

IGC K5

УДК 624.122.35

REINFORCED EARTH AS MATERIAL FOR A NEW TYPE OF COMPOSITE DAM

WAÏK TER-MINASSIAN, C. E.¹

SYNOPSIS. Reinforced Earth is a combination of fill and reinforcing strips within it. The resulting complex has cohesion and strength but remains highly deformable. A reinforced fill can thus stand vertical or overhanging, even when the conventional retaining wall would not be adequate because of foundation settlement.

If used in hydraulic construction, Reinforced Earth makes it possible to design overflow dykes. It also offers other possibilities for the general layout of the works, combining the advantages of the stiff concrete dam and the deformable earth dam. The over-all cost generally makes this new type of dam quite competitive. The construction and performance of the world's first prototype is described.

REINFORCED EARTH, A NEW MATERIAL

In 1966, Mr Henri Vidal intuitively invented in France a new composite material which he called Reinforced Earth (*la terre armée*) and which will probably prove to be just as important an innovation in building and engineering as reinforced concrete was before. It was not the first time that the idea had been considered of perfecting intrinsically the properties of soil as a building material. The use of bamboo, straw fabrics, steel mesh and sheet piling for making gabions can be considered as the first combination of tensile members with soil. A later development was the "*Mur à Echelles*" (ladder wall) which was put into practice fairly extensively, at least in France, as a substitute for retaining walls. This was the work of André Coyne, who developed it in 1924 and qualified it at one time, with remarkable prescience, as "reinforced fill".

Reinforced Earth and the *Mur à Echelles* do indeed seem to resemble each other at first sight, but closer examination reveals differences in the practical applications of the two systems which are indicative of a major divergence in the basic concepts involved. This André Coyne's disciples would not wish to dispute. Although anchored back into the same soil mass it is designed to support, the *Mur à Echelles* was conceived basically to form, with the associated outer layer of fill, a cohesive

¹ Chief Engineer, Coyne & Bellier, Consulting Engineers, Paris, France.

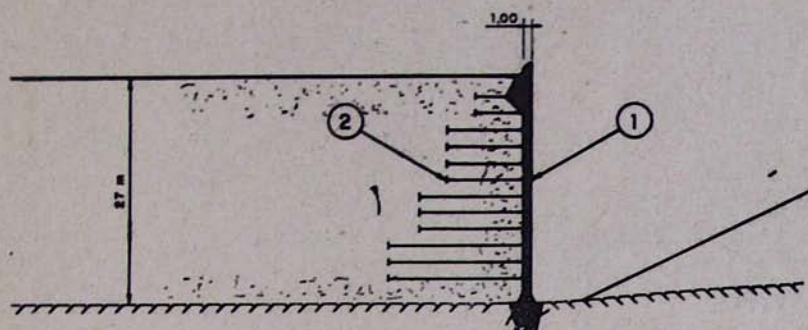


Fig. 1 Typical section through *Mur à Echelles*; 1—Cast-in-place wall; 2—Anchor members with end anchor plates.

նկ. 1. Տիպիկ կտրվածք սանդղաձևային պատի միջով. 1—տեղում պատաստված բետոնե պատ, 2—խարխալին տարրեր ծալրային խարխալին սալերով:

Рис. 1. Типичное сечение через лестничную стенку; 1—изготовленная на месте бетонная стенка; 2—анкерные элементы с концевыми анкерными плитами.

whole which could be approached through structural analysis criteria. This is why the reinforced profile is wider at the base, as with gravity walls (Fig. 1).

The guiding principle in the Reinforced Earth concept, on the other hand, is to confer artificially on the soil mass the mechanical properties of a homogeneous, *orthotropic* material. Reinforced Earth is therefore a truly intimate combination of fill which can resist only compressive and shear loads, and reinforcing strips within it taking the tensile loads. Load transfer between the two relies on friction.

Reinforced Earth fills, very many of which are now used in place of conventional embankments shored up with retaining walls, have three components.

(i) The *fill* does not need to be heavily compacted, although the angle of friction is extremely important.

(ii) The linear *reinforcing members* are usually metallic strips a few millimetres thick and 5 cm to 12 cm wide laid at regular intervals parallel to the direction of the major tensile stress. They are usually horizontal and perpendicular to the free face, and there would be for example a layer of reinforcement every 0.35 m in height, i. e. one for each layer of fill. The horizontal spacing between the individual strips would be from 0.75 m to 0.5 m depending upon the depth below the crest. Precautions are taken against corrosion either by choosing galvanized steel, aluminium, stainless steel or some other corrosion resistant material or by using thicker strip to allow for corrosion. The final choice depends on the ultimate destination of the works.

(iii) The *"skin"* on the free face is a minor practical requirement to prevent the soil running out from between the strips. It is built up of elliptical metal troughs or prefabricated concrete slabs (*"scales"*),

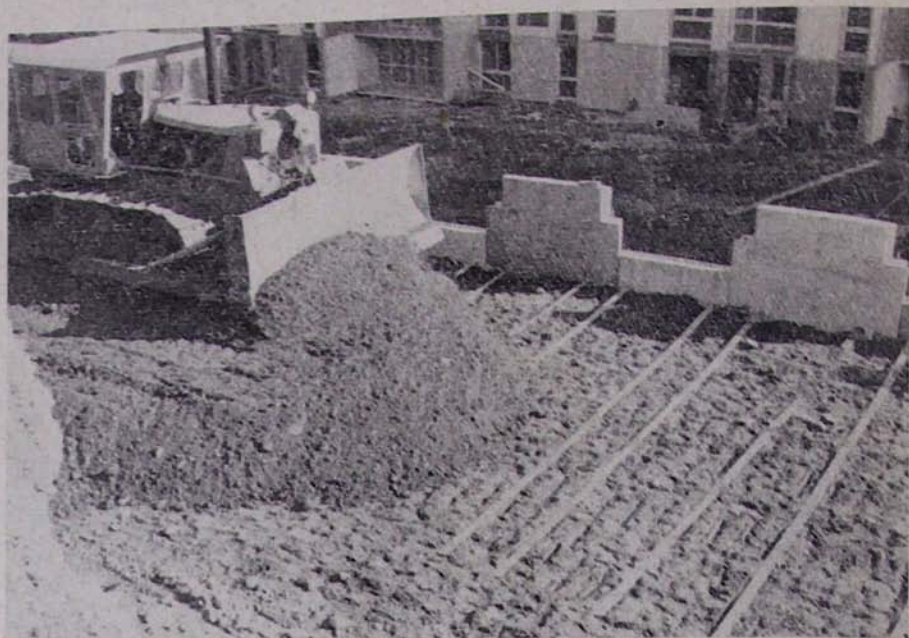


Fig. 2. Construction of a Reinforced Earth fill. Precast skin, concrete scales, reinforcing strips secured to scales. Fill placement under way. Note that bulldozer is working at the edge of the fill.

