The Japanese Geotechnical Society

資　料

フィルダムの破損と被害（抄訳）（その 2）

Earth and Earth-Rock Dams, Engineering Problems of Design and Construction.* 1967, Chap. 2, Failures and Damages, P. 113～199.

神谷貞吉**

5. 震　害

米国で震害をうけたフィルダムの記録はほとんど1920年以前のもので，いずれも設計と施工が適当でなかったように思われる。これに対して新しい施工法によるダムは，まだ激しい地震をうけていないし，また 30 m 以上のダムでかなりの地震力をうけたものもあるが，強さと被害の正確な記録はない。つぎに著名なものにふれてみよう。

1906 年のサンフランシスコ地震は米国における最大の一つで，強さはサンフランシスコ半島で米国震度階 10 注1)，ここに貯水用の3つのダムがある。

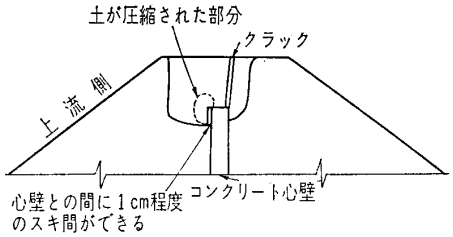
San Andreas ダムは 1860 年建設，1875 年かさ上げして高さ 30 m，中央心壁型，よい粒度のレキ混じり粘土質，3 t ローラーで転圧，コウ配は上流 1：3 1/2，下流 1：3，断層は取付け部に近接して堤軸を横切っている。周辺の地盤にはいたるところに引張りに起因するクラックがみられ，堤体にはクレストの軸方向に 5～7 cm 幅のクラックが1本通った。貯水は満水に近かったが漏水はなく，危険は感じられなかった。

Upper Crystal Spring ダムは貯水池を横断する道路用築堤で断層は堤体を横切った。堤頂は 240 cm 動き，縦横にクラックがはいり，最大は縦方向に幅 15 cm，深さ 120 cm に達した。横方向のクラックは断層付近に発生し圧縮力により閉じていた。この築堤は排水管をそなえ，心壁もあるが，もし貯水用であったら，おそらく崩壊していたろうといわれる。

Pilarcitos ダムは 1874 年竣工，高さ 28 m，水締め心壁，コウ配は上流側 1：2 1/2，下流側 1：2，断層からかなり離れ被害はなかった。San Andreas ダムとともに最近のダムと同様な施工法により，粘土質土を用い，15 m 厚のチュウ積層上にあり，建設後 90 年，1906 年以降なんどか地震に見舞われたが，前記のほか被害はない。

Sheffield ダム，このダムはロサンゼルスの北方にあり，地震のため完全に崩壊した唯一の例である。地震は 1925 年発生，ロッシフォーレル震度階 9 で木造家屋が 10 cm 移動したという。1918 年建設，締固めは運搬車の転圧程度，層厚は大きく，土質は細粒だが，60 cm 以上の丸石を含み，上流面に 12 cm 厚の鉄筋コンクリートしゃ水壁があり，下端に岩盤までカットオフがある。崩壊の数年前から，下流ノリ先からかなりの漏水があり，斜面の飽和状態が続いていた。地震を受けてダムの中央部は 30 m ほど下流に押流された。これは，間ゲキ水圧によるセン断抵抗の減退，堤体下流部分と基礎上層の振動による流動化によるものと考えるほかはない。

St. Mary ダムはカリフォルニアに 1928 年完成，水道用で高さ 16 m，コンクリート心壁を採用，1955 年震度階7の地震のとき，心壁の直上全長に渡って幅 3～6 cm のクラックが発生した。心壁まで試掘してみると，クラックは下流側からはじまり，上流側には土の乱れた跡があり，かなりの圧縮力が作用したものと観察される。これによりコンクリート壁がほとんど不動のまま，堤体が数 cm 振動したことは明白である。



図―7　コンクリート心壁とクラック

水締めダムの震害，ロサンゼルスの Chatsworth ダムは 1918 年完工，水締め工法により，高さ 12 m，長さ 660 m，ノリ面コウ配は 1：2 1/2，漏水が続いて注意中

---

* JAMES L. SHERARD, Sc. D, 他3氏著
John Wiley and Sons, Inc. N.Y.

