

礫中詰材のせん断抵抗力を考慮した鋼製枠砂防ダムの解析と最適設計に関する一考察

A SHEAR RESISTANCE ANALYSIS AND AN OPTIMAL DESIGN OF THE
STEEL MADE SABO DAM CONSIDERING THE EFFECTS OF FILLED MATERIALS

香月 智* 石川信隆** 大平至徳*** 鈴木 宏****

By Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Yoshinori OHIRA, Hiroshi SUZUKI

This paper presents a shear resistance analysis and an optimal design method of the steel made Sabo dam considering the effects of filled materials. At first, a shear resistance analysis method of the standard actual steel made Sabo dam is proposed by using an estimation method of the filled materials pressure. As a result of the analysis, it has been found that the shear resistance of filled materials is about 7-8% of that of whole structure. Secondly, the optimal fully stress design method is proposed, and applied to the actual Sabo dam under the two conditions: 1) the case considering the effects of filled materials, 2) the case neglecting the effects of filled materials. It is found that the total steel weight considering the effects of filled materials is economical about 15% than that neglecting the effects of filled materials.

1. 緒 言

近年、砂防ダムの中で図-1に示すような鋼製枠組の中に礫材を詰めた、いわゆる鋼製枠砂防構造物が数多く建設されるようになってきた¹⁾。本構造物は、図-1(b)に示すような流下直角方向にはビン構造となっているので軟弱地盤上での屈撓性に優れていることや、コンクリートを使用しないため養生期間が不要であり、したがって、短期施工が可能であるなど、数多くの利点を有する。しかし、図-1(c)に示す流下方向の堤体のせん断変形への抵抗力の算定には、礫中詰材と鋼製骨組の一体挙動のせん断抵抗力の算定法が不明確なため、未だ中詰材が鋼製枠のうち、いずれか一方のみのせん断抵抗力で設計を行っているのが現状である²⁾。

従来、中詰材のせん断抵抗力に関する研究としては、北島らが海岸構造物である鋼矢板セルを対象に行った研究³⁾や、鋼板セル内の砂質土の中詰材の研究^{4), 5)}などがあるが、礫材を用いた中詰材の研究は見当たらない。このため著者らは、礫中詰材をコンクリート円筒要素にモデル化したせん断抵抗実験⁶⁾およびせん断抵抗解析法^{7), 8)}についての研究を行ってきた。その結果、中詰材のせん断変形に伴って中詰材内部にブレースのような力の伝達機構が発生することなどが認められた。さらに、礫中詰材を用いた矩形単純せん断枠実験と実際の鋼製枠砂防ダムと同じ階段型の単純せん断枠を用いた実験を行い、階段型の単純せん断枠内に発生する中詰材圧と中詰材のせん断抵抗力を堤体のせん断変形量に応じて求める手法を提案した⁹⁾。

* 正会員 防衛大学校助手 土木工学教室 (〒239 横須賀市走水1-10-20)
 ** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室 (同 上)
 *** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室 (同 上)
 **** 正会員 農博 砂防・地すべり技術センター (〒162 新宿区市ヶ谷砂土原町3-4)

しかし、実際の鋼製枠砂防ダムの解析に、この結果をいかに適用するかについては未解明のままであった。

ところで、砂防ダムの建設を必要とする地域としては、土石流危険渓流だけでも全国7万渓流、その他に地すべり等が予想される危険箇所は26万箇所と膨大な地域にのぼるが、その所要量に対する整備率は半分にも至っていない¹⁰⁾。このような観点から見ると、砂防ダムの設計においては個々のダムに対して経済的な設計をすることにより、より多くのダムの建設を可能にすることが重要と思われる。

そこで本研究は、まず著者らの提案する中詰材圧の推定式を応用

して、礫中詰材のせん断抵抗力を考慮した鋼製枠砂防ダムのせん断抵抗解析法を提案し、続いて、より経済的な設計を可能とする実用的な最適設計手法として、フルストレス基準による最適設計法を開発した。また数値計算例により、その経済効果と中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合の設計に及ぼす影響について考察した。

2. 階段型枠内のせん断抵抗力および中詰材圧の推定法

本項で述べる内容の詳細は文献⁹⁾で報告しているので、ここでは本研究に直接関係する結論を簡単に説明する。実験は、図-2に示すような実物の鋼製枠砂防ダムの形状を縮小モデル化した単純せん断枠を用いて行った。この単純せん断枠は、ピン結合されているので枠自体はせん断抵抗力を発揮しない。この階段型の単純せん断枠に4種類の礫中詰材を詰めた実験を行い、同時に行った矩形単純せん断枠実験との比較から、階段型枠内の中詰材圧分布モデルを図-3に示すように仮定した。すなわち、①中詰材を詰め込んだ直後の中詰材圧は前壁面、後壁面に三角形分布の主動土圧が作用しバランスする。②後壁面側から水平力が作用すると、図-3に示すような増分礫圧が発生し、この増分礫圧のアンバランスが外側から作用する水平力に抵抗する。③この時、後壁面側の増分礫圧の最大値(基準値) σ_t は前壁面下部から45°に引いた線が後壁面と交差する高さに発生するものである。ここで、基準値 σ_t は次の式によって与えられる。

