

大畑財団殿

重力式鋼管ラーメン電車線柱に関する基礎的検討

報告書

2024 年 7 月 30 日

静岡理工科大学土木工学科

富永 知徳

1.はじめに

1.1 研究の背景

鉄道の架線を支える電車線柱(図 1)は耐久性の観点から、全国の線路で徐々に取り換えが行われている。ただし、鉄道の運行を妨げるわけにはいかないため、夜間のみの工事で実施されている。このような電車線柱の取り換え工事のために必要な工程の中で、実は一番大変なのは基礎(図 2)の造成である。柱を立てるための深さ 2～3m 程度の穴を掘削する必要があるが、線路近傍には埋設物が多いため重機を使って掘ることができず、一か所あたり 1 週間程度の時間を使って人力による手掘りを行っているのが実情である。この手掘り作業はコスト面、労務負荷面、安全面のいずれに対して大きな負荷となっているため、現場にはこの作業を合理化したいという非常に強いニーズがある。

しかしながら、架線柱構造そのものを見直すことでこのような課題に対応しようという動きはこれまで起きていない。特許検索を行っても架線柱の基礎構造に関する出願はほとんど存在しない。



図 1 ラーメン電車線柱の例



図 2 電車線柱基礎の例

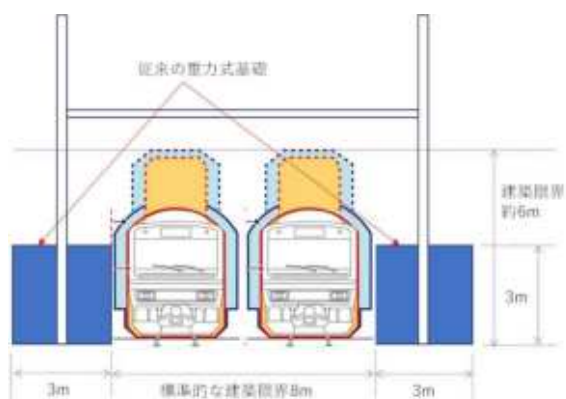


図 3 従来技術での重力式基礎の場合のレイアウト

1.2 提案構造

ここまで説明したように、電車線柱の取り換えにおいて、基礎のための穴掘りを削減するニ

ーズが高い。これを解決するためには基礎を重力式にすることが考えられる。しかし、線路の脇のスペースは大きくなく、線路直角方向になるべく広がらないようにする必要がある。基礎への柱の飲み込み長は約 2~3m 程度なので、基礎を重力式にただけだと、そのコンクリートブロックの高さは 3m 程度となり、すると幅と長さも 3m 程度以上となってしまうために、図 3 に示すように最小サイズでも線路脇への設置は現実的ではない。

そこで、柱の基部を線路直角方向についてピン構造にしてしまうことにより柱基部での発生曲げモーメントを低減し、線路直角方向での基礎幅を低減することを考えた。ただし、柱には柱平行方向にも曲げモーメントが作用するため、通常のピン構造だと実現不可能である。よって、建築ブレースで多く使われている構造のように、鋼端をプレスすることにより幅を最小化することを考えた。(図 4)この幅が狭くなった側を線路直角方向での抵抗方向に配置すれば、線路直角方向には発生モーメントが低減される一方で、線路平行方向については剛性および強度が変化しないということになる。この結果、線路平行方向のモーメントにのみ抵抗できれば良いため、図 5 に示すような線路平行方向にのみ長い基礎とすることができる。

この図 5 のようなレイアウトであれば、基礎のブロックを運搬してきて線路脇に設置するだけで終わるため、基礎工事の必要工期を大幅に削減することができる。なお、図 2 にあるように基礎のすぐ上に鋼管の継手を設けておけば、基礎より上の構造については従来と全く同じ施工プロセスを踏襲できる。

また、現在では 100mm 径程度の小径の羽付き杭を人力で施工する工法も開発されている。(図 6) この杭は圧縮のみならず引張にも効果的に抵抗できるため、このような既存先端技術と組み合わせることによって、重力基礎部分のさらなる小型化や安全性の強化を図ることも可能である。(図 7) 現在、地中レーダー技術で地表面から 1m 程度の範囲であれば埋設物を確認することが可能なので、小径杭を場所を選びながら施工することができる。



図 4 端部をプレスした鋼管の例

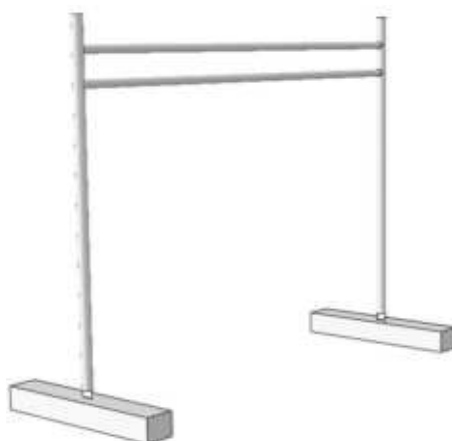


図 5 提案構造基本レイアウト

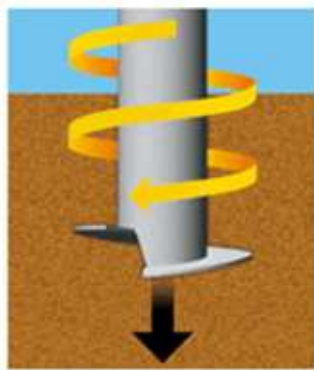


図6 羽付き小径杭のイメージ

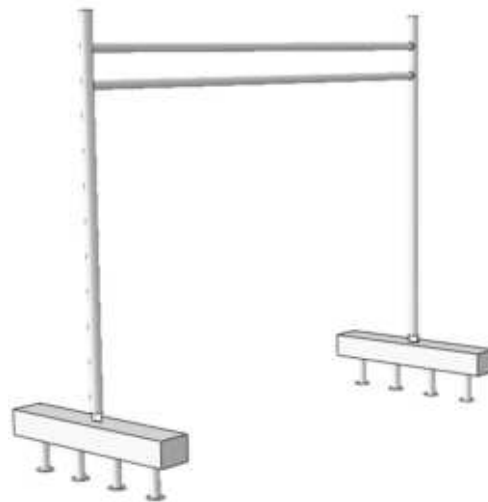


図7 重力式基礎+小径杭のイメージ

1.3 研究内容（提案構造の課題）

本提案構造の実現のためには、以下の課題の解決が必要である。

（1）設計的な実現性の確認

鋼管の端部をプレスしても剛性はゼロにはならない。つまり、発生モーメントは大幅低減されるもののゼロにはならないため、ある程度の抵抗力は必要である。実際の設計計算を行って、必要な重力式基礎の大きさを算定し、基本的な構造を設定する。これにより、概略の構造コストを算定し、得られるメリットに対しての費用対効果を検討するための基礎資料とする。

（2）基礎的な動的挙動の確認

線路直角方向については剛性が大幅に低減するが、それ以外の方向についての剛性は増加する。（線路平行方向では変わらない）その一方で、実際の地震や風は様々な方向から作用してくる。そのため、様々な方向からの地震動の入力による応答を解析的に検討し、提案構造の振動特性および変形特性を確認し、この面からも実現性を検討する。

