

石質物体の摩擦に与える振動の効果

—道床破壊に関する基礎実験—

正員 佐藤 裕*

EFFECT OF VIBRATION ON THE FRICTION BETWEEN STONY BODIES

—A Fundamental Experiment concerning the Destruction of Ballast on Railway Track—
(JSCE June 1954)

Yutaka Satō, C.E. Member

Synopsis The railway ballast subsides gradually under the load of passing trains where it supports the sleepers, so that load of rail falling on each sleeper becomes uneven. A greater part of maintenance work is spent to correct this destruction of ballast. As it seems that the principal cause lies in the decrease of frictional force between ballast particles owing to vibration, the author performed the following experiment. Two samples, flat planes of which were in contact with each other, were laid on a sloping stand. The assembly was vibrated vertically on the vibration table. When the vibration increased till sliding occurred between samples, its frequency and amplitude were measured. The conclusions from this experiment are as follows :

- (1) Friction coefficient decreases owing to vibration ; the proper measure of vibration should be acceleration.
- (2) Vibration effect upon friction coefficient changes considerably in the range of comparatively low frequencies (5 to 40 cps) and increases with the frequency of vibrations.
- (3) When the contact pressure between samples was varied by addition or absence of a weight, the vibration effect does not change, but will change if spring force is used. These relations are also shown.

要旨 軌道の道床は列車の通過によって枕木支持面が漸進的に沈下してゆきレールの支持に斑を生ずる。これを復元するのが各種保線作業中の最も大きい部分を占める。この道床沈下のおもな原因は振動によつて粒間摩擦が減少することにあると考えられたのでそれに関する基礎実験を行つた。

実験の方法は傾斜台に平な面で接した2個の試料を載せ、これらを振動台上で鉛直方向に振動させ、試料間に滑りが生ずるときの振動数と振巾とを測つた。

実験からおもに次のことがわかつた。

(1) 摩擦係数は振動によつて減少しその度合を知るための振動に対する尺度は加速度を用いるのが適當である。

(2) 摩擦係数に対する振動の効果は割に低い振動数範囲 (5~40 cps) でも相当変化し高速になるほど大きい。

(3) 試料間の接面圧を重錘によつて変えたときは振動の効果は変わらないが、バネ力によるときは變るであろう。その関係は本文中に示される。

1. 目的

軌道の道床は列車通過の動的作用を受けて破壊が常に進行しており、その破壊された道床を復元するための労力が、全保線作業中できわめて大きい部分を占める。ここで道床破壊とは道床粒の圧碎もあるが、それよりも実際にはさらに重要である枕木支持面の列車通過による漸進的沈下と、従つてレール支持における斑の発生のことを意味する。道床の支持力は粒間摩擦によつて保持されるものであるが、この摩擦力は列車通過時の振動によつて低下するものと推定された。そこで道床の耐力を増加させるためには、振動が摩擦にいかなる効果を与えるかを知り防振方法を考え、さらに振動の許容限度を求めることが必要となつたので次の実験ならびに考察を行つた。

2. 固体摩擦法則

C.A. Coulomb (1785) の簡単な法則がある。すなわち「摩擦力は接面に作用する垂直圧力に比例し接面積の大きさには無関係である」。

彼は次のように説明した。両固体の接面には細かい凹凸があつて両者が滑るときにはこの凹凸を上下して

* 日本国鉄道技師、鉄道技術研究所軌道研究室

いるが、凸部を上るために加えたエネルギーは凹部を下るときには衝撃によつて、熱エネルギーに変化して元に戻らないことから摩擦力が生ずるとした。実際は接面の粗滑の度合で摩擦力はあまり変わらないので今では上記のみでは足りないとされている。