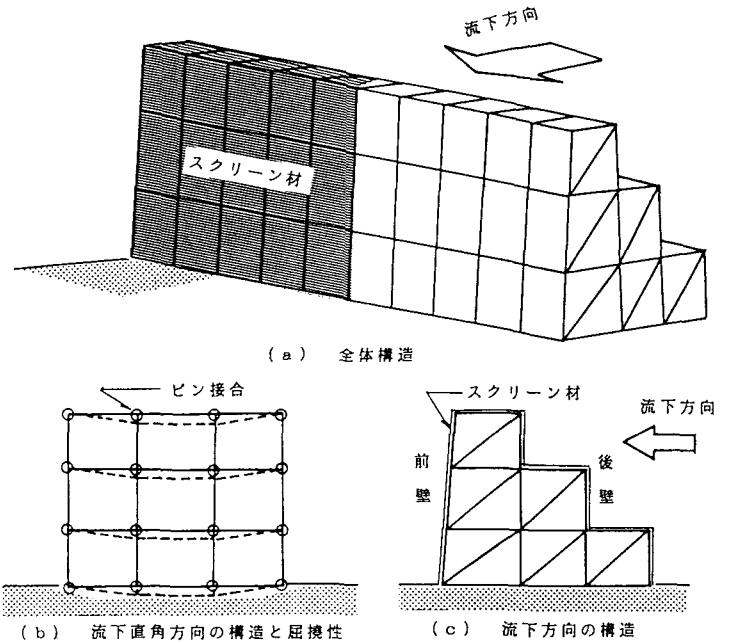


図-1 鋼製枠砂防ダムの構造

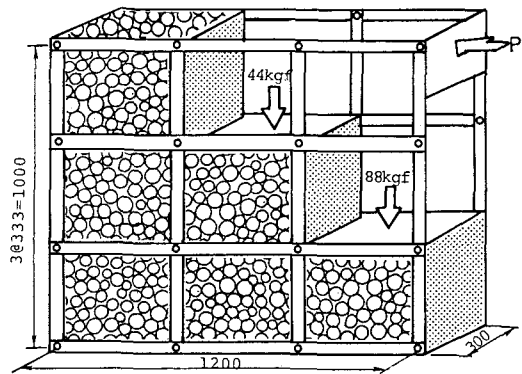


図-2 階段型単純せん断枠実験装置

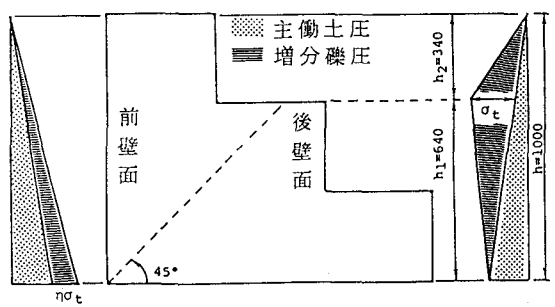


図-3 階段型枠内の礫中詰材圧分布モデル

$$\sigma_t = 3M \cdot \sigma_v \tan \phi / (1 - \eta / 2) \quad (1)$$

ただし、 M ：無次元化せん断抵抗力

σ_v ：底面における垂直応力 $\{=(W+P_u)/A_B\}$ ，

W ：中詰材の全自重，

P_u ：上載荷重，

A_B ：底面積，

ϕ ：中詰材の内部摩擦角。

η ：図-3に示す後壁面の基準値 σ_t に対する前壁面の礫圧の最大値への低減係数，本研究では0.5とする。

さらに、無次元化せん断抵抗力 M は、中詰材の種類の代表値を ϕ ，上方からの拘束力の代表値を σ_v として全ての実験結果に対して標準化したもので、せん断変形量 γ ($=\delta/H$ ， H ：堤体高， δ ：せん断棒上端の水平変位量) に対する無次元化せん断抵抗力 M は次の実験式によって与えられる。

$$M = 4.44 \times (\gamma) + 0.169 \times (\gamma)^{0.2} \quad (2)$$

以上の式(1),(2)を、実験条件に合わせて解き、階段棒実験の結果を推定すると、まずせん断変形量に応ずる礫圧分布の推定値が図-4のように求められる。後壁面側の推定値はやや過大推定となるが、その傾向を良く表している。次に、この分布によって得られるせん断抵抗力の推定値を実験の実験値と比較すると、図-5のようになり、せん断抵抗力は安全側に良くその弾塑性挙動をシミュレートしていることが認められる。

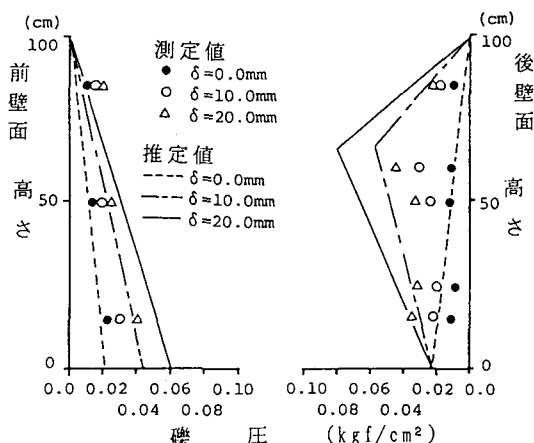


図-4 礫圧分布の推定値と実験値の比較

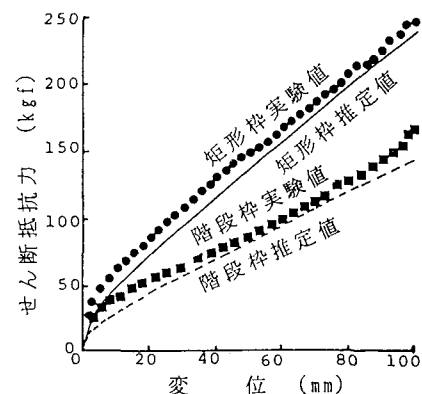


図-5 せん断抵抗力～変位関係の推定値と実験値の比較

3. 中詰材のせん断抵抗力を考慮した

鋼製棒砂防ダムの解析法

(1) マトリックス構造解析の基本式

鋼製棒砂防ダムは、H型鋼などの型钢を格子状に組み立てた骨組棒の中に礫中詰材を詰めて作られる。鋼製棒の骨組構造には、いろいろなタイプのものがあるが、本研究では標準的な骨組構造として図-6に示す棒組を解析および設計対象とする。本構造は、全体的にはトラス構造として解析されるが、中詰材の漏出を防止するためにスクリーン材の設けである前壁面および後壁面の部材については、その部材両端において単純支持されたはりとしての曲げモーメントを、同時に作用させて解析および設計を行っている。そこで、本解析法においても、全体的にはトラス構造をマトリックス弾性解析によって解析した後、前後壁面部材については、曲げモーメント計算を行い、複合断

