

土木研究所資料

第1171号

施工の安全性に関する試験調査

—第 2 報—

ROPSを装着した土工機械の転落実験

昭和51年 9 月

建設省土木研究所

要 旨

本調査は、作業中の建設機械が転倒あるいは転落した場合、運転員が車両におしつぶされることを保護するための保護構造(Roll-Over Protective Structures 略して ROPS)に関して、ROPS 設計のための基礎資料を得ることおよび ISO 規格の妥当性を検当することを目的として行なったものである。

試験は、ROPS を装着したブルドーザー(2 台)およびトラクタショベル(1 台)を、 30° の傾斜面に転落させ、ROPS に加わる応力を測定するとともに、室内で静的載荷試験を行ない、応力～荷重の関係を測定した。この両者の試験結果を比較することにより、転落時に ROPS に作用する外力の推定を行なった。また、計算による解析と試験結果とを比較検討した。

試験の結果、転落時に ROPS に作用する外力(真の外力ではなく、静的水平負荷に相当する外力)が推定された。外力の大きさは、転落 1 回転以内、車両重量の小さい範囲では、ISO 規格の値はほぼ妥当なものと思われるが、車両重量の大きいものではやや不安がある。また外力の作用する方向は、ISO 規格では水平方向で代表しているが、試験結果では斜め上方より作用していることが推定された。しかし、ROPS は一般に上方からの荷重に対しては十分な強度を有しており、水平方向からの荷重で代表してもよいものと考えられる。また計算による解析結果は、静的試験の結果と実用上差しつかえない程度で一致することが判明した。

施工の安全性に関する試験調査

—第 2 報—

ROPSを装着した土工機械の転落実験

機械研究室

本 田 宜 史

後 藤 勇

小 室 日出男

目 次

1. まえがき	1
2. 調査概要	1
3. R O P Sに関する規格	2
4. 実験用の R O P Sと土工機械	3
5. 静的試験方法	7
6. 転落実験方法	8
6.1 転落実験場	8
6.2 転落実験方法	10
7. 計算による R O P Sの解析	10
7.1 有限要素法による解析	11
7.2 門形ラーメンによる近似解析	11
8. 実験結果と考察	16
8.1 転落の状況	16
8.2 転落時の外力の推定	21
8.2.1 外力の方向	21
8.2.2 外力の大きさ	23
8.2.3 I S O 3 4 7 1の検討	29
8.3 R O P Sの変形	31
8.4 静的試験結果と計算結果の比較	36
8.4.1 荷重と応力	36

8.4.2	荷重と変形	37
8.4.3	吸収エネルギー	39
9.	結 論	42
10.	付 録	44

1. ま え が き

建設工事における安全性の確保は、労働環境の改善のための重要な条件であって、近年とみにその必要性が高まっている。建設工事の事故のうち建設機械に関連したものは、建設機械が大形化、多様化し、かつその使用が広く普及するに伴い増加の傾向にあり、その内容も転落、転倒、探車、まき込まれ、衝突等死亡事故に直接つながるものが多い。

国際標準化機構（ISO）の土工機械専門委員会（TC127）では、これらの問題のうち車両（土工機械）の転倒の問題を採りあげ、昭和49年に土工機械転倒時運転員保護構造（Roll-Over Protective Structures略してROPS）に関する提案がなされ、昭和50年にその試験方法が制定された。既に米国では1971年より一部の土工機械についてROPSの装着が義務づけられており、我国でもこれを標準化し、装着を義務づけるための準備が進められている。一方、車両の転落実験あるいはROPSに関する試験例は国内外共に数多くあると聞くが、公開されたデータは極めて乏しい。そこで、土木研究所機械研究室では、昭和49年度より2カ年計画で、実際に車両が転落した場合にROPSに加わる力を測定し、安全で合理的なROPSを設計するための資料を得ると共に、ISOで制定された静的試験方法の妥当性を検討するため、ROPSを装着した土工機械の転落実験を実施した。試験は日本建設機械化研究所に委託し、同研究所構内の登坂試験場斜面を改装して行なった。本報告はこれらの結果について述べるものである。

2. 調 査 概 要

ROPSは、土工用機械（以下車両と言う）に取りつけられた構造物で、車両が転落する際に、斜面との衝突によって適当に変形し、この変形によって運転員に加わる衝撃力を吸収し、かつ運転員が部材の変形により押しつぶされることのないように保護するものである。したがって、ROPSの合理的な設計と安全性を調べるためには、ROPSを装着した車両が転落する際に、斜面との衝突によるROPS部材への外力の加わり方を調べなければならない。

昭和49年度の調査では、12t級ブルドーザに剛性の大きいROPSを装着して転落実験を行った。この結果、ROPSに加わる外力の大きさが、ほぼ推定された。

昭和50年度の調査は、前年度の予備的な調査を補足完了させようとするもので、さらに車種・重量によってROPSに作用する外力等がどのように変化するかを明らかにするため、前年度に引き続き12t級ブルドーザ、17t級ブルドーザ、9t級トラクタショベルの3台の土工機械にROPSを装着して転落実験を行なった。3台の車両に装着したROPSは、前年度のROPSが剛性の大きい（即ち、転落によってほとんど変形しない）ものであったのに比べて、剛性の小さい（即ち、転落によって適当な弾塑性変形を起こす）ものである。

表-2.1 実験回数

年度	機種	機械名	規格	静的試験 回数	転落実験 回数	備 考
昭49	履带式 ブルドーザ	NTK6	12t級	1	3	・ROPSはほとんど変形しない。 ・転落実験では、車両は720°以上回転、転落させる。
昭50	〃	NTK6	〃	1	1	・ROPSは適当な弾塑性変形する。
	〃	BD17	17t級	1	1(+1)	・転落実験では、車両は360°回転、転落させる。
	車輪式 トラクタショベル	WS20	9t級	1	1(+1)	・(+1)は、720°以上回転、転落させる。

調査は以下の項目に主眼をおいた。

- (1) 転落時にROPSが受ける外力を、支柱に貼った歪ゲージで応力を測定することにより調べる。
- (2) 転落実験に用いたのと同じ(材料、寸法、構造、工作法等)のROPSについて静的試験を行ない、これと(1)とを比較することにより、転落時にROPSが受ける外力と等価な静荷重を推定する。
- (3) (1)および(2)の総合的な判断により、ROPSの安全性の検討並びにISO規格の妥当性について検討する。
- (4) ROPSを設計する手段としての有限要素法による解析、ラーメンによる近似解析について検討する。

3.ROPSに関する規格

ROPSに関する規格としては、ROPSの試験方法を規定するISO3471があり、これに関連してROPS試験時のたわみ限界を規定するISO3164がある。(これら両規格の基礎となつたと思われる規格としてSAE/J1040、SAE/J397aがある。さらに建設機械用のシートベルトについて規定するSAE/J386a、これに関連して自動車用シートベルトについて規定するSAE/J4Cがある。)

ISO3471およびISO3164の抄訳は、土木研究所資料第1061号「ROPSを装着した土工機械の転落実験-第1報-」にもあるが、本調査に対する理解を助けるため巻末付録1および付録2にISO3471およびISO3164の概要を再録したので参考にされたい。

4. 実験用のROPSと土工機械

実験用のベースマシンとして使用した土工機械は3台で、履带式ブルドーザ12 ton級(NTK 6)および17 ton級(BD 17)、車輪式トラクタショベル9 ton級(WS 20)である。ただしブルドーザについては、転落実験に際して排土装置が横転のときの回転を防げることがないように、排土板、Uフレーム、排土板昇降用油圧シリンダを取外して使用した。トラクタショベルについては、バケット付のまま実験に使用した。いずれもトラクタのメインフレームは鋼板を溶接して補強したうえ、ROPSを取付けるためのブラケットを設けてある。トラクタとROPSはハイテンボルトで結合している。トラクタの改造およびROPSの製作は建設省関東技術事務所にて行なった。これら機械の主要諸元を表4.1に、ROPSを装着した状態を写真4.1～4.3に示す。

表-4.1 実験用土工機械主要諸元

機 種	履带式ブルドーザ	履带式ブルドーザ	車輪式トラクタショベル
機 械 名	NTK 6 C	BD 1 7	WS 2 0
実験時重量 ¹⁾ (kg)	1 2 0 7 0	1 5 7 4 0	9 6 2 0
ROPS単体重量(kg)	3 7 0	4 6 0	3 0 0
全 長 ²⁾ (mm)	3 9 8 0	4 3 8 0	5 7 1 0 (バケット地上)
全 巾 ³⁾ (mm)	2 4 0 0	2 8 4 0	2 3 0 0 (バケット巾) 2 2 1 0 (車 体 巾)
履帯中心距離(mm)	1 8 8 0	1 9 0 0	—
輪 距 (mm)	—	—	1 7 9 0 (前 輪) 1 8 2 0 (後 輪)
接 地 長 (mm)	2 3 3 0	2 5 0 0	—
軸 距 (mm)	—	—	2 1 5 0
履 帯 巾 (mm)	4 0 6	5 1 0	タイヤサイズ 14.00-24-10PR

注1) NTK 6 C, BD 1 7については排土板, Uフレーム, 油圧シリンダ, オペレータ無し, 燃料, 冷却水, オイル規定量, ROPSを含む。WS 2 0にあつてはバケット付, オペレータ無し, 燃料, 冷却水, オイル規定量, ROPSを含む。

2) 3) 実験時寸法(NTK 6 C, BD 1 7についてはトラクタ車体の寸法)

ROPSは、各々の機械について、寸法、形状、材質、工作法等全く同一のものを2基(合計6基)製作し、静的試験に1基、転落実験に1基を使用した。

ROPSの寸法は、単に運転席を覆うことができればよいが、そのように小さくした場合にはROPSの前部支柱の位置が車両の重心より後方になるため、ROPSを取付けた車両が転落しながら側方へ回転することはないと予想された。このため本実験では前部支柱を車両の重心より前方に配置した。このような寸法にすることによって、車両は転落一回転以内ではほぼ真横に転落、回転を続けることができ、静的試験との比較が容易である。

ROPSの形状は、応力分布が対称となるように、4柱式溶接立体ラーメン構造とし、支柱材には変形の際の応力分布が比較的単純な円形中空断面(パイプ材)を使用し、梁材には2本のみぞ形

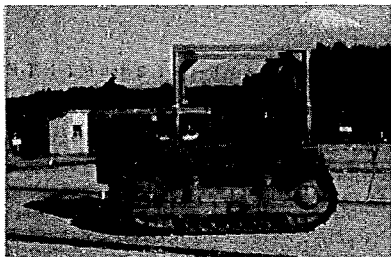


写真 4.1 履帯式ブルドーザ (NTK6C)

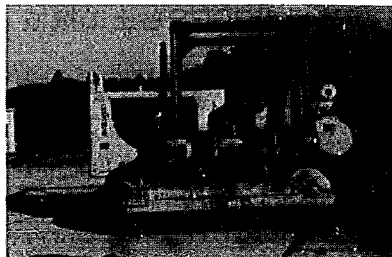


写真 4.2 履帯式ブルドーザ (BD17)

鋼を抱合せ溶接した角柱を使用した。各部材の接合部には応力の集中をさけるため、補強のウェブを付けた。これら ROPS の寸法、形状を図 4.1 ～ 図 4.2 に示した。なお図 4.1 ～ 図 4.2 には支柱の記号、変位の測定点および記号（図には C 支柱のみについて記したが、他の支柱についても同様である。）歪ゲージの貼付位置、荷重の方向、DLV の位置、SGP の位置等を併せて記入した。これらの記号等は静的試験、転落実験を通じて共通に用いられる。



写真 4.3 車輪式トラクションベル (WS20)

ROPS 支柱材の選定に当っては、7 項（計算による ROPS の解析）に詳述するモデルを用い、数種類の寸法の異なるパイプ材について、荷重～たわみの関係を求め、これより ISO 3471 に規定する側方荷重要求値、およびエネルギー要求値を満足するパイプ材を選び支柱材とした。梁材に

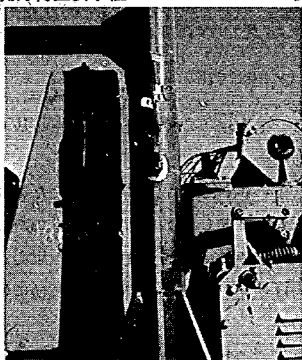


写真 4.4 歪ゲージの貼付け

については、前年度の解析結果によれば大きな応力をうけることはないが、梁にかかる荷重を十分に支柱に伝えることができるように、支柱に比較して剛性の高いものとした。

各々の ROPS には、静的試験と転落実験の際 ROPS に加わる荷重と部材に発生する応力の関係を測定するため、2 本の支柱（B 支柱、C 支柱）に写真 4.4 に示した如く歪ゲージを貼った。前年度の実験においては、4 本の支柱全部に歪ゲージを貼ったが、4 本の支柱の応力には大きな差がなかったため、今年度は 2 本のみ

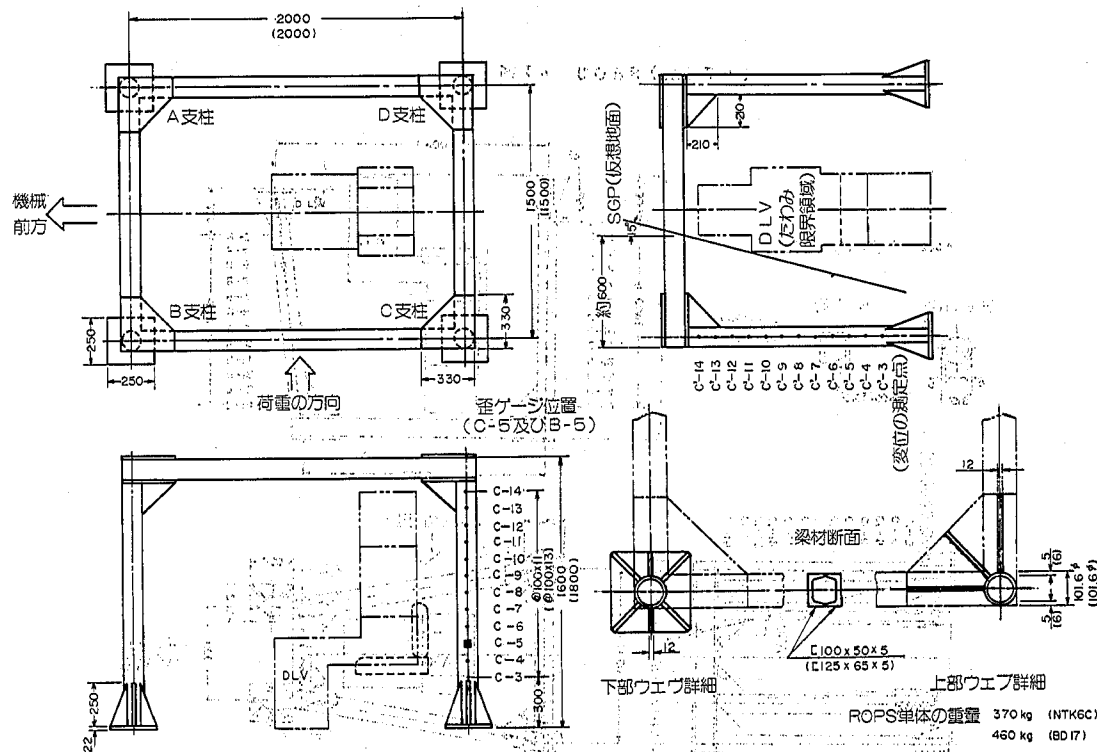


図 4.1 ROPS (NTK6)

() 書き寸法はBD17を表す。

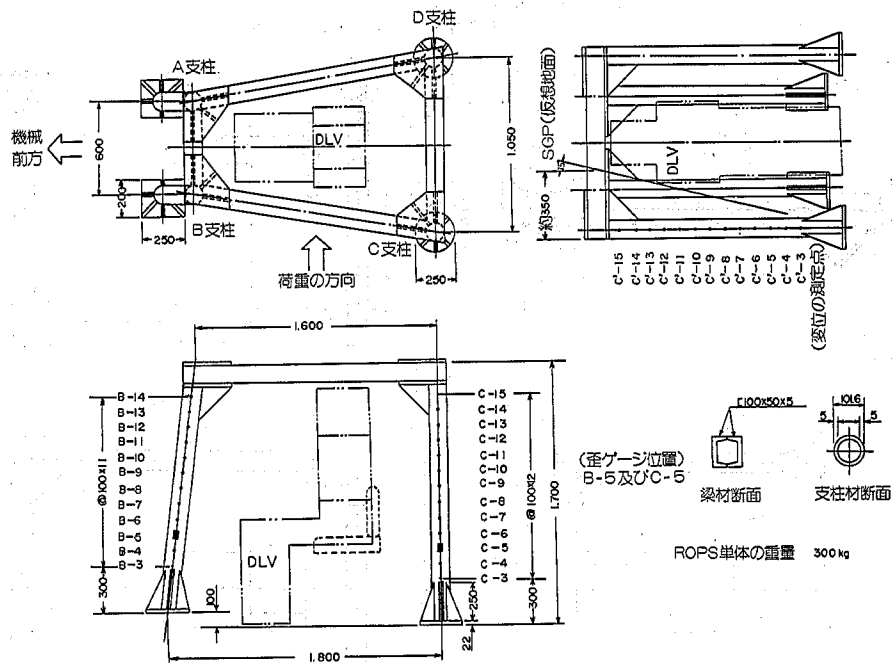


図 4.2 ROPS (WS20)

とした。歪ゲージの貼付位置は前年度実験と同様に基板より50mmの高さである。これは支柱の下端または上端では応力の分布が複雑で、実験により塑性変形することが予想され、また支柱の中央では応力が小さく測定誤差はいりやすいなどの配慮から位置を決めたものである。

5. 静的試験方法

静的試験は、ROPSを試験台上に固定し、これに静荷重を加えて、この時の荷重の大きさと部材に発生する応力および変形量との関係を測定し、これと転落実験の際ROPSに発生する応力および変形量とを比較することにより、転落の際ROPSが受ける外力と等価な静荷重を推定するために行うものである。静的試験の方法はISO3471に準拠する。ただし、ISO3471によればROPSに載荷する時のROPSの固定方法は、ROPSを取付けた車両またはメインフレームを試験台上に固定することを規定している。これは、メインフレームもある程度、変形を受けもつということを考慮したためであろうが、その割合は極めて少ないと考えられるので、今回の実験ではROPSを直接試験台上に固定して試験を行なった。(ISO3471によれば、ROPSに対する性能要求は実験室内での静的試験でのみ評価される。したがって、静的試験方法が必ずしも実際の転落による構造変形を再現するものではないにしても、転落実験に代用し得る方法であるか否かの検討をする必要がある。)

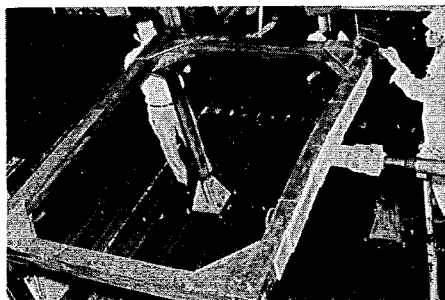


写真 5.1 載荷試験装置

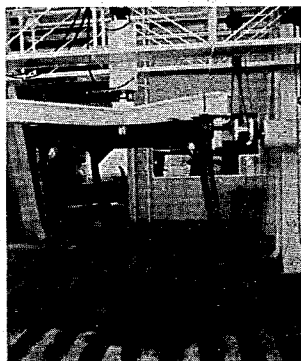


写真 5.2 載荷試験装置

静的試験は、写真 5.1 に示す試験装置 (NTK6C の試験に用いた) または写真 5.2 に示す試験装置 (BD17 および WS20 の試験に用いた) を用いて行なった。いずれの試験装置でも、試験はROPS 頂部梁材の中央に水平方向に、油圧シリンダにより荷重分布板 (ディストリビュータ) を介して静荷重を加えて行なわれる。静荷重の大きさは、油圧シリンダの圧力で測定し、ROPS のたわみは、ROPS 頂部に固定した鋼尺の移動量をレベルにより測定した (ROPS のたわみは、別途に油圧シリンダの押出量によっても測定した)。この時ROPS 支柱に発生する応力は、B 支柱、C 支柱に貼った歪ゲージにより測定した。(歪ゲージの貼付位置については図 4.1 ~ 図 4.2 お

