

道路における繰り返し載荷試験 (第1報)

齋藤二郎
木村 薫
若松 雍 継
後藤 洋 三

概 要

軟弱地盤上の低盛土方式で高速道路を建設する問題点の1つに交通開放後の車両による路体および基礎地盤への動的な影響が考えられる。路面を通過する交通荷重は、一種の繰り返し荷重として考えることができる。繰り返し荷重作用下における路体や基礎地盤の影響は、繰り返し回数、繰り返し周期、繰り返し荷重条件のほか、舗装や路体の構造ならびに盛土基礎地盤の土質状況によって異なり非常に複雑である。現在、この問題に関する十分な検討が行なわれておらずに在来の静的な試験法あるいは土質力学に基づいて設計および施工が行なわれている。本研究は、現在建設中の東北高速道路において実施した軟弱地盤上の低盛土方式に対する繰り返し載荷試験工事の結果について概説するものである。試験は特殊な振動機を用い直接路床面から載荷する路床載荷試験と舗装路面から載荷する舗装載荷試験、実車を走行させる走行試験とに大別される。本報はこれら各種の試験結果のうち現在までに解析が終了したもののなかからその一部を報告するものである。

1. 概 説

東北高速道路の路線のうち埼玉県、岩槻から佐野に至る間は沖積層から成る広範な軟弱地盤地帯である。東北高速道路はこの軟弱地盤地帯において路体および路床の合計厚さが1m程度の低い盛土方式による施工が計画されている。

軟弱地盤における低盛土の問題点の1つに交通開始後の基礎地盤の沈下の促進と繰り返しタワミによる舗装面の破壊とがある。この原因には繰り返し作用する車両の荷重が道路あるいは基礎地盤に対して複雑な応力と変形ならびに振動を長年月にわたって繰り返し作用させる影響によるものである。

低盛土方式による場合は車輪直下の地盤に対する交通荷重の伝ばんが高い盛土に比べてより直接的である。したがって高速道路の機能を十分に果たすためには 10^6 台の交通回数に対して耐えることのできる道路や基礎の改良と工夫が必要とされる。車両の通過によって道路各部の構造や道路基礎地盤に与える影響には土中の応力と応力に伴う変形ならびに加速度の発生とがある。これらは車両通過ごとに生ずる一種の繰り返し荷重として考えることができる。したがって、道路や基礎地盤の強度変化と変形は繰り返し荷重や繰り返し回数、さらには繰り返し載荷速度が関係する動的な面からみた土質工学の追究が必要とされる。

本試験は上述のことがらを検討するとともに動的な特性からみた軟弱地盤上の低盛土方式について今後の設計および施工上の指針を得るために実施するものであり、その調査目的は、

- (イ) 車両の繰り返し荷重による盛土および基礎地盤の動態調査
- (ロ) 車両の繰り返し荷重に対する舗装工種の違いによる影響
- (ハ) 繰り返し荷重に対する基礎地盤の処理方法による影響

などについてである。試験工事は先年実施された東北縦貫自動車道久喜試験盛土地区において行なわれた。試験工事は日本道路公団が発注し大林道路がこれを受注して当技術研究所との共同のもとにこれを実施した。

2. 繰り返し載荷試験の方法

2.1. 繰り返し載荷試験方法の概要

将来10年間にわたり100万台の交通回数に対して設計や施工の段階でこの交通量を再現し諸特性を調査したうえで結果を設計や施工に反映させることは事実上困難である。したがって本試験では路面に作用する交通荷重をある単純な繰り返し荷重に置き換え現地の軟弱地盤上に造成された本線規模の盛土上で直接載荷することにより、その影響を調査する方法によった。