（3）接合構造ディテール

管端をプレスし、のみ込み長を大幅に低減すると線路直角方向発生モーメントが激減するため、線路直角方向の荷重の伝達は問題ない一方で、線路平行方向の発生モーメントは低減しないため、のみ込み長の低減により線路平行方向の耐力は不足となることが予想される、そのため図8に示すように溶接等により拡幅を行ったり、基礎端部から「ほお杖構造」などを形成する必要がある。上記（1）で得られた断面力を用いて、実現可能な接合構造を考案する。



図8 基部拡幅イメージ

上記（１）～（３）までの課題が解決されれば残課題は以下のように考えられる。

（４）試作

実際に製作を行ってみて、実現可能な構造であることを確認する。

（５）振動試験

上記（２）の結果を実験的に再現し、動的解析結

図 8 接合部拡幅イメージ

果の結果の正しさを確認する。

（６）強度試験

試作品を破壊する試験を行うことによって、主に上記（３）の検討結果について、その正しさを確認する。

（７）試験施工

まずは車庫線などで試験施工を行い、施工性および完成後の挙動を確認する。

2. 本年度の研究

前期課題（１）～（２）について以下の２ステップでの対応とした。

STEP1：現行の電車線柱の設計基準に則って試設計を行い、重力式基礎の必要寸法の算定および構造全体の適切な寸法設定を行った。このとき、小径杭との組み合わせの効果についてもパラメトリックに検討を行い、合理的な構造を探索する。

検討のためのツールとしては、FORUM8 の engineering studio という汎用の土木構造の設計用解析に適したソフトウェアを用いた。このソフトウェアは、分布荷重の取り扱いが容易であり、解析対象構造全体の断面力の分布をヴィジュアルに出力できるため、設計検討を効率化することができた。

STEP2：前ステップで設定した試設計されたモデルについて、地震波の入力方向をパラメーターとした動的解析を行い、その応答挙動を確認した。検討のためのツールとしては、MSC の MARC という汎用 FEM ソフトを用いた。

3.検討結果

3.1 試設計

3.1.1 検討方法

適用範囲の概要を明確化するため、外力（地震の震度）をパラメータとして、主に構造ディメンジョンとの関係性を調査した。

検討対象はラーメン構造が最も不利となる、幅の最も狭い1線またぎの構造を対象とした。また、ラーメンの固定条件を変えるため、鋼管タイプとトラスタイプの2種類で検討を行った。この2種類の上部の基本ディメンジョンを図2.1に示す。なお、トラスタイプについては鉄道総合研究所から提供いただいた付録図1に示す図面をベースに幅のみを調整して作成したものである。

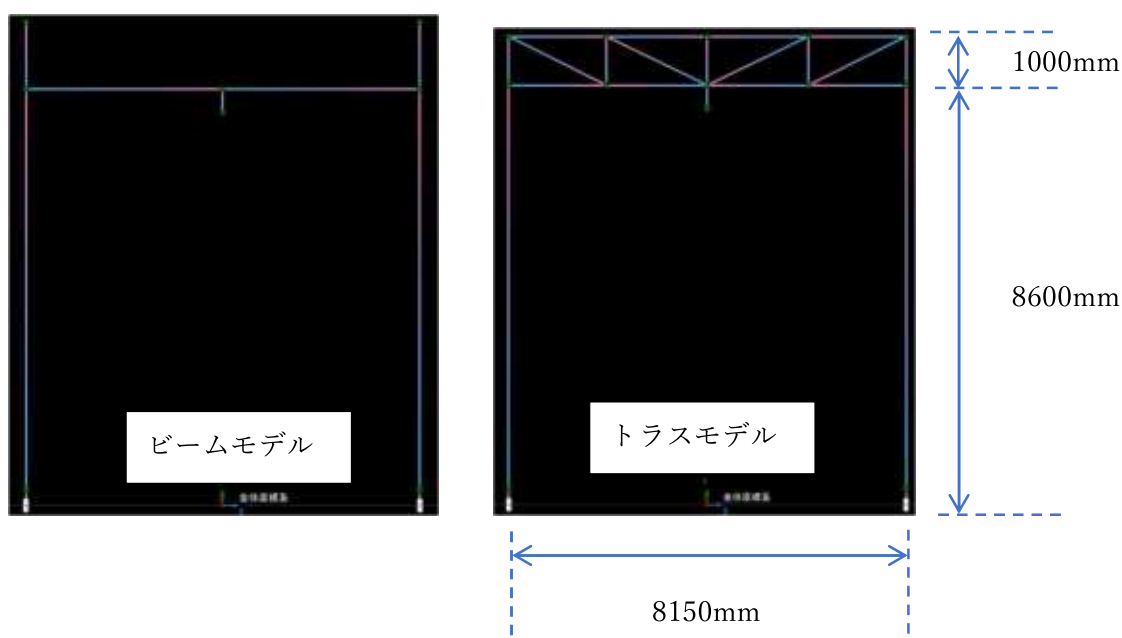


図 2.1 検討基本モデル

まず、線路平行方向について、コンクリート重力基礎部の仕様（長さ、断面）と水平震度の関係を調査する。このとき、限界値は重力基礎部の浮きとした。今回、滑動に関しては単純化して検討を行ったが、重力基礎部に浮きが生じた場合は地盤との関係があまり不明確になるため検討対象外とすることとした。

その後、線路直角方向について载荷を行い、部材の発生応力および水平変位との関係を調査した。水平変位については架線柱と車両の接触を避けるために変位制限がある。

3.1.2 解析方法

(1)概要

解析は Engineer's Studio ver.11.0.5 を用いている。いわゆる静的フレーム解析を行った。

(2)接点

図 2.1 で示したモデル化を実施した。鋼管モデルとトラスモデルのそれぞれの接点座標を以下の表 2.1 に示す。なお、コンクリート基礎部の端部の座標は解析パラメータとして
いるため、表中に示しているのは一番小さい場合の数値である。

表 2.1(a) 接点座標（鋼管タイプ）

節点名称	X: (m)	Y: (m)	Z: (m)	従属
1	-4.075	0	0	柱基部
2	-4.075	8.6	0	ラーメン格点
3	-4.075	10	0	
4	4.075	0	0	柱基部
5	4.075	8.6	0	ラーメン格点
6	4.075	10	0	
7	-4.075	0	3	基部端部(パラメータ)
8	-4.075	0	-3	基部端部(パラメータ)
9	4.075	0	3	基部端部(パラメータ)
10	4.075	0	-3	基部端部(パラメータ)
13	-4.075	0.3	0	
14	-4.075	0.35	0	
15	4.075	0.3	0	
16	4.075	0.35	0	
17	0	8.6	0	架線取り付け部
18	0	8.12	0	架線取り付け部

表 2.1(b) 接点座標（トラスタイプ）

節点名称	X: (m)	Y: (m)	Z: (m)	部位
1	-4.075	0	0	柱基部
2	-4.075	8.6	0	ラーメン格点
3	-4.075	9.6	0	
4	4.075	0	0	柱基部
5	4.075	8.6	0	ラーメン格点
6	4.075	9.6	0	
7	-4.075	0	3	基部端部(パラメータ)
8	-4.075	0	-3	基部端部(パラメータ)
9	4.075	0	3	基部端部(パラメータ)
10	4.075	0	-3	基部端部(パラメータ)
13	-4.075	0.3	0	トラス格点
14	-4.075	0.35	0	トラス格点
15	4.075	0.3	0	トラス格点
16	4.075	0.35	0	トラス格点
17	0	8.6	0	架線取り付け部
18	0	8.12	0	架線取り付け部
11	2.075	8.6	0	トラス格点
12	2.075	9.6	0	トラス格点
19	-2.075	8.6	0	トラス格点
20	-2.075	9.6	0	トラス格点
21	0	9.6	0	トラス格点