Նկ. 2. Ամրացած հողից լիցքի կառուցում: Երևում են հավաքովի բետոնե աստիճաններ և երանգ վրա կպցրած ամրացնող շերտեր: Ցույց է տրված լիցքի դրման ընթացքը: Բուլժոզերը աշխատում է լիցքի եզրին:

Рис. 2. Строительство насыпи из армированной земли. Видны бетонные сборные ступени и закрепленные на них армирующие полосы. Показан ход укладки насыпи. Бульдозер работает на краю насыпи.

tagain placed with each lift. Because of their shape and flexibility the metal troughs can accommodate the deformations of the fill without secondary stresses; the same effect is obtained with the scales by leaving the joints open.

With the reinforcement, the resulting complex has cohesion and strength but remains highly deformable. It is an uncomplicated material, simple and quick to use (Fig. 2) and is probably highly resistant to earthquake shocks. Its low unit cost makes it competitive with more conventional materials. These advantages, taken together, explain the rapid development of the process in engineering construction. Three hundred Reinforced Earth fills have already been built to date with an aggregate length of nearly 60 kilometres. The maximum height is 30 m (and in this case, heavy plant circulates at the edge of the fill).

Reinforced Earth also finds applications in engineering problems other than that of ensuring stability of vertical fill. It has been found an attractive substitute for concrete for massive structures on settlement-prone foundations such as bridge abutments, atomic shelters and wharves. It could

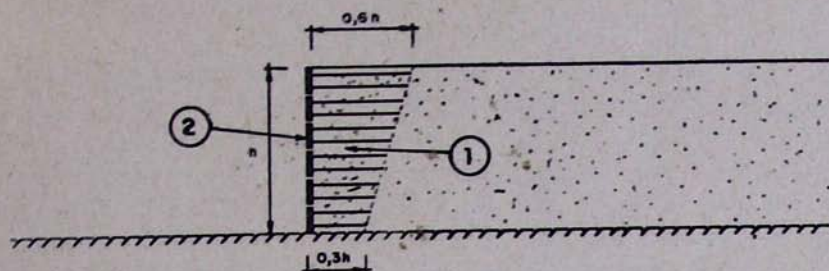


Fig. 3. Typical section through Reinforced Earth fill ($\varphi = 35^\circ$); 1—Reinforced zone
2—Precast concrete scales

նկ. 3. Տիպիկ կտրվածք ամրացած հողից լիցքի միջով ($\varphi = 35^\circ$): 1—ամրացած գոտի, 2—շա-
վարովի բետոնե աստիճաններ:

Рис. 3. Типичное сечение через насыпь из армированной земли ($\varphi = 35^\circ$): 1—армиро-
ванная зона; 2—сборные бетонные ступени.

conceivably be extended to the stabilization of slide areas, with the rein-
forcing strips grouted into drilled holes in the unsafe slope.

DESIGNING REINFORCED EARTH STRUCTURES

Practical development of building with Reinforced Earth has proceed-
ed without waiting for any well-established design rules. The problems
of calculating the reinforcement cross sections and lengths can be ap-
proached in many ways, but theoretical analysis and model tests carried
out in the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris and the
University of California, Berkeley, USA, clearly indicate that methods
currently adopted wisely leave ample safety margins to allow for uncer-
tainty. These will be progressively pared down.

This article is not intended as a discussion of these design criteria,
but merely to introduce engineers to the main conclusions towards which
current research is very probably leading.

The unit force applied to the reinforcing strips per square metre of
free face is proportional to the depth below crest. The total force applied
per linear metre of free face therefore increases as the *square* of the
height h of the wall, and the total weight of reinforcement increases as
the *cube* of the height, as the reinforced zones remain geometrically
similar for all values of h .

Each reinforced zone will theoretically have the shape of a curvili-
near trapezium with the shortest side *at the base* of the wall, although
in practice, the boundaries will be straight lines. As an example (Fig. 3),
a fill material with a friction angle of 35° and a design factor of safety
of 1.45 against failure by sliding at the base will require strips about
 $0.3h$ long at the base and $0.6h$ at the crest. If the foundation is liable to
local shear failure or may be involved in a generalized slide, strips will
have to start below ground level.

The loads on the skin at any given point depend on the height of
fill above. The cost of the skin facing therefore increases only as the

square of the height of the wall and this explains why its relative cost becomes negligible for high retaining walls.

Ignoring other factors, economic criteria based on current French unit rates and prices will show that Reinforced Earth is often an attractive substitute for the ordinary fill-plus-retaining-wall solution and even for grading the slope to its natural angle of repose when it is more than a few metres high. This is not so however for very high slopes because of the cube rule for the increase in reinforcement needed. The limit currently forecast would be several dozen metres depending on the properties of the fill material.

It is important to note that the limit could be raised even higher if it were accepted to abandon our present day design methods and analyse stability under *normal working stresses* instead of at failure. In this case, the thickness of the reinforcement could be tailed down towards the ends instead of being constant, as it is known that, considering dead weight of fill only, the most highly stressed section of the reinforcement strip is the point lying about $0.3h$ in from the face.

REINFORCED EARTH FOR DAMS

The possibility of artificially steepening embankment slopes was successfully used by André Coyne for several water retaining structures. In 1929, he applied the *Mur à Echelles* to the 20 m high upstream cofferdam at Marèges dam site. He then went on to use it for permanent works, such as the Laurenti stone fill dam, 14 m in height with an upstream slope of 1 in 0.25 (1940), and Saint Cassien right bank saddle dam, a 12 m high stone embankment also with an upstream slope of 1 in 0.25 (1956).

It is interesting to note that in all three cases, the deciding factor was lack of space at foundation level for a normal embankment dam, which touches on one of the advantages to he dealt with subsequently. But it is striking that the idea was always to steepen the *upstream* face, in the gravity dam tradition, although without going so far as to make it absolutely vertical.