繰り返し載荷試験を実施する際、試験条件の1つに繰り返し載荷位置の問題がある。現在建設中の本線工事において交通荷重に対する影響軽減のための対策工法を行なうとすれば路床あるいは舗装の段階で講ずる必要がある。また、路面に作用する繰り返し荷重の道路および基礎地盤への動的な影響を調査するに当たっては路床より上部の舗装部と下部の路体部とに分け、それぞれ調査することが必要になる。したがって試験は舗装と路床とに分けてそれぞれ実施することとした。

次に繰り返し荷重の条件設定について考えてみる。舗装を介して伝達される繰り返し荷重，繰り返し載荷速度などの試験の条件は実際の調査や東名および名神高速道路における車両交通の追跡調査結果をもととして次のように決定した。

舗装を介して伝達される交通荷重は下図に示す荷重の分布が考えられる，

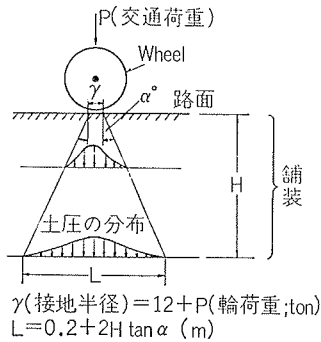


図-2.1 交通荷重の分布

荷重の分散角 α は追跡調査の結果 $\alpha \approx 45^\circ \sim 55^\circ$ 程度であるが，ここでは $\alpha = 45^\circ$ とした。設計輪荷重を $P = 8 \text{ t}$ とし，舗装厚さ $H = 55 \text{ cm}$ における L は $L = 1.5 \text{ m}$ となる。したがって路床面上における鉛直方向の平均土圧強度 σ_z は，

$$\sigma_z = 8 / \frac{1.5^2}{4} \cdot \pi \quad (\text{t/m}^2)$$

となる。また路床面上における載荷時間 T は概略次式で示される。

$$T = L/V = (0.20 + 2H \tan \alpha) / V \quad (\text{sec.})$$

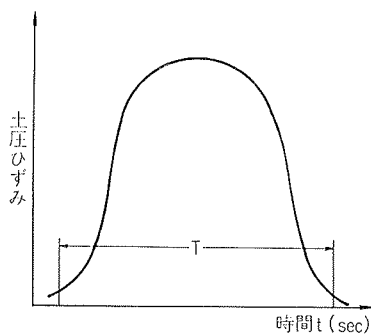


図-2.2 載荷時間の決定

東名および名神等における追跡調査の結果によると， T は $0.1 \sim 0.2 \text{ sec.}$ 程度である。以上の諸条件から上部路床上で直径 1.5 m の載荷板により $T = 5 \sim 15 \text{ cps}$ で繰り返し載荷すれば繰り返し荷重の分布形状ならびに繰り返し載荷周期の2点について交通荷重とシュミレートすることとなる。繰り返し載荷の試験を行なう際は荷重には設計輪荷重に相当する繰り返し載荷重と，上述した載荷周期で100万回の繰り返し載荷（100万台の交通量に相当）を行なう必要がある。

舗装路面を実車が走行するときの路面下地盤の土圧分布形状は図-2.3(a)に示すごとくである。繰り返し載荷試験では図(b)に示すような正弦波を与えることとした。

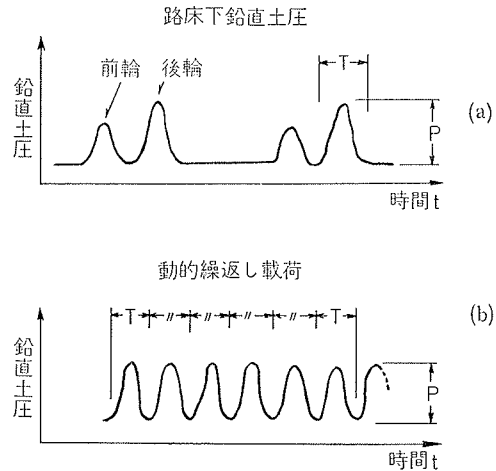


図-2.3 土圧ひずみの時間分布

実車の走行に比べて繰り返し載荷試験の条件は，いっそう苛酷であり基礎地盤軟弱層のレオロジー的な効果，残留水圧の問題などに関し実際とは異なる結果が得られるものと予想される。しかし，試験結果の利用においては安全側である。