および写真4.4参照。)

試験は、油圧シリンダによる静荷重をゆるやかに増加させてゆき、この時の荷重と変位量および支柱に発生する応力との関係を計測することにより、ISO 3471に規定する側方荷重要求値およびエネルギー要求値の両方を満足するまで行なわれる。(ROPSは、この時点では一般に大きな変形を起しているのが普通である。)次いで静荷重を除荷し、永久変形量を計測する。永久変形量は各支柱について、静荷重の方向とこれに直角の方向について測定した。(変位の測定点については図4.1～図4.2参照。)なお永久変形量の測定は転落実験後についても同様の方法で行なう。

ISO 3471によれば、側方荷重を除去した後、車両重量に相当する垂直荷重を負荷することになっているが、今回の実験に用いたROPSは、垂直荷重に対しては十分な負荷能力があるため、垂直載荷実験は省略した。

6. 転落実験方法

6.1 転落実験場

転落実験は、実際の転落時にROPSに作用する外力を計測しようとするものである。

ROPSは、最大傾斜 30° の硬い粘土状地表の斜面を、斜面との接触を失うことなく、車両の縦軸回りに最大 360° 転落する際に運転員を保護しようとするものである。したがって本実験では、転落実験場斜面の傾斜を 30° とし、斜面の長さは、車両が 360° の回転で止まるように6mとした。転落実験場は、建設機械化研究所の登坂試験場の斜面を改装したもので、その平面図を図6.1に示す。

斜面の改装にあたり、ROPSを装着した車両の転落軌跡を検討した結果、傾斜 30° の斜面では車両に回転の初速度を与えずに転落させた場合、 360° の回転を続けることはないと推定されたので、図6.2に示すように斜面頂部にコンクリートブロックを設けた。転落をはじめ



写真6.1 転落実験場

た車両は、履帯(または車輪)がまずコンクリートブロックに衝突する。このコンクリートブロックは十分な高さをとっており、ROPSの角が斜面に衝突するときは、車両の重心がROPSと斜面の接地点より前方に移動しているため車両は回転を続ける。なお履帯(または車輪)がコンクリートブロックに衝突することにより転落のエネルギーの一部が失われるが、コンクリートブロックの剛性は高いのでこのエネルギー損失は少く、斜面にROPSが衝突するときの力は、ほとんど減少することはないと考えられる。

斜面の状態は、盛土をブルドーザで整形したものである。(注。ISO 3471によると、斜面

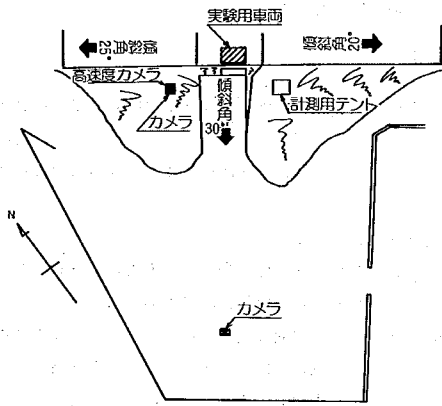


図6.1 転落実験場平面図

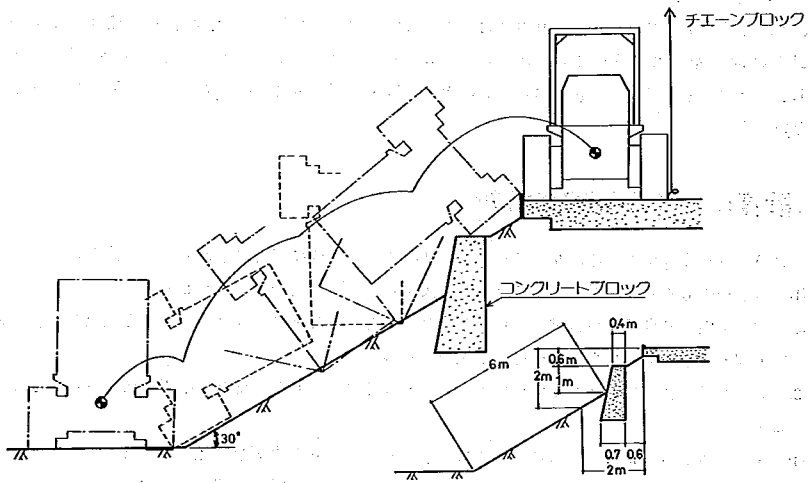


図6.2 転落実験場断面図

の状態は“hard clay surface”となっている。)

6.2 転落実験方法

転落は、図6.2に示すように履帯(または車輪)の下に歯止めの鋼板を敷き、これにワイヤーロープを結び、ワイヤーロープをチェーンブロックで引上げるにより車両に傾斜を与え、車両後方より見て左側に転倒させる。したがって、転落は自重により自然に行なわれるもので、回転の初速度は与えていない。

実験は、各車両1回、合計3回行なった。

転落実験の際測定する項目は、ROPS支柱に発生する応力、ROPSのたわみ(永久変形)、ROPSの加速度、ダミー頭部の加速度、転落状況写真撮影である。

ROPS支柱に発生する応力は、静的試験の場合と同様にB支柱、C支柱に貼った歪ゲージにより測定した。ROPSの加速度は、C支柱頂部に固定した3方向加速度計により測定した。運転席には運転者のダミーをシートベルトで固定し、ダミーの頭部には3方向加速度計を取り付け、転落のとき運転者に加えられる加速度を測定した。転落の状況は図6.1に示すように配置した16mm高速カメラ、16mmカメラ、35mmカメラで撮影した。

転落実験終了後ROPSのたわみ(永久変形)を測定した。測定方法は静的試験の場合と同様である。(BD17およびWS20の2台については、この実験終了後、実験場斜面を延長し、360°以上の回転をさせる実験を行った。これはROPSがDLVに侵入するかどうかを直視的に確認しようとするもので、この場合は、写真撮影と転落後の変形量計測のみで、他の計測は行っていない。)

7. 計算によるROPSの解析

ROPSを設計するにあたり、ROPSには次のような性能が要求されている。即ち、

- (1) 普通土やもろい岩に対してROPSが貫入するのに十分な強さをもつこと。
- (2) 硬い地面にROPSが打撃した時、ROPSがたわむことによりエネルギーを吸収し、引き続いて起る衝撃に対しても有効に耐える能力をもつこと。
- (3) ROPSが極端に変形した場合でも、ROPS部材はDLV(たわみ限界領域)に侵入しないこと。
- (4) 車両がさかさまになった時に、すでに変形したROPSが車両を支えうること。

従来、上記の性能を満足するROPSを設計するためには、試行錯誤的に破壊試験を繰り返し、満足する構造強度をもつものにしていく方法が一般的であった。しかし、この方法は多額の費用と長い開発期間を必要とする。このような観点から、本研究では理論計算による解析方法を試み、これと静的試験結果とを比較し、実用性について検討した。

本研究では電子計算機を用いた有限要素法(MARC)による数値解析と、ROPSを2つの門

型ラーメンで構成されたものと仮定したラーメン近似解法の2通りについて行った。

7.1 有限要素法による解析

電子計算機を用いた有限要素法による解析では、実験に用いたROPSを図7.1に示す解析モデルに置き換えて数値計算を行なった。

静的試験との比較を容易にするため、荷重は縦梁全体にかかる分布荷重とし、荷重方向は水平である。今回のROPS(NTK6C用およびBD17用)は左右対称であるのでモデルは半分のみとした。ウェブ補強部分は実際の形を入力することが出来ないため、外径の異なる中空円筒の積み重ねに置き換えた。

次に支柱用材料の応力～ひずみの関係($\sigma \sim \epsilon$ 線図)を図7.2に示す簡単な折線で近似できるものと仮定した。

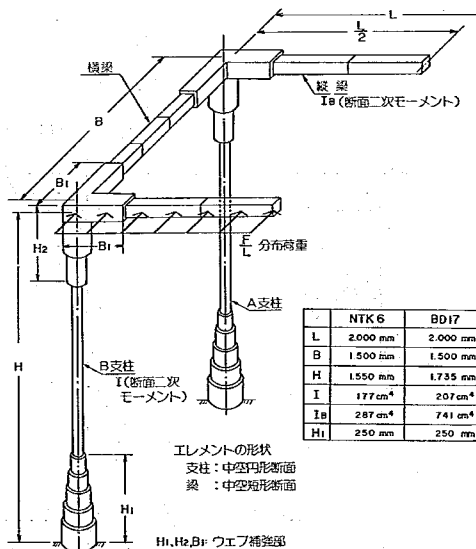


図 7.1 ROPSモデル(有限要素法)

7.2 門形ラーメンによる近似解析

門形ラーメンによる近似解析では、実験に用いたROPSを図7.3に示すモデルに置き換えて解析を行なった。即ちROPSは縦梁を除き、横梁と2本の支柱で構成される門形ラーメンと考えた。

この場合、載荷された荷重Fは、各々のラーメンに $\frac{F}{2}$ ずつ均等に載荷されるものとする。このように考えた場合、各部材の変形が余り大きくないとすると、曲げモーメント図は図7.4に示すようになる。弾性変形の場合、曲げ応力 σ_b は次式によって求められる。

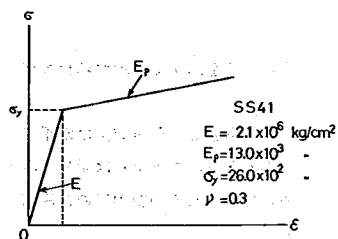


図 7.2 材料の応力～歪線図

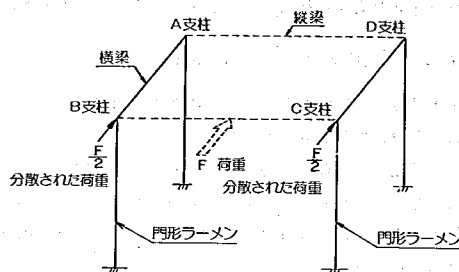


図 7.3 ROPSモデル(門形ラーメン近似)

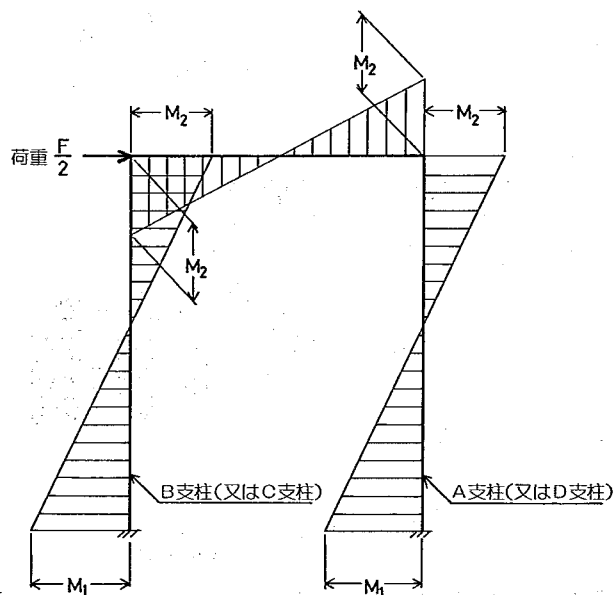


図 7.4 門形ラーメンと考えた場合の曲げモーメント図

$$\sigma_b = \frac{M_x}{Z} \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

ここに、

M_x : 断面 x における曲げモーメント

Z : 部材の断面係数

ウェブで補強された部分を除けば、曲げ応力 σ_b の分布図は曲げモーメント図に相似となる。

弾性変形の場合、荷重点の変位はエネルギー式により求められる。いま 1 本の柱の頂部に荷重 $F/4$ が加わり、荷重方向に Δ だけ変位したものとすると、吸収エネルギー U_F は次のようになる。

$$U_F = \left(\frac{F}{4}\right) \cdot \left(\frac{\Delta}{2}\right) = \frac{F \cdot \Delta}{8}$$

一方、部材の断面 x でのモーメントを M_x とし、せん断ひずみとウェブのひずみエネルギーを無視すれば、長さ H の部材でのひずみエネルギー U_M は、

$$U_M = \frac{1}{2EI} \int_0^H M_x^2 dx$$

ここに、

E : 部材の縦弾性係数

I : 部材の断面二次モーメント

である。エネルギーの釣り合いより、 $U_F = U_M$ であるから、

$$\Delta = \frac{4}{EIF} \int_0^H M_x^2 dx \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

となる。支柱の曲げモーメント M_x は、

$$M_x = M_1 - \frac{M_1 + M_2}{H} \cdot x \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

と表される。(7.3) 式を (7.2) 式に代入して、これを解くと、

$$\Delta = \frac{4H}{3EIF} \{ (M_1 + M_2)^2 - 3M_1 M_2 \} \quad \dots\dots\dots (7.4)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{1+3k}{1+6k} \cdot \frac{FH}{4} \\ M_2 &= \frac{3k}{1+6k} \cdot \frac{FH}{4} \\ k &= \frac{I_B \cdot H}{I \cdot B} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7.5)$$

(7.5) 式を (7.4) 式に代入して整理すると、

$$\Delta = \left\{ 1 - \frac{9k(1+3k)}{(1+6k)^2} \right\} \frac{H^3 \cdot F}{12EI} \quad \dots\dots\dots (7.6)$$

となる。荷重 F を大きくしていくと、ROPS の部材は、まず支柱の下端のウェブと部材の接合部で降伏し始める。このときの荷重 F_y (降伏力) は、(7.1) 式および (7.5) 式より、

$$F_y = 4 \sigma_y Z / \left(\frac{1+3k}{1+6k} \cdot H - H_1 \right) \quad (7.7)$$

ここに、

H_1 : 支柱下端のウェブ補強部の長さ

となる。このときの変位 Δ_y は、(7.7) 式を (7.6) 式に代入して求められる。さらに荷重 F を増していくと、横断面のほぼ全面が降伏し、応力は σ_y の一定値となる。従って、このときの荷重 F は完全塑性体における極限荷重 F_o にほぼ等しいから、

$$F_o = \frac{S_o}{Z} \cdot F_y \quad (7.8)$$

ここに、

S_o : 部材の断面一次モーメント

となる。荷重が F_y 以上になると、部材は弾性および塑性ひずみの両方を含む変形をする。荷重が $F_y \sim F_o$ の間ではまだ弾性変形の要素が大きいのので、近似的に F_o における変位 Δ_o は (7.8) 式を (7.6) 式に代入して求められる。荷重が F_o に達すると、部材は加工硬化を起し、曲げ応力は増加し始める。塑性ひずみによる変位 Δ_p は、部材を硬化塑性体とすると、 $\sigma \sim \epsilon$ 線図は、

$$\sigma = \sigma_y + E_p \cdot \epsilon = \sigma_y + E_p \cdot \frac{\eta}{\rho} \quad (7.9)$$

ここに、

E_p : 部材の塑性係数

η : 中立面からの距離

ρ : 断面 x における曲率半径

であるから、曲げモーメント M は、

$$\begin{aligned} M &= 2 \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma \eta dA = 2 \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{H}{2}} \left(\sigma_y + \frac{E_p \cdot \eta}{\rho} \right) \eta dA = M_o + \frac{E_p \cdot I}{\rho} \\ \therefore \frac{1}{\rho} &= \frac{M - M_o}{E_p \cdot I} \quad (7.10) \end{aligned}$$

ここに、

M_o : 極限モーメント ($= \sigma_y \cdot S_o$)

(7.9) 式をたわみ方程式に代入すると、

$$y = \int_{H_1}^{H-H_2} \frac{M - M_o}{E_p \cdot I} dx \cdot dx$$

ここに、

y : たわみ

となる。上式に (7.3) 式および (7.5) 式を代入して、解いた値を Δ_P とおくと、

$$\Delta_P = \frac{5}{24E_P \cdot I} \cdot \left(\frac{1+3k}{1+6k} \cdot H - H_1 \right)^3 \frac{(F-F_0)^3}{F^2} \dots\dots\dots (7.11)$$

となる。図 7.2 のような $\sigma \sim \varepsilon$ 線図をもつ部材の変位は近似的に (7.6) 式と (7.11) 式を合成したものと考え、全塑性時の変位 Δ は、

$$\Delta = \left\{ 1 - \frac{9k(1+3k)}{(1+6k)^2} \right\} \frac{H^3 F}{12EI} + \frac{5}{24E_P I} \left(\frac{1+3k}{1+6k} \cdot H - H_1 \right)^3 \frac{(F-F_0)^3}{F^2} \dots\dots\dots (7.12)$$

となる。また、曲げ応力 σ_b は (7.9) 式および (7.10) 式より、

$$\sigma_b = \sigma_y + \frac{M-M_0}{Z} \quad (M > M_0) \dots\dots\dots (7.13)$$

となる。

8. 実験結果と考察

8.1 転落の状況

転落実験は、履帯式ブルドーザNTK6およびBD17、車輪式トラクタショベルWS20の3機種について、それぞれ1回づつ行なった。いずれも車両は転落1回転で停止するように斜面の長さを設定した。なおBD17とWS20の2機種については、後述の如く1回転々落実験終了後のROPSの変形量がわずかであったので、転落実験場斜面を延長し、転落2回転の実験を行なった。

転落の状況は図8.1に示すように、履帯(又は車輪)の一方をウィンチで吊上げることにより、車両後方より見て左側に転落させるものである。今回の実験の場合、履帯式ブルドーザは約50~55度、車輪式トラクタショベルは約50度で静的な安定を失い、ゆっくりと回転を始める。車両はまず履帯(又は車輪)がコンクリートブロックと衝突し(この点を P_{c1} 点と名付ける)、ついでROPSの一边(端)が斜面に接地する(P_1 点)。今回の実験場斜面は、盛土後10数年を経過しているとは言え良く締固まった状態ではなかったので、ROPSは回転を続けながら斜面に貫入し、車両は倒立状態になる。ついでROPSの他の一边(端)が接地し(P_1' 点)、一方の履帯(又は車輪)の接地(P_{c2} 点)、他の一方の履帯(又は車輪)の接地(P_{c2}' 点)を経て360°の回転を終了する。

車両は最初の回転を始めてから P_1 点まではゆっくりと回転するが、その後回転の慣性が大きくなるにつれて急速にその速度を増す。

なお車輪式トラクタショベルWS20の場合は、目視の限りにおいて、ウィンチで車両の片方を吊上げたとき反対側(左側)2輪に荷重が集中し、タイヤが大きく変形してエネルギーを蓄積し、回

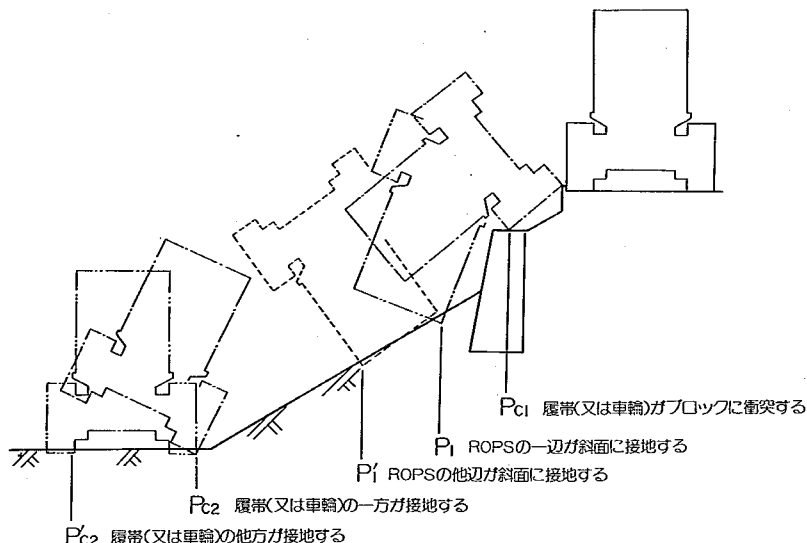


図8.1 転落状況とピークが発生する位置

転を始める瞬間にこのエネルギーが開放されて少し車体が飛び上るように見える。また P_{e1} 点においてもタイヤがコンクリートブロックに衝突し、その反動で回転が増速されるように見える。更に1回転を終了した P_{e2}' 点でもタイヤと地面の反発により更に回転を続け、2回転目 (P_2 点) において (回転角約 450°) 止った。