The slight batter considerably reduces the number of reinforcing tension members needed (in both *Mur à Echelles* and Reinforced Earth designs), but prevents the engineer from making full use of the potential he might obtain by turning the whole dam back to front so that the *downstream* face is vertical or even slightly overhanging (with a watertight facing or inclined core) (Fig. 4). This possibility was first mooted simultaneously with the appearance of Reinforced Earth in dam building, and an agreement was signed in 1973 between the *Société d'Etudes de la Terre Armée* and Coyne & Bellier on hydraulic works.

The merits of this design are so evident and far-reaching that one can imagine a whole new generation of dams which would not be so allor-made as our present dams. Without going to extremes, it can be

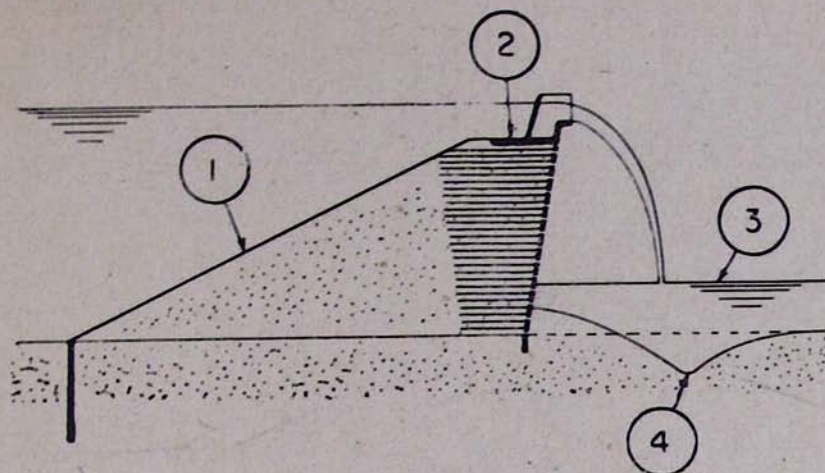


Fig. 4. Section of an overflow Reinforced Earth dam. 1—Watertight facing; 2—Concrete apron; 3—Tailwater level; 4—Depth of maximum scour hole.

Նկ. 4. Կտրվածք ամրացած հողից ջրբաղ ամրացման միջոց: 1—անջրանցիկ ծածկույթ. 2—բետոնե պարտյան. 3—ստորին բլեֆի մակարդակ. 4—ողողման մեծագույն փոսի խորություն:
Рис. 4. Сечение через водосливную плотину из армированной земли: 1—водоупорное покрытие; 2—бетонный фартук; 3—уровень нижнего бьефа; 4—глубина наибольшей ямы размыва.

said that they would probably be more accessible to rule-of-thumb construction and eminently suitable for extensive prefabrication.

A vertical or slightly overhanging downstream face gives a new perspective to the idea of *overspill* earth dam. The problem of energy dissipation would be the same as with an overspill arch dam for example, and can be conveniently overcome if tailwater is deep enough to act effectively as a cushion. We can calculate (and check on scale models) the maximum scour hole depth for different heights and spillway discharges per linear metre of overspill. If necessary, the dam could be founded in a deeper trench so that there is no danger of the toe resting on the lip of the scour hole. Of course, the upstream head would throw the nappe out from the foot of the dam without directly endangering it (the point of impact moving farther downstream with dam height and discharge). On the contrary, experience demonstrates the falling water would tend to wash material back towards the dam.

Model tests have shown the advantages of this solution as compared with the alternative of protecting the sloping downstream face by means of anchored mesh or riprap, with the remaining energy still having to be dissipated on large boulders at the toe or in hydraulic jumps in concrete stilling basins.

As mentioned above, steepening the embankment *halves the base area*, a valuable asset when the relief, geology or other works nearby leave no room for the full section.

This also considerably *shortens the diversion works* when cofferdams are Reinforced Earth. They would be only half the length with a

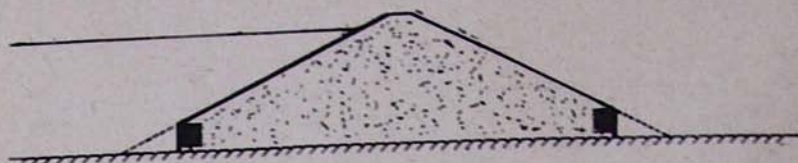


Fig. 5. Shortening the base length Reinforced fills.

Նկ. 5. Ամրացած հիմքի երկարության կրճատում ամրացած լիցքի օգնությամբ:
Рис. 5. Укорочение длины основания с помощью армированной насыпи.

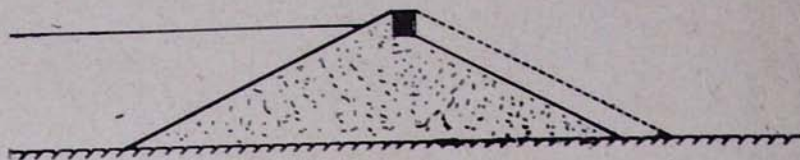


Fig. 6. Saving fill material with Reinforced earth crest.

Նկ. 6. Լիցքի նյութի տնտեսում ամրացած հովից կառարի օգնությամբ:
Рис. 6. Экономия материала насыпи с помощью гребня из армированной земли.

Reinforced Earth main dam. An added advantage of this is that the capacity of the diversion tunnel or channel could be smaller: the critical flood during construction for which the diversion works are dimensioned could be smaller than with a standard embankment dam, because *an unfinished dam in Reinforced Earth can be overtopped* without serious damage if a few simple precautions are taken.

A vertical downstream face offers other possibilities, even if the final dam is not to be to an overspill structure. If a surface channel spillway is decided upon for any reason, passing round the abutment, *there is no need to provide long outlet channels* or tunnels to a point downstream of the dam toe. Flood discharge can return to the river near the axis of the dam as with concrete dams.

The same applies if a surface or underground powerstation is to be built with the dam. *The water paths are so much shorter* that there would be savings on the cost of the outlet works, and in addition on the very expensive surge tanks and other control works, which could be dispensed with altogether in most instances.