(2)部材

部材は、付録図および参考文献[1]を参考に設定した。一般線ではごく一般的なディメンジョンといえるものとなっている、

鋼管は $318.6 \times t6.0$ 。基本的に 6mm 以下の板厚の鋼管は用いられないためである。鋼管径はさらに 1 サイズ小さい 267.4mm が使われることもあるようである。

鋼管のヒンジ化部は図 4 の示したイメージでプレスした状況を想定した。鋼管の断面積は同じで、厚さは板厚の 2 倍の 12mm ということで、断面高さ $B = \text{鋼管断面積} / 12\text{mm}$ として決定した。

コンクリート基礎部は設置の自由度を考えると小さいほうが良いが、鋼管径が 318.6 のため 300mm 以下を決定するのは不合理である。なお、予備解析でコンクリート基礎部を 300×300 、 400×400 、 500×500 の 3 パターンで解析を行って、状況を確認したところ、 300×300 では基礎部の曲がりの影響が大きく、基礎部で負反力が生じがちである一方で、 400×400 と 500×500 ではそれほど大きな差異は観測されなかったため、コンクリート基礎部の断面は 400×400 としている。コンクリート強度は 30MPa で、SD345 の D19@3 の主鉄筋を上下にかぶり 50mm で配置した。

トラス部の部材は、付録図および参考文献[1]を参考とした。いくつかタイプがあるが、最も部材構成が単純なものを選定した。

なお、鋼管およびその他鋼部材は STK400 および SS400 相当の強度としている。

モデル部材の一覧表を表 2.2 に示す。i 端、j 端に記入された数字は、表 2.1 での座標に対応している。

表 2.2(a) 部材一覧（鋼管タイプ）

要素名	i 端	j 端	長さ: (m)	i 断面	j 断面	備考
12	1	13	0.3	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
13	13	14	0.05	base_yoko	base_yoko	プレス部
16	4	15	0.3	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
17	15	16	0.05	base_yoko	base_yoko	プレス部
18	16	5	8.25	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
19	5	6	1.4	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
22	7	1	3	RC rectangle4	RC rectangle4	基礎部
23	1	8	3	RC rectangle4	RC rectangle4	基礎部
24	9	4	3	RC rectangle4	RC rectangle4	基礎部
25	4	10	3	RC rectangle4	RC rectangle4	基礎部
2	17	5	4.075	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
3	18	17	0.48			
4	2	17	4.075	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
5	14	2	8.25	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
6	2	3	1.4	Steel Pipe318	Steel Pipe318	

表 2.2(b) 部材一覧 (トラスタイプ)

要素名	i 端	j 端	長さ: (m)	i 断面	j 断面	備考
12	1	13	0.3	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
13	13	14	0.05	base_yoko	base_yoko	プレス部
16	4	15	0.3	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
17	15	16	0.05	base_yoko	base_yoko	プレス部
18	16	5	8.25	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
19	5	6	1	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
22	7	1	3	RC Rectangle4	RC Rectangle4	基礎部
23	1	8	3	RC Rectangle4	RC Rectangle4	基礎部
24	9	4	3	RC Rectangle4	RC Rectangle4	基礎部
25	4	10	3	RC Rectangle4	RC Rectangle4	基礎部
3	18	17	0.48			
5	14	2	8.25	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
6	2	3	1	Steel Pipe318	Steel Pipe318	
2	2	19	2	L75double	L75double	トラス部材
4	3	20	2	L75double	L75double	トラス部材
7	3	19	2.24	FB40double	FB40double	トラス部材
8	19	20	1	L50	L50	トラス部材
9	17	19	2.075	L75	L75	トラス部材
10	20	21	2.075	L75	L75	トラス部材
11	17	20	2.30	FB50	FB50	トラス部材
14	17	21	1	L50	L50	トラス部材
15	11	17	2.075	L75	L75	トラス部材
20	12	21	2.075	L75	L75	トラス部材
21	5	11	2	L75double	L75double	トラス部材
26	6	12	2	L75double	L75double	トラス部材
27	6	11	2.24	FB40double	FB40double	トラス部材
28	11	12	1	L50	L50	トラス部材
29	12	17	2.30	FB50	FB50	トラス部材

(3)支点の設定

Engineer's Studio ver.11.0.5 では非線形バネの設定ができないため、コンクリート基礎部の「浮き」の検討のためには通常の鉛直方向線形バネを用いた。バネに引っ張りが生じた時点で、構造としての適用範囲外として判定したため、結果として提示されているものでは、すべて浮きが生じてないものとなっている。

なお、実際には今回の検討でのような構造では、滑動も商事生じる可能性があり、また、その活動が構造に輸入される地震動の免震効果を発揮しうられるが、現在の時点ではそこを追求するには十分な基礎データが存在しないため、今回の検討においては、線路軸方向および線路軸直角方向については固定とし、鉛直方向の変位のみ検討の対象としている。

なお、鉛直方向バネの強度は予備解析により、鉛直方向の変位が 5mm 以下程度となるように決めている。値は全モデル共通で 4000kN/m² の分布バネとした。

(4)荷重

考慮した荷重は自重および地震力である。プログラムの機能を使って、各部材の質量から震度を用いて一括で載荷を行った。なお、鋼部材の比重は 7.8、コンクリートの比重は 2.3 で計算をしている。

架線関連の荷重は、参考文献に従って表 2.3 のように設定した。厳密には架線はある長さをもってモデル化する必要があるが、今回は架線関連の質量を算出後、それと等価な鋼部材を架線の取り付け位置に取り付けて、同量の力学効果を得ている。ただし、ケーブルは本当は剛性がほとんど無いため、質量の一部しか構造に負荷されないはずだが、今回は鋼部材としてモデル化しているため、全質量が負荷となっている。

なお、地震荷重は震度を 0.1 刻みでパラメータとした。

表 2.3 架線関連荷重一覧

	種別	単位重量	数量	径間	荷重小計	
(1)	水平集中荷重(P)					
ア	風圧荷重分(Pw)					
	電車線(シンプル)	23.9	4	35	3346	
	き電線(下り)	34.6	1	35	1211	
	き電線(上り)	27.5	1	35	962.5	
	がいし(2 個連)	80	10	1	800	
	やぐら	530	2	1	1060	
	下束(曲振用)	130	4	1	520	
	電柱上部	289	2	1	578	
	Pw 計				8477.5	
イ	横張力分(Pt)					
	電車線(シンプル)	2286.7	4	1	9146.8	
	き電線(下り)	2317	1	1	2317	
	き電線(上り)	2977	1	1	2977	
	Pt 計				14440.8	
	P(左風の場合)				22918.3	(N)ア + イ
	P(右風の場合)				5963.3	(N)－ア + イ
(2)	水平等分布荷重(Q)					
	下り側電柱(Q1)				273	(N/m)
	上り側電柱(Q2)				273	(N/m)
(3)	垂直等分布荷重(w)					
	電車線(シンプル)	16.5	4	35	2310	
	き電線(下り)	27.7	1	35	969.5	
	き電線(上り)	57.6	1	35	2016	
	がいし(2 個連)	100	10	1	1000	
	やぐら	850	2	1	1700	
	下束(曲振用)	150	4	1	600	
	ビーム	3009	1	1	3009	
	小計				11604.1666	
					7	
	垂直等分布荷重(w)				2275.32679	(N/m)
					7	