接面積の大きさに関係しない理由は一般に固体は全面で完全に接することは不可能であつて、実際はごく小面積で接しているにすぎない。そこでこれらの接触部分には非常に大きい圧力が作用し、塑性変形を生じているから接面積は圧力の大きさに比例して拡がる（弹性変形ならば圧力の大きさの $2/3$ 乗に比例）。すなわち摩擦力は見かけの接面積とは無関係に圧力に比例した真の面積でのみ生ずる。

摩擦力についてはまた境界摩擦力を考えねばならない。すなわち I. Langmuir によればすべて物体表面には異種物質の薄い分子層が附着していてその附着力は非常に強い。これを境界層と呼ぶが従来の摩擦に関する実験は測定しようとする固体自身の面で接しないで境界層によつて隔てられたままで行つたもののが多かつた。

結局摩擦力は次のものから生ずると考えられている。

(a) 接面の凹凸を上下するときの Coulomb の示したエネルギー損失

(b) 接面の塑性変形のための仕事

(c) 固体摩擦部分で生じた局部的融着を引離すための仕事

(d) 境界層をおし分け

るための仕事

(e) 境界分子層が互いに擦れ合うためのエネルギー損失

境界摩擦力は分子層を押し分けたり擦れ合つたりするため生ずるものであつて、これは垂直圧力の大きさにあまり関係しない。従つて垂直圧力が非常に小さくて境界摩擦力の項が大きく効いてくる場合は摩擦係数は大きい値を示す。

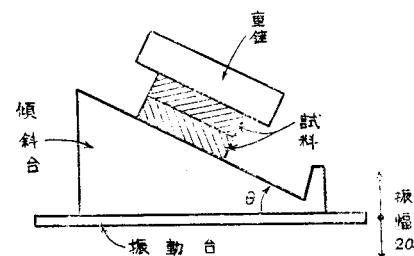
摩擦に関する実験法則は静摩擦係数は動摩擦係数より大であること、動摩擦係数は運動速度に関係することなど種々示されている

が、基本的には不明のことが多い。従つて摩擦に対して振動が与える効果についても、上記塑性変形および境界層変形の一一種のバネ作用に基づく両固体の相互振動を考えねばならぬ理論的取扱いは困難である。

3. 実験方法

図-1 のように傾斜台上に平な面で接した 2 個の試料をのせ、上から重錐で押さえ、これらを振動台上で鉛直方向に定常的に振動させ、上下の試料間に滑りが生ずるときの振巾を種々の振動数に対して求めた。滑動開始は試料のマークを望遠鏡で観て求めた。

図-1



3.1. 試料 石質のもので、摩擦係数が種々異なるものがあり、その上面が平で均一なものとして表-1 に示す Grindstone 5 種、Sand paper 2 種を用いた。また重錐と傾斜台が素面のままのものの実験も行つた。

傾斜台または重錐と Grindstone との間には荒い

表-1 各種試料

試 料	原 料	粒径 (mm)	形 状	寸 法 (mm)	重 量 (g)
Grindstone, No.36	アランダム	0.85	孔明円盤	外径 65, 内径 9.5, 厚 16	117
" 46	カーボランダム	0.60	"	" 64, " 13, " 13	72
" 60	ホワイトアランドーム	0.40	"	" 64, " 13, " 6.1	37
" 120	"	0.15	"	" 64, " 13, " 6.3	43
" 220	グリートカーボランダム	0.11	"	" 51, " 16, " 23	78
Sand paper, No.60		0.40	重錐、傾斜台に貼付	50×89	
" 100		0.18	"	"	
重錐 素面	鉄 鋼	荒仕上面	六 面 体	50×80×24	950

表-2 振動台

種 别	方 式	振動数 (n)	振巾 (2a)	そ の 他
A	不平衡錐式	最低 400 rpm	最大 1.8 mm	可動部重量 7 kg
		最高 2400 "	" 1.5 "	
B	クランク式	最低 0 "	" 20 "	
		最高 1200 "	" 1.5 "	