写真 8.1 ~ 8.3 は、転落の状況を撮影したものである。

次に、転落の際の ROPS と履帯 (又は車輪) の接地の状況を図 8.2 に示す。図 8.2 より車両は1回転の範囲内ではほぼ真横に転がっている。従って ROPS に作用する外力は車両の前後方向に対して直角に加わっているものと推定され、車両の水平軸方向に対する角度は明確ではないにしろ、静的試験での側方載荷に近い状態を再現しているものと思われる。なお外力の方向については 8.2 (転落時の外力の推定) で考察する。

3機種について各1回の転落実験終了後転落実験場斜面を延長し、BD17およびWS20の2機種について2回転の転落を行なう実験を行なった。この実験の目的は、転落1回転以内ではROPSによるエネルギーの吸収が小さかったので、もっと大きな外力が作用すると思われる2回転目ではROPSがどのような挙動を示すものであろうか、またROPSの部材がたわみ限界領域 (DLV) に侵入しないか、を目視的に観測しようとするものである。

ROPSは、いずれも1回目の転落実験に使用したもので永久変形が残っているそのままを使用している。計測は目視 (写真撮影) のみで、歪ゲージによる計測、加速度計による計測は行なっていない。

転落状況は、1回転目は前回の転落実験と同様に真横に転がるが、2回転目以降は写真 8.4 ~ 8.5 に示すように必ずしも真横には転がらない。履带式ブルドーザー BD17 は2回転 (回転角約 720°) で停止したが、車輪式トラクタショベル WS20 は3回転目に入った時点 (P_3 点) (回転

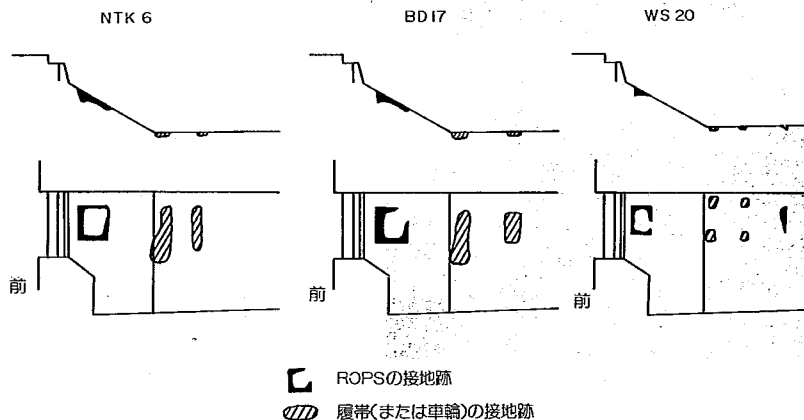


図 8.2 転落実験の接地跡



(1)



(4)



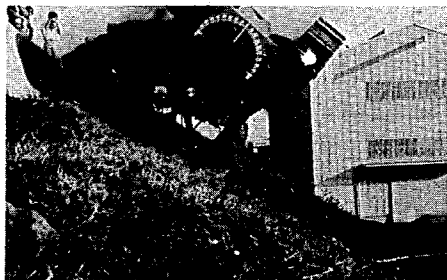
(2)

(1) 吊上げの状況

(2) 回転角約 180°
(P_1 の状態)

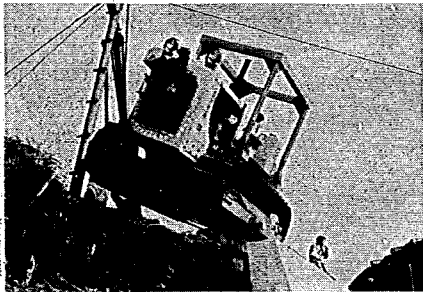
(3) 回転角約 210°
(P_1' の状態)

(4) 回転角 360°

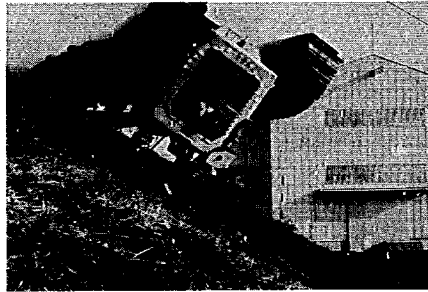


(3)

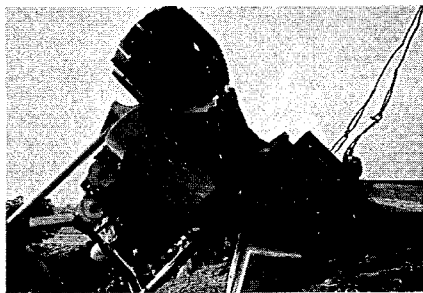
写真 8.1 NTK6 転落状況



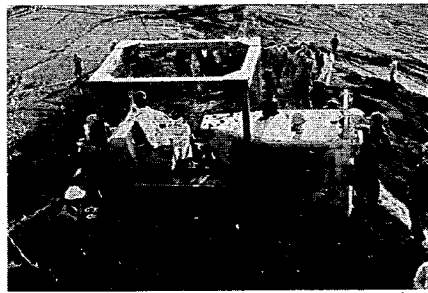
(1)



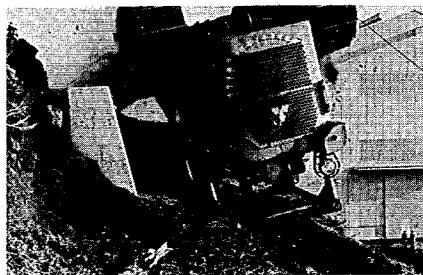
(4)



(2)



(5)



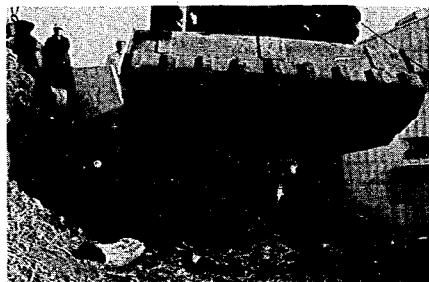
(3)

- (1) 吊上げ状況
- (2) 回転角約 130°
(P_{c1} の状態)
- (3) 回転角約 180°
(P_1 の状態)
- (4) 回転角約 210°
(P_1' の状態)
- (5) 回転角 360°

写真 8.2 BD17 転落状況



(1)



(4)



(2)



(3)

- (1) 吊上げ状況
- (2) 回転角約 120°
(P_{c1} の状態)
- (3) 回転角約 180°
(P_1 の状態)
- (4) 回転角約 210°
(P_1' の状態)

写真 8.3 WS20 転落状況

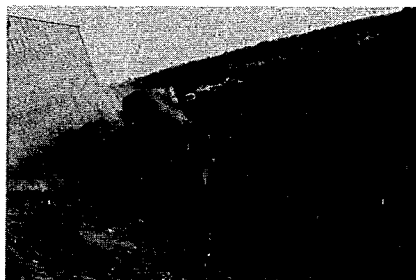


写真 8.4 2 回転目の転落状況 (BD17)

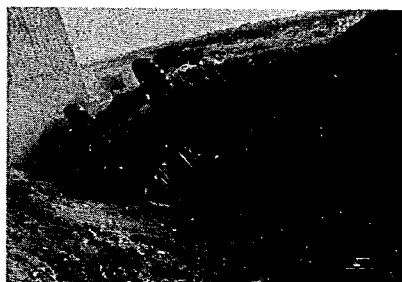


写真 8.5 2 回転目の転落状況 (WS20)

角約 900°) で停止した。ROPS は 2 回転目に ROPS が斜面と接地する P_2 点、WS20 の場合は P_2 点と P_3 点で急激に変形してゆくのを目視され、2 回転目は 1 回転目より大きな外力が作用しているものと推定される。

8.2 転落時の外力の推定

8.2.1 外力の方向

転落時に ROPS に作用する外力の方向は、次の方法により推定した。即ち ROPS の C 支柱上端に固定した 3 成分加速度計の計測結果より、 P_1 点における 3 方向の加速度のベクトルの合成された方向を外力の方向と推定した。さらに高速度写真より転落時の ROPS の軌跡を求め、 P_1 点における軌跡の接線方向を外力の方向と推定することも併せて行なった。

図 8.3 ~ 8.4 は、NTK6 および BD17 の転落軌跡を、ROPS が斜面に接地した瞬間を基準にして $1/10$ 秒毎に描いたものである (WS20 については、高速度写真不良の為解析できなかった)。これによれば、ROPS が地面に接地した瞬間の外力の方向は、水平より上方約 14° (NTK6) ~ 20° (BD17) である。一方加速度ピーク値のベクトルの合成された方向 (付表 12 参照) は、図 8.3 ~ 8.4 に記入した如く地平面より上方に NTK6 で 28° 、BD17 は 15° 、WS20 は 26° である。

高速度撮影と加速度計の計測は個々に独立して行なわれ、時間的に同期して計測されていないが、加速度のピーク値は約 $1/10$ 秒で立上っていることから、ROPS 接地 $1/10$ 秒後に最大負荷をうけるものとして、この時の ROPS 軌跡の接線方向を求めると約 45° (NTK6) ~ 55° (BD17) となる。即ち、今回の転落実験における外力の方向は、図 8.5 に示す範囲内で接地中に変化すると推定される。

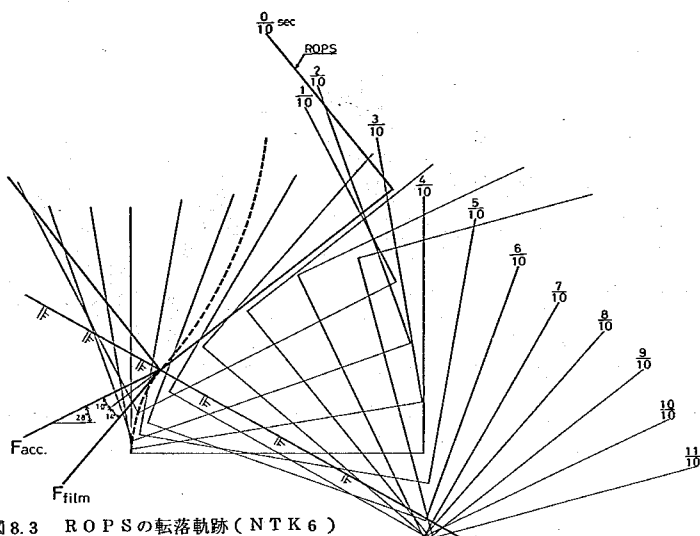


図 8.3 ROPSの転落軌跡 (NTK6)

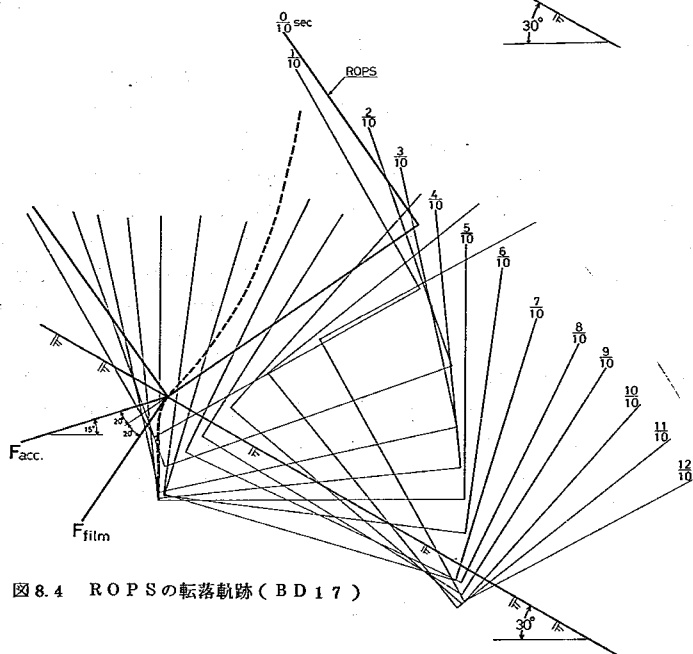


図 8.4 ROPSの転落軌跡 (BD17)

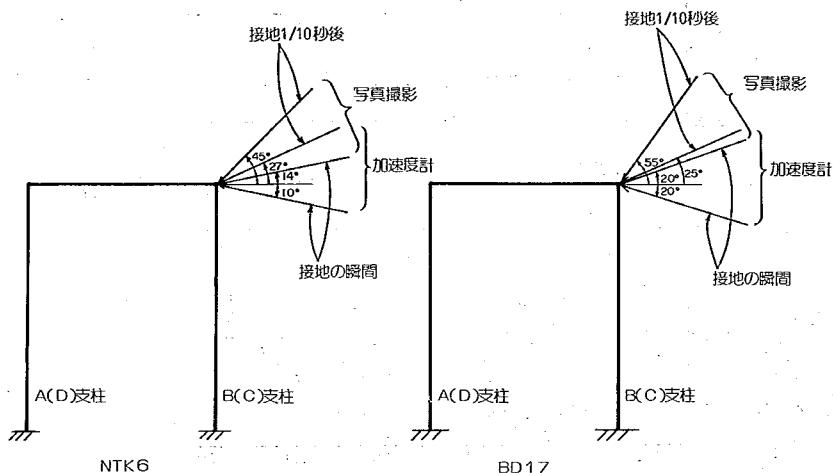


図 8.5 転落時の外力の方向の範囲

8.2.2 外力の大きさ

転落時に ROPS に作用する外力の大きさは、静的試験における側方荷重と等価な荷重を求めようとするもので、次の方法により推定した。まず静的試験により校正曲線を作成する。校正曲線は側方荷重とその時の ROPS 頂部の変形量の関係、および側方荷重とその時の B 支柱、C 支柱に発生する主応力の関係を求めておく。一方、転落実験においては、ROPS の B 支柱、C 支柱に発生する主応力を計測する。また転落後の ROPS の永久変形量を計測する。これらの値を静的試験による校正曲線と比較することにより、外力の大きさを推定しようとするものである。

(i) 主応力による推定

図 8.6 は、転落時に ROPS の B 支柱、C 支柱に発生する主応力の大きさを P_{01} 点を時間軸の基準とした時間経過と共に示したものである（付表 11 参照）。ROPS 支柱に発生する応力は、ROPS が斜面上に接地する P_1 点において最大値が発生しており、ROPS の強度に関してはこの時点の荷重に耐えられればよいことになる。 P_1 点における B 支柱および C 支柱の応力は NTK6 の場合はほぼ一致しているが、BD17 および WS20 の場合は必ずしも一致していない。ROPS はほぼ真横に転がっているとは云え、ROPS の転落後の接地跡（図 8.2 参照）を見ると、BD17 ではやゝ B 支柱に、WS20 ではやゝ C 支柱に荷重が片寄ってかかっていることも推定される。しかし B 支柱、C 支柱の応力の差は 10% 程度であり、十分現象を再現しているものと思われる。

次に図 8.7～8.9 は、静的な側方載荷試験における荷重～応力の関係を示したものである（付表 4～7 参照）。静的試験においては、荷重は ROPS に対して正確に水平方向からかけられている

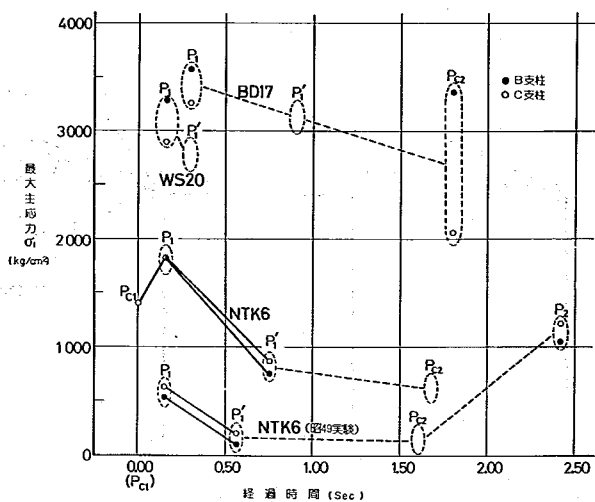


図 8.6 転落時に支柱に発生する主応力

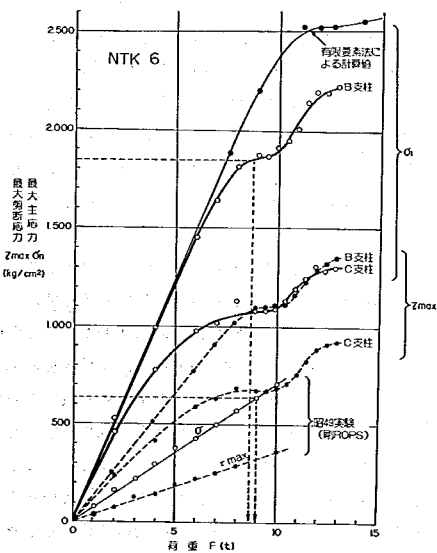


図 8.7 静的試験による荷重～応力線図 (NTK 6)

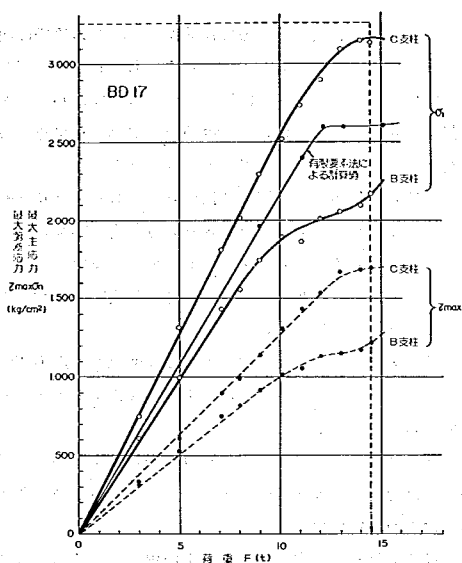


図 8.8 静的試験による荷重～応力線図 (BD 17)

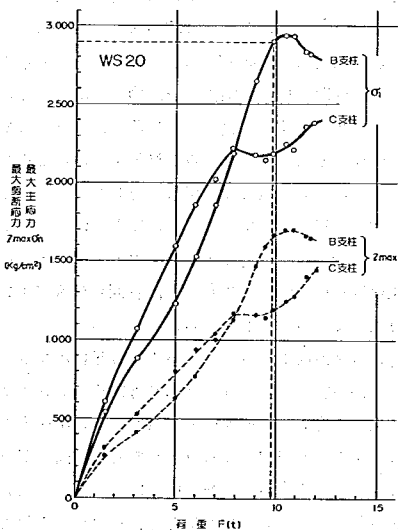


図 8.9 静的試験による荷重～応力線図 (WS 20)

にもかかわらず、B支柱、C支柱に発生する応力には差がある。この原因は明らかではないが、ROPSの試験台上への取付ボルトの締め方のバラツキや、ROPSウェブ補強部の溶接手順や形状、あるいは歪ゲージの貼付状態などが微妙に作用しているのではなかろうか。

図8.6で得られた結果を図8.7～8.9に代入して静荷重と等価な荷重を求めると、NTK6は約8.7 ton、BD17は約14.4 ton、WS20では約9.8 tonが得られる。

ここでNTK6に注目すると、前年度転落実験に用いたNTK6と今年度転落実験に用いたNTK6は同一車両であり、前年度は剛性の高いROPSを、今年度は剛性の低いROPSを装着している点異なるのみである。図8.6および図8.7を利用して前年度実験における転落時に作用する外力（静荷重と等価な荷重）を求めると約9 tonとなり、今年度実験の値約8.7 tonとほぼ等しい値が得られ、実験の再現性があることが確認された。

BD17については、試験装置の故障により荷重14.4 ton以上の応力測定が行われていないので、図8.8のみを見る限りにおいては荷重の推定は不確実な点があるが、外力の推定については後述の如くROPSの変形量からも推定する。

なお、ここで得られた荷重は真の外力ではなく、真の外力の水平分力に相当するものであり、真の外力は8.2.1項で考察した方向（図8.5参照）から作用しているものと考えられる。