3.1.3 解析結果

(1)線路方向荷重ケース

線路方向に荷重(震度)を増加させながら、コンクリート基礎に負反力が出ない範囲を明確化する。コンクリート基礎の長さを長くしながら、荷重を増加させた。

図 2.1 にコンクリート基礎幅と基礎底面が圧縮であるレベルの震度との関係を示す。これより以下がわかる。

- ①トラスタイプと鋼管ビームタイプ両方とも、幅が広いほど対応できる震度が大きくなる。特に、幅が 10m あると安定性が高くなる。
- ②トラスタイプのほうがビームタイプよりも安定性が少し高い。ビーム部の重量が影響したと思われる。

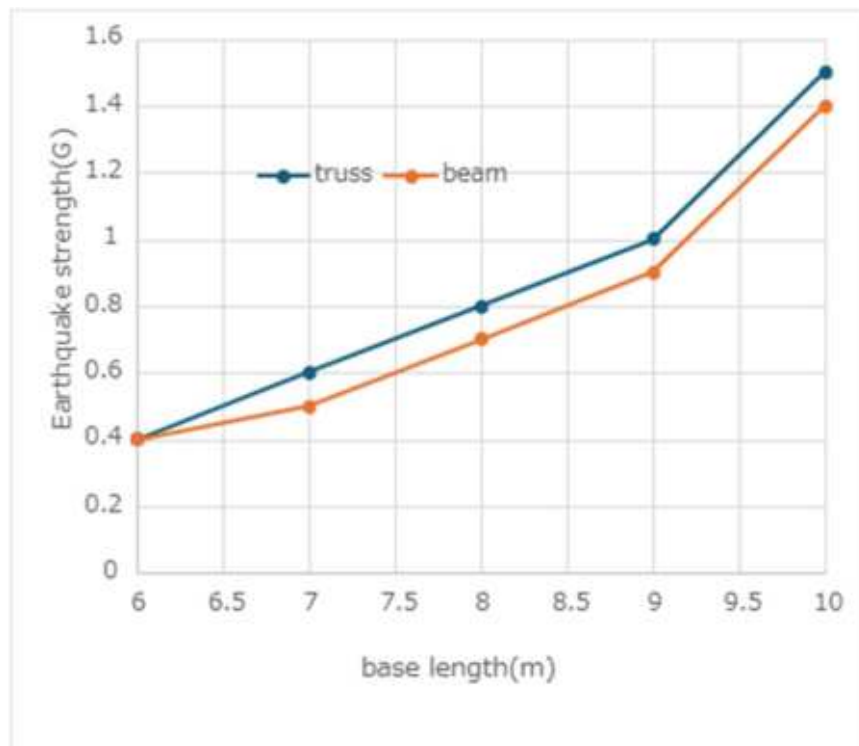


図 2.1 コンクリート基礎幅－限界震度関係

線路平行方向についての、固定式の場合と、重力式の場合での水平変位の比較を図 2.2 に示す。図中、S のついた線が固定式の場合である。

この図より、この方向における重力式化による水平変位への影響は小さいことがわかる。また、ビームタイプの方がトラスタイプよりも変位が小さいこともわかる。

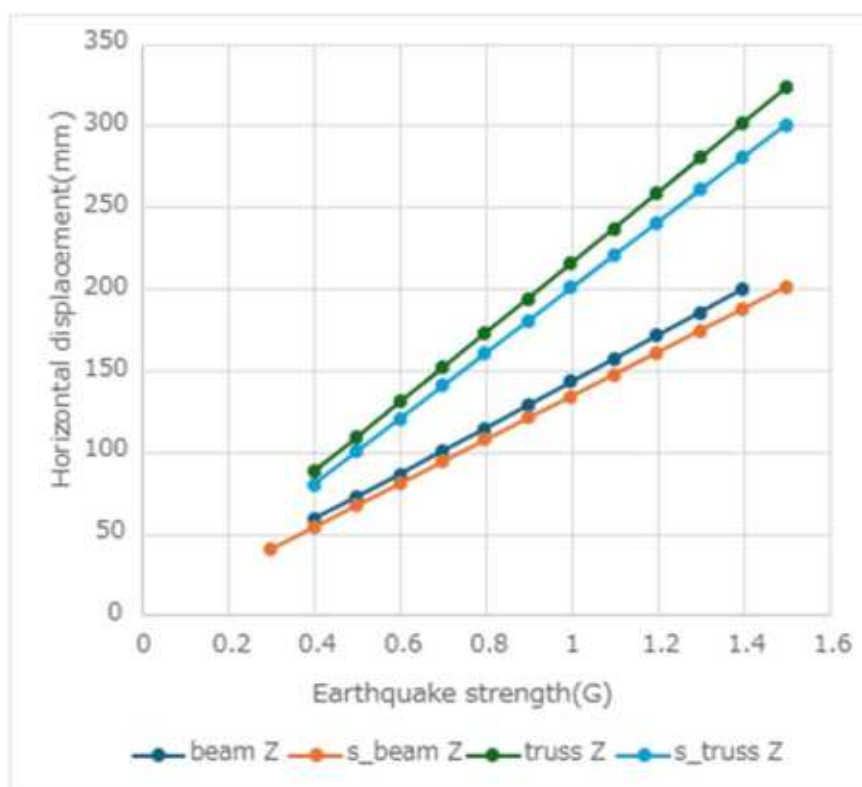


図 2.2 震度－線路平行方向水平変位関係

(2) 線路直角方向荷重ケース

線路直角方向についての、固定式の場合と、重力式の場合での水平変位の比較を図 2.3 に示す。図中、S のついた線が固定式の場合である。

今回の提案構造は線路直角方向についてはヒンジに近い状態にしているので、当然ながら固定式に比較するとかなり変位が大きい。しかしながら、地震時については水平変位の制限値は耐震基準には設定されていない。また、大きいとは言え、応答震度 1.0 程度まで、トラスタイプでは 150mm 程度ということは、鋼管径の約 50%程度の変位であり、おそらくは車両に接触するレベルではない。