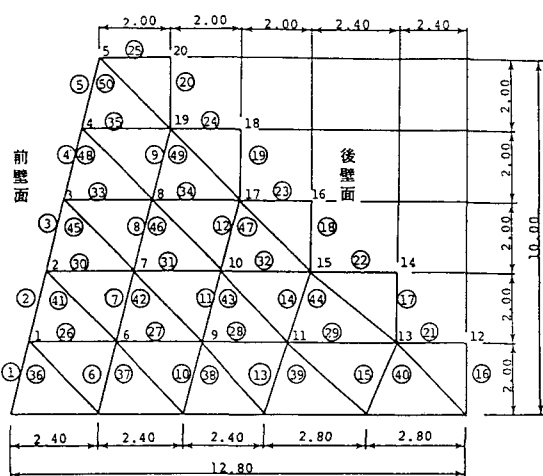


図-6 鋼製棒砂防ダムの骨組構造

面力による応力度チェックを行うものとする。

鋼製骨組部材に働く内力および外力を図-7のように表すと、マトリックス構造解析の基本式は、次式のように表わされる。

$$\mathbf{u} = [\mathbf{c}^T \mathbf{k} \mathbf{c}]^{-1} \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{c} [\mathbf{c}^T \mathbf{k} \mathbf{c}]^{-1} \mathbf{F} \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k} \mathbf{c} [\mathbf{c}^T \mathbf{k} \mathbf{c}]^{-1} \mathbf{F} \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{u}$: 外変位ベクトル、

$\mathbf{q}$: 内変形ベクトル、

$\mathbf{Q}$: 内力(軸力)ベクトル、

$\mathbf{F}$: 外力ベクトル、

$\mathbf{c}$: 変形適合マトリックスであり、 i 要素のみの場合

次のような要素を持つ、

$$\mathbf{c}_i = [-\cos \theta_i, -\sin \theta_i, \cos \theta_i, \sin \theta_i],$$

$\mathbf{c}^T$: 釣合マトリックス ($\mathbf{c}$ の転置マトリックス)、

$\mathbf{k}$: 構造全体の集合剛性マトリックスであり、

i 要素のみの場合次のような要素を持つ、

$$\mathbf{k}_i = [EA_i / l_i].$$

よって、トラス構造では、外力 $\mathbf{F}$ が与えられると、内力 $\mathbf{Q}$ (軸力)が式(5)より得られる。

また、前壁面および後壁面の部材に働く曲げモーメントについては、等変分布荷重を受ける単純ばりの最大曲げモーメントによって求めるものとした。

すなわち、前・後壁面に働く中詰材圧および背面貯砂圧による分布荷重を図-8のように表すと、任意点 x における曲げモーメント M_x は、次式によって求められる。

$$M_x = \frac{1}{6} \frac{(q_A - q_B)}{l} x^3 - \frac{1}{2} q_A x^2 + \frac{1}{6} (2q_A + q_B) l x \quad (6)$$

M_x の最大値では、微係数が0となることから次式が求められる。

$$\frac{dM_x}{dx} = \frac{1}{2} \frac{(q_A - q_B)}{l} x^2 - q_A x + \frac{1}{6} (2q_A + q_B) l = 0 \quad (7)$$

よって、式(7)を根の公式によって解き、その解を式(6)に代入することによって各部材の最大曲げモーメントが求められる。

(2) 外荷重および中詰材圧荷重

鋼製砕砂防ダムの堤体に作用する設計荷重としては、図-9、10に示すように中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合、中詰材のせん断抵抗力を考慮する場合のいずれの場合にも、洪水時の静水圧のみを考慮するものとする²⁾。なお、中詰材圧荷重については以下に述べる。

現行の設計における中詰材圧の与え方の基本的な考え方は、図-9に示すように前後壁面に静止土圧を作用させて解析および設計を行っている。しかし、第2項で述べた著者らの研究結果(図-4、5参照)によると、前壁面および後壁面には、中詰材を詰めた当初主働土圧分布の礫圧が生じ、その後堤体のせん断変形の増加に伴って、図-10に示すような増分礫圧が生ずる。この時のせん断変形に応ずる礫圧の増分量の基

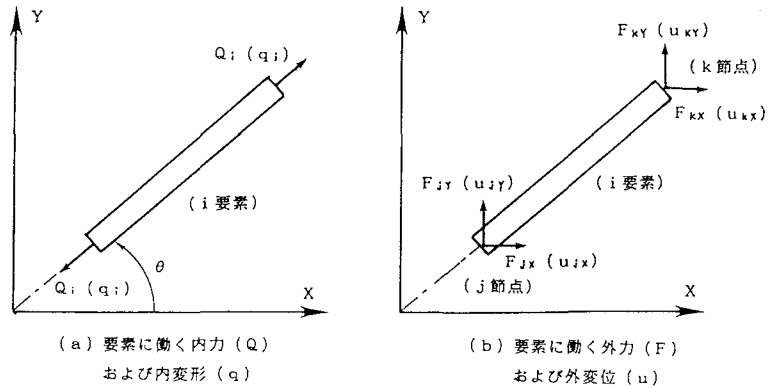


図-7 部材に働く力と変形

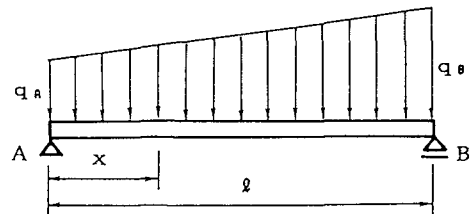


図-8 等変分布荷重を受ける単純ばり

準値 σ_t は、式(1)、(2)によって求められる。

(3) 解析手順

式(1)、(2)のような変形に応じて変化する荷重を受ける構造のマトリックス構造解析の解析手順は図-11に示すようになる。すなわち、その方法は、

- ① まず、堤体の上端の水平変位量 δ_0 を仮定する。
- ② 式(1)、(2)によって δ_0 に対応する後壁面の増分礫圧の基準値 σ_t を求め、前・後壁面の礫圧分布を求める。
- ③ 外荷重ベクトル $\mathbf{F}$ を変更した後、式(3)、(4)、(5)によって外変位 $\mathbf{u}$ 、内変形 $\mathbf{q}$ 、内力 $\mathbf{Q}$ を求める。
- ④ 求められた外変位 $\mathbf{u}$ の中から堤体の上端水平変位 δ を抽出し、 δ と δ_0 を比較する。
- ⑤ この際、 $\delta \doteq \delta_0$ であれば、そのときの解を真の解析結果として計算を終了する。
- ⑥ $\delta \neq \delta_0$ の場合、 $\delta_0 = \delta$ として②に戻り、繰り返し計算を行い、⑤の段階で収束するまでこれを繰り返す。