(iii) 静的試験と転落実験の対応性の検討

ここで、静的試験における荷重～主応力の関係を校正曲線として使用することの妥当性を検討しておく。静的に載荷した場合の荷重と主応力の関係は、転落実験のように衝撃的な荷重（と考えられる）と主応力の関係とは異なるのではないかという疑問があるからである。

まず、ROPSの部材は弾性範囲内にある必要がある。即ち、荷重と応力の関係は材料の弾性範囲内では比例関係にあるが、塑性範囲ではこの関係は一義的には決まらないからである。ROPSは全体としては塑性変形を起こすが、少なくとも歪ゲージを貼った位置では弾性範囲にある。このことは、歪ゲージの出力が荷重の作用した前後で、零点の移動がないところから証明できる。

次に、実験に使用した歪ゲージは、5KHzまでの現象に対してフラットな出力特性を有しており、実際の現象はこの $1/10$ （500Hz）以下で使用することが望ましいとされている。今回の転落実験の場合、歪のピーク値は約 $1/10$ 秒の現象（5Hz）であり、出力波形にオーバードampingなどの波形が見られないこと、また歪速度が比較的遅いこと（ $1/10$ 秒間に最大で 1700×10^{-6} の歪が発生する）からも、十分現象を再現しているものと考えられる。

次に、静的試験においては、水平方向からの荷重であるから部材に発生する応力は曲げ応力のみと考えることができる。一方転落実験においては、外力の方向は図8.5に示すように水平ではないと考えられるから、部材に発生する応力は、曲げ応力、振り応力、圧縮応力の合成されたものが計測されるはずである。しかし転落1回転以内ではROPSの前後方向の変形は無視できるほど小さい（ROPSはほぼ真横におかれている）から、振り応力は無視して考える。次に真の外力は図8.5に示したようにROPSの斜め上方から作用すると考えた場合、部材に発生する曲げ応力の引張側応力は、外力の垂直成分による圧縮応力分だけ小さく計測される可能性がある。しかし支柱材

料の断面積は、圧縮に対しては十分に大きく、仮に車両の全重量を2本の支柱で垂直に支えたと考えた場合（この場合が圧縮応力が最大となる）にでも、圧縮応力は $3 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$ 程度であり、一方部材に発生する引張応力は $20 \sim 35 \text{ kg/mm}^2$ のオーダーで計測されていることから、転落実験の際に部材に発生する応力は、真の外力の水平分力による曲げ応力がほとんどであると考えられる。実験結果を示す図8.7～8.9によれば、最大主応力と最大剪断応力の比は約2:1であり、最大主応力の方向が $\pm 8^\circ$ 程度であることから、単純曲げに近い状態であることが推定される。

以上の検討により、転落実験時にROPSに発生する応力を計測し、これと静的試験時にROPSに発生する応力を比較することにより、静的試験の側方荷重に相互する外力（真の外力の水平方向分力）を推定することが可能であると考えられる。

㊦ 変形量による推定

転落実験後のROPSの永久変形量より、外力の大きさを推定する。ROPSの変形については8.3（ROPSの変形）で考察するが、1回転々落後のROPS頂部の永久変形量はNTK6で約7.5mm、BD17で約16mm（以上4支柱の平均値）、WS20では約21mm（A、B支柱平均）および約48mm（C、D支柱平均）であった（図8.15～8.17および付表13～15参照）。

一方、静的な側方載荷試験における荷重～変形量の関係を図8.10～8.12に示す（付表1～3参照）。但し、BD17については、試験装置の故障により荷重14.4tonで一旦除荷し、再負荷している。

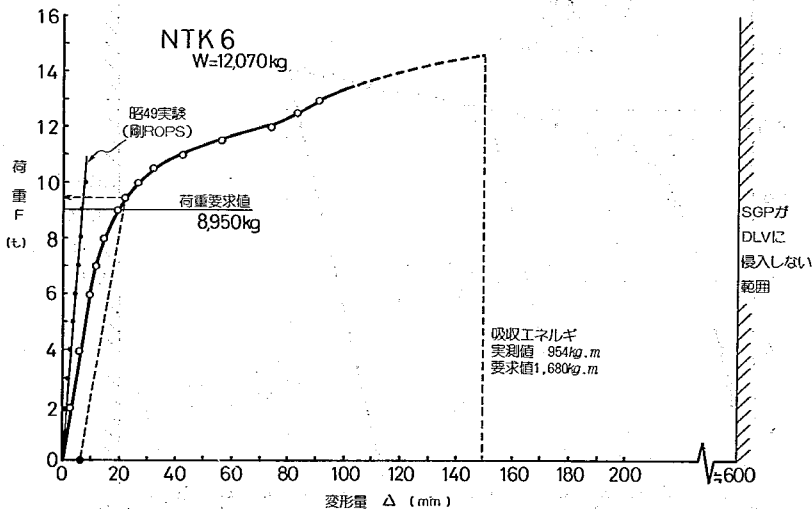


図8.10 静的試験結果を利用した外力の推定（NTK6）

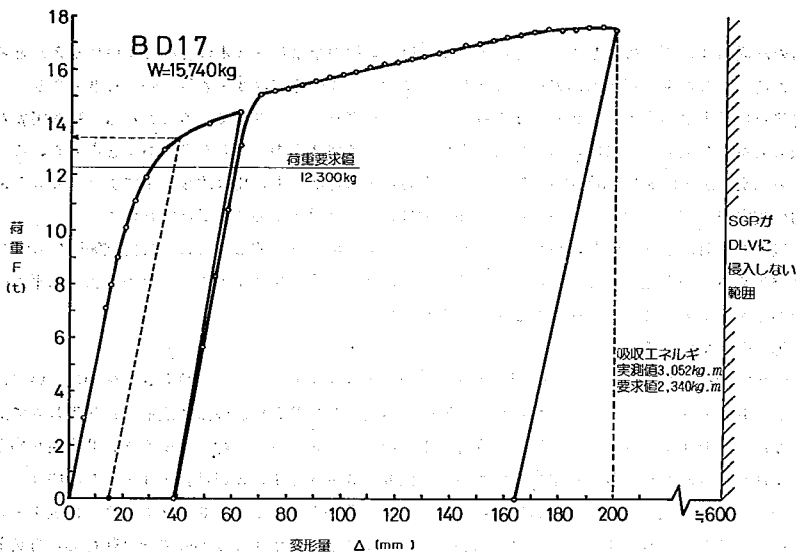


図 8.1.1 静的試験結果を利用した外力の推定 (BD17)

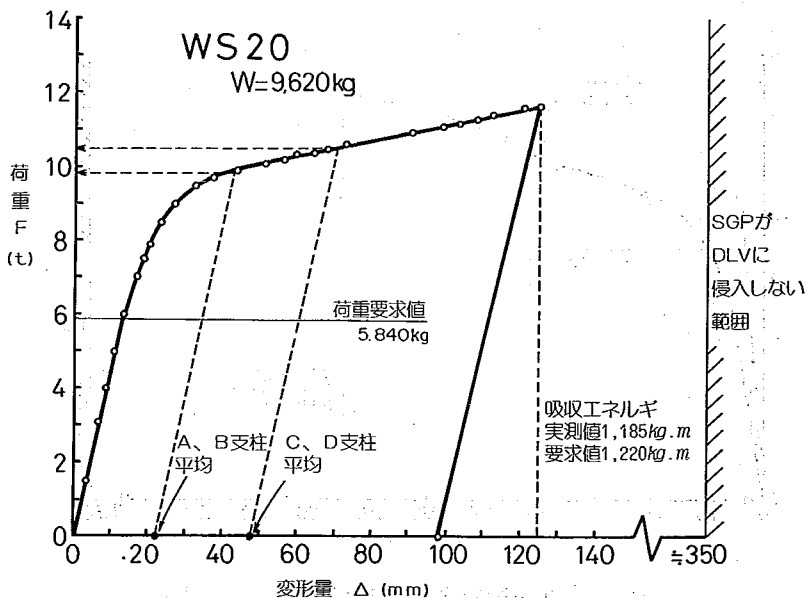


図 8.1.2 静的試験結果を利用した外力の推定 (WS20)

転落実験後の永久変形量の計測結果を図8.10～8.12に代入して静荷重と等価な荷重を求める。ここで転落実験後に計測される変形量は塑性変形分（永久変形）のみであるが、転落途中においてはこれに弾性変形分が加わっているはずである。このことは、図8.11～8.12に示した如く静的試験の途中で除荷すると弾性変形に相当する変形量が回復することから理解できる。従って変形量から荷重を求める際には、弾性変形分を差し引いて考える必要がある。このようにして荷重を求めると、NTK6は約9.5 ton、BD17は約13.5 ton、WS20は約9.8～10.5 tonとなり、先に荷重～応力の関係より求めた結果とほぼ等しい値が得られた。

8.2.3 ISO3471の検討

ISO3471によれば、ROPSの性能は静的試験でのみ評価される（付録1～2参照）。静的試験の方法は、5.（静的試験方法）または付録1に記した通りである。ROPSの可否はこの静的試験の結果より次の点で評価される。即ち、

- (1) ROPSは、ROPSの変形によって、ROPSのいかなる部分もたわみ限界領域(DLV)に侵入してはならないし、また仮想地面(SGP)がDLVに侵入してはならない。
- (2) 側方負荷時の荷重およびエネルギーは、ある値（車両重量の関数で示される。付録1～2参照）以上でなければならない。
- (3) 側方負荷を除去した後、車両重量に相当する垂直荷重に耐えられなくてはならない。

(1)は、車両の転落によるROPSの変形によって、ROPS部材がオペレータに当たらないこと、また車両の転落中に地面がオペレータに当たらないことを保証するもので当然のことである。また(3)についても、既に P_1 点において変形してしまったROPSが倒立状態の車両重量を支え得ることを保証するもので、転落が「斜面との接触を失うことなく」行なわれる限り妥当な考え方である。

問題は(2)の側方負荷の荷重の大きさと荷重の方向にあるだろう。無論、実際の転落事故のケースは千差万別であり、静的試験で全てのケースを再現することは不可能に近い。しかし、ROPSの目的を「最大傾斜30°の斜面の上を、斜面との接触を失うことなく、車両の縦軸回りに360°転倒する」場合に、シートベルトを着けたオペレータが押しつぶれる可能性を減少させること、と限定した場合には、自ずから荷重の方向は定まる。

ISO3471によれば側方負荷の荷重の方向は、ROPSに対して真横から水平に負荷することになっている。今回の転落実験によれば、「車両の縦軸回り」即ち真横に転落させた場合、外力はROPSに対してほぼ真横から作用することが確認された。ただし、車両の水平方向に関しては図8.5に示した如くある角度をもっていることが推定される。しかし、ROPSの変形は、8.2.2（外力の大きさ）で考察した如く、その大部分が外力の水平分力による曲げモーメントによるものであることから、水平方向からの負荷で代用してよいものと考えられる。

次に、側方負荷の荷重の大きさ（および吸収エネルギー）は、車両重量の関数で示される。ISO3471で規定する荷重およびエネルギーと、今回の実験で推定された外力およびエネルギーを比較すると図8.13～8.14に示す如くなる。履帯式ブルドーザの荷重について比較すると、実験値は

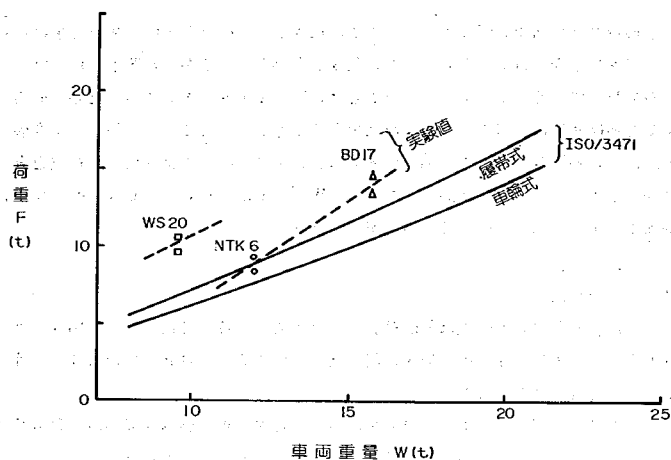


図 8.1.3 車両重量と側方荷重の関係

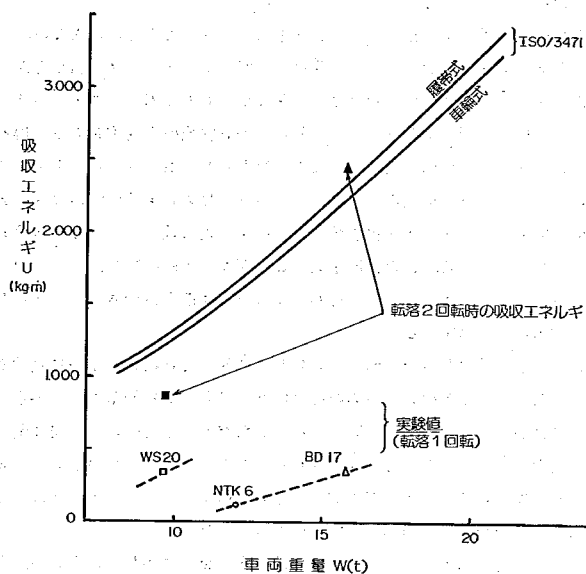


図 8.1.4 車両重量と吸収エネルギーの関係

ISOの値と同じかやゝ大きく目である。図8.13で見る限りISOの値は車両重量の低い範囲内ではほぼ妥当なものと云えよう。しかし今回の実験値は、真の外力の水平分力に相当する力であり、転落の状況によっては真の外力が水平方向から直接作用することも考えられる。その意味ではISOの値は車両重量が大きくなるとやゝ危険側になる可能性があると云える。車輪式トラクタショベルの荷重の実験値は、ISOの値に比較してひじょうに大きな値が推定された。この原因として考えられることは、WS20のROPSの平面形が後方が開いた台形をしている為(図4.2参照)、転落の際まずC支柱1本のみが接地し、ついでB支柱が接地することがあげられる。転落後の変形の観察によれば、WS20のROPSは全体に「振り」の影響を受けているが、今回の実験では1支柱に1枚の歪ゲージしか貼っていないので「振り」の影響がどの程度かを求めることはできなかった。

8.3 ROPSの変形

ISO3471によれば、ROPSは、軟かい地面に衝突した場合には斜面に貫入することにより車両の回転を制動する働きをし、また硬い地面に衝突した場合にはROPSが変形することにより車両の回転のエネルギーを吸収し、引続いて起る衝撃に対して耐え得ることを期待している。

図8.15～8.17は、1回転々落後、2回転々落後および静的試験終了後の永久変形量の計測結果を示したものである(付表13～15、付表16～17、付表8～10参照)。いずれの試験においても、ROPSの部材がたわみ限界領域(DLV)に侵入することなく、また仮想地面(SGP)がDLVに侵入することもなかった。

全体的なROPSの変形を観察すると、転落1回転以内ではほぼ真横に変形し、前後方向の変形は小さい。但しWS20の場合は、ROPSの平面形が後方が開いた台形をしているため「振り」の影響がみられる。転落2回転目では、車両は必ずしも真横には転がらないので(写真8.4～8.5参照)、前後方向の変形もでてくる。写真8.6～8.7に2回転々落後の状況を示す。

変形後の支柱の形状を観察すると、いずれの場合も支柱下部のウェブで補強した部分の頂部、またはやゝその上が変形しており、この部分の塗装には写真8.8に示すように剪断応力の方向と思われる上に凸な山形の模様を表われているものもある。次に、支柱下部ウェブ補強部の上端附近から上部ウェブ補強部の下端附近までの中間部分は、ほとんど変形がなくて直線形状を保っている。また上部ウェブ補強部は十分な補強がなされている為、試験後(転落後)も元の形を保っている。

変形の観察結果から、ROPSは全体としては大きな永久変形をするものの、部材の全てにわたって塑性変形を起こすのではなく、曲げモーメントが最大となる下部ウェブ上端部附近のみが塑性変形を起こすことを暗示している。

次に、ROPSの変形による吸収エネルギーについて考察する。ROPSによる吸収エネルギーは、静的試験結果を示す図8.10～8.12の荷重～変形量線図と変形量の軸で囲まれる面積で示される。今回の実験に使用したROPSは、この結果からも明らかなように、ある荷重に対して破壊することなく変形する十分な能力がある。

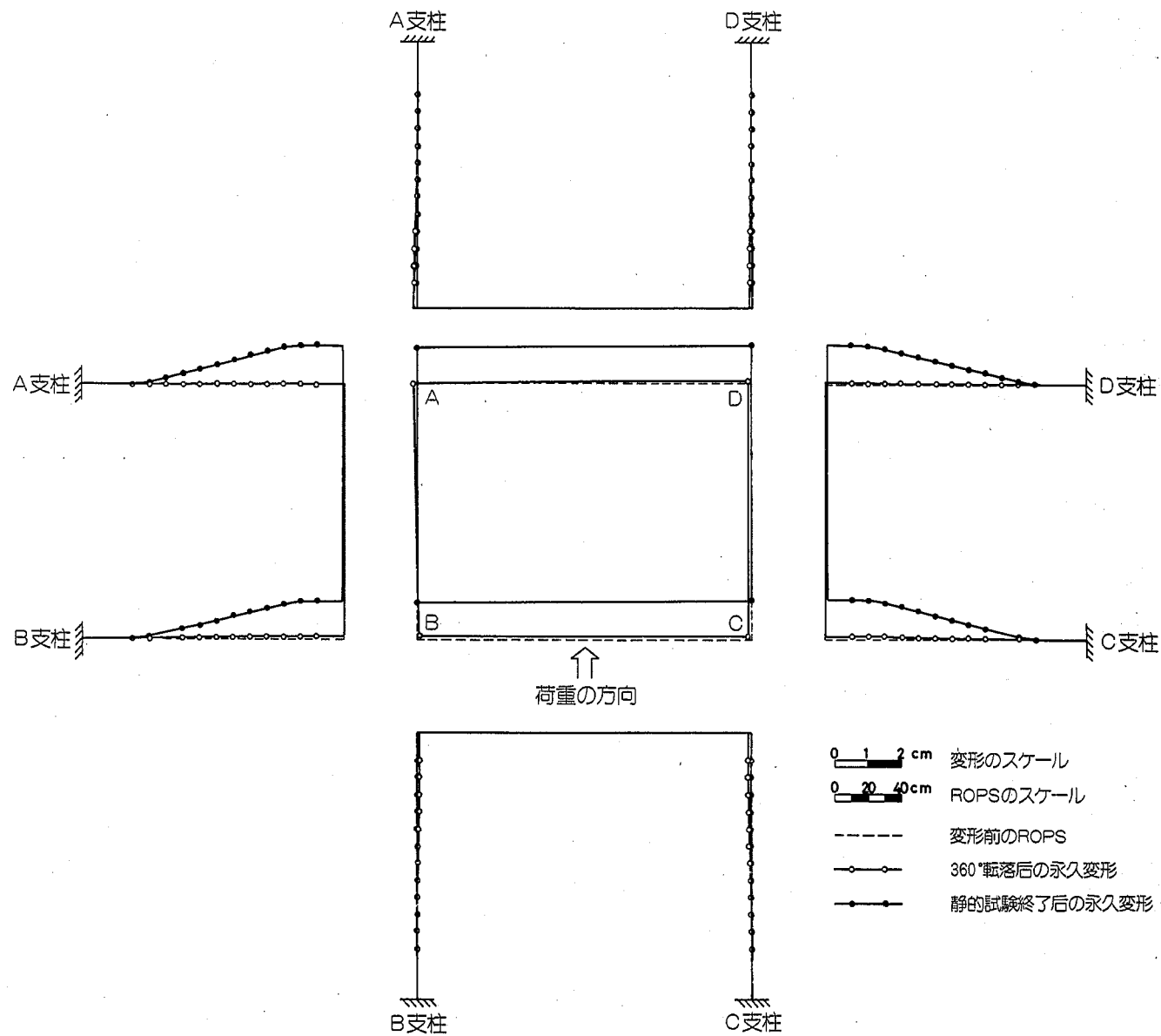


図 8.15 ROPS の変形 (NTK 6)