また、ビームタイプよりもトラスタイプの方がかなり発生水平変位が小さい。これはトラスタイプの方が梁部でのモーメント負担が大きいためと思われる。

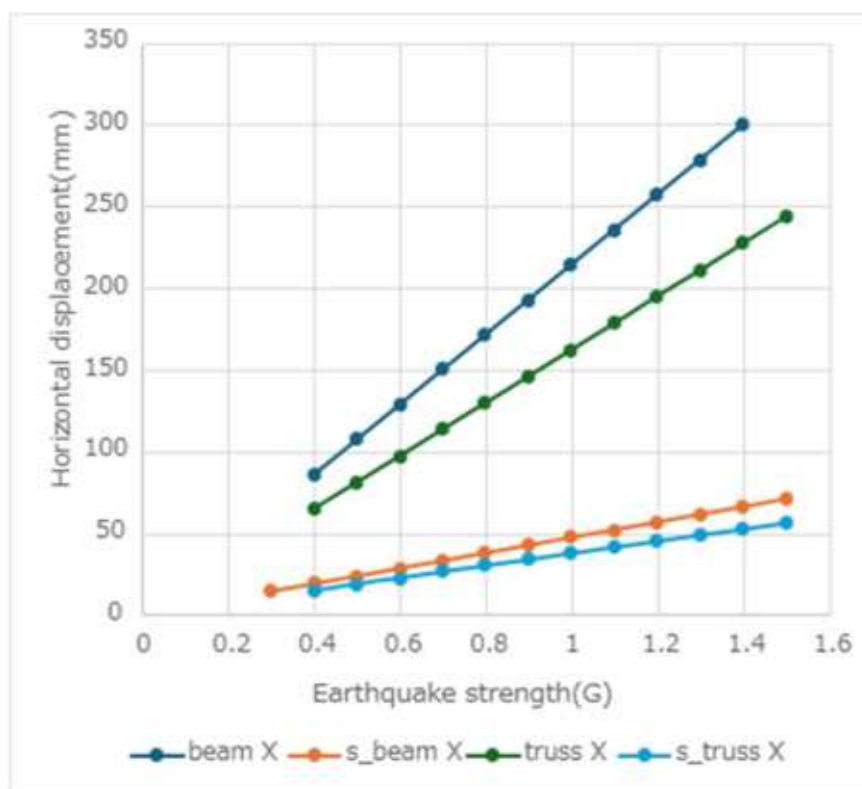


図 2.3 震度－線路直角方向水平変位関係

線路直角方向応答震度と鋼管基部（潰した部分）での発生応力との関係を図 2.4 に示す。これより、応答震度 0.6~0.7 程度であれば STK490 でも弾性域に収まることがわかる。この部分については実質的に強制変位状態にあるため、鋼材等の溶接を行って断面の保有する耐力を上げて、その分剛性が増えるために作用するモーメントが増加する。そのため、より大きな震度に抵抗するためには鋼材の強度を上げる以外には方法がない。よって、図中尉は鋼種ごとの限界値（降伏応力降伏応力）を示している。STK590 を使えば応答震度 1.3~1.4 程度には耐えることができることがわかる。なお、トラスタイプとビームタイプではトラスタイプの方が発生応力が小さくなる。トラスタイプの方が隅角部での回転剛性が大きいと思われる。

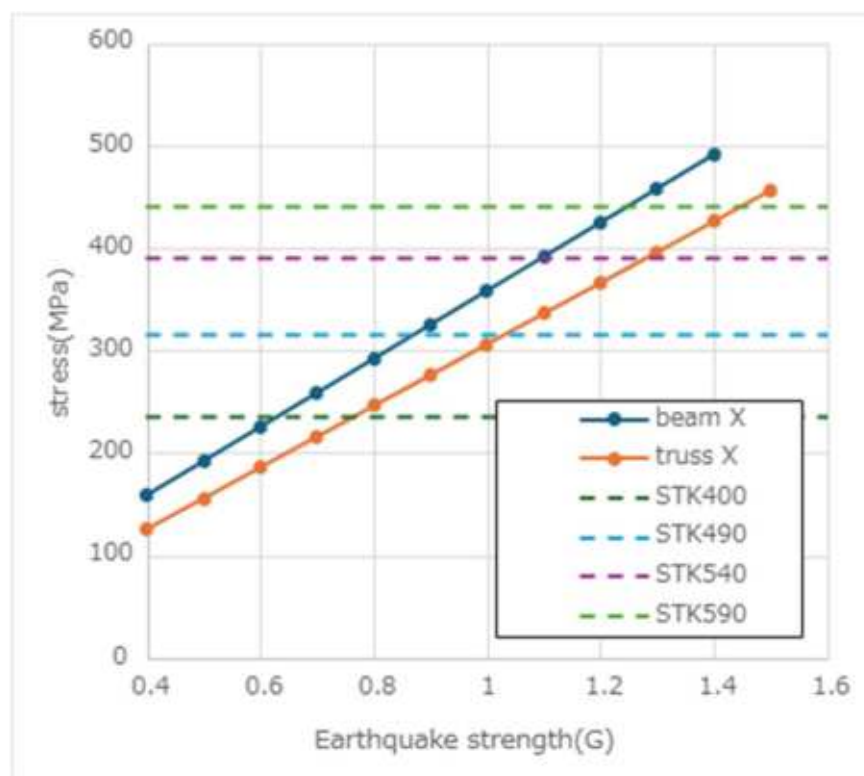


図 2.4 線路直角方向応答震度と鋼管基部発生応力との関係

また、全部材の発生応力照査の結果をビームモデルについて表 2.4、トラスマデルについては表 2.5 に示す。いずれも線路直角方向での応答震度 0.4 の時点の結果であるが、発生応力を SS400/STK400 の基準降伏応力 235MPa で無次元化するとその最大値はビームモデルで 0.38、トラスマデルで 0.43 であるので、それぞれ応答震度 0.9 程度までは降伏が発生しないことがわかる。つまり、応答震度が 0.9 を超えてくると、主に上のトラス部などで降伏が生じてくる。

表 2.4 応答震度 0.4 のときのビームモデルの部材発生応力照査結果

名称	X (m)	部材種別	N (kN)	Myp (kNm)	Mzp (kNm)	σ N	σ M1	σ M2	total	total/235
12	0	Steel Pipe318	-3.5	0.0	0.0	-1	0	0	1	0.00
12	0.300000012	Steel Pipe318	-3.3	0.0	1.1	-1	0	2	3	0.01
13	0	base_yoko	-3.3	0.0	1.1	-1	0	109	110	
13	0.050000001	base_yoko	-3.3	0.0	1.3	-1	0	127	128	
16	0	Steel Pipe318	-18.8	0.0	0.0	-3	0	0	3	0.01
16	0.300000012	Steel Pipe318	-18.7	0.0	1.6	-3	0	3	7	0.03
17	0	base_yoko	-18.7	0.0	1.6	-4	0	159	163	
17	0.050000001	base_yoko	-18.7	0.0	1.8	-4	0	186	190	
18	0	Steel Pipe318	-18.7	0.0	1.8	-3	0	4	7	0.03
18	8.25	Steel Pipe318	-14.9	0.0	38.7	-3	0	86	88	0.38
19	0	Steel Pipe318	-0.6	0.0	-0.2	0	0	0	1	0.00
19	1.399999976	Steel Pipe318	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.00
22	0	RC rectangle4	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.00
22	3	RC rectangle4	0.0	1.8	2.3	0	0	0	0	0.00
23	0	RC rectangle4	0.0	1.8	2.3	0	0	0	0	0.00
23	3	RC rectangle4	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.00
24	0	RC rectangle4	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.00
24	3	RC rectangle4	0.0	1.8	12.7	0	0	1	1	0.01
25	0	RC rectangle4	0.0	1.8	12.7	0	0	1	1	0.01
25	3	RC rectangle4	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.00
2	0	Steel Pipe318	-2.7	0.0	15.6	0	0	35	35	0.15
2	4.074999809	Steel Pipe318	-3.5	0.0	-38.9	-1	0	-86	87	0.37
3	0		0.0	0.0	0.0					
3	0.479999989		9.5	0.0	-0.9					
4	0	Steel Pipe318	1.8	0.0	24.7	0	0	55	55	0.23
4	4.074999809	Steel Pipe318	1.1	0.0	16.5	0	0	37	37	0.16
5	0	Steel Pipe318	-3.3	0.0	1.3	-1	0	3	3	0.01
5	8.25	Steel Pipe318	0.4	0.0	24.5	0	0	54	54	0.23
6	0	Steel Pipe318	-0.6	0.0	-0.2	0	0	0	1	0.00
6	1.399999976	Steel Pipe318	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.00