Sand paper を挟んで滑りを止め、また Sand paper は接着剤で貼付けた。

3.2. 振動台 振動台は 1 000 rpm 以上は表-2 の A をそれ以下は B を用いたがこれらは振動計検定用として車両運動研究室に所属するものである。

振動振巾は特殊ダイアルゲージ (1/10 mm 目盛、1 回転 10 mm, ストローク 30 mm) でまた振動数は電気式回転計 (横河電機 AS-1, VPC) でよんだ。

4. 実験結果

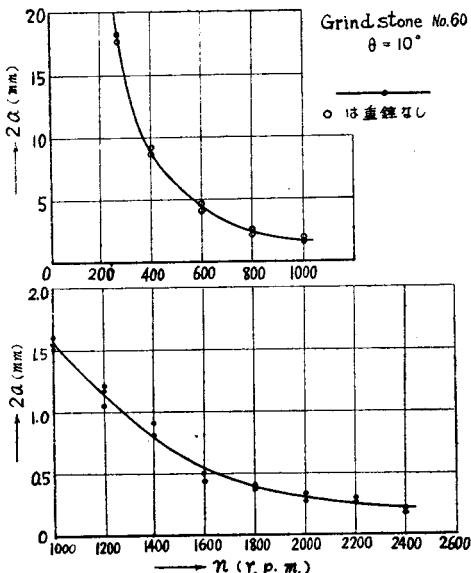
4.1. 静摩擦係数 各試料の実験前後に測つた静摩擦係数の値を表-3 に示す。これは面を除々に傾けて滑動開始の角を分度器でよんだものである。

表-3 各試料の静摩擦係数

試 料	静摩擦角(度) 信頼限界 $1 - \alpha = 95\%$	静摩擦係数 平均値 f_0
Grindstone, No.36	$27.6 \pm 2.26 \times 1.63 = 23.9 \sim 31.3$	0.523
" 46	$19.7 \pm 2.26 \times 1.20 = 17.0 \sim 21.4$	0.358
" 60	$34.4 \pm 2.26 \times 2.58 = 28.6 \sim 40.2$	0.685
" 120	$19.3 \pm 2.26 \times 3.18 = 12.1 \sim 26.5$	0.350
" 220	$33.7 \pm 2.26 \times 2.90 = 27.1 \sim 40.3$	0.667
Sand paper, No.60	$36.6 \pm 2.26 \times 2.67 = 30.7 \sim 42.5$	0.743
" 100	$36.6 \pm 2.26 \times 1.94 = 32.2 \sim 41.0$	0.743
重錠素面	$17.0 \pm 2.78 \times 1.10 = 13.8 \sim 20.2$	0.306