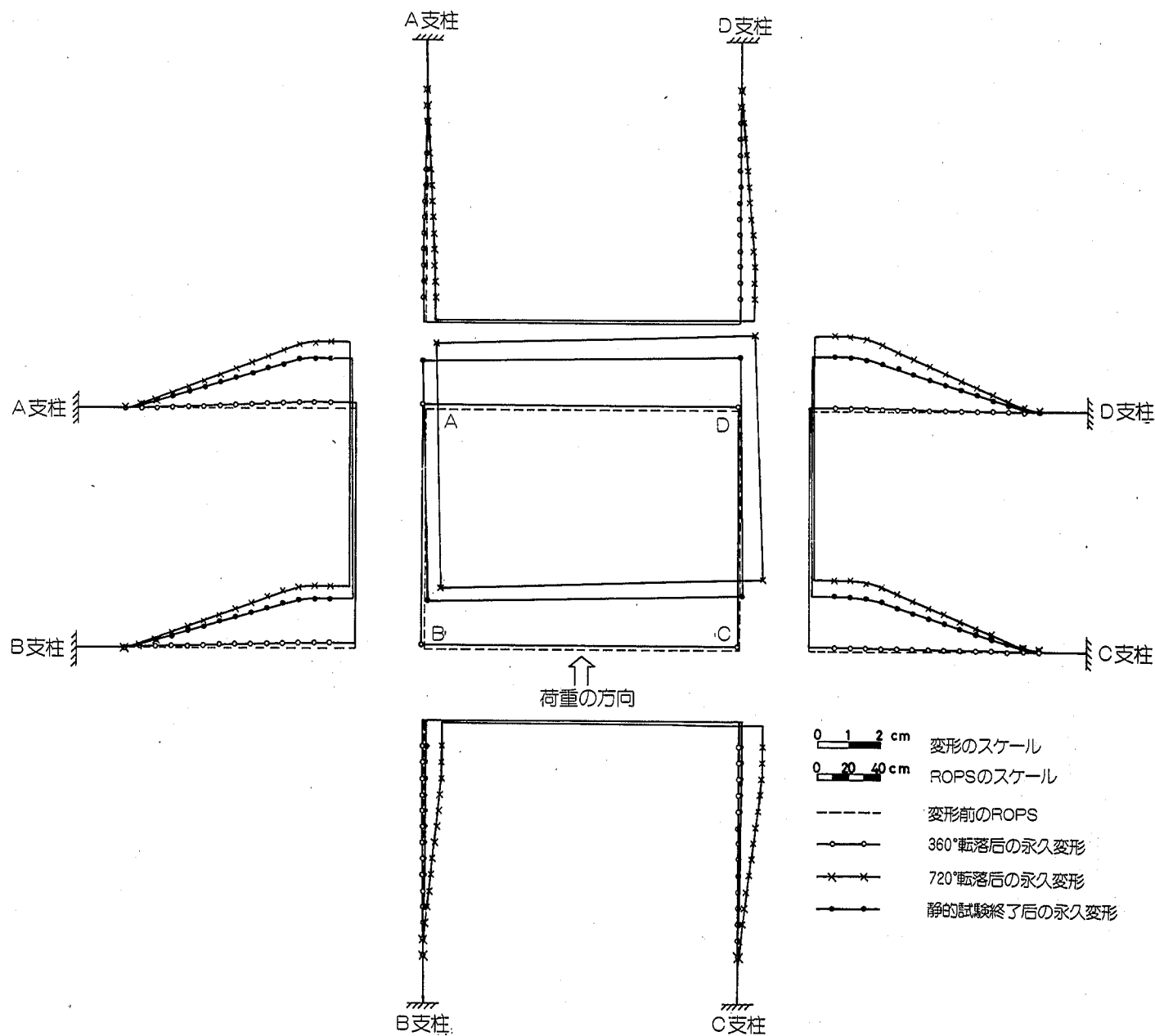


図 8.16 ROPS の変形 (BD17)

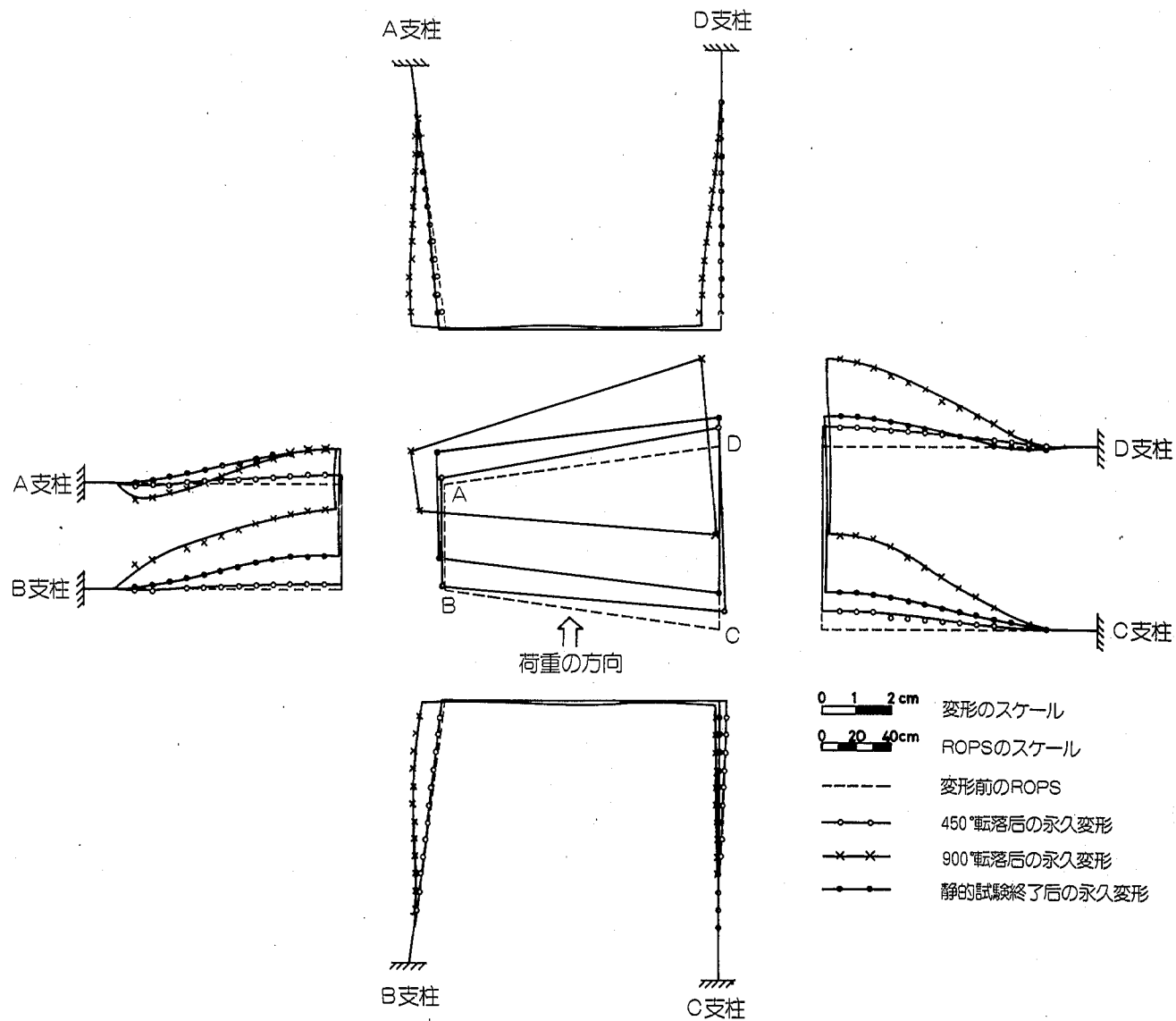


図 8.17 ROPS の変形 (WS20)

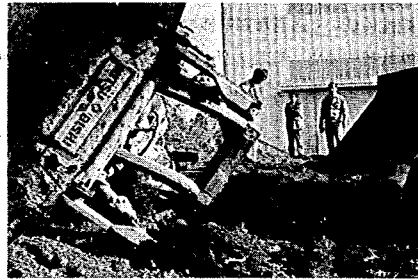


写真8.6 720°転落後の変形状況 (BD17) 写真8.7 900°転落後の変形状況 (WS20)

一方、一回転々落後の変形量は図8.15～8.17に示した如くひじょうに小さく、この変形量の計測結果を図8.10～8.12に代入して、R.O.P.Sの変形による吸収エネルギーを推定するとNTK6で約120 $kg \cdot m$ 、BD17で約370 $kg \cdot m$ 、WS20で約450 $kg \cdot m$ となり、この値はISO3471で規定する吸収エネルギーに対する要求値よりかなり小さい(図8.14参照)。この原因は、転落実験場斜面が盛土で造成されているため十分硬くはなく、 P_1 点においてR.O.P.Sは写真8.9に示すように斜面に貫入し、地面が圧縮されることによりエネルギーを吸収しているためである。土の圧縮に要したエネルギーは、地面の物理的性質の計測を行なっていないので不明である。



写真8.8 変形後の支柱基部の状況

2回転々落後の変形状況からR.O.P.Sの吸収したエネルギーを推定すると、BD17では約



写真8.9 R.O.P.Sの斜面への貫入跡

2,440 $kg \cdot m$ 、WS20では約880 $kg \cdot m$ となり、ISOの要求値とほぼ同じになる。即ち今回の実験に使用したR.O.P.Sは、エネルギーの吸収能力にはまだ余力があることになる。しかしR.O.P.Sの変形により転落時に制動作用がなされたか、あるいは転落の衝撃が緩和されたか、については、明確な判断はできなかった。剛性の高い(ほとんど変形しない)R.O.P.SをつけたNTK6の転落実験(昭和49年度実施)と、

剛性の低い(適当な弾塑性変形をする)ROPSをつけたNTK6の今年度の転落実験を図8.6により比較すると、剛性の低い今年度の実験の方が、回転に要する時間がやゝ長い、即ち回転に制動作用が働いたと考えられるが、その差は有意なほど大きなものではない。

8.4 静的試験結果と計算結果の比較

8.4.1 荷重と応力

静的試験において、前述の如く側方負荷時の荷重と、B支柱、C支柱の特定の位置(歪ゲージの貼付位置は図4.1～4.2参照)に発生する応力の関係を求めた。これと7(計算によるROPSの解析)に述べた有限要素法(MARC)による計算結果を比較したものを図8.7～8.8に示す。

実験で求められた最大主応力(σ_n)と最大剪断応力(τ_{max})の比は約2:1であり、最大主応力の方向(θ)が $\pm 8^\circ$ 程度(付表4～7および付表11参照)であることから、単純曲げに近い状態であると思われる。

実験値と有限要素法による計算値を比較すると、NTK6(図8.7)の場合、B支柱の実験値と計算値がよく一致しており、C支柱の実験値は当初から低くでていることから、歪ゲージの貼付に不備があったのかも知れない。BD17(図8.8)の場合、計算値はB支柱、C支柱の実験値のほぼ中間である。WS20については有限要素法による解析は行なわなかった。

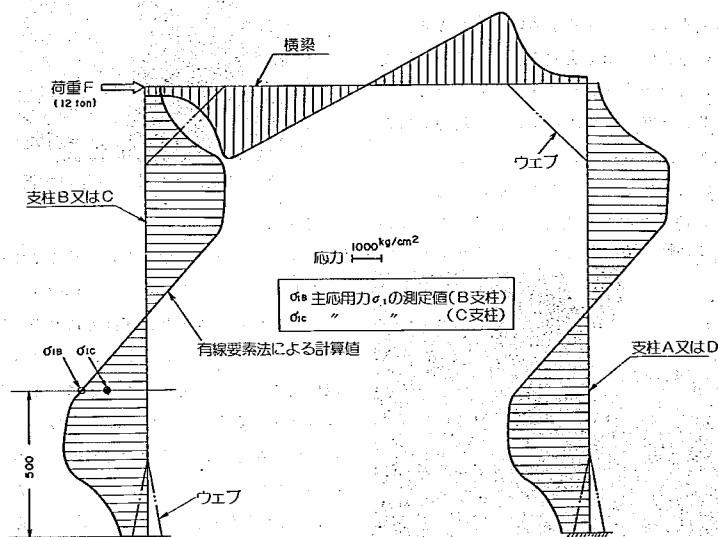


図8.18 有限要素法による応力計算値と実測値との比較(NTK6)

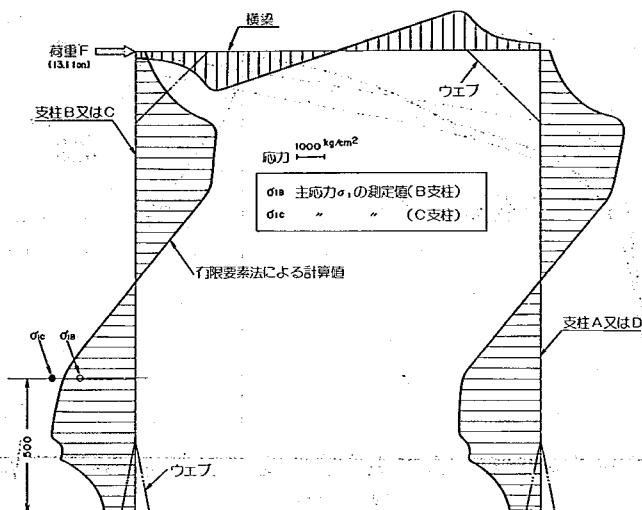


図 8.19 有限要素法による応力計算値と実測値との比較 (BD17)

荷重と応力の関係は、弾性範囲内では理論的には一次の比例関係にある。しかし、実測値によると部材の一部が降伏し始めると非線形となった。この理由としては、部材の一部が降伏すると変形が大きくなり、ROPSの曲げモーメント分布が当初と異なってくること、更に変形が大きくなると支柱部材の圧縮側はウェブにおされて、断面形状に変化がおこること等があげられる。

次に、有限要素法により、転落実験時に作用する外力とほぼ等しい荷重をかけた時のROPS部材の応力分布を求めると、図8.18～図8.19の如くなる。これと実測値を比較するとほぼ一致している。図8.18～図8.19によれば、応力の最大値はウェブ補強部の頂部に発生し、歪ゲージを貼った位置での応力より20～30%増加するものと思われる。また、ウェブの存在は応力分布に大きな影響を及ぼしており、その影響範囲はウェブ長さの約2倍程度と推定される。このことは、実際のROPSを設計するに当たり、ウェブの形状、工作法等に十分の注意を払う必要があることを示している。

8.4.2 荷重と変形

静的試験における荷重～変形量の関係を図8.20～8.22に示した。図には7.(計算によるROPSの解析)に述べた有限要素法(MARC)による計算結果と、門形ラーメン近似による計算結果を併せて記入した。

実測値と計算値を比較すると、材料の弾性変形範囲内では両者の結果はよく一致している。しか

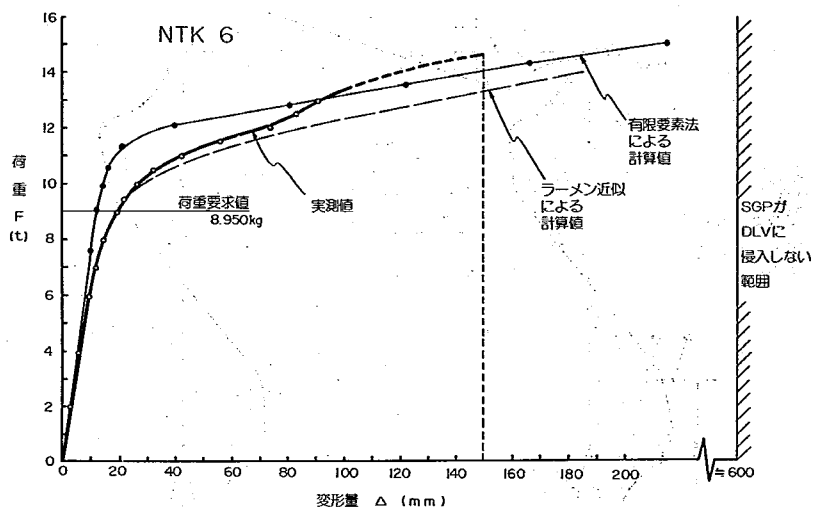


図 8.20 静的試験結果と計算値の比較 (NTK 6)

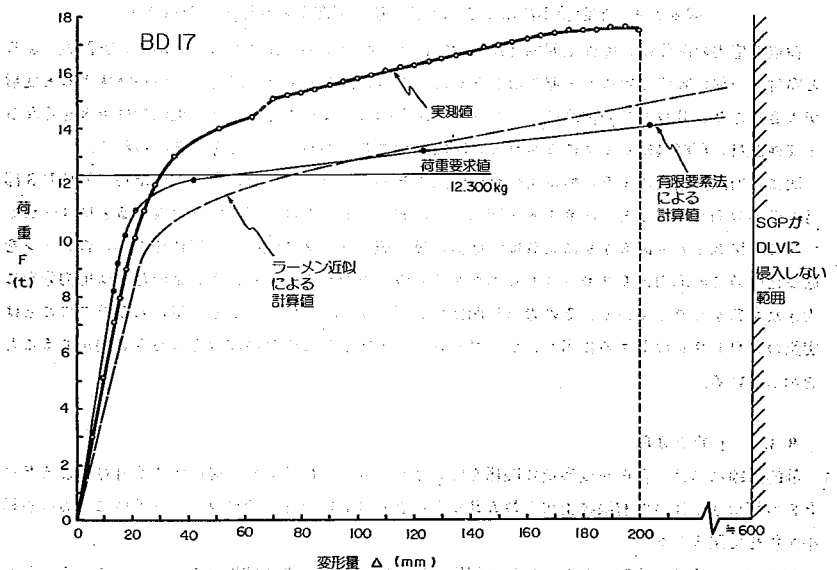


図 8.21 静的試験結果と計算値の比較 (BD 17)

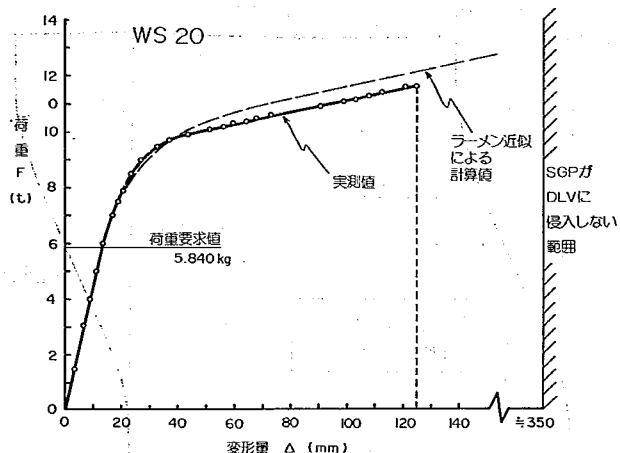


図 8.2.2 静的試験結果と計算値の比較 (WS 20)

し部材の一部が降伏し始める頃より両者の結果に差が出てくる。この理由として次のことが考えられる。

i) 解析モデルの材料の諸係数(弾性係数, 塑性係数, 降伏応力, ポアソン比等)は図 7.2 の如く仮定したが, これらの値は材料試験によって求めたものではなく, 一般的な値として JIS 等を参照に仮定したもので, 試験に使用した ROPS 材料の諸数値と異なっている。

ii) 解析モデルのウェブ補強部の構造は, 実物 ROPS のウェブ補強部の構造とは異なっている。塑性変形はウェブ補強部のすぐ上の部分に起るから, この部分の変形量の微小な差は ROPS 頂部での変形量に大きな差となって現われてくる。

次に NTK6 と BD17 について, ある荷重(転落実験で推定された外力とほぼ同じ荷重)の時の ROPS の計算値による変形の形状について図 8.2.3 ~ 8.2.4 に示す。前述した如く変形量の絶対値には差があるが, 変形の形状は実物 ROPS のものとよく合致している(図 8.1.5 ~ 8.1.7 参照)。

8.4.3 吸収エネルギー

ROPS の変形による吸収エネルギーは, 図 8.2.0 ~ 8.2.2 に示す荷重~変形量線図と変形量の軸で囲まれた面積で表される。従って荷重~変形量線図の実測値と計算値の差は, そのまま吸収エネルギーの値に影響がある。実測値が ISO 3471 に規定する吸収エネルギーを満足した時点での実測値と計算値を比較すると, NTK6 および WS 20 では両者はほぼ一致し, BD17 では約 17 %