2.2. 試験項目と試験方法

繰り返し載荷試験は上部路床仕上り面で直接載荷する，(i)路床載荷試験，(ii)舗装路面で載荷する舗装載荷試験，(iii)舗装路面で実車を走行させる走行試験とに大別される。これら各試験のフィールドの配置を図-2.4に示す。

(i)路床載荷試験は上部路床仕上り面から正弦波の振動加力を与える方法であり繰り返し荷重には，実車走行時の交通荷重を正確にそのまま載荷することがむずかしいため繰り返し荷重として， 2.8 t ， 5.0 t ， 7.8 t および 15.0 t の4段階を選んだ。また繰り返し荷重の載荷方法として，フィールドごとに繰り返し荷重を変える単一載荷試験と1つのフィールドに繰り返し荷重を段階的に作用させる段階載荷試験とがある。それぞれの試験の方法を表-2.1および表-2.2に示す。

(ii) 舗装載荷試験は路面から直接繰り返し載荷する。舗装の工種は，舗装合計厚さが 50 cm のアスファルトおよびコンクリート舗装を選定した。それぞれの試験フィールドにおいて鋼板ならびにW輪タイヤによる載荷が行なわれた。舗装載荷試験における試験の方法を表-2.3に示す。

(iii) 走行試験は上部路床上で直接繰り返し載荷する際荷重の分布や路体および基礎地盤に作用する動的な諸性質について実車が路面を走行した場合とどの程度

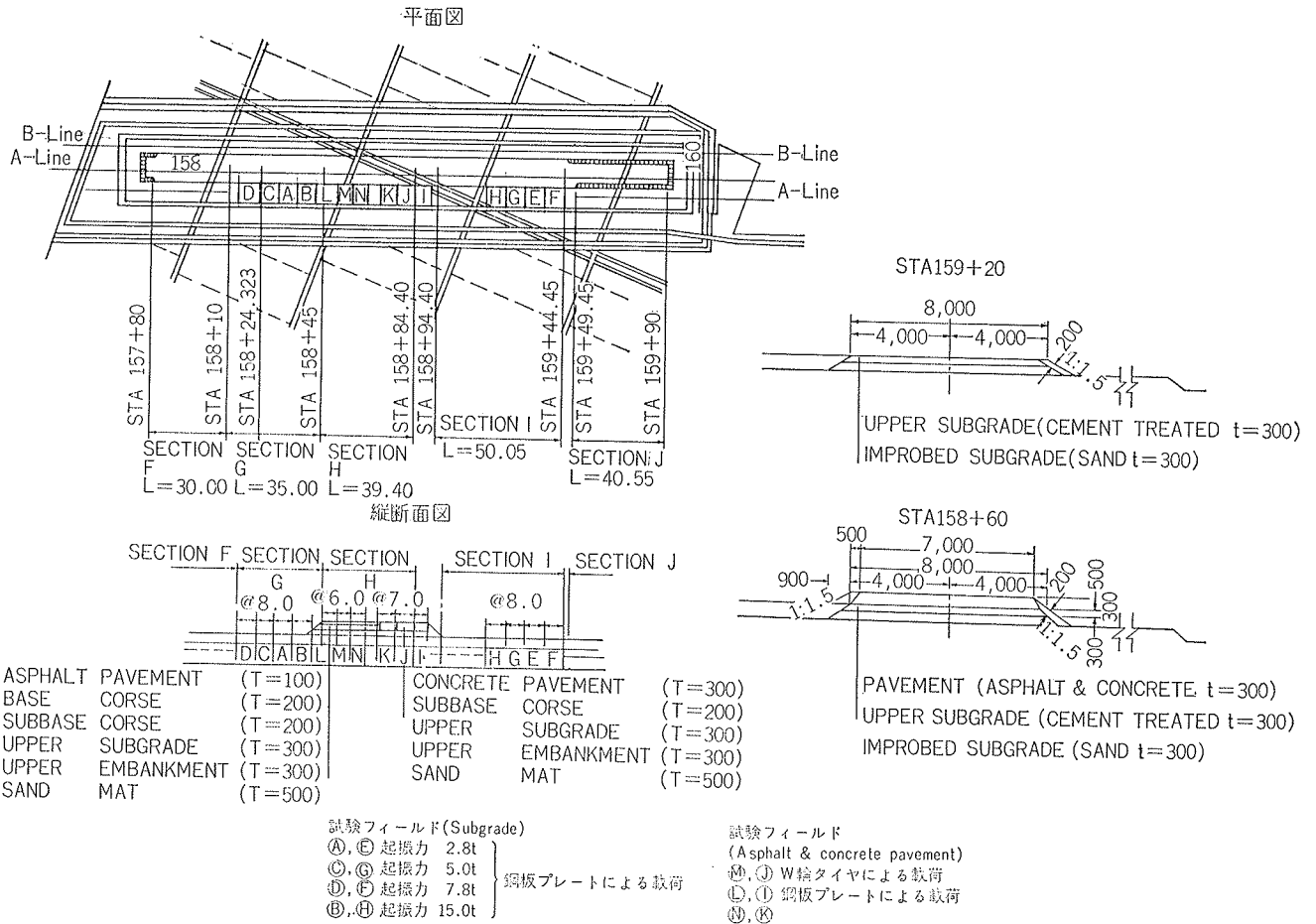