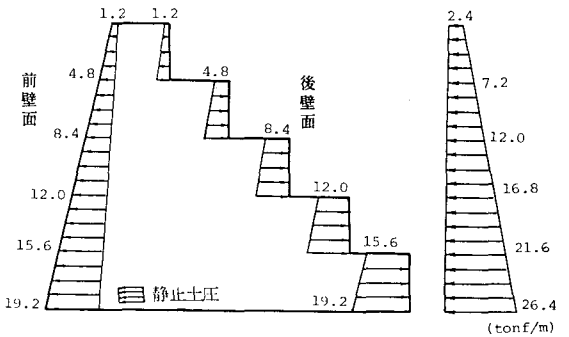


図-9 中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の荷重分布

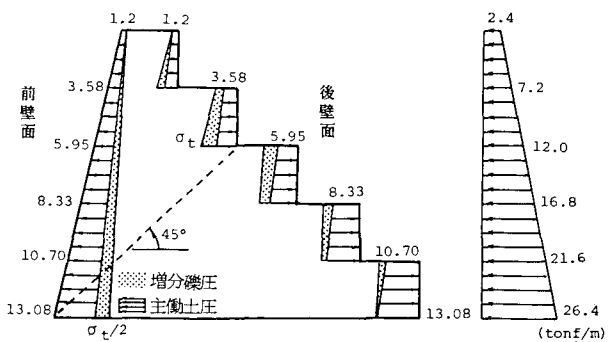


図-10 中詰材のせん断抵抗力を考慮する場合の荷重分布

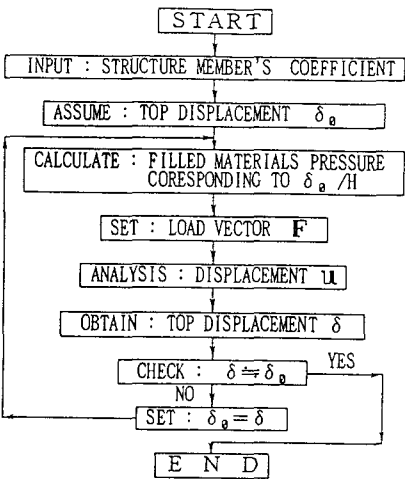


図-11 中詰材のせん断抵抗力を考慮した鋼製碎砂防ダムの解析手順

表-1 解析に用いた部材表

部材番号	部材断面	有効断面積 (cm^2)
1	H-304×301×11×17	106.1
2	H-300×300×10×15	91.1
3	H-400×200×8×13	58.9
4-5	H-200×200×8×12	44.9
6-15	H-194×150×6×9	23.4
16	H-350×175×7×11	41.2
17	H-244×175×7×11	37.0
18-19	H-300×150×6.5×9	28.0
20	H-150×150×7×10	26.3
40	2[-150×75×9×12.5]	43.9
21-25	[-150×75×6.5×10]	15.2
45-50		
26-39	2[-150×75×6.5×10]	30.3
41-44		

備考：有効断面積は、さび代1.5mmを除いた断面積のことを示す。

4. 解析結果と考察

図-6に示す骨組構造を持つ鋼製杵碁防ダムに対して、現行設計法における中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の解析と、提案する中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合の解析を行い、その相違点について考察する。表-1に解析に用いた各部材の断面諸元を示す。提案する解析手法によると、最終的に収束値として得られる増分中詰材圧の基準値 σ_c は2.0tonf/mとなり、後壁面の主働土圧5.95tonf/mの約1/3の増分中詰材圧が得られている。この中詰材圧分布の底面に対するモーメントは、

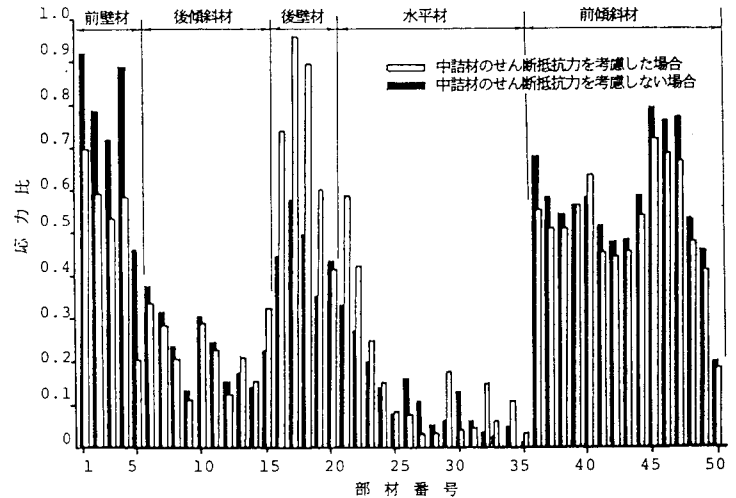


図-12 荷重系ごとの部材応力比の比較

37tonf・m/mとなるのに対し、静水圧荷重のモーメントは520tonf・m/mである。よって、この設計においては、中詰材は約7%のモーメント分担をしていることがわかる。

ちなみに、後述する最適設計結果における中詰材圧の抵抗力分担は8%となり、最適化により鋼材断面が細くなって鋼製骨組がフレキシブルになる反面、中詰材のせん断抵抗力の分担は大きくなることがわかる。

図-12に、中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合と、本法の中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合における各部材に発生する応力比(σ/σ_s)を比較図示する。

これより、中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合の解析結果では、中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の解析結果に比べて、前壁材(部材番号1~5)に発生する応力比が明瞭に小さくなる一方で、後壁材(部材番号16~20)においては逆に大きくなり、部材の負担が増加することが認められる。また、後傾斜材(部材番号6~15)や水平材(部材番号21~35)では、その応力比はいずれの解析においても非常に小さな応力比となっており、これらの部材の負担は小さいことが認められる。