4.2. Grindstone の振動実験 各試料について滑動を開始する振動数と振巾との関係を低速から高速、高速から低速、さらに低速から高速へと大体 3 回 200 rpm ごとに繰返えして求めた振動数 (n) と振巾

図-2



($2a$) との関係の一例を図-2, 3 に示す。測定点の散らばりは他の試料でも同程度であつた。

試料を上から重錠で押された場合と軽い試料のみの場合とで相異がでるか否かを調べた例が図-4 であつて荷重の大きさによる相異は見られない。

図-3

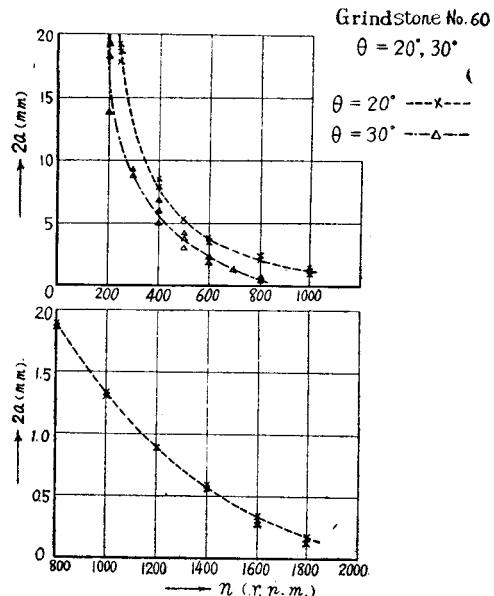
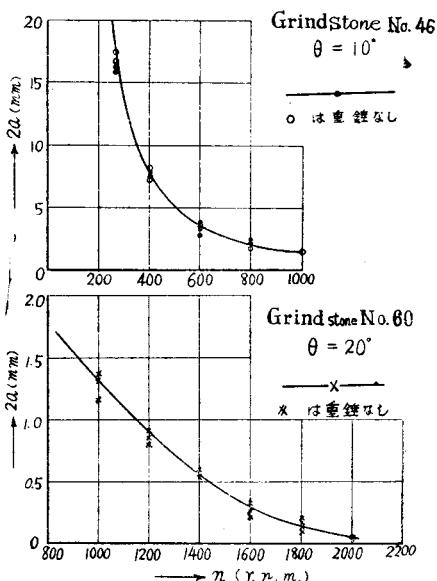


図-4



各試料について上記のような図に平均線を引き、これを換算して滑動開始の振動数 (n) と加速度 (\ddot{a}) と

図-5

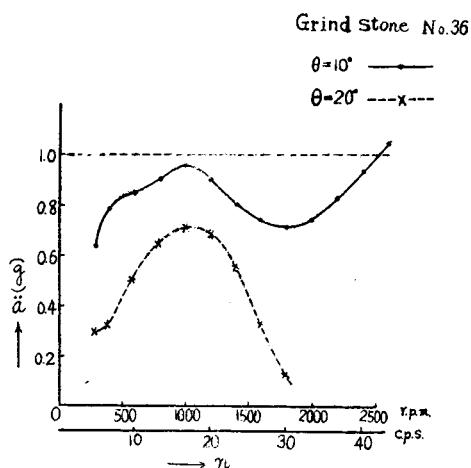


図-6

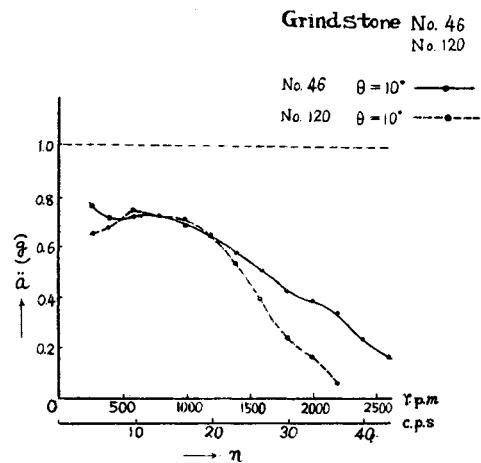
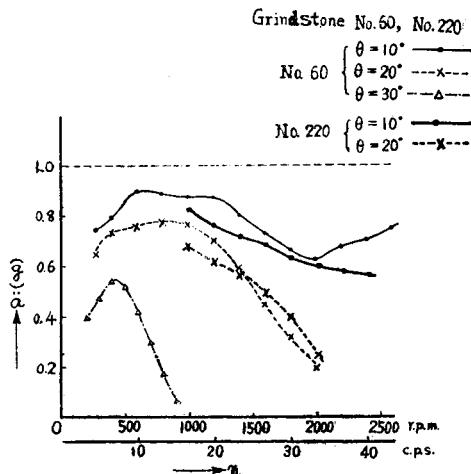


図-7



の関係を求めたのが 図-5, 6, 7 である。

以上の各図から加速度の大きさ $1g$ 以下で滑動すること、傾斜角の大きいほど振動効果が大きいこと、および静摩擦係数の近いものは粒径や原料が異なつても振動効果は似た傾向を示すことなどがわかる。

