペケレベツ川では、推定発生土砂量 1,400 万 m³のうち、砂防堰堤(2 基)による補足量が 630 万 m³と推測され、既設砂防施設の効果が確認されています。

4. おわりに

近年我が国は、大規模地震に伴う巨大津波や土砂崩壊・地滑りなどの土砂災害、そして気象変動に伴う豪雨による大規模出水などの激甚災害に見舞われ、国民の安全・安心生活にとって大いなる脅威になっています。大規模地震からは耐震設計の高度化へと学びを深め、施設の安全性を確保するに至ったことを丸山先生のご講演から学びました。また、昭和 56 年洪水災害に次ぐ大災害となった平成 28 年 8 月台風災害では、1ヶ月に 4 つの台風に見舞われるというこれまで経験したことの無い事象に遭遇し、自然の猛威による激甚災害を肌で感じることにになりました。石黒室長のご講演では、そのことをより理解することが出来ました。防災委員会では、今回ご講演いただいた内容を今後想定される大地震や水害への備えとして、また今後災害復旧に携わるすべての方々への貴重な教訓や助言として活用していく所存です。国内の災害史に残る大きな災害を経験されたお二人から大変貴重なご講演をいただきましたことに心から感謝する次第です。

渡 辺 洋 一 (わたなべ よういち)

技術士(建設/総合技術監理部門)

防災委員会 都市部会幹事
株式会社 構研エンジニアリング