** 日本大学生産工学部教授・工博

注 1) Modified Mercalli Scale は米国の震度階の基準で，日本の震度階に換算したものはないが，この震度 10 は日本の震度5程度ともいわれる。中南米ではこの震度階に準じたものを用いている。（参考資料参照）
Rossi-Forel Scale は米国の上記震度階の旧式のもので，ヨーロッパで使用しているところもある。
Richter's Scale は，いわゆるマグニチュードのことで，米国ではこのように考案者の名前を呼称としている。

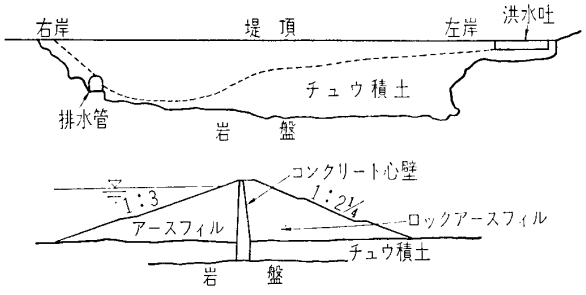
NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

のところ，1930 年震度階 7 の地震を受けた。監視人の車がブレーキをかけたまま 1 m 動き，2 m 戻ったという。上流側は落積みの盛土で，地震のため水中にすべり落ち，あとに急な崩壊面が残り，堤体は完全に飽和状態になった。軸方向のクラックが全長に発生し，顕著なものは上流側と下流側におのおの 2 本，幅は 5～7 cm，深さは 1.5～3.5 m に達した。漏水は全長にわたり，地震の 2 時間後で毎分 30 リットルで濁水，翌日はその 1/2，濁りは少なくなる。2 日後には毎分 4 リットル，漏水による危険はなくなった。

ミシシッピー河の最上流マヂソン河に 1914 年築造した Hebgen ダムは，高さ 30 m，長さ 230 m，レキを含む粘土質土の転圧式，コンクリート心壁型，基礎は岩盤，貯水容量 12 億トン，1959 年強い地震を受ける。ダムから 230 m 離れた山腹に落差 5～6 m の断層が生じ，下流では 5000 万トンの岩石が崩壊して河をせき止め，下流水位はダムのノリ先まで上昇した。震度はマグニチュード注2) 7.5～7.8 であった。貯水の動きは，最初のショックで駆けつけた監視人の観測によると，第 1 波はすでに越流したあとで，数分後第 2 波がきて，1 m の深さで越流し，10 分たって上流にむかい，さらに 10 分後再び越流した。越流の深さと間隔の数字は不正確であるが，少なくとも 4 回越流したことは間違いないという。これに対して，堤頂，上下斜面は侵食によく抵抗し，下流斜面の植生はほとんど洗い流されたが，ガリーの最深は 1 m 程度，堤体を弱らせるには至らなかった。

しかし，沈下は大きく，コンクリート心壁に対して 30～200 cm に達し，基礎のチュウ積層の厚さに比例した。クラックは軸方向に走り，幅は最大 30 cm，平均 5～8 cm，心壁の下流天端面に現われた。上流側斜面に，幅最大 25 cm，長さ 100 m 以上のクラックができたが，下流側斜面にはなく，ノリ先のふくれもなかった。コンクリート心壁には洪水吐に近く，同じ間隔で 4 カ所にクラックがはいったが，ほかに異常なく，ただ盛土との間にすき間が残り幅 20 cm に達し，心壁からの漏水はたいしたことなく，修理して完全に止めた。



図—8 Hebgen ダム

注 2) M：震央からちょうど 100 km のところに置いてある W·A 型地震計（倍率 2800倍）の最大振幅を a（ミクロン）とすると，$M=\log a$

地震について要約すると，

（1） 強い地震による被害は，堤頂の軸方向クラックと沈下である。沈下はそのため越流して破壊するほどではない。

（2） いわゆる転圧アースダムで完全に破壊された例は Sheffield ダムだけである。これは下流部の土がルーズで飽和して流動化したためである。

（3） ダムの被害は堤軸に直角方向の地震動の水平成分によるものである。おそらく，堤体の振幅と加速度が基礎のそれより大であれば，堤体の最も薄い頂部に縦のクラックができる。

（4） 地震のショックで，たとえ締固めが弱かったとしても，そのために斜面が滑動した例はそれほど多くはない。

（5） 周期と被害について，アースダムは建築物に比して長い周期によって，それ以上の害をうけるという考え方がある。これによると震源に近いほど被害が激しいとは限らない。