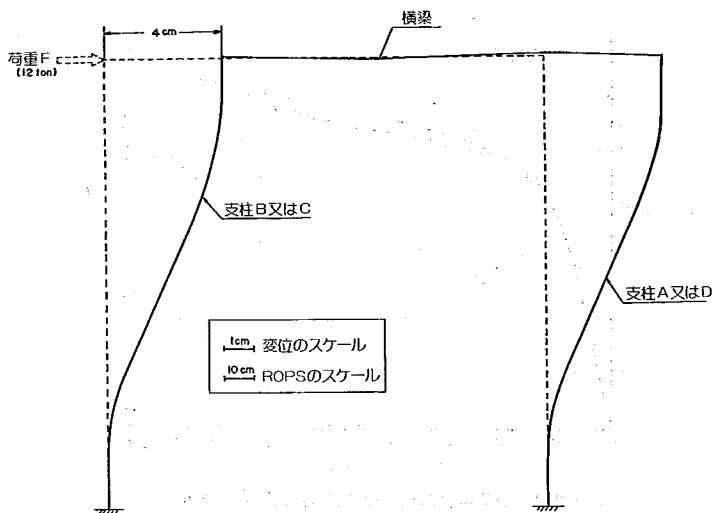


図 8.2.3 ROPSの変形(有限要素法)(NTK6)

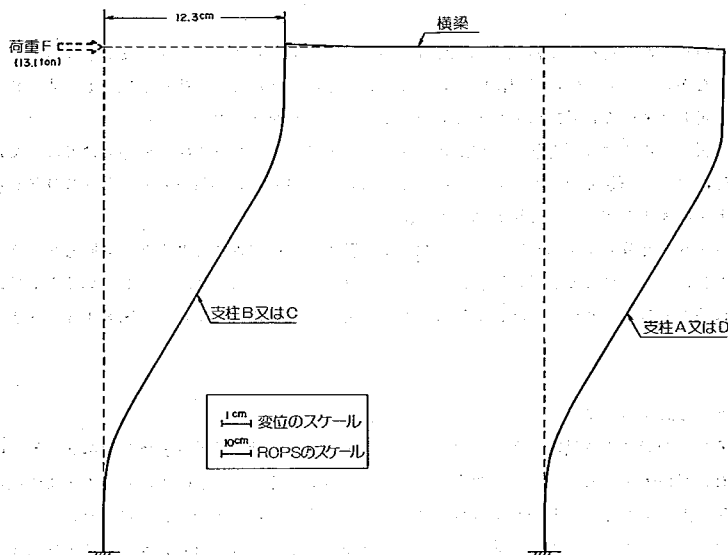


図 8.2.4 ROPSの変形(有限要素法)(BD17)

程計算値の方が低いが、実用的には計算により静的試験の推定を行なうのには十分利用が可能であると言える。

ROPSの変形量の限界を示すものは、8.2.3項に記したとおりであるが、今回の実験の場合はいずれも変形量の限界までには余裕を残して吸収エネルギーを満足している。この意味では、今回のROPSは吸収エネルギーよりも強度に重点をおいた設計とすることができるが、もし変形が図8.2.5に示すように起るとするならば、支柱材料の伸びは平均して17%にもなり、実際にはウェブ補強部附近ではもっと大きな伸びを示すであろうから、材料の伸びの限度を超えて破断すると考えられる。従ってROPSの変形量の限界に余裕があるからと云って、吸収エネルギーをかせぐ為に変形量をむやみに大きくすることは当然のことながら危険である。

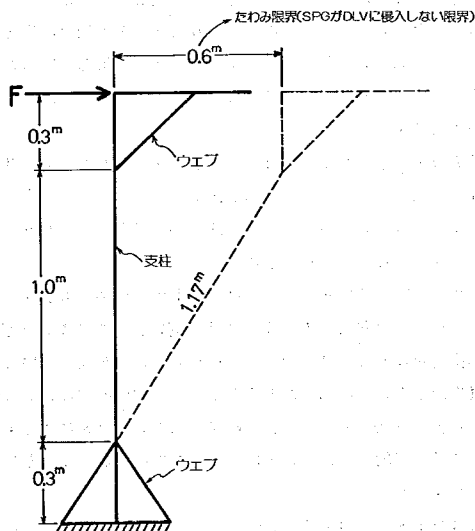


図8.2.5 ROPSがたわみ限界まで変形した時の変形模様

9. 結 論

昭和49～50年度にわたる調査により、ROPSを装着した車両の転落時の挙動が観測でき、転落時のROPSについて以下の事項が判明した。

(1) 転落時にROPSに作用する外力の方向は、加速度計と高速度写真撮影により求めた。この結果、ROPSと斜面が接地する瞬間の外力の方向は、横梁に対してほぼ水平である。外力はROPS接地約 $1/10$ sec後に最大となるものと推察されるが、このときの作用の方向は横梁に対して約 $25^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 上方となる。

(2) 転落時にROPSに作用する外力の大きさは、静的試験における荷重～部材の歪(応力)と荷重～変形量の関係を校正曲線とし、転落時の部材の歪(応力)と転落後の永久変形量を計測しこれを前記校正曲線にあてはめて、外力の大きさを推定した。したがってここで推定された外力は真の外力そのものではなく、静的試験時に負荷された荷重と等価な荷重を外力とするものである。かつ、真の外力は前述の如くROPSに対してある角度で作用していると考えられるが、静的試験の荷重はROPSに対して水平に作用しているので、ここで推定される外力は、真の外力の水平分力に相当するものである。

推定された外力の大きさの水平分力はNTK6で $8.7 \sim 9.5$ ton、BD17で $13.5 \sim 14.5$ ton、WS20では $9.8 \sim 10.5$ tonであった。

なお昭和49年度のNTK6の実験によれば9 tonが得られており、今年度の実験結果とよく一致し、実験に再現性があることが確認された。

なお荷重が作用している時にROPS部材に発生する応力を解析すると、主応力(σ_n)が最大せん断応力(τ_{max})のほぼ2倍であり、単純曲げに近い状態であると推定される。また、一般にROPSの構造は垂直荷重に対しては十分な強度を有しているが曲げに対しては弱いものとなっている。仮に外力が垂直方向からのみ作用したと考えた時の部材の応力は、実験時に発生した部材の応力の10多程度でしかない。したがって、外力は前述の如くROPSに対してある角度をもって作用していると推定されるが、静的試験においてはISO規格に規定するように水平方向からの荷重で代用してよいものと考えられる。

(3) 転落時にROPSに作用する外力の大きさと車両重量の関係は、車両重量が増加するにしたがって増加することが予想される。履带式ブルドーザNTK6(12t級)とBD17(17t級)の実験では当然このことが確認されたが、両者の関係を函数化するまでには至らなかった。

実験で推定された外力とISO規格による載荷荷重を比較すると、実験値はISO規格とほぼ同じかやや大きめとなる。実験の範囲内ではISO規格は車両重量の低い範囲内でほぼ妥当なものと云えるが、車両重量が大きくなるとやや危険側になる可能性がある。

(4) 転落時にROPSに作用する外力と機種との関係は、車両重量の変化によるほか、走行装置が履带式か車輪式によっても異なるものと予想される。車輪式トラクタショベルWS20の実験では、推定された外力がISO規格よりかなり大きな値を示した。これはROPSの平面形状が後方が開

いた台形をしているため、斜面との接地時にまず1本の支柱のみが接地し、ROPSは振り変形を起したためと考えられる(履帯式ブルドーザの場合は2本の支柱がほとんど同時に接地する)。今回の調査では振り応力の影響について解析するには至らなかった。

(5) 有限要素法による数値計算およびラーメン近似による計算値は、ほど実用に耐える範囲内で静的試験結果と一致した。従ってこれらの計算方法は実用ROPSの設計に用い得るものと判断される。ただしいずれの方法にしろ、材料の降伏点、塑性係数等材料の諸係数の選び方により塑性領域での荷重～変形量曲線の傾斜や降伏の始まる点が異なってくるので、計算に当っては材料試験等により材料の諸係数を十分把握しておく必要がある。また、ROPSは全体としては塑性変形を起こすものの、必ずしも部材の全体にわたって塑性変形しているものではなく、実験(および計算値)によれば下部ウェブ補強部の付近で塑性変形を起こしている。今回使用した有限要素法の電算プログラムはウェブの形状をそのまま入力することが出来ず、またラーメン近似計算においてはウェブは変形しないものとして計算しており、これが実験値との僅かな差となって表われているものと考えられる。ウェブの影響については、計算時のみならず、ROPSの工作に当たっても十分な注意をはらう必要があるものと思われる。

(6) ROPSの吸収エネルギーについては、実験に用いたROPSはいずれもISO規格のエネルギー値を満足したが、斜面に衝突した時の車両のエネルギーがROPS側と斜面側でどのような割合で吸収されたのか不明であり、理論的にROPSがどれほどのエネルギーを吸収すればよいかについての結論を得るには至らなかった。

10. 付 録

付録 1	ISO/3471 (抜粋, 抄訳)
付録 2	ISO/3164 (抜粋, 抄訳)
付表 1	NTK 6 静的試験 (荷重～変形量)
付表 2	BD 17 " (")
付表 3	WS 20 " (")
付表 4	NTK 6 " (ROPS 支柱に発生する応力)
付表 5	NTK 6 " (" , 昭 49 実験分)
付表 6	BD 17 " (ROPS 支柱に発生する応力)
付表 7	WS 20 " (")
付表 8	NTK 6 " (静的試験後の永久変形量)
付表 9	BD 17 " (")
付表 10	WS 20 " (")
付表 11	転落実験 (ROPS 支柱に発生する応力)
付表 12	転落実験 (ダミー頭部および ROPS の加速度)
付表 13	NTK 6 転落実験 (360° 転落後の永久変形量)
付表 14	BD 17 " (360° ")
付表 15	WS 20 " (450° ")
付表 16	BD 17 " (720° ")
付表 17	WS 20 " (900° ")

付録 1 ISO/3471 土工機械 — 転倒時運転者保護構造 — 実験室試験および性能要求
(建設機械規格制限カルテル, 運営委員会トラクタ分科会, 翻訳昭和 50 年 6 月より抜粋, 抄訳)

1. 範 囲

この国際規格は、転倒時運転者保護構造 (Roll-Over Protective Structures 以下 ROPS) の構造特性を測定する静的実験室試験および性能に対する要求について規定する。ROPS は車両が万一転倒した場合に、シートベルトをつけた運転者が押しつぶれる可能性を減少させることを第一の目的とした構造である。

静的実験室試験は、時速 0 ～ 16 km/h の車両が硬い粘土状地表を、最大 30 度の傾斜地で 360 度転倒し、指定されたたわみ限界領域 (Deflection Limiting Volume 以下 DLV) に侵入しないよう、運転者を保護する構造特性を試験する手段である。

この国際規格は、静負荷時の ROPS の荷重～たわみ特性を評価する、安定したしかも反復可能な方法を確立し、かつ前述の荷重条件においてこの構造に対する性能要求を規定するものである。

2. 適用分野

車輪式トラクタショベルおよび車輪式ブルドーザ、車輪式モータグレーダ、車輪式プライムムーバ、履帯式トラクタショベルおよび履帯式ブルドーザ

3. 5. 省 略

6. 一 般

以下の諸点は、この国際規格の基礎となる原則、考え方および適用を理解する助けとするためのものである。

(1) この評価方法は、必ずしも実際の転倒による構造変形そのままを再現するものではない。

(2) この評価方法は、一般に ROPS と車両のアッセンブリに対して破壊試験となる。というのは、その一方または双方に対して永久変形を起すことが多いからである。

(3) この規格に適合した ROPS は車両のあらゆる転倒事故において運転者を保護できるという事はないかもしれないが、少なくとも以下の条件で運転者を保護することが期待できる：前進初速度 $0 \sim 1.6 \text{ km/h}$ で、最大傾斜 30° の硬い粘土状地表の上を、斜面との接触を失うことなく、車両の縦軸廻りに 360° 転倒する。

(4) 水平荷重要求とそれに対するたわみの制限 (DLV) は、ROPS が凍っていない土に貫入することにより車両の転倒に対して制動作用を行なうことを保証しようとするものである。

(5) エネルギー要求とそれに対するたわみの制限 (DLV) は、大きく変形しない地表 (凍土、コンクリート、岩盤) を ROPS が打撃した時に、たわむことにより、引きつづいて起こる衝撃に対しても有効に耐える能力を保証しようとするものである。

(6) 垂直荷重要求は、車両がさかさまになった時に、すでに変形した ROPS が車両を支えることを保証しようとするものである。

(7) 荷重およびエネルギー要求値は最小値である。これらの要求値を同時に達成する必要はないし、またそういうことはきわめて希である。したがって、水平負荷試験が終了するまでにどちらかの最小値を超えるであろう。たわみ限界がたわみ量の最大値であり、荷重またはエネルギー最大値を満たすためにこの限界値を超えてはならない。

(8) 実際の転倒は動的 (多分、衝撃的) であるため、弾性変形に基づく“安全率”は適用できない。ROPS の安全率はエネルギー吸収能力、溶接設計および溶接手順に関係しており、静的強度または永久変形の防止にはほとんど関係していない。

7. 静的実験室試験

7.1 ~ 7.2 設備、計測器

ROPS ~ 車両フレームアッセンブリをベットプレートに固定し、水平および垂直荷重をかける設備を用意する。

試験装置には ROPS にかけられる荷重とそのときのたわみ (変形) を計測する計測器が備えられなければならない。計測器の精度は、測定最大荷重および測定最大たわみの $\pm 5\%$ 。

7.3 ~ 7.4 省 略

7.5 試験方法

7.5.1 一般

試験は側方負荷、垂直負荷の順序で行なう。試験の間に、ROPS～車両アッセンブリのいかなる部材に対しても修理または曲り直しをしてはならない。

7.5.2 側方負荷

(1) 荷重～たわみ特性は、ROPS頂部の縦方向主要部材に側方負荷を掛けることによって決定される。三柱式以上のROPSの負荷は、前柱と後柱間の水平距離(L)の80%以下の長さで、負荷分布装置を介して掛けなければならない。(付録1図1参照)

(2) 二柱式のROPSの負荷は、後部主要部材から $\frac{L}{3}$ の距離で頂部縦方向部材に掛けなければならない。(付録1図1参照)

(3) 負荷の最初の方法は、車両の縦中心線を通る垂直面に対して直角で、水平な方向でなければならない。

(4) 負荷が継続されると、ROPS～車両フレームの変形が負荷方向を変えることがあるがこれは許容される。

(5) 運転席が車両の縦中心線からはずれている場合は、運転席に最も近い側の最外側に負荷しなければならない。

(6) 運転席が車両の縦中心線にある場合で、左側と右側との負荷で違った荷重～たわみ関係になるようにROPSが装着されている場合は、側方負荷はROPS～車両アッセンブリに最も厳しい側にかけなければならない。

(7) 負荷は静的とみなしうるようにつけなければならない。

(8) 負荷の着力点においては25mm以下の間隔でたわみとその荷重が記録されなければならない。

(9) 負荷はROPSが荷重およびエネルギー要求の両方を満たすまで続けなければならない。

(10) エネルギーを計算するのに使われるたわみは、荷重の作用線に沿ったROPSのたわみでなくてはならない。

(11) 負荷装置を支持する部材のたわみは、エネルギーを計算するのに使われるたわみ量の中に加えてはならない。

7.5.3 垂直負荷

(1) 側方負荷を除去した後、ROPSの頂部に垂直負荷をかけなければならない。

(2) この負荷をROPSにかける方法については何ら制限はない。

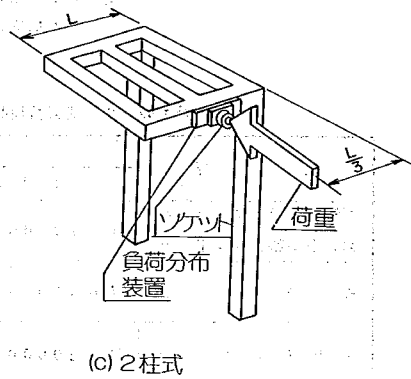
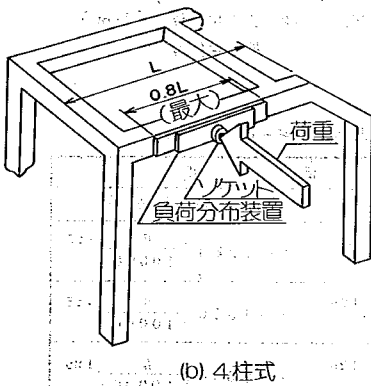
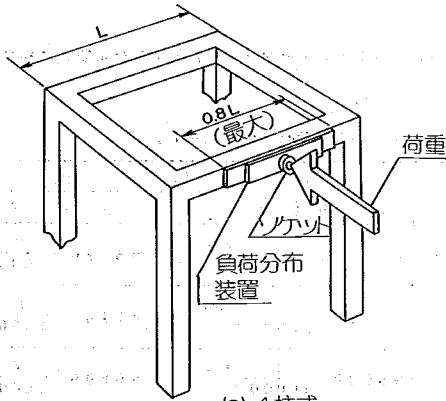
8. 性能要求

8.1 一般

それぞれのテスト期間中ROPSのいかなる部分もDLVに侵入してはならない。またROPSの変形によって仮想地面(Simulated Ground Plane 以下SGP)がDLVに入ってはならない。

8.2 荷重～エネルギー要求および垂直負荷要求

図の装置は代表的な例
であり必ずしもこれに
よらなくともよい。



付録1図1 側方負荷方法

- (1) これらの要求はDLVが許容するたわみ以内で達成されなければならない。
- (2) 側方負荷時の荷重は付録1表-1に示す関係式の要求値以上でなければならない。
- (3) 側方負荷時に吸収されるエネルギーは付録1表-2に示す関係式の要求値以上でなければならない。
- (4) 側方負荷を除去した後、ROPS～車両アセンブリは、最大推せん質量に相当する垂直負荷を支持しなければならない。

付録1表-1 側方負荷時の最小荷重 F, f

機 種	関 係 式	
	S I 単位 (1)	工 業 単位 (2)
車輪式トラクタシヨベル および車輪式ブルドーザ	$F = 60000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.20}$	$f = 6120 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.20}$
モータグレーダ	$F = 70000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.10}$	$f = 7140 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.10}$
ブライムムーバ	$F = 95000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.20}$	$f = 9690 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.20}$
履帯式トラクタシヨベル および履帯式ブルドーザ	$F = 70000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.20}$	$f = 7140 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.20}$

- (1) F : 単位 N (ニュートン) (2) f : 単位 $kg f$ (kg 重)
 M : 単位 kg (質量) W : 単位 kg

付録1表-2 側方負荷時の最小吸収エネルギー U, u

機 種	関 係 式	
	S I 単位 (1)	工 業 単位 (2)
車輪式トラクタシヨベル および車輪式ブルドーザ	$U = 12500 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.25}$	$u = 1280 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.25}$
モータグレーダ	$U = 15000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.25}$	$u = 1530 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.25}$
ブライムムーバ	$U = 20000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.25}$	$u = 2040 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.25}$
履帯式トラクタシヨベル および履帯式ブルドーザ	$U = 13000 \left(\frac{M}{10000} \right)^{1.25}$	$u = 1330 \left(\frac{W}{10000} \right)^{1.25}$

- (1) U : 単位 J (ジュール) (2) u : 単位 $kg f \cdot m$
 M : 単位 kg (質量) W : 単位 kg

付録2 ISO/3164 土工機械 — 転倒時運転者保護構造および落下物保護構造の実験室
評価 — たわみ限界領域（抄訳）

1. 目的

この国際規格は、ISO 3471およびISO 3449に規定されるROPSおよびFOPSの実験室評価に用いるDLV（たわみ限界領域）について規定するものである。DLVの寸法についてはISO 3411に基づく。