4.3. Sand paper の実験 前記と同様に求めた実験結果を 図-8~11 に示す。

測定点の散らばりは前の場合よりやや大きかつた。

いずれも Grindstone, No. 60 および No. 220 の場合と大体同様の傾向である。

図-8

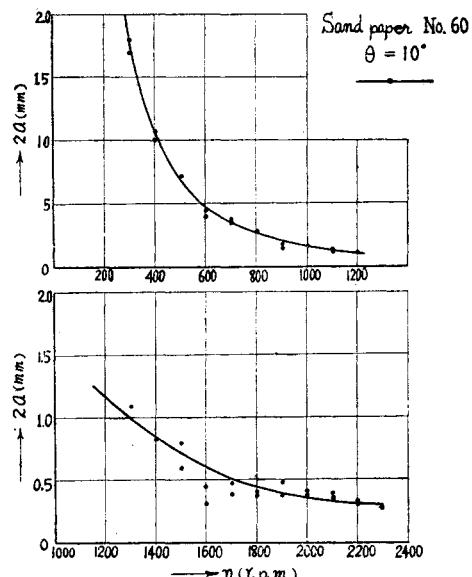


図-9

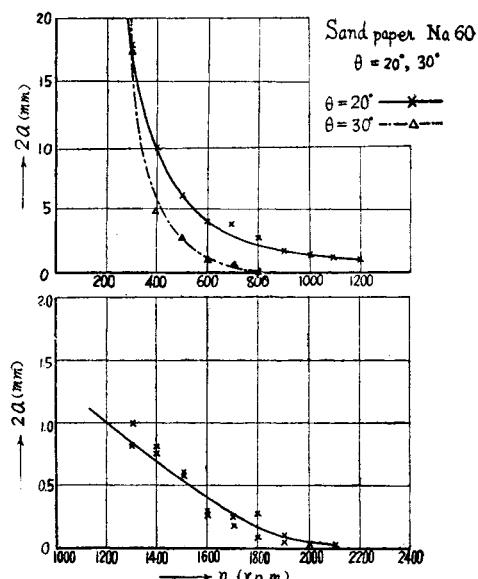


図-10

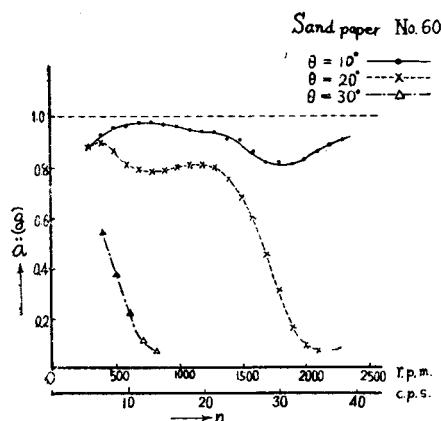
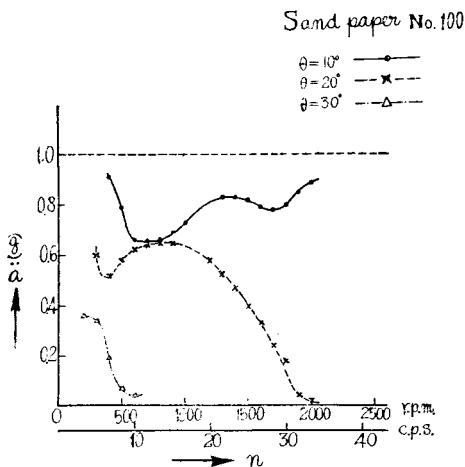