図-2.4 試験フィールドの配置

試験場所	基礎地盤処理区間：Aフィールド 基礎地盤無処理区間：Eフィールド	
載荷装置及び載荷方法	載荷装置：単一載荷試験に使用した装置と同一 繰返し荷重：2.8t, 5.0t, 7.0t及び15.0tの段階載荷 繰返し回数：2.8tのみ10 ⁶ 回と他の荷重については5×10 ⁵ 回 載荷周期：13cps	
測定	埋設計器	
及び試験	連続式沈下計	○繰返し荷重、繰返し回数と路体及び基礎地盤各層の圧縮沈下量、沈下振巾の分布
	土圧計	○繰返し荷重、繰返し回数と路体及び基礎地盤の各層の主圧、加速度ならびに間隙水圧の振巾変化と振巾分巾
	加速度計	○繰返し荷重、繰返し回数と基礎地盤及び上部路床の変形量
	間隙水圧計	○繰返し荷重、繰返し回数と路体の経時、温度変化
及び試験	沈下板抗	○繰返し回数とソイルセメント層ならびに路体の強度変化
	沈下板抗	○繰返し荷重と地盤の強度変化
及び試験	繰返し平板オランダコーン調査	○繰返し回数と上部路床、路体の強度変化
	常時微動	○FieldのX, YおよびZ方向の常時微動を繰返し載荷試験前に測定
	弾性波速度	○繰返し荷重、繰返し回数と試験地盤のP波及びS波の速度変化
及び試験	表面波速度	○繰返し載荷試験前に上部路床の表面波速度の測定
	強制振動試験	○地盤の共振点をチャックハンマーにより強制振動させて共振点を調べる。