There is no doubt that the appearance of the „half-dyke“ introduces a new types of dam into the usual catalogue which combines the advantages of the stiff concrete dam and the deformable earth dam. One can expect that it will come into widespread use, possibly at first in combination with ordinary embankment profiles. For instance, one can truncate the embankment slopes by reinforcing the fill at the bottom to cut down the total base area (Fig. 5) or sit a free-standing Reinforced Earth crest on top of a conventional earth dam (Fig. 6). Such expedients would not of course realise the full potential of this new material, but there would nevertheless be appreciable economies: for example, the fill volume saved in the second case above is proportional to final dam height.

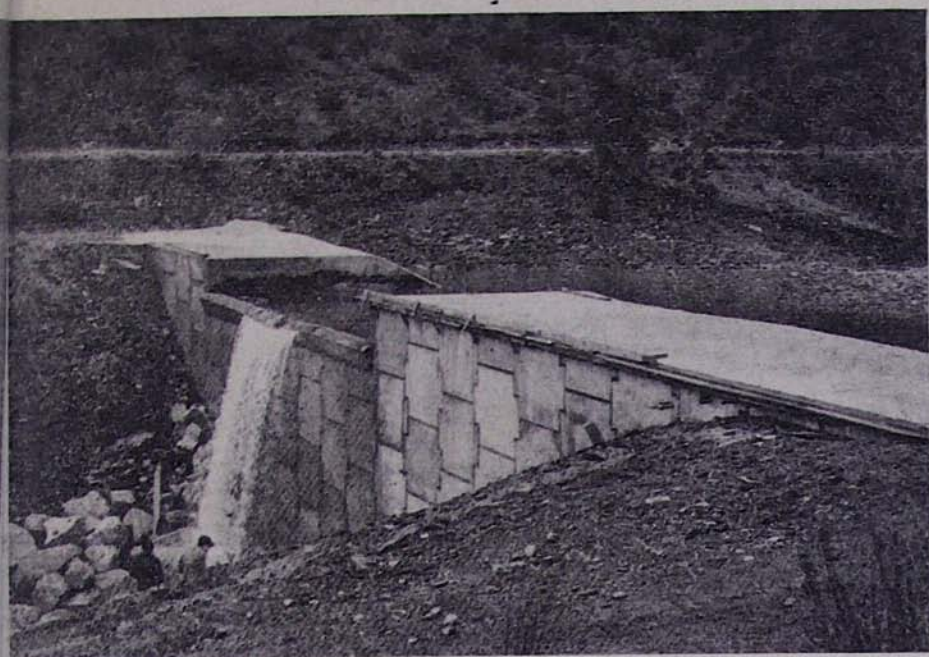


Fig. 7. The Vallon des Bimes prototype dam (1972).
 նկ. 7. Վալոն դը Բիմի (1972) ամրաբարակի նախատիպը:
 Рис. 7. Прототип плотины в Валлон де Бим (1972).

THE VALLON DES BIMES PROTOTYPE

The prototype Reinforced Earth dam already exists at Vallon des Bimes in Southern France (Fig. 7). It was built on the principles described by the Direction Départementale de l'Agriculture du Var. It is a modest dam (height 9 m, length 36 m) which impounds a standing supply of 36,000 m³ of water for fighting local forest fires. This means that all inflow must be permanently spilled once the lake is full. The maximum flood is estimated at 20 m³/s, and there is no watchman.

The dam, which contains 2,500 m³ of fill, was built in seven weeks in November and December 1972 by a local contractor employing only eight men using limited plant. It was completed just before a night of heavy runoff in which the lake immediately filled and spilling began with a 15 to 20 cm head on the sill. It has thus been in operation since this date.

It is founded half on micaschist and half on scree material from the slope. A drainage blanket under the base protects the body of the dam from saturation through water coming from the foundation, in which there are a few springs; no effort was made to control them with a grout curtain or drilled drains.

The upstream slope of the dam is 1 in 2. The crest width is 5 m and the downstream face is vertical. The watertight upstream facing consists of a layer of flocked polyester thread (Bidim) hot impregnated with

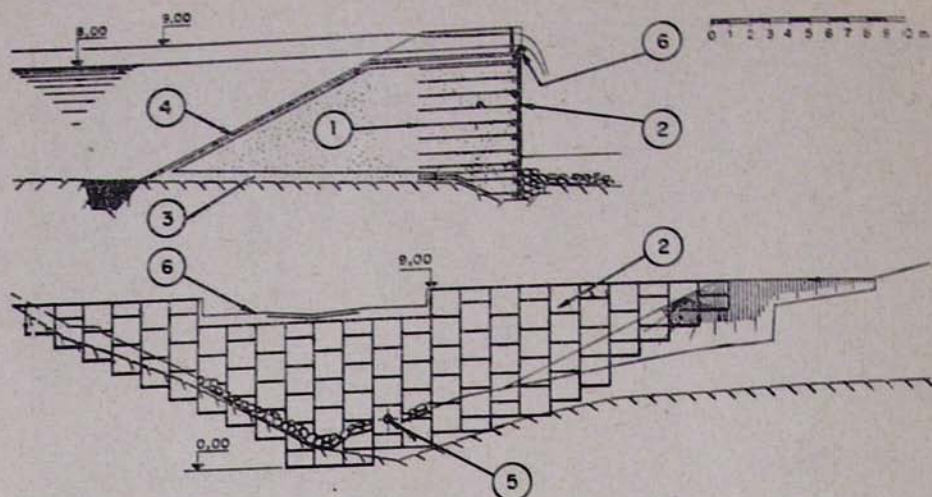


Fig. 8. Typical section and downstream elevation of Vallon des Bimes dam; 1—Reinforcing strips; 2—Concrete scales; 3—Drainage blanket; 4—Watertight facing and lean concrete protection; 5—Bottom outlet; 6—Overflow weir.

Նկ. 8. Վալոն դը Բիմի ամրառակի տիպիկ կտրվածքը և ստորին ճակատը: 1—ամրացնող շերտիկներ, 2—բետոնե աստիճաններ, 3—ցամաքորդային շերտ, 4—անցրանցիկ ծածկույթ և վտիար բետոնից պաշտպանություն, 5—հատակային ջրթող, 6—ջրթող շեմ:

Рис. 8. Типичное сечение и низовой фасад плотины Валлон де Бим: 1—армирующие полосы; 2—бетонные ступени; 3—дренирующий слой; 4—водоупорное покрытие и защита из тощего бетона; 5—донный спуск; 6—водосливной порог.

bitumen road emulsion, laid over a 30 cm drainage layer and protected at the surface by 7 cm of lean concrete. There is an 11.4 m overspill section near the centre of the crest capable of discharging the design flood with a 1 m head on the sill (Fig 8).