最大値 0.38

表 2.5 応答震度 0.4 のときのトラスモデルの部材発生応力照査結果

名称	X (m)	部材種別	N (kN)	Myp (kNm)	Mzp (kNm)	σ N	σ M1	σ M2	total	total/235
12	0	Steel Pipe318	-3.26	0.00	0.00	-1	0	0	1	0.00
12	0.300000012	Steel Pipe318	-3.12	0.00	1.16	-1	0	3	3	0.01
13	0	base_yoko	-3.12	0.00	1.16	-1	0	117	118	
13	0.050000001	base_yoko	-3.10	0.00	1.35	-1	0	136	137	
16	0	Steel Pipe318	-16.90	0.00	0.00	-3	0	0	3	0.01
16	0.300000012	Steel Pipe318	-16.77	0.00	1.25	-3	0	3	6	0.02
17	0	base_yoko	-16.77	0.00	1.25	-3	0	126	129	
17	0.050000001	base_yoko	-16.74	0.00	1.45	-3	0	147	150	
18	0	Steel Pipe318	-16.74	0.00	1.45	-3	0	3	6	0.03
18	8.25	Steel Pipe318	-13.00	0.00	29.22	-2	0	65	67	0.28
19	0	Steel Pipe318	-12.48	0.00	28.57	-2	0	63	65	0.28
19	1	Steel Pipe318	-12.03	0.00	0.19	-2	0	0	2	0.01
22	0	RC Rectange4	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0.00
22	3	RC Rectange4	0.00	1.76	2.19	0	0	0	0	0.00
23	0	RC Rectange4	0.00	1.76	2.19	0	0	0	0	0.00
23	3	RC Rectange4	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0.00
24	0	RC Rectange4	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0.00
24	3	RC Rectange4	0.00	1.76	11.37	0	0	1	1	0.01
25	0	RC Rectange4	0.00	1.76	11.37	0	0	1	1	0.01
25	3	RC Rectange4	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0.00
3	0		0.00	0.00	0.00					
3	0.479999989		9.53	0.00	-0.91					
5	0	Steel Pipe318	-3.10	0.00	1.35	-1	0	3	4	0.01
5	8.25	Steel Pipe318	0.64	0.00	26.72	0	0	59	59	0.25
6	0	Steel Pipe318	0.50	0.00	26.39	0	0	58	58	0.25
6	1	Steel Pipe318	0.96	0.00	-0.13	0	0	0	0	0.00
2	0	L75double	28.76	0.00	0.33	11	0	14	25	0.11
2	2	L75double	28.66	0.00	-0.19	11	0	-8	19	0.08
4	0	L75double	-24.24	0.00	-0.11	-10	0	-5	14	0.06
4	1.468727231	L75double	-24.31	0.00	0.02	-10	0	1	10	0.04
4	2	L75double	-24.34	0.00	0.00	-10	0	0	10	0.04

7	0	FB40double	-2.63	0.00	-0.02	-4	0	-6	10	0.04
7	1.356589556	FB40double	-2.68	0.00	0.01	-4	0	2	6	0.03
7	2.23606801	FB40double	-2.71	0.00	-0.01	-5	0	-1	6	0.02
8	0	L50	1.99	0.00	-0.01	4	0	-2	6	0.02
8	1	L50	2.03	0.00	0.00	4	0	0	4	0.02
9	0	L75	26.18	0.00	0.44	21	0	37	57	0.24
9	2.075000048	L75	26.23	0.00	-0.18	21	0	-15	36	0.15
10	0	L75	-19.74	0.00	0.03	-16	0	2	18	0.08
10	1.19919014	L75	-19.77	0.00	0.07	-16	0	6	21	0.09
10	2.075000048	L75	-19.79	0.00	0.05	-16	0	4	19	0.08
11	0	FB50	-5.13	0.00	0.03	-17	0	14	31	0.13
11	2.303394318	FB50	-5.08	0.00	-0.02	-17	0	-9	26	0.11
14	0	L50	0.04	0.00	-0.24	0	0	-68	69	0.29
14	1	L50	0.08	0.00	0.16	0	0	45	46	0.19
15	0	L75	-6.88	0.00	-0.02	-5	0	-2	7	0.03
15	2.075000048	L75	-6.83	0.00	-0.16	-5	0	-14	19	0.08
20	0	L75	-19.45	0.00	-0.20	-15	0	-17	32	0.14
20	2.075000048	L75	-19.39	0.00	0.21	-15	0	17	32	0.14
21	0	L75double	-30.90	0.00	-0.65	-12	0	-27	39	0.17
21	2	L75double	-30.80	0.00	0.14	-12	0	6	18	0.08
26	0	L75double	4.85	0.00	-0.17	2	0	-7	9	0.04
26	1.392577767	L75double	4.92	0.00	-0.05	2	0	-2	4	0.02
26	2	L75double	4.95	0.00	-0.08	2	0	-3	5	0.02
27	0	FB40double	26.42	0.00	-0.02	44	0	-5	49	0.21
27	0.992325127	FB40double	26.42	0.00	0.00	44	0	1	45	0.19
27	2.23606801	FB40double	26.41	0.00	-0.04	44	0	-9	53	0.22
28	0	L50	-12.03	0.00	-0.13	-21	0	-37	58	0.25
28	1	L50	-11.99	0.00	0.13	-21	0	36	57	0.24
29	0	FB50	26.81	0.00	0.00	89	0	-1	90	0.38
29	0.639580369	FB50	26.81	0.00	0.00	89	0	1	90	0.38
29	2.303394318	FB50	26.81	0.00	-0.03	89	0	-13	102	0.43

最大值 0.43

3.1.4 STEP1 のまとめ

外力（地震の震度）をパラメータとして、主に構造ディメンジョンとの関係性を調査した結果、以下の結論を得た。

- 1) トラスタイプと鋼管ビームタイプ両方とも、幅が広いほど対応できる震度が大きくなる。特に、幅が 10m あると安定性が高くなる。
- 2) トラスタイプのほうがビームタイプよりも安定性が少し高い。ビーム部の重量が影響したものと思われる。
- 3) 線路平行方向において重力式化による水平変位への影響は小さい。また、このときビームタイプの方がトラスタイプよりも変位が小さい。
- 4) 線路直角方向の発生変位は従来の固定式基部と比較すると大きいですが、応答震度 1.0 程度まで鋼管径の約 50%程度の変位であり、おそらくは車両に接触するレベルではない。このとき、ビームタイプよりもトラスタイプの方がかなり発生水平変位が小さい。これはトラスタイプの方が梁部でのモーメント負担が大きいためと思われる。
- 5) 鋼管基部（潰した部分）では応答震度 0.6～0.7 程度であれば STK490 でも弾性域に収まる。STK590 を使えば応答震度 1.3～1.4 程度には耐え得る。なお、トラスタイプとビームタイプではトラスタイプの方が発生応力が小さくなる。トラスタイプの方が隅角部での回転剛性が大きいと思われる。
- 6) ビーム部の発生応力は応答震度 0.9 程度までは降伏が発生しない。