（6） コンクリート心壁型ダムは，心壁がないものよりクラックができやすい。粘土心壁でも本体と土質が急に変るとクラックの誘因になるという見方もある。

6. 波浪と上流側斜面の防御

アースダムの損傷の多くに波浪による侵食がある。普通，継続期間が短かく，完全な破壊に結びつくことはまれである。そのため，応急処置よりはむしろ修復が大切である。しかし余裕高が不十分，上流斜面があまり急なダムは波浪による破壊の危険がある。その最悪の例は，コロラドの Point-of-Rocks ダムである。1911 年完成，高さ 30 m，上流側斜面 1：1.5，金網入りの 10 cm 厚のコンクリートスラブ張り，コロラド地峡の強風にさらされるとき 2 m の波がたつ。1915 年の強風でスラブが破壊され岩石のリップラップで補強した。1927 年，ハリケーン級の強風を受けて，堤頂がくずれ，崩壊しそうになって砂袋で防御した。原因は上流面の急斜配にあり，条件によっては波浪が破壊の原因となることを示した。

斜面の防御の効果について，米国の技術部隊の1946～1947 年に行なった，100 ダムの調査によると，完成後 5～50 年，地形，地質はさまざまであるが，

（1） 40 ダムは岩石の落積みのリップラップ，厚さは 20～200 cm，そのうち 2 ダムが急斜配のため岩石が移動して破壊している。岩石の大きさは 12 cm，層厚 50～130 cm であった。また 3 ダムではレキのフィルター層消失の被害がみられた。

（2） 20 ダムは手積みのリップラップ，層厚 30～90 cm，6 ダムに岩石の移動があった。そのうち 4 ダムの

NII-Electronic Library Service

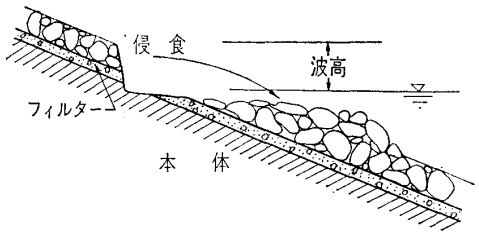
The Japanese Geotechnical Society

最初の被害は流木と流氷が原因であった。波高は 50～250 cm。

（3） 厚さ 10～30 cm のコンクリートスラブを張った 14 ダムのうち 5 ダムに被害があり，20 cm 厚の鉄筋コンクリートスラブに被害はなかった。

岩石の落積みのリップラップは，層厚が同じならば，並べて積んだものより波浪に対して良好である。その理由は，おのおのの岩石が動いても，全体の抵抗を弱めることにはならない。それに対して，密に組合せた積み方では，大きな岩石が一つゆるむと，その下のフィルター層が直ちに露出する。また手積みの岩石はかみ合いが弱いので，流木や流氷でゆるみやすい。

激しい嵐になると，波浪が水面付近でリップラップを繰返しうっては返す。フィルターがあまり細かいとついには洗い流されて，波は直接堤体を侵食するようになる。また岩石の平均の大きさが波力に対して不十分であれば，岩石が流し出される。フィルター層の破壊はよくあることで，まず小さな岩石が運び出され，そのすき間からフィルターが洗掘され，そのあとに大きな岩石が落ちこむ。



図—9 リップラップの侵食

リップラップの侵食は，大きさのそろった岩石が多くて，小さなものが少なく，すき間を埋めるのに十分でない場合にも起こる。すき間からフィルターが流出すると，大きな岩石がしだいにずり落ちて，気のつかないうちに本体の侵食が進む。この修復は大きな岩石をもとに戻すため，多額の工事費がかかる。

フィルターの流出を防ぐには，リップラップに 10 cm 以下の小塊を含ませると効果がある。それがないときには，リップラップを厚くするか，フィルターをあらくすればよい。

また下層が粘土質のためリップラップがそのまますべり落ちるのは，傾斜を 1：3～1：3.5 にすれば起こらないというひともあるが，傾斜が急でも施工が良ければ心配ない。大きなダムでそのような例はない。