The Reinforced Earth skin consists of cruciform concrete elements 0.18 m and 0.20 m thick measuring 1.5 m by 1.5 m. Their unit weight being very small (in the region of 1 ton), they were transported by road from the nearest prefabrication yard about 200 km away and placed without difficulty with a small truck-mounted crane. The reinforcement is galvanized steel strip on 0.75 m centres laterally and vertically.

A 30 cm cast iron pipe through the base fill with control valves at its downstream end is used as the bottom outlet and fire service supply.

The limited storage capacity and absence of risk downstream explains why the dam could be built without the more elaborate techniques that would have been required for a larger dam. Nevertheless, there were hardly any modifications to normal fill placement in the reinforced zone and work was so simple that it scarcely increased the unit costs over that of ordinary fill.

The total cost was 180,000 Francs, made up as follows: fill—21%, parts and erection of downstream face—42%, upstream watertight facing—14%, stripping, cut-off trench, dewatering, river diversion—23%.

The relative proportion of each item does not seem to bear out what is said above as to the economy of the process, as in this specific case, the cost of parts and erection is far higher than the savings from eliminating the downstream fill. But allowance must be made for the small size of the dam and the fact that it is a prototype. The above costs are, far from being truly representative of what can be expected on large projects.

The fact remains that the Owner of the works was well rewarded for his initiative in experimenting with this new type of dam, because there was certainly a considerable saving in overall cost as compared to a conventional embankment dam with lateral channel spillway capable of discharging floods of 20 m³/s.

ԱՄՐԱՑԱԾ ՀՈՂԸ ՈՐՊԵՍ ՆՅՈՒԹ ՆՈՐ ՏԻՊԻ ԲԱՎԱԴՐԱԿԱՆ ԱՄՐԱՐԱՐՏԱԿՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

ԻՆՅԵՆԵՐ-ՀԻՇԱՐԱՐ ՎԱՀԻԿ ՏԵՐ-ՄԻՆԱՍՅԱՆՆԻ

ՈՒՆՖԵՐԱՏ: Ամրացած հողը լիցքի և նրա մեջ գտնվող ամրացնող շերտերի զուգորդությունն է: Ստացվող կոմպլեքսն ունի կցում և դիմադրություն, բայց մնում է բարձր ձևափոխող: Այսպիսով, ամրացած լիցքը կաշող է մնալ ուղղաձիգ կամ կախված դիրքում, նույնիսկ այն դեպքում, երբ հիմքի նստման պատճառով սովորական հենապատը պահանջներին համապատասխան չլինի: Հիդրոտեխնիկական կառուցվածքներում ամրացած հողն օգտագործելիս հնարավոր է նախագծել ջրաթափ ամբարտակներ, կառույցների ընդհանուր հատակագծման համար՝ նա նաև տալիս է ուրիշ հնարավորություններ միավորելով կոշտ բետոնե ամբարտակի և ձևափոխող հողային ամբարտակի առավելությունները: Այս նոր տիպի ամբարտակների ընդհանուր արժեքը դրանց դարձնում է բավականին մրցակցական: Նկարագրված են այս տիպի աշխարհի առաջին ամբարտակի կառուցվածքը և աշխատանքի կատարումը:

Ամրացած հողը որպես նոր նյութ

1966 թ. Ֆրանսիայում Անրի Վիդալը կոահողարար առաջարկեց մի նոր բաղադրովի նյութ, որը նա անվանեց «ամրացած հող» (la terre armée) և համաձայնաբար, կլինի նույնքան կարևոր նորամուծություն շինարարության և տեխնիկայի մեջ, որքան երկաթբետոնն էր առաջ:

Ամրացված հող գաղափարի առաջնորդող սկզբունքն է՝ հողի զանգվածին արհեստականորեն հաղորդել համասեռ օրթոտրոպիկ նյութի մեխանիկական հատկություններ: Այն, իրոք, լիցքի (որը կարող է դիմադրել միայն սեղմող և կտրող բեռնվածքներին) և ամրացնող շերտիկների (որոնք կարող են իրենց վրա վերցնել ձգող բեռնվածքները) համակցություն է: Այդ երկուսի միջև բեռնվածքի փոխադրումը հիմնված է շոշափման վրա: Այդ խնդրի ավելի վաղ լուծումներից մեկն էր սանդուղքային պատը (նկ. 1)²:

Ամրացած հողի լիցքերը, որոնցից շատերն այժմ օգտագործվում են հենապատերով պարերին հարող սովորական ջրաթմբերի փոխարեն, ունեն երեք առանձնահատկություն:

1. Լիցքը չի պահանջում ուժեղ խտացում, չնայած շփման անկյունը չափազանց կարևոր է:

2. Գծային ամրացնող տարրերը սովորական մետաղական շերտեր են՝ մի քանի միլիմետր հաստությամբ և 5-ից մինչև 12 սմ լայնությամբ, տեղադրված կանոնավոր ընդմիջումներով՝ գլխավոր ձգող լարման ուղղությամբ ուղղահանու: Դրանք սովորաբար հորիզոնական են և ուղղահայաց աղաթ

¹ Քբոյն և Բեյլեն խորհրդատու ֆիրմայի գլխավոր ինժեներ, Փարիզ, Ֆրանսիա:

² Նկարները տես էջ 107—114:

րական լուծում և նույնիսկ, մինչև բնական շեպի անկյունը ձեռնառու փոխարինող, եթե միայն նրա բարձրությունը մի քանի մետրից ավելի է: Սակայն այսպես չէ շատ բարձր լանջերի համար, որովհետև այստեղ գործում է ամրացման աճման խորանարդ չափի կանոնը: Ներկայումս սահմանը կլինի մի քանի տասնյակ մետր՝ կախված լիցքի նյութի հատկություններից:

Ամրացած հողը ամբարտակների համար

Ամբարտակներ նախագծողները լիովին կարող են օգտագործել ամրացած հողը՝ պատրաստելով ամբարտակի լիցքի ստորին եզրը ուղղահայաց կամ նույնիսկ մի փոքր կախված (անջրաթափանց երեսապատումով կամ թեք միջուկով ծծանցման դեմ պայքարի համար, նկ. 4): Այս հնարավորությունը քննարկման է դրվել ամբարտակաշինության կառուցման մեջ ամրացած հողի հայտնվելու հետ միաժամանակ և 1973 թ. հիդրոտեխնիկական աշխատանքների վերաբերյալ համաձայնագիր է ստորագրվել ամրացած հողի ուսումնասիրման քննկրության (Société d'étude de la terre armée) ու Քոյն և Բելլիե ֆիրմայի (Coyne & Bellier) միջև:

Այս նախագծի արժանիքներն այնքան ակնհայտ են և հեռանկարալին, որ կարելի է պատկերացնել ամբարտակների մի ամբողջ նոր սերունդ, որոնք այնքան էլ տեղանքի հետ կապված չեն լինի, ինչպես ներկայումս: Առանց չափազանցության կարելի է ասել, որ դրանք, հավանաբար, ավելի հարմար կլինեն մոտավոր հաշվարկներով շինարարության և միանգամայն ընդունելի լայնատարած հավաքովի կառուցման համար:

Ուղղահայաց կամ թեթևակի կախված ստորին նիստերը տալիս են նոր հեռանկարներ ջրբաղ ամբարտակների գաղափարին: Օրինակ, էներգիայի մարման պրոբլեմը կլինի այնպիսին, ինչպիսին ջրթող կամարածե ամբարտակի համար է և կարող է հեշտությամբ լուծվել, եթե ստորին բլեֆը բավականաչափ խորն է որպես էֆեկտիվ բարձ գործելու համար: Եթե անհրաժեշտ է, ամբարտակը կարող է հիմնվել ավելի խոր խրամատում, այնպես որ հեղեղատի եզրին հենման դեպքում ամբարտակի ստորոտի լվացման վտանգը կորցնում է իր նշանակությունը: Իհարկե, վերին բլեֆի կողմից ճնշալուծը կշարտի ջրային շիթը ամբարտակի ստորոտից, և այսպիսով, կհեռացնի ուղիղ լվացման վտանգը (հարվածի կետը տեղաշարժվում է ամբարտակից նրա բարձրության և ծախսի հետ միասին): Ընդհակառակն, փորձը ցույց է տալիս, որ թափվող ջուրը ձգտում ունի նյութը հետ բերել դեպի ամբարտակ:

Մոդելային փորձարկումները ցույց են տվել թեք ստորին երեսակի պաշտպանման համար այդ լուծման առավելությունները խարսխված ցանցի կամ քարայրիցքի օգնությամբ այլ ընտրական եղանակի նկատմամբ, որտեղ մնացած էներգիան մարվում է ստորոտի մոտ խոշոր գլաքարերի վրա կամ հիդրավիկ ցատկերով բետոնե ավազաններում:

Լիցքին մեծ թեքություն տալը կլիսով չափ փառացնում է հիմքի մակերեսը, որը շատ արժեքավոր է, երբ ռելիեֆի, երկրաբանությունը կամ մյուս աշխատանքները համարյա տեղ չեն թողնում լրիվ կտրվածքի իրագործման համար: Այդ նույնպես նշանակալից չափով փոքրացնում է դերիվացիոն աշխատանքները, եթե անջրաթափանց պատնեշն արված է ամրացած հողից: Իրանը ունեն միայն կիսով չափ երկարություն, եթե գլխավոր ամբարտակը պատրաստվում է ամրացած հողից: Լրացուցիչ առավելությունը կայանում է նրանում, որ դերիվացիոն թունելը կամ ջրանցքը կարող է լինել ավելի փոքր, քանի որ ամրացած հողից չավառված ամբարտակը կարող է ողողվել առանց լուրջ վնասների, եթե կիրառված են մի քանի պարզ նախազգուշական միջոցներ:

Ուղղաձիգ ստորին նիստը ներկայացնում է այլ հնարավորություններ, նույնիսկ եթե վերջնական ամբարտակը չլինի ջրաթափ կառուցվածքի: Եթե որևիցե պատճառով նախատեսվում է մակերեսային ջրաթափ ջրանցք, որն անցնում է ամբարտակի հաստարանի շուրջը, ապա անհրաժեշտություն չկա

Համար 2-րդ փոր է (շուրջ 1 տոննա). դրանք ավտոճանապարհով տեղափոխ-
են մոտավորապես 200 կմ հեռավորության վրա գտնվող հավաքովի
տեղացվածքների մոտ եղած գործարանից և առանց դժվարության տեղադրվել
ամբարձիրով: Ամրացումն իրենից ներկայացնում է ցինկապատ եր-
կաշի շերտեր, որոնք տեղադրված են կողմնային և ուղղաձիգ ուղղություն-
ով կենտրոնների միջև 0,75 մ հեռավորության վրա:
Ամրարտակի հողաթմբի ստորին մասի միջով անցկացված է 30 սմ
ամաղծով շուգունն խողովակ, որն ունի վերահսկիչ կափույրներ ստորին
շրջանի ուղղության մոտ. այն ծառայում է որպես հատակային ջրթող և
մղելու ջրամատակարարում:
Ջրամբարի ոչ մեծ ծավալը և դրանից ներքև գտնվող կառույցների
ատամաձև կիսկի բացակայությունը բացատրում է, թե ինչու ամբարտակը
պարզ էր կառուցվել առանց մանրադնին մշակված տեխնիկայի օգտագործ-
ման, որը կպահանջվեր մեծ ամբարտակի համար: Այնուամենայնիվ, ամրաց-
ված զոտում չէր արված համարյա ոչ մի փոփոխություն հողաթմբի նորմալ
դարձման համեմատ, և աշխատանքն այնքան պարզ էր, որ այն համարյա
անդրադարձավ սովորական հողաթմբի նկատմամբ միավոր արժեքի վրա:
Պարտիկի ամբարտակն ունի ընդհանուր արժեքի զգալի տնտեսում՝ վայրկյա-
նում 20 մ³ հորդացման ընդունակ կողմնային ջրթող առկա սովորական լցովի
ամբարտակի հետ համեմատած:

АРМИРОВАННАЯ ЗЕМЛЯ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ НОВОГО ТИПА СОСТАВНЫХ ПЛОТИН¹

Инженер-строитель ВАИК ТЕР-МИНАСЯН²

Реферат. Армированная земля представляет собой комбинацию насыпи и ар-
мирующих полос в ней. Получаемый комплекс обладает сцеплением и прочностью, но
остаётся высоко деформируемым. Армированная насыпь может таким образом стоять
вертикально или нависать даже в тех случаях, когда обычная подпорная стенка не
будет адекватной вследствие осадки основания. При применении в гидротехнических по-
сооружениях армированная земля даёт возможность проектирования водосливных пло-
тин. Она также даёт другие возможности для генеральной планировки сооружений, со-
единяющих преимущества жестких бетонных и деформируемых земляных плотин. Общая
стоимость этого типа плотин делает их вполне конкурентоспособными. Описано соору-
жение и производство работ первой в мире плотины этого типа.