5. フルストレス基準による最適設計法

フルストレス基準による最適設計法¹¹⁾は、ある仮定された断面によって得られる部材応力度をその部材の許容応力度に対する余裕度(応力比)に応じて断面を改良する手法である。この方法は、直接的には目的関数を用いて最適化を行わないが、応力度制約に基づく設計においてはフルストレス状態の場合に最小重量設計となることが証明されており^{11)・12)}、暗黙のうちに最小重量設計を行うことになる。またこの方法は、各断面の改良予測に数値計画法を用いないため厳密さに欠けるが、構造解析手法と簡易に組み合わせてプログラム化できる利点があるため、形状最適化の研究などにも応用されている^{12)・13)}。さらに、前述の中詰材のせん断抵抗力を考慮した解析手法のように、断面改良に伴って荷重自体が変化するような解析手法に対しても、設計変更に伴う感度解析を必要としないため、特に工夫を要せずに適用できる利点がある。

以上のことから、この方法は設計現場において簡易に適用可能な極めて実用的な方法であると考えられる。

(1) 最適設計計算の基本式

a. 断面積と断面係数の関係

最適設計計算では逐次に部材の断面積を変更するため、断面積とその他の解析に用いる定数との関係を求めておく必要がある。本構造物の解析においては、前壁材と後壁材の応力度解析に曲げモーメントと軸力を同時に受ける部材の応力度計算をするために、断面積 A と断面係数 Z の関係が必要となる。

本研究では、この関係を図-13に示すように、実在するH型鋼およびC型鋼の断面について最小2乗近似による直線回帰式を求めこれを用いた。なお、断面計算においては、鋼製砂防構造物設計便覧⁴⁾の基準に基づき腐食代1.5mmを除いた有効断面についてそれぞれの定数を求めた。

H型鋼の場合

$$Z = 14.13A - 149.8 \quad (8)$$

C型鋼の場合

$$Z = 12.46A - 107.9 \quad (9)$$

ただし、 Z ：断面係数、 A ：断面積。

b. 断面積の改良式

(a) トラス部材の場合

現設計段階において i 部材の断面積を A_0 、その時の部材に発生している軸力を N とする。また、次の段階に改良される断面積 A は、修正係数 D を用いて次式によって与えられるものとする。

$$A = DA_0 \quad (10)$$

設計を変更することによって、部材の軸力は変化しないものと 図-13 鋼材の断面係数～断面積関係 仮定したうえで、次の設計においてフルストレス状態になるものとする次式が成立する。

$$N/DA_0 = \sigma_{Na1} \quad (11)$$

ただし、 σ_{Na1} ： i 部材の軸力の許容応力度（圧縮時は、座屈による低減を含む）。

よって、修正係数 D は次式によって与えられる。

$$D = N/A_0 / \sigma_{Na1} \quad (12)$$

(b) 曲げモーメントと軸力を同時に受ける部材の場合

現設計段階における軸力を N 、曲げモーメントを M としたうえで、次の設計段階に i 部材がフルストレス状態となるものと仮定すると次式が成立する。

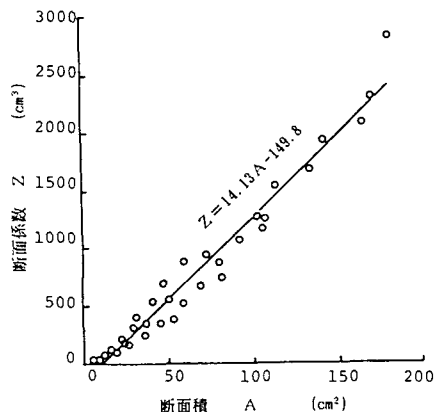
$$\frac{N/A}{\sigma_{Na1}} + \frac{M/Z}{\sigma_{ba1}} = 1 \quad (13)$$

ただし、 σ_{ba1} ：許容曲げ応力度。

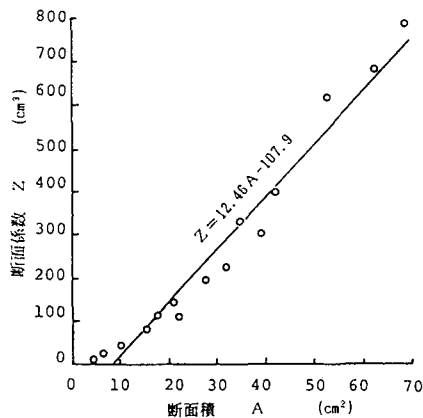
前述の式(8)および式(9)を一般的に式(14)のように表すと、式(13)は式(15)のようになる。

$$Z = \alpha A + \beta \quad (14)$$

$$\frac{N/DA_0}{\sigma_{Na1}} + \frac{M/(\alpha DA_0 + \beta)}{\sigma_{ba1}} = 1 \quad (15)$$



(a) H型鋼の場合



(b) C型鋼の場合

図-13 鋼材の断面係数～断面積関係

式(15)をDについて解くと、次の2次方程式の根の解が得られる。

$$D = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (16)$$

ただし、 $a = \alpha A_0^2 \sigma_{Na1} \cdot \sigma_{ba1}$,

$b = (\beta \sigma_{Na1} \cdot \sigma_{ba1} - \alpha N \sigma_{ba1} - M \sigma_{Na1}) A_0$,

$c = -\beta N \sigma_{ba1}$

c. 設計値の収束判定条件式

構造全体が、希望する範囲でフルストレス状態に収束したか否かの判定は、次式によって行うものとする。

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\sigma_{a1}} \cdot \frac{V_i}{V_{a11}} \geq T_c, \text{ and } \frac{\sigma_i}{\sigma_{a1}} \leq 1.0 \quad (i=1 \cdots N) \quad (17)$$

ただし、 Z_c ：収束判定関数、 n ：部材数、 σ_i ： i 部材の応力度、 v_i ： i 部材の体積、 σ_{a1} ： i 部材の許容応力度、 v_{a11} ：総鋼材量、 T_c ：収束を判定する許容値。