アースフィルダムではコンクリートスラブもよく使われる。場所打ちで，鉄筋を網状にいれて，ジョイントを置く方式とベタ打ちの方式とがある。プレキャストを用いることもある。コンクリートスラブはレキ層をフィルターとして，そのうえに打設するのが普通だが，コンクリートの割れ目やジョイントからフィルターさらには本体の土が洗い出されることがある。そのためスラブが沈下し，割れ目が広がり，コンクリートが劣化して破壊した例もある。この方式の成功率は低いとされている。

南ダコタの Belle Fourche ダムは 1908 年完成，高さ 35 m，ローラー転圧，上流側コウ配 1：3，30～70 cm 厚のフィルターのうえに 20 cm 厚，160×150 cm² のプレキャストコンクリートスラブ使用，ジョイントは 12.5 cm 排水のためあけてある。暴風雨のたびに被害があり，350 以上のスラブが動き，修理する。貯水低下のときダム内に水位が残り，3 m も水が噴出したことがある。

ネブラスカの Kingsley ダムは高さ 50 m，1941 年完成，上流面コウ配 1：3，強風のよく吹く地域で，最大波高 250 cm，近くに堅岩がないため長方形のコンクリートブロックを使用，鉄棒でつなぎ，さらにワイヤロープですべり落ちないように引張ってある。使用後約 3 年で下層の洗掘のためほとんど沈下移動し，岩石のリップラップに置き換える。1960 年とくに波浪の強い範囲に特製のテトラポットを加えた。

鉄筋コンクリートのベタ打ちのスラブは，低いダムには有効である。20～30 cm 厚，鉄筋の断面比は 0.3～0.5 %，その下にレキの排水層をおく。普通は波浪の範囲だけに張るが，不透水性の基層までのばしてしゃ水壁をかねることもある。このタイプのもの 12 ダムを知っているが，こわれたものはない。寒冷地ではスラブの裏に氷のレンズができて，そのためクラックがはいると心配するむきもあるが，その例はない。寒冷地で 30 年，無事に経過したものもある。唯一の欠点は，波がよく走ることで，天端をのり越えて下流斜面をぬらし，貯水の損失を招くことであるが，波返しをつければ防げる。

東コロラドの Bonny ダムは，リップラップを岩石にすれば，350 km 離れた山脈に求めることになる。そこでソイルセメントとアスファルトコンクリートの保護層のモデルテストを行なった。貯水池に突出た仮の堤で，長さ 120 m，高さ 7.5 m，斜面のコウ配 1：2。

貯水してから 8 年，その間 2 m 程度の波浪はたびたび経験したが，ソイルセメントはほとんど被害はなく，ただ締固めの境界に沿うた侵食の跡があり，アスファルトコンクリートにはヘアークラックが発生し，1.2 cm 程度に開き，深さ 10 cm に達したものもあるが，堤の先端がくずれたほかは大きな被害はなかった。

7. 突然の流動化による滑動

アースダム設計者にとってむずかしい問題は，ルーズな砂質地盤上の流動化に対する安全度である。代表的な転圧ダムでそのような基礎をもつもので，そのような破

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

壊をした例がないので，実際のデータに乏しい。しかし，水締め工法では，大きなダムで，工事中に外側の層が水圧のため流動化してくずれた例がある。

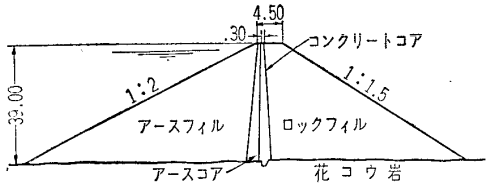
例の Sheffield ダムの破壊は地震のショックのあとに起こったものであるが，直接の原因は堤体の下層ないしは基盤の流動化にある。もっとも，施工方法，用土の土質の記録が不十分ではあるが，締固め不十分で，用土が砂質で，飽和の状態にあったことは確かのようである。またカリフォルニヤの Red Mountain ダム，1949 年完成，高さ 17 m，粘土質のアースフィル下流側の底部に，1 m 厚の砂層の地下排水がある。貯水の当初，両そでから漏水があったので，地下排水の出口に土留めのクイを打った。ところがそのためか，地下排水の上部のノリ面がふくれあがり，5 m ほどの高さまで流動化して押し出された。