2. 適用分野

ISO 3471, ISO 3449

3～4. 省略

5. 精度

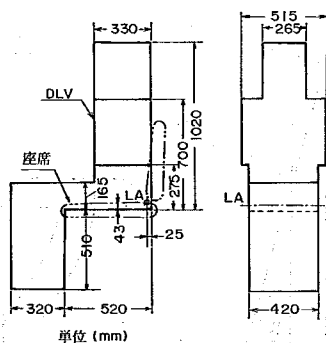
この規格に使用されるすべての長さおよび位置の精度は、 $\pm 1.3\text{ mm}$ 以下。

6. DLVの位置決め

DLVとシートとの関係位置、寸法を付録2図1に示す。

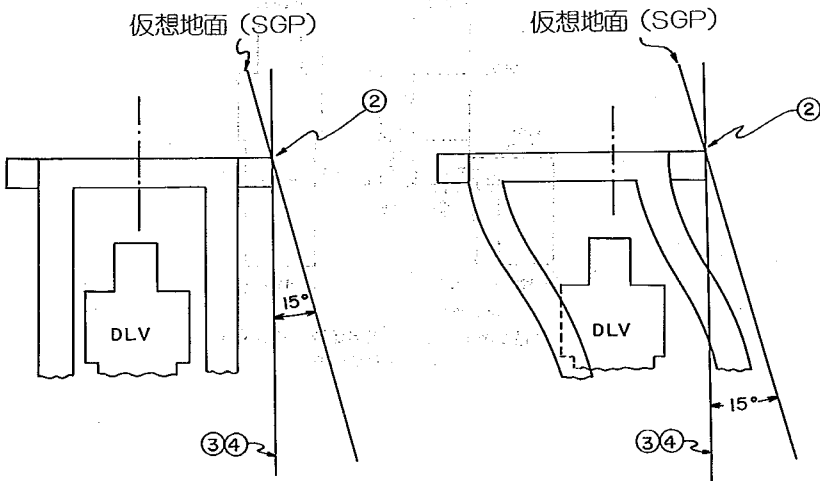
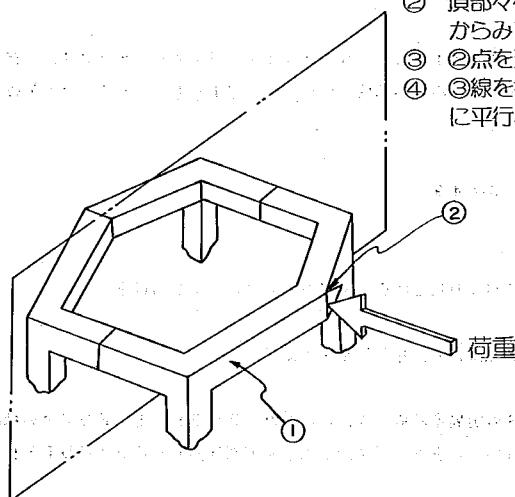
7. 適用

ROPSおよびFOPSの実験室評価の際は、いかなるROPSおよびFOPSの構成部材もDLVに侵入してはならないし、また付録2図2に示す仮想地面（SGP）がDLVに侵入してはならない。



付録2図1 たわみ限界領域（DLV）
の寸法及び位置

- ① 頂部々材
- ② 頂部々材で車両前後方向からみて最外側の点
- ③ ②点を通る垂直線
- ④ ③線を含む車両縦中心線に平行な垂直面



付録 2 図 2 仮想地面 (SGP) の位置

付表1 NTK6 静的試験

(荷重～変形量)

<参考>

NTK6 剛構造(昭49実験)

荷重 F (t)	変形量 Δ (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)	荷重 F (t)	変形量 Δ (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)
0.0	0.0	—	12.5	83.3	867
2.0	2.5	3	13.0	90.1	954
4.0	5.6	16	試験装置のシリンダストローク不足の為、以後測定不能		
6.0	9.5	40			
7.0	11.8	61			
8.0	14.8	86			
9.0	19.5	132			
9.5	22.1	154			
10.0	26.8	210			
10.5	32.3	276			
11.0	42.5	380			
11.5	58.7	569			
12.0	73.9	757			

荷重 F (t)	変形量 Δ (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)
0.0	0.0	—
1.0	0.6	0
2.0	1.3	1
3.0	2.0	3
4.0	2.7	6
5.0	3.5	9
6.0	4.3	14
7.0	5.1	19
8.0	5.9	25
9.0	6.7	32
10.0	7.9	39

付表2 BD17 静的試験

(荷重～変形量)

荷重 F (t)	変形量 Δ (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)	荷重 F (t)	変形量 Δ (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)	荷重 F (t)	変形量 Δ (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)
0.0	0.0	—	8.3	15(+40)	63(+662)	16.5	90(+40)	1188(+662)
3.0	5.5	8	10.8	20(+40)	111(+662)	16.6	95(+40)	1270(+662)
5.1	9.5	24	13.2	25(+40)	171(+662)	16.7	100(+40)	1354(+662)
7.1	13.5	49	15.1	30(+40)	242(+662)	16.9	105(+40)	1438(+662)
8.0	15.5	64	15.2	35(+40)	318(+662)	17.0	110(+40)	1522(+662)
9.0	18.0	85	15.3	40(+40)	394(+662)	17.1	115(+40)	1606(+662)
10.1	21.0	114	15.4	45(+40)	470(+662)	17.2	120(+40)	1692(+662)
11.1	24.0	146	15.6	50(+40)	548(+662)	17.3	125(+40)	1778(+662)
12.0	28.0	192	15.7	55(+40)	626(+662)	17.4	130(+40)	1864(+662)
13.0	34.5	273	15.8	60(+40)	704(+662)	17.5	135(+40)	1952(+662)
14.0	50.5	489	15.9	65(+40)	783(+662)	17.5	140(+40)	2038(+662)
14.4	62.5	662	16.1	70(+40)	863(+662)	17.5	145(+40)	2126(+662)
※0.0	40.0	—	16.2	75(+40)	943(+662)	17.6	150(+40)	2214(+662)
2.9	5(+40)	7(+662)	16.3	80(+40)	1024(+662)	17.6	155(+40)	2302(+662)
5.7	10(+40)	29(+662)	16.4	85(+40)	1106(+662)	17.5	160(+40)	2390(+662)

注 ※印以降は、試験装置故障の為一旦除荷後再負荷した。

付表3 WS20 静 的 試 験

(荷重～変形量)

荷 重 F (t)	変 形 量 d (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)	荷 重 F (t)	変 形 量 d (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)	荷 重 F (t)	変 形 量 d (mm)	吸収エネルギー U (Kg·m)
0.0	0.0	—	9.3	29.5	168	11.4	112.0	1035
1.5	4.0	3	9.5	32.5	196	11.5	116.5	1086
3.1	6.5	9	9.7	37.0	239	11.6	120.5	1133
4.0	8.5	16	9.9	43.5	303	11.7	125.0	1185
4.5	10.0	22	10.1	51.0	378			
5.0	11.0	27	10.2	55.5	423			
5.6	12.5	35	10.3	59.5	464			
6.0	13.5	41	10.4	64.0	511			
6.6	15.5	53	10.5	68.0	553			
7.0	17.0	64	10.6	72.5	600			
7.5	19.0	78	11.0	89.5	784			
7.9	20.5	90	11.1	99.0	889			
8.5	23.5	114	11.2	103.0	933			
9.0	27.0	145	11.3	107.5	984			

付表4 NTK6 静 的 試 験

(ROPS支柱に発生する応力)

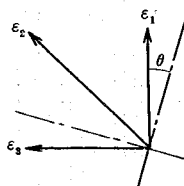
支柱 の 応力 荷重 (t)	B							C						
	ひずみ ($\times 10^{-6}$)			応 力 (Kg/cm ²)			方向	ひずみ ($\times 10^{-6}$)			応 力 (Kg/cm ²)			方向
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	τ_{max}	θ°	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	τ_{max}	θ°
2.0	250	110	-70	530	10	260	3.6	220	50	-80	454	-34	244	-3.4
4.0	470	220	-150	990	-30	510	5.5	370	60	-130	775	-55	415	-6.7
6.0	700	300	-250	1452	-102	777	4.5	490	60	-230	982	-202	592	-5.5
7.0	800	330	-320	1636	-196	916	4.6	510	50	-250	1017	-237	627	-5.9
8.0	890	350	-370	1808	-248	1028	4.1	560	50	-260	1132	-232	682	-6.9
9.0	930	350	-410	1872	-312	1092	3.8	540	30	-260	1090	-250	670	-7.7
9.5	930	350	-420	1866	-336	1101	4.0	540	30	-260	1090	-250	670	-7.7
10.0	950	340	-420	1908	-318	1113	3.1	550	40	-270	1102	-262	682	-6.9
10.5	970	340	-430	1946	-326	1136	2.9	570	50	-280	1138	-268	703	-6.3
11.0	1000	330	-450	2000	-350	1175	2.2	610	70	-310	1204	-304	754	-4.9
11.5	1070	310	-480	2137	-367	1252	0.6	650	90	-360	1256	-386	821	-3.1
12.0	1110	300	-530	2195	-455	1325	0.3	690	110	-400	1317	-447	882	-1.8
12.5	1110	290	-540	2188	-478	1333	0.2	690	110	-430	1295	-515	905	-1.0
13.0	1130	270	-550	2227	-487	1357	-0.7	700	100	-440	1312	-532	922	-1.5

付表 5. 参考 NTK6 剛構造 静的試験

(昭和49年度試験, ROPS支柱に発生する応力)

支柱 応力 荷重(t)	A				B				C				D			
	σ_1	σ_2	τ_{max}	方向 θ°	σ_1	σ_2	τ_{max}	方向 θ°	σ_1	σ_2	τ_{max}	方向 θ°	σ_1	σ_2	τ_{max}	方向 θ°
1.0	90	12	39	2.4	88	5	42	-12.1	78	-15	47	-1.5	48	-24	36	-5.2
2.0	175	17	79	2.3	177	12	83	-11.2	160	-7	84	0.8	125	-20	73	-3.5
3.0	226	11	108	4.6	244	5	120	-9.7	221	-8	115	-3.4	181	-25	103	-6.4
4.0	313	17	148	2.8	319	5	157	-8.4	284	-11	148	5.8	259	-22	141	-7.1
5.0	397	11	193	4.3	415	11	202	-9.8	344	-35	190	7.5	355	-16	186	-6.7
6.0	451	11	220	4.9	465	9	230	-9.3	383	-44	214	7.6	401	-38	220	-5.2
7.0	509	13	248	5.1	534	12	261	-8.7	450	-24	237	7.5	479	-35	257	-5.8
8.0	572	19	277	3.8	621	18	302	-9.1	530	-38	284	7.4	555	-33	294	-6.2
9.0	642	21	311	4.9	693	18	338	-9.4	589	-37	313	6.6	609	-36	323	-6.0
10.0	701	7	347	5.2	758	22	368	-8.9	632	-50	341	8.0	708	-30	369	-6.7

※ 応力の計算式 (付表4~7および付表11に共通)



$$\sigma_1 = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \nu} + \frac{\sqrt{2}}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right] \quad \tau_{max} = G \sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \nu} - \frac{\sqrt{2}}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right] \quad \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

付表 6 B D 1 7 静的試験

(ROPS支柱に発生する応力)

支柱 ひずみ 荷重(t)	B							C						
	ε_1	ε_2	ε_3	σ_1	σ_2	τ_{max}	方向 θ°	ε_1	ε_2	ε_3	σ_1	σ_2	τ_{max}	方向 θ°
3.0	289	52	-94	610	-25	318	6.7	342	118	-67	744	81	332	2.7
5.0	485	130	-176	999	-72	535	2.1	610	176	-133	1324	107	609	4.8
7.1	692	196	-235	1436	-65	751	2.0	854	235	-240	1812	30	891	3.7
8.0	750	222	-259	1552	-79	816	1.3	952	294	-267	2015	40	988	2.3
9.0	842	248	-294	1740	-96	918	1.3	1086	318	-320	2289	9	1140	2.6
10.1	923	261	-341	1895	-149	1022	1.4	1208	341	-400	2515	-91	1303	2.2
11.1	923	261	-388	1861	-256	1058	0.3	1318	353	-453	2734	-138	1436	2.6
12.0	992	261	-412	2005	-265	1135	1.2	1403	388	-493	2900	-170	1535	2.0
13.0	1016	287	-412	2060	-248	1154	0.6	1501	400	-547	3090	-228	1659	2.2
14.0	1039	300	-423	2096	-260	1178	0.2	1525	400	-547	3147	-213	1680	2.5
14.4	1073	287	-435	2176	-262	1219	1.2	1525	400	-560	3147	-242	1689	2.3
試験装置故障の為以降測定不能														

付表7 WS20 静的試験

(ROPS支柱に発生する応力)

支柱 ひずみ 応力 荷重(t)	B							C						
	ひずみ($\times 10^{-6}$)			応力(Kg/cm^2)			方向 θ°	ひずみ($\times 10^{-6}$)			応力(Kg/cm^2)			方向 θ°
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	$\tau_{\max}$		ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	$\tau_{\max}$	
1.5	260	91	-78	546	0	273	0.0	296	77	-103	613	-34	324	2.3
3.1	418	182	-101	896	55	421	-2.6	507	154	-146	1071	12	529	2.3
5.0	592	227	-195	1233	-42	637	-2.1	761	231	-231	1598	-8	803	2.0
6.0	734	273	-234	1533	-33	783	-1.4	887	269	-274	1859	-20	940	1.8
7.0	884	455	-312	1862	-146	1004	-7.9	972	292	-317	2025	-60	1043	1.6
7.9	1065	364	-390	2188	-162	1176	-1.0	1056	292	-334	2211	-45	1128	2.8
8.5	1176	364	-444	2406	-210	1310	0.1	1064	277	-360	2213	-101	1157	3.0
9.0	1302	364	-514	2650	-286	1468	0.9	1056	269	-377	2182	-145	1163	2.8
9.3	1349	391	-569	2719	-379	1551	-0.03	1056	254	-386	2177	-167	1172	3.2
9.5	1381	382	-600	2772	-429	1600	0.2	1039	246	-377	2145	-159	1152	3.4
9.7	1412	391	-623	2827	-460	1643	0.1	1056	238	-394	2174	-188	1181	3.7
9.9	1444	400	-623	2901	-438	1670	0.3	1065	231	-403	2190	-204	1197	3.9
10.2	1444	409	-623	2901	-438	1670	0.04	1073	231	-420	2195	-236	1216	3.7
10.3	1452	427	-623	2920	-433	1676	-0.4	1082	385	-420	2209	-223	1217	-2.1
10.5	1460	427	-639	2927	-464	1695	-0.5	1099	231	-429	2251	-241	1246	3.9
10.7	1460	427	-631	2933	-445	1689	-0.3	1099	231	-446	2237	-278	1257	3.5
10.9	1460	418	-639	2927	-464	1695	-0.2	1099	231	-471	2217	-333	1275	3.0
11.1	1444	400	-639	2890	-475	1683	0.1	1115	231	-489	2241	-363	1375	2.9
11.3	1460	418	-639	2927	-492	1695	-0.2	1183	231	-506	2391	-360	1409	3.6
11.5	1420	364	-639	2835	-492	1664	0.7	1183	215	-549	2360	-458	1409	3.4
11.7	1412	345	-631	2823	-480	1652	1.3	1200	192	-574	2385	-507	1446	3.9

付表8 NTK6 静的試験

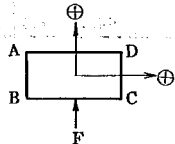
(静的試験後の永久変形量)

(単位 mm)

方向 測点	支柱 状態	A			B			C			D		
		試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量
荷重 方向	3	77.5	76.5	1.0	76.5	77.5	1.0	77.0	78.0	1.0	76.5	73.5	3.0
	4	77.5	71.0	6.5	76.5	85.0	8.5	76.0	86.0	10.0	76.5	67.0	9.5
	5	78.0	59.0	19.0	76.0	—	—	75.5	—	—	76.5	55.5	21.5
	6	78.5	46.5	32.0	76.0	109.5	33.5	75.0	110.0	35.0	76.5	43.0	33.5
	7	79.0	35.0	44.0	75.5	122.0	46.5	74.5	122.5	48.0	76.5	31.0	45.5
	8	79.5	22.0	57.5	75.5	134.0	58.5	74.0	135.5	61.5	76.5	18.5	58.0
	9	80.5	10.0	70.5	76.0	147.0	71.0	74.0	148.0	74.0	76.5	6.5	70.0
	10	81.0	-2.0	83.0	76.5	160.0	83.5	74.0	162.0	88.0	77.0	-5.0	82.0
	11	82.0	-13.0	95.0	77.0	173.0	96.0	74.0	175.0	101.0	77.5	-17.0	94.5
	12	83.0	-24.0	107.0	77.5	184.0	106.5	74.0	186.0	112.0	78.0	-28.0	106.0
	13	83.5	-30.0	113.5	77.5	190.5	113.0	74.5	191.5	117.0	78.0	-34.0	112.0
	14	84.0	-33.0	117.0	77.5	193.0	115.5	75.0	194.0	119.0	78.5	-37.0	115.5
荷重と直 角方向	3'	78.0	76.0	-2.0	76.5	76.0	-0.5	76.5	76.0	0.5	77.0	74.5	2.5
	4'	77.5	75.0	-2.5	76.5	75.5	-1.0	77.0	76.5	0.5	77.0	74.0	3.0
	5'	77.0	74.0	-3.0	76.0	75.5	-0.5	77.0	77.0	0	77.0	74.5	2.5
	6'	77.0	73.5	-3.5	76.0	75.0	-1.0	77.0	77.0	0	77.0	74.5	2.5
	7'	76.5	73.0	-3.5	76.0	75.0	-1.0	77.5	77.5	0	77.0	75.0	2.0
	8'	76.5	72.5	-4.0	76.0	75.0	-1.0	78.0	76.5	1.5	77.5	75.0	2.5
	9'	77.0	72.5	-4.5	76.0	75.5	-0.5	78.5	77.0	1.5	78.0	75.0	3.0
	10'	77.0	73.0	-4.0	76.5	76.0	-0.5	79.0	78.0	1.0	78.0	75.5	2.5
	11'	77.5	73.0	-4.5	77.0	77.0	0.0	79.5	79.0	0.5	79.0	76.0	3.0
	12'	78.0	72.0	-6.0	77.0	78.0	1.0	80.0	80.0	0	79.0	76.0	3.0
	13'	78.0	71.5	-6.5	77.0	78.5	1.5	80.5	80.5	0	79.5	75.0	4.5
	14'	78.0	74.0	-4.0	78.0	78.0	0.0	80.5	79.5	0.5	80.0	77.0	3.0

注 変形量の符号

付表8~10, 付表13~17に共通



付表9 BD17 静 的 試 験

(静的試験後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	測 点	支 柱 状 態	A			B			C			D		
			試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量
荷 重 方 向	3		79	74	5	74.5	78.5	4	75	79.5	4.5	75.5	73.5	2
	4		79	68	11	74	86	12	75.5	89	13.5	75.5	67	8.5
	5		79	55	24	74	98.5	24.5	75.5	103	27.5	75.5	53	22.5
	6		79	41	38	73	112.5	39.5	75.5	118	42.5	75.5	37.5	38
	7		79.5	26.5	53	73	127	54	75.5	134.5	59	75.5	21.5	54
	8		79.5	12	67.5	72.5	141	68.5	76	150.5	74.5	75.5	5.5	70
	9		80	-2	82	72.5	155.5	83	76	166	90	76	-10	86
	10		80.5	-15.5	96	72.5	170	97.5	77	183	106	76	-25	101
	11		81	-29.5	110.5	72.5	184.5	112	77.5	199	121.5	77	-41	118
	12		82	-43	125	72.5	199	126.5	78	216	138	77	-56	133
	13		82.5	-56.5	139	72.5	213.5	141	78.5	232	153.5	77.5	-71	148.5
	14		83	-67	150	72.5	223.5	151	79	244.5	165.5	78	-82.5	160.5
	15		83	-73	156	72.5	228	155.5	79.5	251	171.5	78.5	-89	167.5
	16		83.5	-74.5	158	72.5	229	156.5	80	253.5	173.5	79	-91.5	170.5
荷 重 と 直 角 方 向	3'		77	76.5	-0.5	77	77	0	76.5	77	-0.5	76	77.5	-1.5
	4'		77	75.5	-1.5	76.5	77	0.5	76	72.5	0.5	76	77	-1
	5'		76	75	-1	76	78	2	75.5	74.5	1	75	77	-2
	6'		76	74	-2	76	79	3	75	73	2	75	77	-2
	7'		75.5	73	-2.5	75.5	80	4.5	74	72	2	74.5	77	-2.5
	8'		75.5	72	-3.5	75	81	6	73.5	71	2.5	74.5	77	-2.5
	9'		75.5	71	-4.5	75	82	7	73.5	69	4.5	74	77	-3
	10'		76	70	-6	75.5	83	7.5	73	68	5	74	77	-3
	11'		76	70	-6	75.5	84	8.5	73	67.5	5.5	74.5	77.5	-3
	12'		76	69.5	-6.5	76	85	9	73	67	6	75	78	-3
	13'		76.5	68	-8.5	76	86	10	73	66.5	6.5	75	78	-3
	14'		76.5	67	-9.5	76	88	12	73	66	7	75	77.5	-2.5
	15'		76.5	67.5	-9	76	87	11	73	65	8	75	78	-3
	16'		76.5	67.5	-9	76	86.5	10.5	73	64.5	8.5	75	80	-5