Армированная земля как новый материал.

Анри Видаль в 1966 году во Франции интуитивно пришел к соз-
данию нового составного материала, названного «армированной зем-
лей» (la terre armée), который, вероятно, будет таким же важным нов-
шеством в сооружениях и в технике, как это ранее было с железобе-
тоном.

Руководящий принцип в концепции армированной земли—искусст-
венное сообщение грунтовой массе механических свойств однородного
ортотропного материала. Это действительно тесное сочетание насыпи,
которая может сопротивляться только сжимающим и сдвигающим на-
грузкам, и армирующих полос в ней, принимающих на себя растяги-
вающие нагрузки. Передача нагрузок в ней основывается на трении.
Одним из более ранних решений этой же задачи была лестничная
стенка (рис. 1)³.

¹ Перевод с английского проф. Г. И. Тер-Степаняна.

² Главный инженер консультативной фирмы Койн и Белье, Париж, Франция.

³ Рисунки см. на стр. 107—114.

Насыпи из армированной земли, многие из которых применяются в настоящее время вместо обычных дамб с примыканием в виде подпорных стенок, имеют три особенности:

1) насыпь не нуждается в сильном уплотнении, хотя угол трения чрезвычайно важен;

2) линейные армирующие элементы обычно представляют собой металлические полосы толщиной в несколько миллиметров и шириной от 5 до 12 см, уложенные с правильными интервалами параллельно направлению главного растягивающего напряжения. Они обычно горизонтальны и перпендикулярны свободной грани. Принимаются меры против коррозии или путем выбора оцинкованной стали, алюминия, нержавеющей стали или некоторых других антикоррозионных материалов, или применения более толстых полос, рассчитанных на коррозию;

3) к «оболочке» на свободной грани предъявляется незначительное требование—предотвращение вытекания грунта из пространства между полосами. Оболочка делается из эллиптических металлических желобов или сборных бетонных плит («ступеней»), также укладываемых с каждым поднятием насыпи. Вследствие своей формы и гибкости, металлические желобы могут приспособливаться к деформациям насыпи без вторичных напряжений; в случае ступеней тот же эффект достигается путем оставления открытых швов.

Благодаря армированию, получающийся в результате комплекс обладает сцеплением и прочностью, но остается высоко деформируемым. Это несложный материал, простой и быстрый в использовании (рис. 2) и, вероятно, хорошо сопротивляющийся сейсмическим толчкам. Его низкая стоимость делает его конкурентоспособным по отношению к более обычным материалам. Эти преимущества, взятые вместе, объясняют быстрое распространение этого способа в инженерном строительстве. К настоящему времени уже построено триста армированных земляных насыпей с общей длиной около 60 км. Наиболее высокая из них имеет 30 м, и в этом случае на краю насыпи действует тяжелая установка.

Помимо того, что армированная земля обеспечивает устойчивость вертикальных насыпей, она находит применение также и при решении других инженерных проблем. Армированная земля привлекает внимание как заменитель бетона для массивных сооружений в склоновых к осадке основаниях, как-то: мостовые устои, атомные убежища и пристани. Ее можно с уверенностью применить и для стабилизации оползневых участков, с закреплением армирующих полос в скважинах, пробуренных в неустойчивом склоне.

Проектирование сооружений из армированной земли

Сооружения из армированной земли получили практическое применение до создания каких-либо хорошо разработанных правил проектирования. Настоящая статья имеет целью показать инженерам те главные выводы, к которым, весьма вероятно, ведут современные исследования.

Общий вес армирования увеличивается в кубе высоты h насыпи, так как армированные зоны геометрически подобны для всех значений h .

Каждая армированная зона теоретически имеет форму криволинейной трапеции с наиболее короткой стороной, расположенной в основании грани, хотя практически границы—прямые линии. Например: насыпной материал с углом трения 35° и проектным запасом устойчивости 1,45 по отношению скольжения по основанию потребует полосы длиной $0,3h$ в основании и $0,6h$ в вершине (рис. 3). Если осно-

вание способно к местным обрушениям при сдвиге или может быть вовлечено в общее оползание, полосы должны начинаться ниже уровня земли.

Нагрузки на оболочки в любой точке зависят от высоты вышерасположенной насыпи. Поэтому стоимость облицовывающей оболочки увеличивается лишь как *квадрат* общей высоты; это объясняет, почему ее относительная стоимость делается пренебрежимо малой для высоких насыпей.

Если не учитывать остальных факторов, то экономический критерий, основанный на существующих во Франции ценах и заработной плате, показывает, что армированная земля часто является выгодной заменой обычного решения «насыпь и подпорная стенка» и даже *выполживания склона до угла естественного откоса*, если только его высота более нескольких метров. Это, однако, не так для очень высоких склонов, потому что здесь действует кубическое правило увеличения армирования. В настоящее время пределом будет несколько десятков метров, в зависимости от свойств материала насыпи.

Армированная земля для плотин

Проектировщики плотин могут полностью использовать армированную землю, делая низовую грань насыпи плотины вертикальной или даже слегка нависающей (с водонепроницаемой облицовкой или наклонным ядром для борьбы с фильтрацией) (рис. 4). Эта возможность была поставлена на обсуждение одновременно с появлением армированной земли в плотиностроении, и в 1973 году между Обществом по изучению армированной земли (Société d'étude de la terre armée) и фирмой Койн и Белье (Coype & Bellier) был подписан договор на гидротехнические работы.

Преимущества этого проекта настолько очевидны и идут так далеко, что можно представить себе целое новое поколение плотин, которые не будут так привязаны к месту, как в настоящее время. Не впадая в крайности, можно сказать, что они, вероятно, будут подходящими для строительства по приближенным подсчетам и вполне приемлемыми для широкого сборного строительства.