ここで、式(17)の意味を説明する。まず式(17)の後半は各部材の応力が許容応力度以内に入ることを示す。次に前半の Z_c は1.0に近づくほど、構造全体がフルストレス状態に近いことを表している。しかし、その中味は、個々の部材の応力比 σ_i / σ_{a1} にその部材の持つ体積が総体積に占める割合を乗じて求めているため、単に各部材の応力比を相加平均した関数を用いる場合に比べると、軸力が小さく細い部材として設計される重要度の小さな部材が、収束判定に及ぼす影響が小さくなるように工夫されている。また、 T_c の具体的な数値としては、部材のグルーピングを行わない場合で0.8、グルーピングを行った場合では0.75を用いている。ここで、グルーピングとは、表-2および3に示すように部材の配置に応じて工学的な判断から同種類の断面部材を予め指定して設計することで、計算においては、各設計段階ごとに、グループ内の各部材断面の最大修正値 D_{max} をグループ代表値として選択している。

(2) 最適設計の計算手順

以上の基本式を用いた最適設計の計算手順は、図-14に示すようになる。すなわち、その方法は、

- ① まず構造物の形式・荷重などの諸元を入力する。
- ② 部材断面積の初期値を与える。
- ③ 与えられた構造部材によって解析を行う。この際中詰め材のせん断抵抗力を考慮した場合の解析法では、設計ごとにせん断変形量が異なるため、この段階で繰り返し解析を実行する。
- ④ 解析結果から、各部材の応力 σ_i を求め、式(17)によってこの構造物が期待する設計に収束しているかを判定する。
- ⑤ 設計が終了していない場合には、式(12)、(16)によって各部材の改良を行う。
- ⑥ 改良された構造を使用して②の段階から繰り返す。
- ⑦ ③の段階で設計を完了するまで繰り返し計算を行う。
- ⑧ 最終的に得られた断面積より、少し大きな断面積を持つ実在の型钢を配置して確認のため解析を行い、各部材の応力度をチェックする。

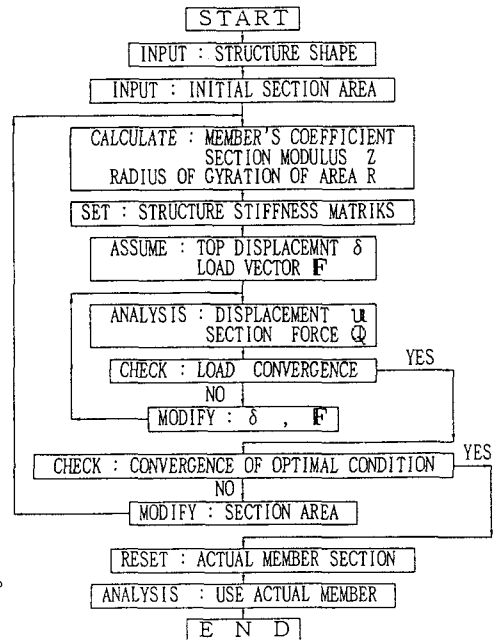


図-14 最適設計の計算手順

6. 最適設計結果と考察

(1) 最適設計計算の効率性

図-15に最適設計計算における繰返し回数と総鋼材量の収束状況を示す。これより、いずれの計算においても14回以内の繰返し回数で収束しており、フルストレス基準による最適設計法では、各段階ごとに数理計画手法による修正計算を行っていないにもかかわらず、非常に良い収束状況を示すことが認められる。特に、提案する中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合には、各解析ごとに設計断面の変化によって中詰材圧による荷重分布の変化があるにもかかわらず、8回の解析によって最適値が得られており、計算効率が良いことがわかる。

ただし、本計算では、式(17)における収束判定値 T を、グルーピングしない場合で0.8、グルーピングを行った場合で0.75と、比較的緩い基準を用いたものであり、これ以上の厳しい値では収束が得られない傾向が見られた。

すなわち、これ以上のより厳密な最適値を得るには最適化手法の改良が必要である。

表-2 中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の最適設計後の部材表

部材番号	部材断面	有効断面積 (cm^2)
1	H-344×348×10×16	112.5
2	H-300×300×10×15	91.1
3	H-400×200×8×13	58.9
4	H-350×175×7×11	41.2
5	H-300×150×6.5×9	28.0
6-15	H-148×100×6×9	16.0
16	H-350×175×7×11	41.2
17	H-244×175×7×11	37.0
18	H-300×150×6.5×9	28.0
19	H-194×150×6×9	23.4
20	H-148×100×6×9	16.0
21-25 29 32-34 45-48	[150×75×6.5×10	15.2
26-28 30-31 35 49-50	[125×65×6×8	10.0
36 44	[200×90×8×13.5	27.7
37-39 44	[150×75×9×12.5	21.9
40	H-250×90×11×14.5	38.6
41-43	H-200×80×7.5×11	31.0

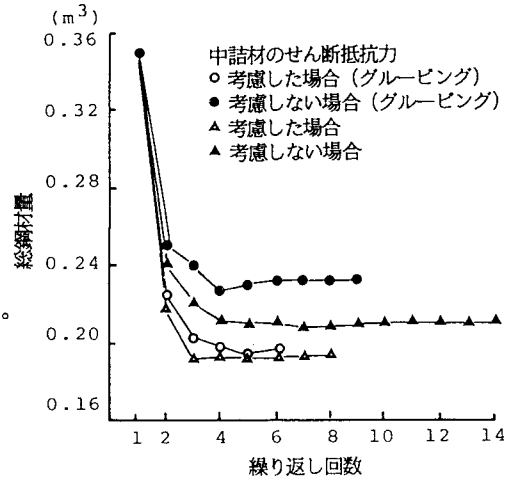


図-15 総鋼材量の収束状況

表-3 中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合の最適設計後の部材表

部材番号	部材断面	有効断面積 (cm^2)
1	H-300×300×10×15	91.1
2	H-340×240×9×14	71.7
3	H-350×175×7×11	41.5
4	H-300×150×6.5×9	28.0
5	H-148×100×6×9	16.0
6-15	H-148×100×6×9	16.0
16	H-350×175×7×11	41.2
17-18	H-346×174×6×9	30.8
19	H-300×150×6.5×9	28.0
20	H-148×100×6×9	16.0
21-25 29 32 45-47	[150×75×6.5×10	15.2
26-28 30-31 33-35 48-50	[125×65×6×8	10.0
36-39 44	[200×80×7.5×11	21.0
40	H-300×90×9×13	34.6
41-43	H-200×70×7×10	17.1