図-11



4.4. 重錐素面の振動実験 重錐、傾斜台とも素面のままの場合も前記と同様に求めた実験結果を図-12に示す。

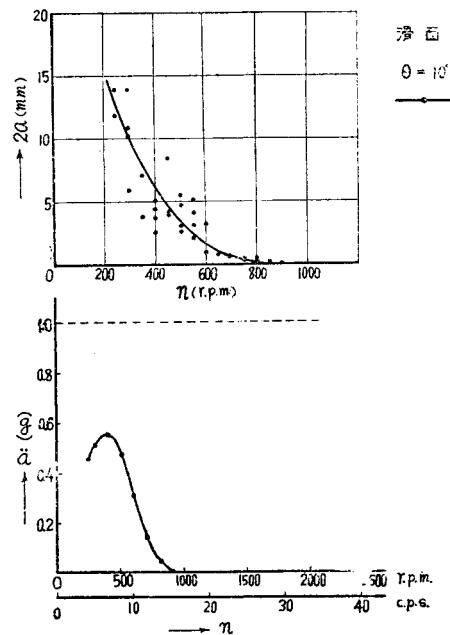
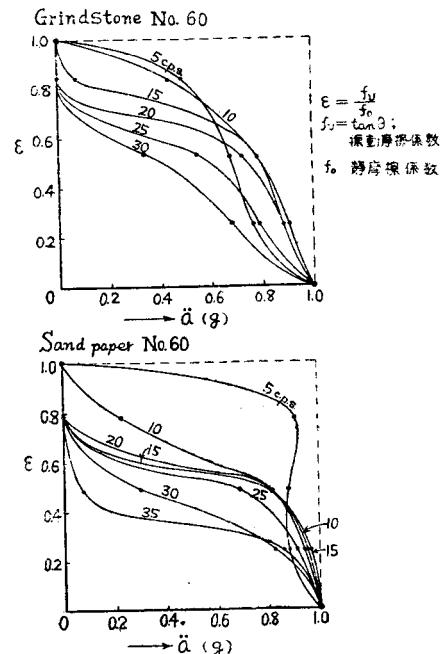
測定点の散らばりは相当大きかつた。

5. 考 察

本実験によれば試料を傾斜台にのせ、これらを振動台で振動させると、振巾に達すれば滑動することおよび傾斜角が大きいほど滑動しやすいことが明らかとなつた。すなわち摩擦係数は振動が与えられることによって減少するものである。

振動によつて滑動するときの摩擦係数を振動摩擦係数 f_v と名づければ、これは振動条件に応じて $f_v = \tan \theta$ から求められる。いま、 $\epsilon = f_v/f_0$ とおく。 $\epsilon < 1$ ならば振動効果がある。

前節の結果から ϵ と加速度 (\ddot{a}) との関係を各振動数 (n) ごとに求めたのが次の図-13である。

図-12 重錐素面、 $\theta = 10^\circ$; 振動数 (n) と振巾 ($2a$) または加速度 (\ddot{a}) との関係図-13 ϵ と加速度 (\ddot{a}) との関係

摩擦力に対して振動効果が無ければ図の点線で示す関係になり、これから遠ざかるほど振動効果が大きい。実験の振動数範囲は 5~40 cps であつたが、この間でも振動効果は相当に変り高速になるほど大きい（軌跡）。

道の道床に現われる振動は大体この範囲である)。

振動台の振動加速度が $1g$ を越せば上のせた物体は躍り出でるから試料が滑るのは当然であるが、実験の大部分は $1g$ より小さい加速度で滑動した。これは接面における塑性変形の Relaxation time に関係するものと考えられる。

試料の原料や粒径が異なつても、また Grindstone と Sand paper の間でも静摩擦係数の近いものは振動効果が大体同様に現われたことは注目すべきである。

重錐の有無によつて試料間の接面圧を大きく変えても振動効果は異ならなかつたが、これを重錐によらずに例えばバネによつた場合は滑動する加速度の大きさは変り、次の関係式で表わされるであろう。