上述の破壊はいずれも堤体のルーズな下層に起こったもので，締固め十分な堤体が，基礎がルーズな砂層の場合，流動化するか否かについて直ちに参考になるものではない。

8. 中心コア型ロックフィルダムのたわみによる被害

ロックフィルダムは斜面がいかに急であっても，アースフィルダムにみるようなスベリ破壊は起こさない。しかし下流斜面があまり急だと，最初の満水のとき，堤頂が下流にたわみ，クリープの形で下流に動き続ける。この現象は理論的に解析されていないが，移動の記録から下流面のコウ配の限界を知ることはできる。

カリフォルニヤの Crane Valley ダムには長期移動の記録がある。1910 年完成，心壁はコンクリート，上流側は土の水締め，下流側は岩石の落し積み，大塊でかなり高所から落とし，硬質ではあるが，よごれた細粒を大量に含んでいる。



図—10 Crane Valley ダム

最初の貯水のときクレストが下流に動き，1914 年までに 270 cm に達したので心壁上に測点を設けて測量をはじめた。1952 年までにさらに 150 cm 移動したので下流斜面に岩石を加え，堤頂幅を 30 m にした。1928年にコンクリート心壁中央下流側に調査穴をおろした。心壁の下端は動いていないことがわかった。しかしその 2 m 上に水平クラックがあり，心壁は下流に傾斜を増していた。堤体が下流へ動いたためで，よくみると，縦横に細いクラックがあり，堤体の土が詰まって，漏水をある程度おさえていた。さらに心壁の上流側調査穴を掘ったところ，24 m 以深は土が流動化し，それよりさきは掘り下げることはできなかった。この水平圧のため心壁が下流に押されたことは間違いない。

これに似た現象は南アフリカの Kebir ダムに起こった。高さ 35 m，ロックフィル，下流側コウ配 1：1.8，コンクリート心壁型，心壁の上幅は 1.8 m，底幅は 9 m，満水時，クレストは 60 cm 沈下し，80 cm 下流に動き，心壁は底部でセン断され 15 cm ずれた。

9. 表面乾燥による被害

表面乾燥割れは低いアースフィルダムの保守によくある被害である。主に堤軸方向にはいり，時に 10 cm 以上の幅になることもある。ノリ面の張力は天端のノリ肩に発達する。発生の原因は，

（1） 貯水が，高温乾季に長期にわたって空のとき，
（2） 堤体材料が高塑性の細粒のシルト質土の場合，
（3） 築堤が十分締固めてないとき，

とくにいちじるしいクラックは，粘土分の少ないダムで，洪水調節用のものに多い。これは，設計者が，貯水池が短期間づつ繰返して使われると考え，そのため締固めの仕様を軽くするためである。侵食が集まるとクラックになるから，表面を修理し，砂質を加えて乾燥き裂の発生を防ぐ。あまり乾燥がひどいときには，天端にみぞをほり，ノリ面に水を流し，収縮き裂を防ぐ。

締固めが貧弱で，粘土質があまりに多いと，収縮してクラックができやすい。また，粘着性の少ないシルト分は侵食に弱い。アメリカの南西の乾燥地帯ではこのことが多く，とくに細かい粘土質シルト，塑性の低いシルト質粘土のダムでは，乾燥き裂が侵食されてガリーになりやすい。完全な修理を要するが，きわめて面倒で金がかかる。

ネブラスカの Lovewell ダムでは，高さ 12 m，1956 年の工事中，18 m あがったとき工事を 3 週間やすんだ。完成後，柔わらかい粘土質基礎の強度を調べるため，サンプリングのせん孔をした。基礎面の上 1.50 m にきたとき，ボーリング水が透水層の中に逃げた。竪坑を掘って調べたが，締固めは十分で，クラックはなかった。担当者が中止したとき乾燥クラックが発生し，水はここから漏ったが，やがて膨張して閉じたものと考えた。大切なことは，堤体には最良の土質を使用していることである。液性限界 40%，塑性限界 20% 最大密度 1.6 t/m^3，粒度分布は 0.005 mm 以下 30%，200 メッシュ以下 95%。そこで同じ土を用いた別のダムでは，散水とか，砂質土をかけて養生することを仕様した。　（終り）