表-4 各設計ごとの総鋼材量の比較

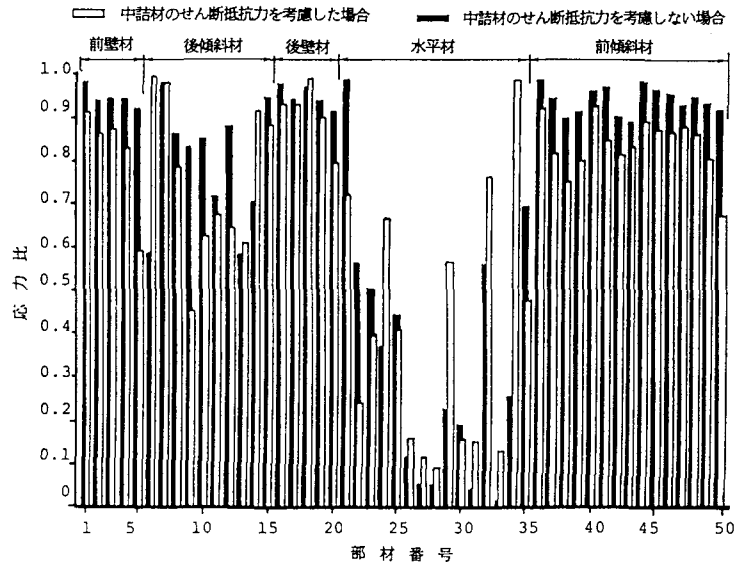
設計区分		総鋼材量 (m^3)	初期値比 (%)	実部材比 (%)
初期値		0.350	100	129
中詰材 せん断 抵抗力 を考慮 しない	理想断面(50部材独立)	0.212	61	
	理想断面(グルーピング)	0.233	67	
	実部材(グルーピング)	0.272	78	100
中詰材 せん断 抵抗力 を考慮 する	理想断面(50部材独立)	0.194	55	
	理想断面(グルーピング)	0.197	56	
	実部材(グルーピング)	0.233	67	86

(2) 総鋼材量と応力比

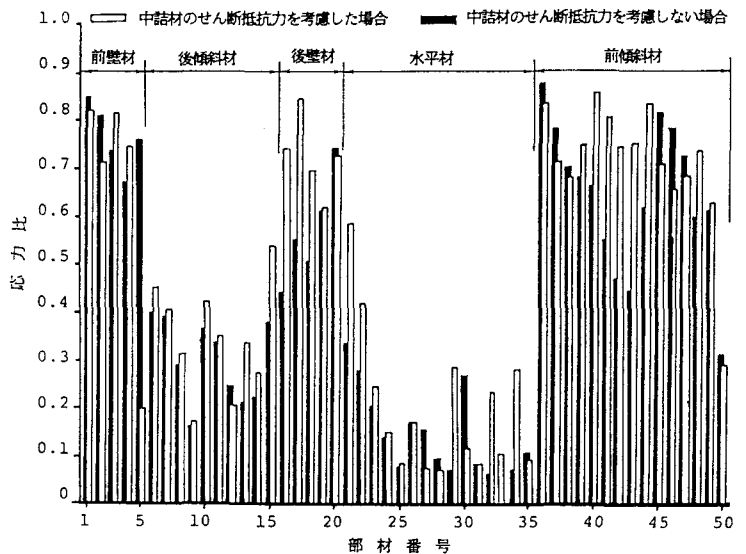
表－２には、中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の最適設計結果の部材表を、表－３には中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合の部材表を示す。また、図－１６には各設計結果における各部材の応力比分布を示す。さらに、表－４には、各設計ごとの総鋼材量の比較を示す。これらより、最適設計によって図－１２で見られた応力比の余裕度に応じて確実に総鋼材量は減少していることがわかる。またその結果、理想断面設計のみならず、実部材配置においても初期値に比し22～33%の鋼材量の軽減が認められる。このことは、本構造物の単位体積当り建設費に占める鋼材量費（間接費含む）の割合が概ね70%程度と非常に大きいことから、かなりの経済的な効果が得られるのではないかと推察される。

(3) 各部材の鋼材量

図－１７に実部材を用いた設計における各部材の鋼材量を中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合と考慮した場合について比較して示す。これは、先に示したグルーピングして計算された最適値に実部材を当てはめて設計されたものである。これより、初期値、中詰材のせん断抵抗力を考慮した場合の最適設計値、中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の最適設計値のいずれの場合にも前壁面の部材の鋼材量は非常に大きいことがわかる。しかし、後傾斜材、水平材の鋼材量がいずれの最適設計値においても明瞭に減少しており、



(a) 各部材ごと独立して設計した場合
(グルーピングをしない場合)



(b) グルーピングを行った場合
図－１６ 最適設計後の各部材の応力比

これらの部材がこの構造形式においてはかなり応力的に余裕のある部材となることがわかる。

ところで、この2つの最適設計値は、明らかに荷重系の違いによって構造物の設計が変化する傾向を表わしているものと思われる。図-18には、それぞれグルーピングを行わない場合の最適値において中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の設計値に対する考慮した場合の設計値の各部材ごとの鋼材量の比を示した。これより、中詰材のせん断抵抗力を考慮した解析をもとに設計を行うと従来の中詰材のせん断抵抗力を無視した場合に比して、前壁面および前傾斜材について小さな部材を用いることが許される一方で、後壁面部材および水平部材に対しては、やや大きめの部材を使用して設計を行う必要があることが認められる。特に、前壁材と後壁材は、中詰材を拘束して鋼製骨組と中詰材のせん断変形を同一に保つ重要な役割を持つため、その大小関係については注意を要するものと思われる。