以上の得られた知見から総合的に判断すると、構造の応答震度 1.0 程度までは適用可能かと思われる。その条件化で基部の幅は 10m 程度あれば十分な安定性を得ることができると考えられる。

3.2 時刻歴応答解析

3.2.1 検討方法

基部が重力式であること、また、その鋼管基部が異方性を持つことが、動的挙動にどのような影響を及ぼすのか確認するために、動的応答解析を行う。具体的には、地震波の種類、方向、強度をパラメータとする。なお、構造モデルは 3.1 で検討した中で、トラスタイプと鋼管ビームタイプの両方の基部長さが 5m の場合を用いる。評価のため従来の固定基部のモデルについても解析し、比較を行った。

3.2.2 解析方法

(1)概要

解析は MSC/MARC 2023.4 を用いていた。要素はフレーム要素である。

(2)接点

3.1 と同様に図 2.1 で示したモデル化を実施した。接点座標も表 2.1 と同じである。なお、コンクリート基礎部の端部の座標は 5.0m と -5.0m となるタイプのものである。

(2)部材

部材も 3.1 と同じである。モデル部材は表 2.2 と同じである。i 端、j 端に記入された数字は、表 2.1 での座標に対応している。

なお、鋼材の材料強度はすべて 400MPa 級(SS400 または SRK400) としており、鋼材の構成則は完全弾塑性としている。コンクリート強度は 30MPa である。減衰定数は鋼で 2%、コンクリートで 5%とした。

(3)支点の設定

MSC/MARC では非線形バネの設定ができるため、コンクリート基礎部の「浮き」の検討のために鉛直方向非線形バネを用いた。圧縮側のバネ剛性は 3.1 と同じで 4000kN/m² とした。引張側の剛性はゼロである。

(4)荷重

考慮した荷重は自重および地震力である。すべて加速度の時刻歴データで与えている。なお、3.1 と同様に鋼部材の比重は 7.8、コンクリートの比重は 2.3 で計算をしている。

架線関連の荷重も 3.1 と同様に表 2.3 のように設定した。

なお、地震荷重は波形で 1 種地盤用と 3 種地盤用の 2 種類。方向を 0,22.5,45,67.5,90 度の 5 角度、そして最大加速度を 1 種で 5 タイプ、3 種で 4 タイプとした。最大荷重を変化させるときは、元の最大加速度から比例で全加速度を変化させている。用いた加速波の一覧を表 3.2.1 に示す。

なお、1 種地盤用は神戸海洋気象台地盤上 NS 成分(最大 588gal)、3 種地盤用はポートアイランド内地盤上 EW 成分(最大 619gal)である。

表 3.2.1 地震加速度一覽表

No	種別	最大加速度 (gal)	入力方向(度)				
1-5	1 種	568	0	25.5	45	67.5	90
6-10		700	0	25.5	45	67.5	90
11-15		800	0	25.5	45	67.5	90
16-20		900	0	25.5	45	67.5	90
21-25		1000	0	25.5	45	67.5	90
26-30	3 種	619	0	25.5	45	67.5	90
31-35		800	0	25.5	45	67.5	90
36-40		900	0	25.5	45	67.5	90
40-45		1000	0	25.5	45	67.5	90

3.2.3 解析結果

図 3.1.1～3.1.25 にトラスタイプのモデルの格点の 1 種地盤での全変位履歴を示す。グラフの縦軸は線路平行方向、横軸は線路直角方向である。Gravity が提案の重力式、Fixed が従来の固定式の結果である。なお、いずれのケースでも部材の塑性化は生じていない。