表-2.1 段階載荷試験

試験フィールド	基礎地盤処理区間：A, B, CおよびDフィールド 基礎地盤無処理区間：E, F, GおよびHフィールド	
載荷装置及び載荷方法	φ = 1.5m 鋼製円板に振動抗打機取付け 繰返し載荷回数 10 ⁶ 回 載荷周期 13cps 繰返し荷重 2.8t, 5.0t, 7.0t及び15.0tの単一繰返し載荷	
測定	埋設計器	
及び試験	連続式沈下計	○繰返し載荷回数と路体及び基礎地盤の圧縮沈下
	土圧計	○繰返し載荷回数と路体及び基礎地盤の鉛直土圧、鉛直加速度振巾の変化
	加速度計	○繰返し載荷回数と基礎地盤表面及び上部路床の変形
	間隙水圧計	○繰返し載荷回数と基礎地盤表面及び上部路床の変形
及び試験	沈下板抗	○繰返し載荷回数と基礎地盤表面及び上部路床の変形
	沈下板抗	○繰返し載荷回数と基礎地盤表面及び上部路床の変形
及び試験	繰返し平板オランダコーン調査	○繰返し載荷回数と上部路床、路体の強度変化
	繰返し平板オランダコーン調査	○繰返し載荷による基礎地盤の強度変化

表-2.2 単一載荷試験

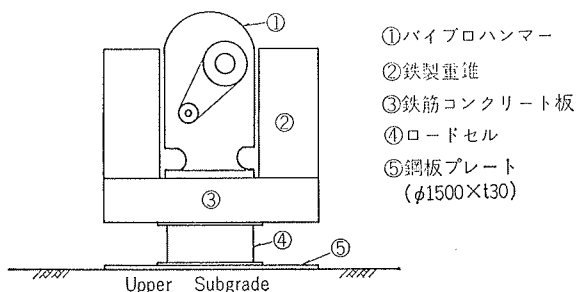
試験場所	基礎地盤処理区間： { コンクリート舗装区間の I, J, Kフィールド アスファルト舗装区間の L, M, Nフィールド
載荷装置 及び 載荷方法	載荷装置： 1) 鋼板に振動機取付け 2) W輪タイヤを有する台車に振動機の取 付け 繰返し荷重：鋼板7.8t, W輪タイヤ2.8t 繰返し回数：10 ⁶ 回 載荷速度：13cps
測定 及び 試験	埋設式器 連続式沈下計 土圧計 加速度計 温度計 含水比計 弾性波速度 表面波速度 常時微動 オランダコーン 調査
	○繰返し載荷回数による基礎地盤の圧縮沈下 ○繰返し載荷回数による道路及び基礎地盤各層の鉛直な らびに水平土圧、加速度振巾の変化 ○道路及び基礎地盤の弾性波速度の測定 ○繰返し載荷時の舗装部の温度変化 ○路床、路盤、及びサンドマット層の含水比変化 ○繰返し載荷前後の弾性波速度変化 ○繰返し載荷前に舗装路面の表面波速度の測定 ○FieldのX, YおよびZ方向の常時微動を繰返し載荷前に 測定 ○繰返し載荷前の基礎地盤強度の調査

表一2.3 舗装載荷試験

違いがあるかを調査し、あわせて車両走行時の道路や基礎地盤の動的な影響を調査する目的で実施した。このほかにも動的な試験とは別に上部路床のソイルセメントに関する諸試験を実施しているがここでは割愛する。

3. 繰返し載荷装置

路床載荷試験における繰返し載荷装置は直径1.5m厚さ30m/mの鋼板の中心に直径70cm×高さ20cmのロードセルをボルトで緊定し、さらにその上に鉄筋コンクリート板を取り付ける。起振機は鉄筋コンクリート板上に設置する。起振機の周辺には加振中の載荷装置のバウンドを防止するため重錘を取り付ける構造とした(図一3.1)。起振機は日平産業製の振動杭打機を改造して使用した。