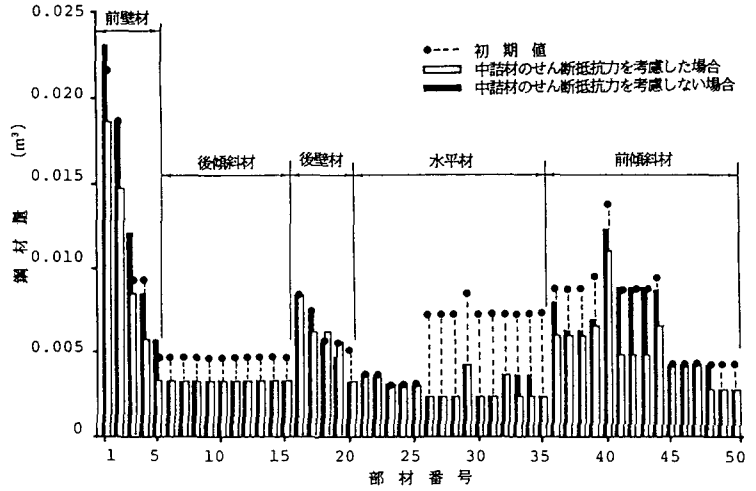


図-17 部材ごとの鋼材量の比較

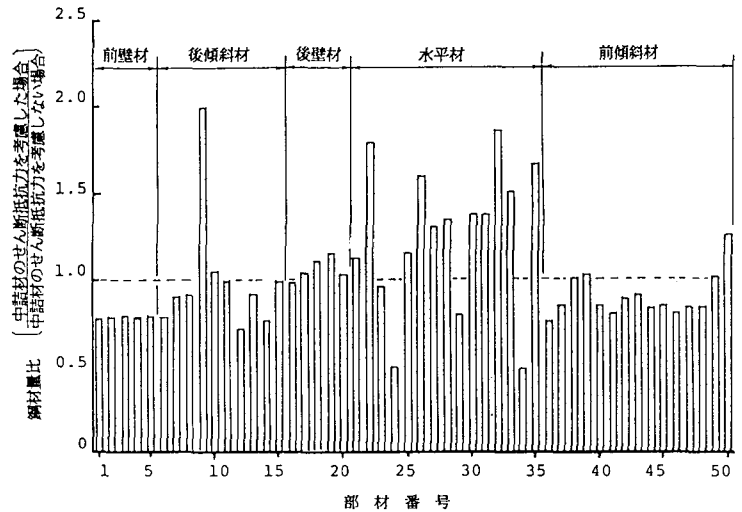


図-18 最適設計値における各部材の鋼材量の比

7. 結 言

本研究は、著者らの行った中詰材のせん断抵抗力の推定法を、実際の鋼製枠砂防ダムに適用した中詰材のせん断抵抗力を考慮した解析手法を提案したうえで、その解析法の適用性と中詰材のせん断抵抗力分担について考察した。さらに、本構造物に対して最適設計手法を適用し、その効果と提案する解析手法が設計に及ぼす影響について検討したものである。

本研究の成果を要約すると以下のようになる。

- (1) 中詰材のせん断抵抗力～変位関係に対応する中詰材圧分布を、マトリックス構造解析と組み合わせることにより中詰材のせん断抵抗力を考慮した鋼製枠砂防ダムの解析手法を提案できた。
- (2) 本解析法によると、標準型の鋼製枠砂防ダムにおいて静水圧荷重を受ける場合、解析時に約7%程度の中詰材のせん断抵抗力分担が得られた。
- (3) フルストレス基準による最適設計手法は、前項のせん断抵抗力～変位関係を考慮した解析計算を含めても、ほとんど問題なく良好な収束計算を行うことが認められた。

- (4) 最適設計を行うと理想的には、約30%強の総鋼材量の軽減が、実部材においても約20%程度の軽減が図られることが認められ、経済的にもかなりの効果が期待できることが推察された。
- (5) 従来の中詰材のせん断抵抗力を考慮しない場合の解析に対して、提案する中詰材のせん断抵抗力を考慮した解析では、前壁面での鋼材を減少させることができる反面、後壁面などにはより強化する必要があることがわかった。

謝辞：本研究の数値計算にあたり当時本科学学生山崎義浩氏のご助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 佐野常昭・鈴木宏：鋼製治山砂防施設の歴史と現状，新砂防，vol.41，No.1，pp.84～91，昭和63年6月。
- 2) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，昭和62年10月。
- 3) 北島昭一：岩盤上のセル構造の破壊について，土と基礎，pp.25～33，1962年10月。
- 4) 伊藤富雄・松井保：鋼板セルの理論解析，災害科学研究所，1980。
- 5) 北島昭一・野田節男・中山種清：根入れ鋼板セルの静的挙動，港湾技研資料No.375，1981
- 6) 香月智・石川信隆・鈴木宏・佐野清：モデル化した中詰材のせん断抵抗実験について，平成元年度砂防学会研究発表会概要集，pp.337～340，平成元年5月。
- 7) 香月智・石川信隆・大平至徳・鈴木宏：円筒要素モデルを用いた中詰材のせん断抵抗力に関する基礎的研究，土木学会論文集，第410号/I-12，pp.359～368，1989年10月。
- 8) 香月智・石川信隆・大平至徳・鈴木宏：Rowe理論を応用した中詰材のせん断抵抗力の評価式に関する一考察，構造工学論文集，Vol.36A，pp.1337～1346，1990年3月。
- 9) 香月智・石川信隆・大平至徳・鈴木宏：鋼製砂防構造物の中詰材のせん断抵抗力および中詰材圧の推定法に関する一考察，土木学会論文集，平成3年4月，掲載予定。
- 10) 国土庁：防災白書（平成2年版），大蔵省印刷局，平成2年6月。
- 11) 土木学会：構造システムの最適化—理論と応用—，pp.138～139，昭和63年9月。
- 12) 田村武・小林昭一・山根剛：有限要素法による弾性体の形状最適化，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，I-252，pp.538～539，昭和62年9月。
- 13) 畔上秀幸・沖津昭慶・高見昭康：適応成長解析による形状最適化法，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集第12巻，pp.539～544，昭和63年7月。

(1990年10月12日受付)