Вертикальные или слегка нависающие низовые грани дают новые перспективы для идей *водосливных* плотин. Так например, проблема гашения энергии будет той же самой, что и для водосливных арочных плотин, и может быть легко решена, если нижний бьеф будет достаточно глубок, чтобы эффективно действовать в качестве подушки. Если необходимо, плотина может иметь основанием более глубокую траншею, так что отпадает опасность размыва ее подошвы при опирании на бровку промоины. Конечно, напор со стороны верхнего бьефа отбросит водяную струю от подошвы плотины и таким образом устранил опасность прямого подмыва (точка удара отодвигается от плотины вместе с ее высотой и расходом). Наоборот, опыт показывает, что падающая вода имеет тенденцию намывать материал в обратном направлении к плотине.

Модельные испытания показали преимущества этого решения по сравнению с альтернативной защитой наклонной низовой грани с помощью заанкеренной сетки или каменной наброски, где оставшаяся энергия должна быть погашена на крупных валунах у подошвы или в гидравлических прыжках в бетонных бассейнах.

Придание насыпи большой крутизны *уменьшает наполовину площадь основания*, что очень ценно, когда рельеф, геологические условия или другие работы почти не оставляют места для осуществления полного сечения. Это также значительно *уменьшает деривационные работы*.

если водонепроницаемая перемишка делается из армированной земли. Они имеют лишь половинную длину, если главная плотина делается из армированной земли. Дополнительное преимущество состоит в том, что деривационный туннель или канал может быть меньше, так как незавершенная плотина из армированной земли может быть даже затоплена без серьезных повреждений, если принять несколько простых предохранительных мер.

Вертикальная низовая грань представляет другие возможности, если даже окончательная плотина не должна быть водосливной конструкцией. Если по какой-либо причине предусматривается поверхностный водосливной канал, проходящий вокруг примыкания, то нет необходимости устраивать длинные выпускные каналы или туннели к нижнему бьефу. Паводковый расход может быть возвращен в реку вблизи от оси плотины, как это делается для бетонных плотин.

То же относится к случаю, когда вместе с плотиной должна быть построена подземная или наземная силовая станция. Водные пути могут быть существенно короче, так что образуется экономия за счет стоимости выпускных сооружений и очень дорогих уравнильных резервуаров и других регулирующих устройств, без которых в большинстве случаев можно обойтись.

Несомненно, что появление «полуплотин» (half-dyke) вводит в обычный перечень новый тип плотин, который сочетает преимущество жестких бетонных плотин и деформируемых земляных плотин. Можно ожидать, что он получит широкое распространение, возможно, прежде всего в сочетании с насыпями обычных профилей. Например, можно отсечь откосы насыпи, армируя внизу насыпь для уменьшения общей площади основания (рис. 5) или посадить свободно стоящий армированный гребень на верхушку обычной земляной плотины (рис. 6). Эти приемы, конечно, не используют всех потенциальных возможностей нового материала, но будут тем не менее экономичны: например, объем насыпи, сэкономленный во втором случае, в верхней части будет пропорционален окончательной высоте плотины.

Прототип Валлон де Бим

Прототип плотины из армированной земли существует в Валлон де Бим в Южной Франции (рис. 7). Плотина была сооружена по принципам, описанным Сельскохозяйственным управлением департамента Вар. Это небольшая плотина (высота 9 м, длина 36 м), которая запруживает воду для обеспечения постоянного запаса воды (36000 м³) для борьбы с местными лесными пожарами. Это означает, что весь приток должен постоянно сбрасываться, как только водоем оказывается заполненным. Максимальный паводок установлен в размере 20 м³/сек; при водоеме нет сторожа.

Плотина с объемом насыпи 2500 м³ была построена в течение семи недель в ноябре-декабре 1972 г. местным подрядчиком, у которого работало только восемь человек, применявших ограниченное оборудование. Она была закончена как раз перед той ночью, когда сильный ливень заполнил водоем и начался водосброс с высотой от 15 до 20 см над порогом. Начиная с этого времени плотина находится в эксплуатации.

Она была основана наполовину на слюдистых сланцах и наполовину на каменистой осыпи, спустившейся со склона долины. Дренарующий слой под основанием защищает тело плотины от насыщения водой, проникающей из основания, где имеется несколько родников; не было сделано никаких попыток организовать борьбу с ними с помощью водонепроницаемой завесы или буровых дрен.

Верховой склон плотины имеет уклон 1:2. Ширина гребня 5 м, а низовая грань вертикальная. Верховое водонепроницаемое покрытие состоит из слоя пушистой полиэстеровой ткани (Бидим), пропитанной горячей дорожной битумной эмульсией, уложенной на дренирующий слой толщиной 30 см и защищенной с поверхности слоем тощего бетона толщиной 7 см. В середине гребня имеется водосливная секция длиной 11,4 м, способная пропускать расчетный расход с высотой 1 м над порогом (рис. 8).

Оболочка армированной земли состоит из крестообразных бетонных элементов толщиной 0,18 и 0,20 м и размерами 1,5×1,5 м. Их удельный вес очень мал (порядка 1 т); они транспортировались по автодороге от ближайшего завода сборных конструкций на расстояние около 200 км и без труда укладывались с помощью небольшого автокрана. Армирование представляло собой полосы из оцинкованного железа, размещенные в боковом и вертикальном направлениях на расстоянии 0,75 м между центрами.

Через нижнюю часть насыпи плотины пропущена чугунная труба диаметром 30 см, снабженная контрольными задвижками у низового конца; она служит в качестве донного выпуска и для пожарного водоснабжения.

Небольшой объем водохранилища и отсутствие риска в отношении расположенных ниже нее сооружений объясняют причины, по которым плотина могла быть построена без применения более детально разработанной техники, которая могла бы потребоваться для большой плотины. Тем не менее, в армированной зоне не было произведено почти никаких изменений по сравнению с нормальной укладкой насыпи, и работа была такой простой, что это почти не отразилось на единичной стоимости по отношению к обычной насыпи.

Новый тип плотин показал значительную экономию в общей стоимости по сравнению с обычной насыпной плотиной с боковым водосливым каналом, способным пропустить паводок до 20 м³/сек.