図一3.1 繰返し載荷装置

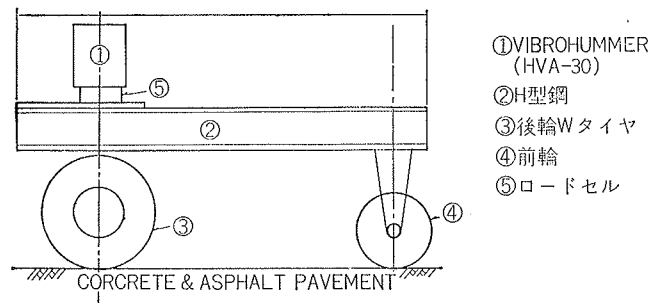
試験条件	車種：いすゞ7t積みダンプトラック 機載重量：0~7tまで可変 車走：10~40km/hまで可変 走行場所：アスファルト及びコンクリート試験舗装の路面各延長約20m上の走行
測定 及び 試験	埋設式器 土圧計 加速度計 沈下計 走行車両の振動 路面の平担性 アスファルト ひずみ
	○車走及び車重の変化と道路ならびに基礎地盤各層の土 圧、加速度沈下の振巾の分布 ○走行車両の振動を車両に取付けた加速度計による計測 ○試験前に走行路面の平担性のレベルによる調査 ○アスファルト舗装上を車両が走行する際の、舗装部各 層のひずみ測定

表一2.4 走行試験

起振機は2質量起振機と呼ばれるもので、偏心重錘をもつ2本の回転軸が互いに逆方向に回転することにより水平方向の遠心力を打ち消し鉛直方向のみの遠心力を発生させる機構にある。

試験時の載荷装置はソイルセメント上に厚さ約5mmのアスファルトと砂との混合物を載荷板下に敷いてすえ付けた。試験中は装置の移動に対して随時載荷位置の修正を行なった。

動輪載荷装置を図一3.2に示す。動輪載荷装置の構造は、後輪、前輪を有し後輪が1軸2輪タイヤである。起振機はH型鋼、車体フレームの後輪軸上に設置してある。装置は繰返し載荷中の移動防止に前輪部を2個の重錘によって固定する方法とした。



図一3.2 動輪載荷装置

載荷装置の繰り返し載荷についての条件は起振機の機構上次のように決定した。

載荷周期：13cps，載荷回数： 10^6 回
 繰り返し荷重：起振力として2.8t，5.0t，7.8tおよび15.0tの4段階の載荷，ただし舗装載荷試験においては鋼板による載荷試験で7.8t，動輪載荷試験で2.8tの載荷。

4. 試験結果

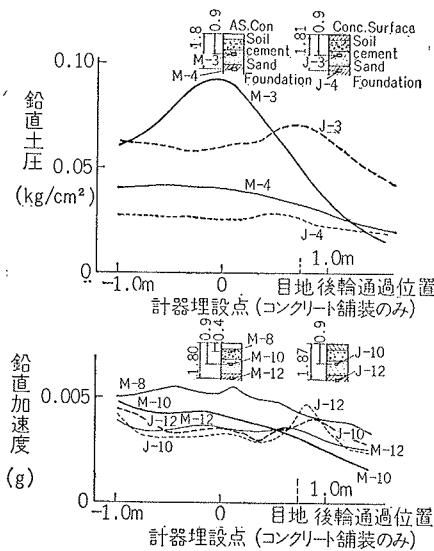


図-4.1 鉛直土圧および加速度の分布

図-4.1 はトラック走行時の舗装および路体の鉛直土圧ならびに加速度の分布を示すものである。まず土圧分布についてみると，ソイルセメント上部路床直下の土圧はアスファルト舗装およびコンクリート舗装に明確な差がみられる。基礎地盤における土圧の分布は，コンクリート舗装のほうがアスファルト舗装に比較して最大値が小さく，かつ大きな広がりを見せている。

次に実車走行時の加速度分布について見ると，図からアスコンの層とコンクリート板とでは大きな違いがみられる。このことは両者の剛性の相違によるものであり，コンクリート板に比較して剛性の低いアスコン層のほうがより大きな加速度が発生するといえる。