付表 10 WS20 静 的 試 験

(静的試験後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	支 柱 状 態 脚 点	A			B			C			D		
		試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量	試験前	試験後	変形量
荷 重 方 向	3	69.5	65	4.5	72.5	77.5	5	74	76.5	2.5	73	88	-15
	4	69.5	58.5	11	72.5	84	11.5	73.5	83	9.5	72.5	81	-8.5
	5	70	48	22	72	93	21	73.5	92	18.5	72	71.5	-0.5
	6	70	39	31	72	103.5	31.5	73	102.5	29.5	71.5	61.5	10
	7	70.5	29	41.5	72	114	42	73	112.5	39.5	71.5	51	20.5
	8	71	19	52	72	124	52	73	123	50	71	41	30
	9	72	14.5	57.5	72.5	134	61.5	73	133	60	71	30.5	40.5
	10	72.5	0	72.5	73	145	72	73.5	143.5	70	71	21.5	49.5
	11	73.5	-10	83.5	73	155	86	74	154	80	71	11	60
	12	74	-19	93	73	164	91	74.5	165	90.5	71	1	70
	13	74.5	-25	99.5	72.5	169	96.5	75	174	99	71	-7	78
	14	75	-26.5	101.5	73	171	98	75	178.5	103.5	71	-12	83
	15							75	180	105	71	-15	86
荷 重 と 直 角 方 向	3'	236.5	230	-6.5	234	235	1	75.5	75.5	0	75	75	0
	4'	249.5	242	-7.5	247	248	1	76	76	0	76	75	1
	5'	263	254	-9	260	261	1	76	76	0	76	76	0
	6'	276.5	266.5	-10	273.5	274	0.5	77	76	1	76.5	76	0.5
	7'	289.5	279	-10.5	286.5	287	0.5	77.5	76	1.5	77	77	0
	8'	303	291	-12	300.5	300	-0.5	78	76	2	77.5	77	0.5
	9'	316.5	304	-12.5	313.5	313.5	0	79	76	3	78	77.5	0.5
	10'	330	316.5	-14.5	327.5	327	-0.5	80	76.5	3.5	79	78	1
	11'	344	329	-15	341	340.5	-0.5	81	77	4	79.5	79	0.5
	12'	357.5	340.5	-17	354.5	354	-0.5	82	78	4	80.5	79.5	1
	13'	371	353	-18	368	367.5	-0.5	83	79	4	81	80	1
	14'	385	366.5	-18.5	381.5	380	-0.5	84	80	4	81.5	80	1.5
	15'							84	81	3	82	82	0

付表11 転 落 突 験

(ROPS 支柱に発生する応力)

機 械 名	ビーク記号	支 柱 並, 応力	B							C						
			歪 ($\times 10^{-6}$)			応 力 (Kg/cm^2)			方 向 θ°	歪 ($\times 10^{-6}$)			応 力 (Kg/cm^2)			方 向 θ°
			ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	$\tau_{\max}$		ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_1	σ_2	$\tau_{\max}$	
N T K 6		Pc1	-1038	-409	231	-185	-2236	1026	0.2 [*]	-635	-391	128	-105	-1416	656	9.9 [*]
		P1	865	341	-231	1837	65	886	1.3	865	391	-255	1830	0	915	4.4
		P'1	-346	-205	58	-91	-773	341	8.4 [*]	-404	-261	128	59	-887	473	12.4 [*]
		Pc2														
(参考) N T K 6 (剛構造) (昭49実験.)		Pc1														
		P1				550	9	271	6.2				635	-38	337	12.5
		P'1				80	-106	93	30.6 [*]				-10	-213	102	6.4 [*]
		Pc2														
		P'c2														
		P2				1061	48	507	7.3				1230	-123	677	10.9
		P'2														
		P3				873	1	436	20.9				774	-222	498	7.3
B D 1 7		Pc1														
		P1	1756	769	-750	3578 ^Δ	-560 ^Δ	2069 ^Δ	6.0	1543	868	-600	3260 ^Δ	-431 ^Δ	1846 ^Δ	-10.1
		P'1														
		Pc2	1660	462	-667	3370 ^Δ	-391 ^Δ	1881 ^Δ	-0.8	1029	316	-450	2064	-327	1196	1.0
W S 2 0		Pc1														
		P1	300	1650	-600	3304 ^Δ	-604 ^Δ	1954 ^Δ	-41.4	-300	529	1350	2908	242	1334	-0.1 [*]
		P'1														
		Pc2														
		P'c2														
		P2														

- 注 1. ビーク記号については図 8.1 参照
 2. *印は主応力 σ_2 の方向
 3. NTK6 (剛構造) は 3 回の実験の平均値

付表 12 転 落 実 験

(ダミー頭部及びROPSの加速度)

機 械 名	ピーク 記 号	経過時間 (sec)	ダミー頭部の加速度 (g)			ROPS (C支柱頂部)の加速度 (g)				
			左	右	上 下	前 後	左	右	上 下	前 後
N T K 6	P _{c1}	0.00								
	P ₁	0.16	3.5	8.3	1.2	21.4	10.3	10.7		
	P' ₁	0.76								
	P _{c2}	—	15.8	15.4	2.7	11.5	18.0	23.4		
(参考) N T K 6 (剛構造) (昭49実験)	P _{c1}									
	P ₁	0.00	2.2	5.1	1.4					
	P' ₁	0.41	2.0	1.7	1.4					
	P _{c2}	1.43	4.5	—	5.9					
	P' _{c2}	1.78	4.7	8.8	6.4					
	P ₂	2.26	5.9	7.9	2.7					
	P' ₂	2.80								
	P ₃									
B D 1 7	P _{c1}	0.00								
	P ₁	0.30	5.6	7.9	2.1	12.7	3.3	6.4		
	P' ₁	0.90								
	P _{c2}	1.80	22.3	25.6	12.1	26.4	18.5	15.6		
W S 2 0	P _{c1}									
	P ₁	0.00	9.7	9.1	2.1	10.9	5.2	4.0		
	P' ₁	0.07								
	P _{c2}	—	8.9	10.7	2.4	19.1	12.5	9.4		
	P' _{c2}	—								
	P ₂	—								

注 1. ピーク記号については図 8.1 参照。

2. NTK6 (剛構造) は 3 回の実験の平均値。

付表13 NTK6 転落実験

(360°転落後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	測点	A			B			C			D		
		転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量
荷重方向	3	77	76.5	0.5	77	79	2	75.5	79	3.5	76	74.5	1.5
	4	76.5	76	0.5	77	79	2	75	79	4	76	74	2
	5	76	76	0	76	—	—	74	—	—	76	74	2
	6	76	75.5	0.5	75.5	79	3.5	73.5	79.5	6	76	73.5	2.5
	7	75.5	75	0.5	75	79.5	4.5	73	79.5	6.5	75.5	73	2.5
	8	75	75	0	74.5	80	5.5	73	80	7	76	73	3
	9	75	75	0	74.5	80	5.5	72.5	80	7.5	76	73	3
	10	75	74.5	0.5	74	81	7	72.5	81	8.5	76.5	73	3.5
	11	75	75	0	74	81.5	7.5	72.5	81.5	9	77	73	4
	12	75.5	75	0.5	74.5	82	7.5	72.5	82.5	10	77	73	4
	13	75.5	75	0.5	74.5	83	8.5	72.5	83	10.5	78	73.5	4.5
	14	76	75	1.0	74.5	83.5	9	72.5	84	11.5	78.5	74	4.5
荷重と直角方向	3'	75	76	1	75	75	0	75.5	77	-1.5	77.5	78	-0.5
	4'	74.5	75.5	1	74	75	1	75	77	-2	77	78	-1
	5'	74	74.5	0.5	73	74	1	74	77	-3	76.5	77.5	-1
	6'	73	74	1	72	73	1	73	77	-4	75.5	77	-1.5
	7'	72	73	1	71	72.5	1.5	72.5	77	-4.5	75	77	-2
	8'	71	72.5	1.5	70	72	2	72	77	-5	74	77	-3
	9'	71	72	1	69	71.5	2.5	71.5	77.5	-6	74	77	-3
	10'	70.5	72	1.5	68.5	71	2.5	71	78	-7	74	77	-3
	11'	70	71.5	1.5	68	71	3	70.5	78.5	-8	74	77	-3
	12'	70	71	1	67.5	71.5	4	70	79	-9	73.5	77.5	-4
	13'	69.5	71	1.5	67	70.5	3.5	70	79.5	-9.5	73	77.5	-4.5
	14'	69	70.5	1.5	66.5	70.5	4	70	80	-10	73	77.5	-4.5

付表 14 BD17 転落実験

(360° 転落後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	測点	支柱 状態	A			B			C			D		
			転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量
荷重 方向	3		81	82.5	-1.5	75.5	76.5	1	78	80	2	77.5	77	0.5
	4		82	82.5	-0.5	75	77	2	77.5	80	2.5	78	77	1
	5		82	81	1	74.5	79.5	5	77	—	—	79	77	2
	6		83	79.5	3.5	74	79.5	5.5	76	80.5	4.5	79.5	76.5	3
	7		83	78	5	73.5	80	6.5	75.5	81	5.5	80	76.5	3.5
	8		84	77	7	73.5	82	8.5	75	81	6	81	76	5
	9		84.5	75.5	9	73	84	11	75	81.5	6.5	82	76	6
	10		85	74.5	10.5	73	85.5	12.5	74.5	82	7.5	83	76	7
	11		86	74	12	73	87.5	14.5	74.5	83	8.5	84	76	8
	12		87	73	14	73.5	89	15.5	74.5	83.5	9	85	76.5	8.5
	13		88	71.5	16.5	73.5	91	17.5	74.5	84.5	10	86	76.5	9.5
	14		88.5	70	18.5	73.5	92	18.5	74	85	11	87	77	10
	15		89	70.5	18.5	73	93	20	74	85	11	88	77	10
	16		90	71.5	18.5	73	93.5	20.5	74	85.5	11.5	89	77.5	11.5
荷重と 直角 方向	3'		76.5	77	+0.5	76.5	75	-1.5	76	75.5	0.5	76	77	-1
	4'		76.5	76	-0.5	76	75	-1	75	75	0	75.5	76.5	-1
	5'		76	75.5	-0.5	75.5	74	-1.5	74.5	74.5	0	75	76.5	-1.5
	6'		76	75	-1	75	73.5	-1.5	74	74	0	75	76.5	-1.5
	7'		76	74.5	-1.5	75	73	-2	73.5	73.5	0	75	76	-1
	8'		76	74	-2	75	72	-3	73	73	0	74.5	76	-1.5
	9'		76	73.5	-2.5	74.5	72	-2.5	73	73	0	74.5	76	-1.5
	10'		76.5	73.5	-3	74.5	71.5	-3	73	73	0	74.5	76.5	-2
	11'		77	73	-4	75	71.5	-3.5	73	73	0	75	76.5	-1.5
	12'		77.5	73	-4.5	75	71	-4	73	73.5	-0.5	75	77	-2
	13'		78	73	-5	75	71	-4	73	73.5	-0.5	75	77.5	-2.5
	14'		78	73	-5	75	71	-4	73	73.5	-0.5	75	77.5	-2.5
	15'		78.5	73	-5.5	75	70.5	-4.5	73	73.5	-0.5	75	77	2
	16'		79	73.5	-5.5	75	70.5	-4.5	73	73	0	75	77.5	-2.5

付表 15 WS 20 転落実験

(450° 転落後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	測点	支柱 状態			A			B			C			D		
		転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量
荷重 方向	3	71	75.5	-4.5	74.5	69	-4.5	74	77	3	74.5	65	9.5			
	4	71	73.5	-2.5	74.5	70.5	-4	74	79.5	5.5	74.5	60	14.5			
	5	71	70.5	0.5	74	—	—	74	—	—	74.5	57	17.5			
	6	71	68	3	74	75	1	74	87	13	74	52.5	21.5			
	7	71	65	6	74	77	3	74	91	17	74	48	26			
	8	71	62.5	8.5	74	81	7	74	95	21	74	44	30			
	9	71.5	60	11.5	74	83.5	9.5	75	99.5	24.5	74.5	40	34.5			
	10	71.5	58	13.5	74.5	86	11.5	75.5	104	28.5	75	36	39			
	11	72	53	19	75.5	89	13.5	76	108.5	32.5	75	32	43			
	12	72.5	50.5	22	75.5	91.5	16	77	113	36	75.5	28	47.5			
	13	73	48	25	75.5	92.5	17	77.5	118	40.5	76	24.5	51.5			
	14	73	47.5	25.5	76.5	94.5	18	78	120	42	76.5	22.5	54			
	15							78	121	43	76.5	21	55.5			
荷重と 直角 方向	3'	235.5	232	-3.5	236	234	-2	76	73	3	75.5	75.5	0			
	4'	249	245	-4	249	247	-2	77	73	4	76	76.5	-0.5			
	5'	262	257	-5	262.5	260	-2.5	77.5	72	5.5	76.5	77	-0.5			
	6'	275.5	270	-5.5	275.5	273	-2.5	78.5	71	7.5	77	77.5	-0.5			
	7'	289	283	-6	289	286	-3	79	70	9	78	78	0			
	8'	302	295.5	-6.5	302	299	-3	80	69	11	78.5	79	-0.5			
	9'	316	309	-7	316	312.5	-3.5	81	68	13	79.5	79.5	0			
	10'	329.5	322	-7.5	329.5	326	-3.5	82	67.5	14.5	80.5	80.5	0			
	11'	343	335.5	-7.5	343	340	-3	83.5	66.5	17	81.5	82	-0.5			
	12'	357	348.5	-8.5	357	353	-4	84.5	66	18.5	83	83	0			
	13'	370	361.5	-8.5	370.5	367	-3.5	86	65	21	84	83.5	0.5			
	14'	383	375	-8	383.5	380	-3.5	87	65.5	21.5	84	83	1			
	15'							88	65	23	85	85	0			

付表 16 BD17 転落実験

(720° 転落後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	測点	支柱 状態	A			B			C			D		
			転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量
荷重 方向	3		82.5	80	2.5	76.5	79	2.5	80	83.5	3.5	77	73	4
	4		82.5	71	11.5	77	89	11	80	95	15	77	63	14
	5		81	52	29	79.5	106	26.5	—	—	—	77	43.5	33.5
	6		79.5	31.5	48	79.5	127.5	48	80.5	134	53.5	76.5	21	55.5
	7		78	11	67.5	80	148	68	81	156	75	76.5	-1	77.5
	8		77	-9.5	86.5	82	168	86	81	177.5	96.5	76	-23	99
	9		75.5	-30	105.5	84	188.5	104.5	81.5	199	117.5	76	-44.5	120.5
	10		74.5	-50	124.5	85.5	209	123.5	82	221	139	76	-66.5	142.5
	11		74	-70	144	87.5	230	142.5	83	242	159	76	-88	164
	12		73	-90.5	163.5	89	251.5	162.5	83.5	264.5	181	76.5	-109.5	186
	13		71.5	-110	181.5	91	271	180	84.5	285	200.5	76.5	-130.5	207
	14		70	-128	198	92	283	191	85	299	214	77	-149.5	226.5
	15		70.5	-135	205.5	93	287	194	85	306	221	77	-158.5	235.5
	16		70.5	-138.5	209	93.5	288	194.5	85.5	308	222.5	77.5	-162	239.5
荷重と 直角 方向	3'		77	74.5	-2.5	75	73.5	-1.5	75.5	72.5	3	77	75	2
	4'		76	74	-2	75	75	0	75	68	7	76.5	73	3.5
	5'		75.5	76.5	1	74	80	6	74.5	62.5	12	76.5	70.5	6
	6'		75	79	4	73.5	85	11.5	74	54.5	19.5	76.5	66	10.5
	7'		74.5	82	7.5	73	91	18	73.5	47.5	26	76	62	14
	8'		74	85	11	72	96	24	73	40	33	76	57.5	18.5
	9'		73.5	87.5	14	72	101	29	73	32.5	40.5	76	53.5	22.5
	10'		73.5	90.5	17	71.5	107	35.5	73	25.5	47.5	76.5	50	26.5
	11'		73	93	20	71.5	112.5	41	73	18	55	76.5	46.5	30
	12'		73	96	23	71	118	47	73.5	11.5	62	77	42.5	34.5
	13'		73	98	25	71	122	51	73.5	4	69.5	77.5	39	38.5
	14'		73	99	26	71	126.5	55.5	73.5	1	72.5	77.5	34	43.5

付表 17 WS20 転落実験

(900° 転落後の永久変形量)

(単位 mm)

方向	測点	A			B			C			D		
		転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量	転落前	転落後	変形量
荷重と直方向	3	75.5	128	-52.5	69	138	69	77	78	1	65	-	-
	4	73.5	120	-46.5	70.5	150.5	80	79.5	95.5	16	60	43	17
	5	70.5	101.5	-31	-	-	-	-	-	-	57	15.5	41.5
	6	68	82	-14	75	188.5	113.5	87	153	66	52.5	-12.5	65
	7	65	62.5	2.5	77	208.5	131.5	91	186	95	48	-40	88
	8	62.5	45.5	17	81	228	147	95	217.5	122.5	44	-68	112
	9	60	24.5	35.5	83.5	248	164.5	99.5	250	150.5	40	-90.5	130.5
	10	58	4	54	86	268	182	104	283	179	36	-128	164
	11	53	-15.5	68.5	89	288.5	199.5	108.5	316	207.5	32	-150	182
	12	50.5	-34.5	84.5	91.5	304	212.5	113	350.5	237.5	28	-177.5	205.5
	13	48	-50	98	92.5	313	220.5	118	376	258	24.5	-203	227.5
	14	47.5	-54	101.5	94.5	319	224.5	120	387.5	267.5	22.5	-219	241.5
	15							121	390.5	269.5	21	-229	250
	3'	232	225.5	-6.5	234	227	-7	73	70.5	2.5	75.5	74	1.5
	4'	245	231	-14	247	235.5	-11.5	73	68	5	76.5	77.5	-1
	5'	257	236.5	-20.5	260	242.5	-17.5	72	70.5	1.5	77	84	-7
	6'	270	240	-30	273	248	-25	71	71.5	-0.5	77.5	91	-13.5
	7'	283	243.5	-39.5	286	253	-33	70	72	-2	78	97.5	-19.5
	8'	295.5	246.5	-49	299	258.5	-40.5	69	72	-3	79	104	-25
	9'	309	250	-59	312.5	263	-49.5	68	72	-4	79.5	110	-30.5
	10'	322	253.5	-68.5	326	269	-57	67.5	73	-5.5	80.5	117.5	-37
	11'	335.5	257	-78.5	340	274	-66	66.5	74	-7.5	82	124	-42
	12'	348.5	260	-88	353	282.5	-70.5	66	73	-7	83	131.5	-48.5
	13'	361.5	266	-95.5	367	298	-69	65	63	-2	83.5	137	-53.5
	14'	375	281.5	-93.5	380	314	-66	65.5	75	-9.5	83	135.5	-52.5
	15'							65	76	-11	85	145	-64.5