試料質量を m 、重錐質量を M 、重錐と等しい面圧を与えるバネ力を F 、試料面圧を N 、とし重錐の場合が加速度 b で滑動しバネ力の場合は b' で滑動するすれば、面圧 N が動力学的にも等しいためには次の条件が成立しなければならぬ。

$$b' = \frac{m+M}{m} b$$

上の条件は軌道の道床のようにレールの曲げによつて押さえられた場合の振動効果を考えるときに用いられるもので実験的に確かめたいと考える。

本実験の振動効果を道床に適用するには道床粒の接触角の分布、さらに接觸角の揺らぎ (Brown 運動などで考える Schwankung) について知らねばならぬ。

6. 結 言

列車通過によつて道床の枕木支持面が次第に下つてゆきレール支持に斑を生ずるのは振動によつて道床粒

間摩擦力が低下することに主因があると考え、これについて基本的な実験を行つておもに次のことがわかつた。

(1) 摩擦係数は振動によつて減少しその度合を知るための振動に対する尺度は加速度を用いるのが適當である。

(2) 振動によつて滑動するときの摩擦係数を振動摩擦係数と名づけ、これが静摩擦係数に対し減少するほど振動効果が大きいと称する。実験は割に低い振動数範囲 (5~40 cps) で行つたが、この間でも振動効果は相当変化し高速になるほど増大する。

(3) 試料間面圧を重錐によつて変えたときは振動効果に変りはないが、バネ力によるときは変り、滑動する加速度は次の式で表わされるものとなろう。

$$b' = \frac{m+M}{m} b$$

m : 試料質量, M : バネ力に相当する面圧を与える質量 b : M なる質量をのせたとき滑動する加速度。

(4) 振動効果はおもに試料の静摩擦係数によつて決められ、粒径材質には実験の範囲では関係がなかつた。

上記のことがらを実際軌道における道床破壊に適用するためには道床粒の配列などについて知らねばならぬが、定性的には別に行つた実験すなわち試験軌道に疲労試験機によつて繰返し荷重を加えたときの道床の枕木支持面における漸進的沈下測定結果をよく説明する。これらについては改めて報告したい。

本実験は軌道研究室豊田昌義君、市川茂君などの協力によつて行われた。

(昭.29.1.13)

第 6 回 国 土 建 設 週 間 の お 知 ら せ

建設省が設置されてから満 6 年となつた。例年 7 月 10 日の建設省記念日を中心として実施している「国土建設週間」は本年も来る 7 月 10 日から 1 週間、全国都道府県及び各関係機関の協力を得て実施する。

1. 期 間

7 月 10 日 (土) ~ 7 月 16 日 (金) 7 日間

2. 実施目標

- 1) 国土建設に対する関心の昂揚
- 2) 河川・道路の愛護精神の徹底
- 3) 水防の強化促進
- 4) 治山・治水根本対策の確立
- 5) 国土総合開発及び多目的ダムの趣旨徹底
- 6) 産業開発青年隊の趣旨徹底
- 7) 道路及び自動車交通に関する知識の普及
- 8) 建築の不燃化の強調
- 9) 高層住宅の建築促進
- 10) 庶民住宅の建設促進と住宅金融公庫の事業紹介
- 11) 都市計画に関する啓蒙、都市建設への市民意識の昂揚

- 12) 公園緑地の建設、都市美化の強調、公園緑地に関する道徳心の昂揚
- 13) 建設工事の機械化普及
- 14) 建設業の合理化

3. 実施行事

- 1) 建設祭: 7 月 10 日午後 1 時より日比谷公会堂において挙行
- 2) 展覧会: 7 月 8 日より 7 月 19 日まで日比谷公園広場において「建設機械展」を開催
- 3) 建設白書の発表: 7 月上旬
- 4) グラフ・リーフレットの発行
- 5) ポスターの配布
- 6) ラジオ・テレビの特別番組に放送
- 7) 建設功労者、優良団体の表彰
- 8) 土木・建築両研究所および地理調査所の公開、見学ならびに研究発表
- 9) 水防演習 (利根川水系の予定)
- 10) 全国中学校生徒よりの国土建設に関する作文募集

なお実施行事は以上の中央における諸行事のはか、地方においてもそれぞれ地方の事情において実施されることを望む。