しかし舗装から盛土基礎地盤までの加速度分布は明らかに舗装工種の違いによる差がみられるが，基礎地盤に対する加速度の違いは明確に認められない。これらの結果から車両走行時における両舗装の動的影響の違いは車輪直下，上部路床までが主である。コンクリート舗装のほうが動的な影響が小さいといえる。しかし，基礎地盤に対しては，ソイルセメント層あるいは路体の砂層によってその影響が均等化されるため舗装工種の違いによる差がほとんど認められなくなる。

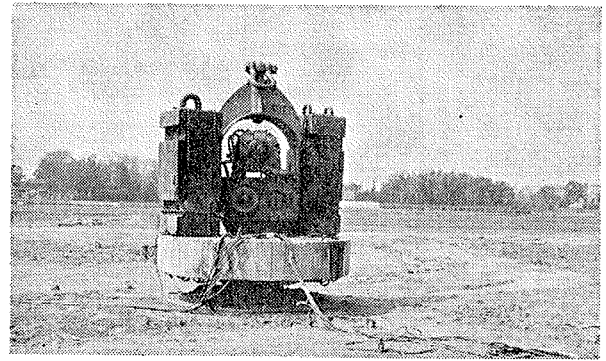


図-4.2 繰り返し載荷装置

トラックの走行によって生ずる土中の加速度および動土圧の分布はトラックの走行スピードならびに車両の積載重量によっても異なると考えられる。これに関する試験結果は，次のとおりである。

(i)トラックのスピードが及ばず動土圧への影響は，試験車のスピードが40km/hの範囲において動土圧は車速に関係なくほぼ一定である。(ii)運速と加速度との関係は測定値にバラツキがあったため明確ではないが，ほぼ動土圧の場合と同様な結果にある。一方，車両の積載重量との関係は，車両の重量にほぼ比例した動土圧の分布が見られた。

コンクリート舗装では図-4.3に示されるごとく目地の影響が認められる。これは車両が目地を通過する際に，車輪の衝撃によって生ずるものであり，その影響は無視できない。

図-4.3(a)および(b)は路床載荷試験における繰り返し回数，繰り返し載荷と沈下量との関係を連続式沈下計の測定結果から示した。

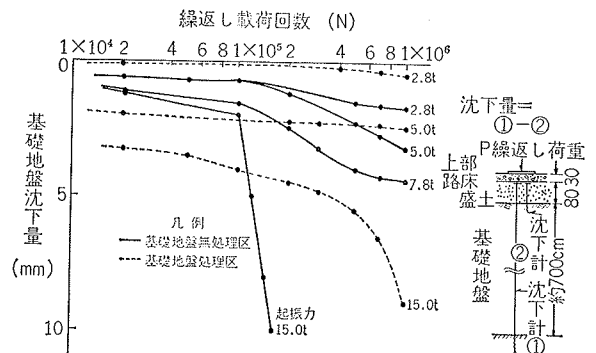
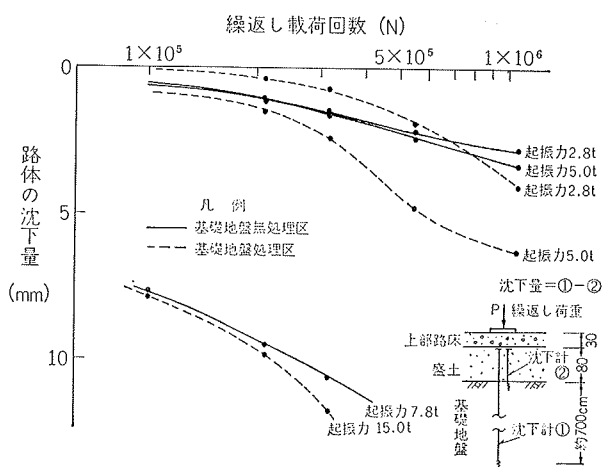


図-4.3(a) 繰り返し回数と沈下量との関係

連続式沈下計による測定結果を繰り返し回数ごとの基礎地盤の沈下量と路体の砂の沈下量とに分ければ図-4.3(a)および(b)の結果が得られる。図-4.3(a)から基礎地盤の繰り返し載荷による沈下は基礎地盤が改良されているかいないかによって沈下の傾向が異なってい