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

参　考　資　料

Modified Mercalli Scale（メルカリ震度階）

I. 条件がよければほとんど感じない。

II. 屋内で静かにしていれば感じる人もある。つってあるもので，敏感なものは揺れる。

III. 屋内で静かにしているとわかるが，ほとんどの人は地震とは思わない。停止している車はわずかに揺れるが，側をトラックが通ってもその程度には揺れる。しかし周期の長短はわかる。

IV. 昼間，屋内の人にはわかるが，外で気がつく人は少ない。夜間ならば，目をさます人もある。皿，窓，扉など騒ぎ，壁はきしむ音をする。家屋にトラックが衝突したようなショックを感じる。停止している車中では揺れるのがよくわかる。

V. ほとんどの人にわかり，夜間，目をさます。皿や窓にはこわれるものもある。壁にクラックがはいるものもある。不安定なものは倒れる。木，柱，その他高いものは揺れて，音を出す。振子型の時計は止まることもある。

VI. すべての人が感じ，多くは驚いて戸外に走る。重い家具は動き，壁は落ち，煙突には被害が現われる。しかし被害はわずかである。

VII. 誰でも外に駆けだす。普通の構造物には軽い被害があるが，設計と施工がよろしければその心配はない。しかし設計が不良で，施工も悪い機造物にはかなりの被害があり，煙突にはこわれるものもでる。車を運転中の人にも感じる。

VIII. よく設計されたものでは被害は軽いが，不良の工事の建物はかなりやられる。鉄骨構造のパネル壁ははずれておちる。煙突，工場の積荷，柱，記念碑，壁などくずれる。重い家具は倒れる。砂や泥が押し出される。井戸の水位に変化が起こる。車を運転中の人は不安を感じる。

IX. 特別に設計した構造物でもかなりの被害がある。良く設計された鉄骨構造は傾く。マッシブな建物は大きく傾き，部分的にこわれるところもでる。建物の基礎がずれる。地割れが目につく。埋設管がこわれる。

X. 良く建てられた木造建築でも倒壊するものがでる。鉄骨構造はほとんど基礎がやられる。地割れははげしい。軌条は曲がる。河川の堤防など急なスロープはかなりすべる。砂や泥がずれる。貯水が堤の上にはねあがる。

XI. 石造建物の無事なものは少ない。橋はこわれる。地割れは大きく口をあける。地下の埋設管は破壊されて用をなさない。柔らかい地盤はくずれ，あるいはすべる。軌条の曲がりはいちじるしい。

XII. すべて被害を受ける。地表面は波を打つ。真すぐな線，水平な面は破壊される。物体は空中にほうりあげられる。

（原稿受付 1971.2.22）

➡ 新 刊 紹 介

設計施工基準集（設計編）のうち

『地中構造物』が発行！

土質工学会では，昭和39年12月に各機関の代表者を集めて設計施工基準集編集委員会（委員長　永盛峰雄）を設け，各機関ごとにまちまちに用いられている土質工学の分野での設計および施工に関する方法を統一する作業を進めてまりりました。

その準備段階として，各機関が制定している基準，示方書，指針などを広く集め，これを系統的に編集して参考資料を作っています。このうち「**擁壁**」および「**土工**」については，すでに発行しておりますが，今度は「**地中構造物**」が発行されました。

その内容は，国，地方自治体，公団，公社などが実務のうえで「**地中構造物**」を設計するときに，実際に使っている土質に関する資料を項目ごとに機関別に原文で記載し，まとめて解説したものです。

各機関で設計業務に携わっている技術者にとっては，貴重な参考資料になると存じますので，ぜひご購入のうえご活用くださいますようお勧めいたします。

基準などの収録機関名：建設省，農林省，日本道路公団，水資源開発公団，帝都高速度交通営団，東京都，仙台市，川崎市，横浜市，名古屋市，京都市，大阪市，神戸市，広島市，北九州市，その他

本文主要目次

1．構造物に作用する荷重の種類
- 1-1　活荷重・死荷重・その他の荷重
- 1-2　鉛直荷重（土圧）
- 1-3　水平荷重（土圧）
- 1-4　基礎反力
- 1-5　その他

2．構造物に作用する荷重の算出法（計算例）

3．埋戻し
- 3-1　埋戻し材料
- 3-2　埋戻し方法
- 3-3　締固め度の管理

判　型：B 5判，ページ：130 ページ

定　価：**1,100 円**，**会員特価 800 円**，送料 130 円

申込先：東京都港区西新橋1丁目13番5号（東亜別館）
社団法人　土　質　工　学　会
〒105　Tel 502—6256～8
振替 東京 40786

NII-Electronic Library Service