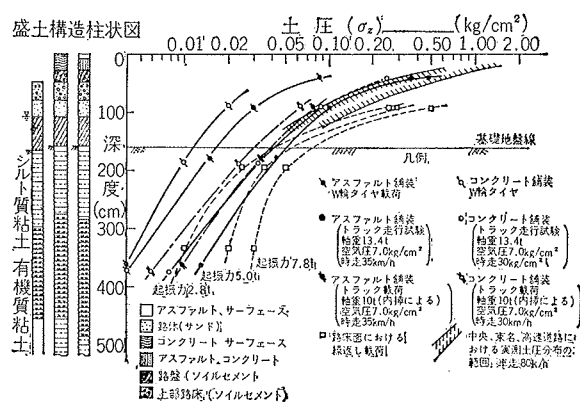
図—4.3(b) 繰り返し回数と沈下量との関係

る。一般に基礎地盤無処理地区のほうが処理地区に比べて沈下の絶対値は大きい。繰り返し載荷重15.0 tにおける無処理地区の沈下量は 10^5 回載荷付近で急激に増加している。この現象は 10^5 回の載荷によって基礎地盤が著しく劣化したためである。この現象は繰り返し載荷試験後のオレンジコーン調査の結果からも裏づけられた。一方、繰り返し載荷時の路体の沈下についてみると、基礎地盤の沈下傾向と同様に繰り返し回数および繰り返し荷重の増加に伴い沈下が促進する。一般には基礎地盤の処理および無処理地区とを比較した場合に基礎地盤処理地区のほうが路体の沈下量が多い。この原因としては路体に作用する鉛直および水平加速度の違いが考えられる。繰り返し載荷中の路体の沈下は両図を比較してみてもわかるように、かなり大きな値を示している。

砂は振動に対してきわめて鋭敏であり、砂の締め固め程度、含水比さらには使用した砂の粒度、粒子の形状によってもその動的な挙動は異なるものと考えられる。今回の試験に使用した砂の振動性状については現在解析中であり別の機会に報告する。

図—4.4 は舗装および路床載荷試験における繰り返し荷重と深度方向の鉛直土圧の分布を示すものである。図から、コンクリート舗装とアスファルト舗装における土圧分布を比較すると、コンクリート舗装のほうがアスファルト舗装に比べて荷重の分散がよい。このことは両舗装の剛性の相違によるものである。

アスファルト舗装における走行試験結果は東名およ



図—4.4 深さ方向の土圧分布

び名神高速における土圧分布と比較的よい一致を示している。また路床載荷試験における土圧分布は基礎地盤下の起振力 5.0 t 以下において一致した傾向を示しているが、盛土ではいずれの起振力に対しても過大な分布を示している。この原因としては繰り返し載荷位置の違いによるものである（舗装路面と路床面との載荷位置の違い）。

路床載荷試験における土圧分布あるいは繰り返し回数と沈下量の関係さらには走行試験結果を用いて 100 万台の交通量に対する路面の沈下を推定することが可能になる。しかし本試験に使用した装置では前述したように土圧分布について交通荷重とシュミレートできなかったものの、加速度については、実車走行時に比べ10倍程度の加速度が発生している。盛土や基礎地盤の変形と劣化に対する加速度の影響について本試験では十分に解明できなかった。試験結果は一応安全側の諸数値を与えるものであり、実際にはこれよりも小さな変形と劣化が生ずるものと予想される。

5. あとがき

繰り返し載荷試験の測定結果は現在解析中であり結果の一部について報告した。試験はこのほかにも現場試験の補足として室内における砂の振動試験、舗装路面における小規模な走行試験などを行なっている。これらの結果については別の機会に報告したい。

参考文献：日本道路公団東京支社、(株)大林道路 東北道
繰り返し載荷試験工事報告書