これらの図より以下のことがわかる。

(1) 剛性の落ちた線路直角方向については、固定式に対して重力式は大きく変位が増加している。一方で、線路平行方向については、ほぼ同程度である。

(2) 標準的な地震時の重力式の線路直角方向最大変位は 0.2m 程度で、これは平行方向の発生最大変位の 2 倍程度である。

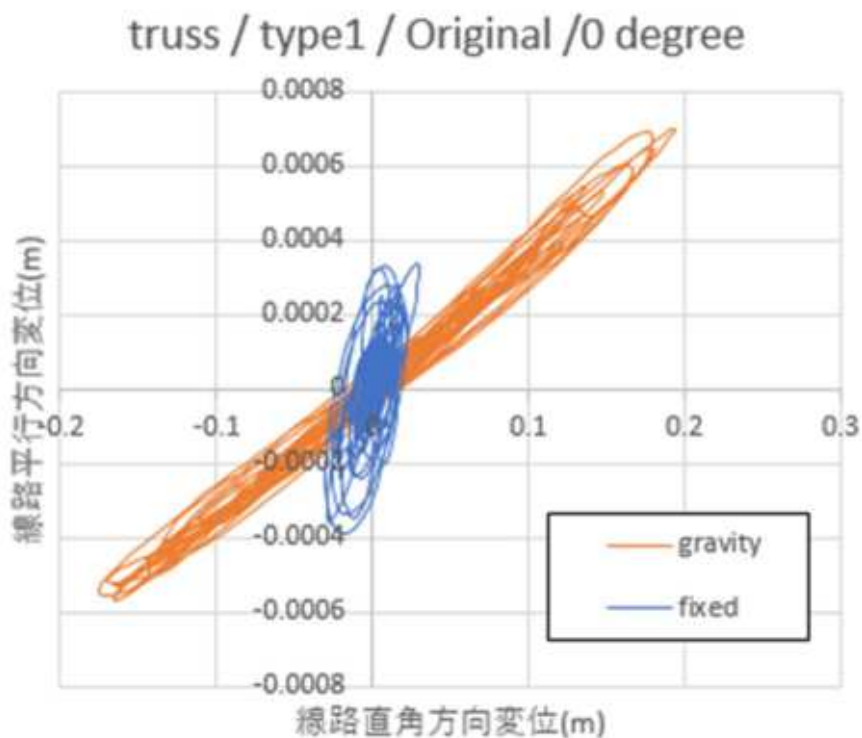


図 3.1.1 1 種 568gal/0 度

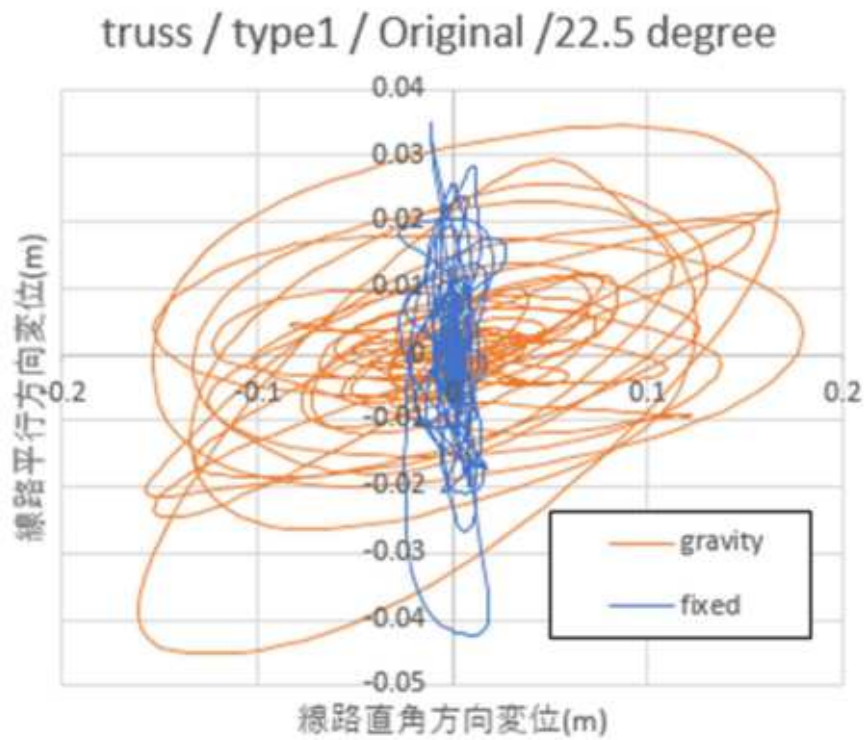


図 3.1.2 1種 568gal/22.5 度

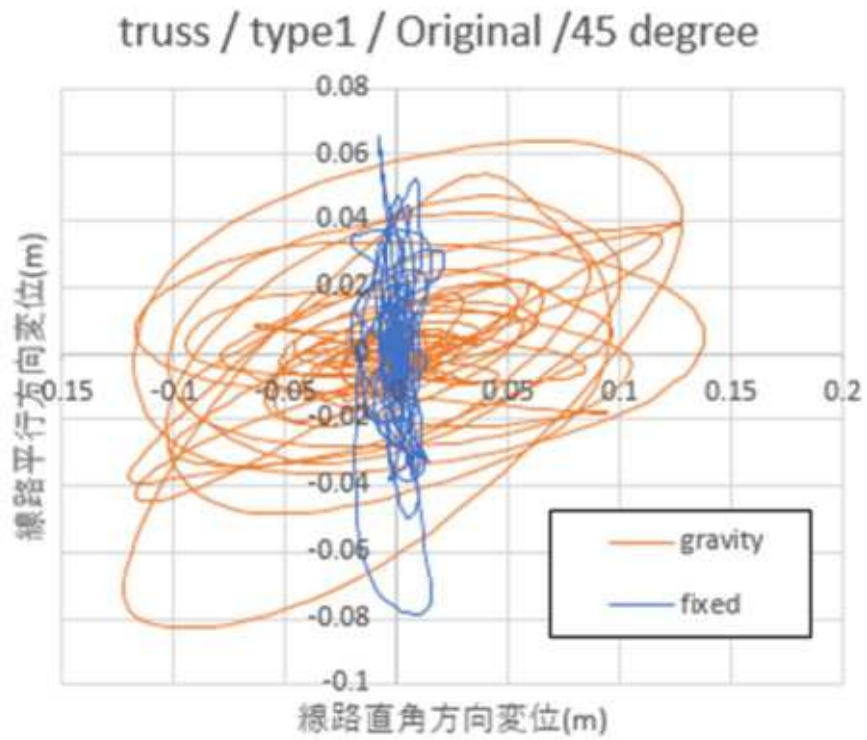


図 3.1.3 1種 568gal/45 度

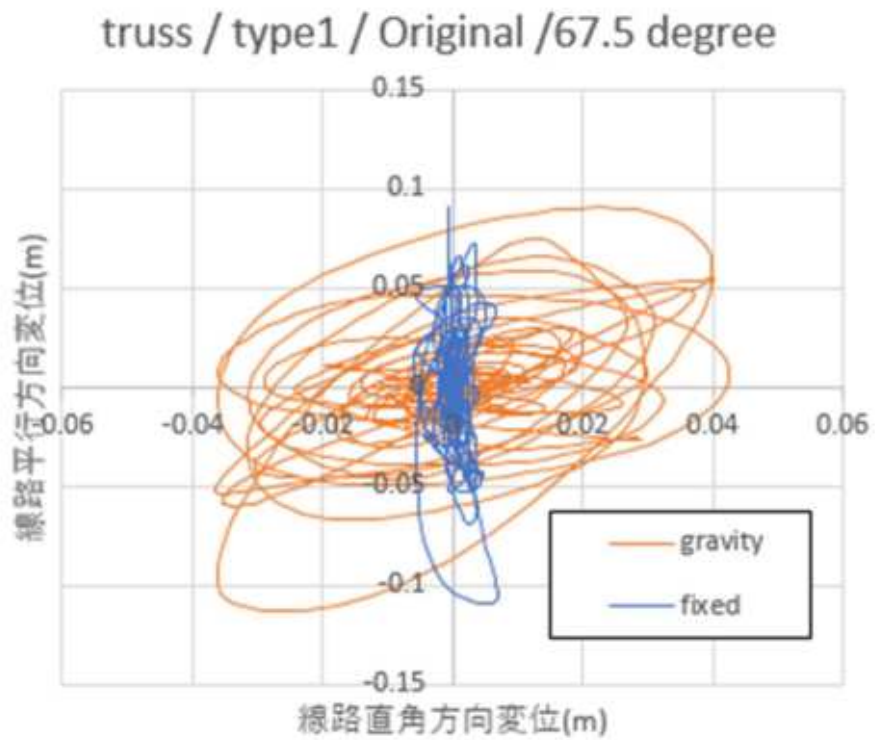


図 3.1.4 1種 568gal/67.5 度

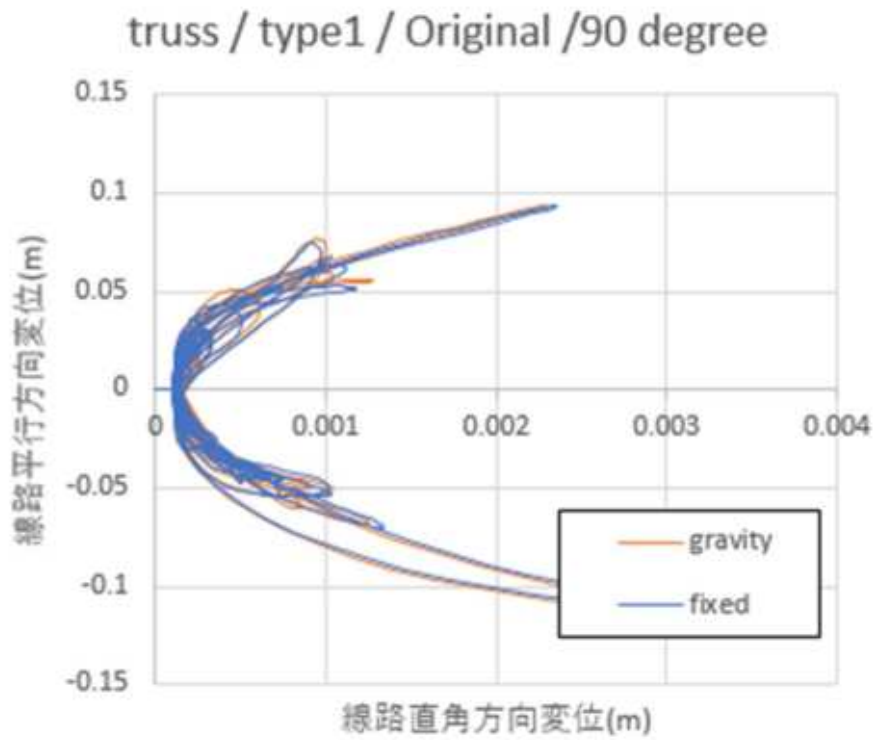


図 3.1.5 1種 568gal/90 度

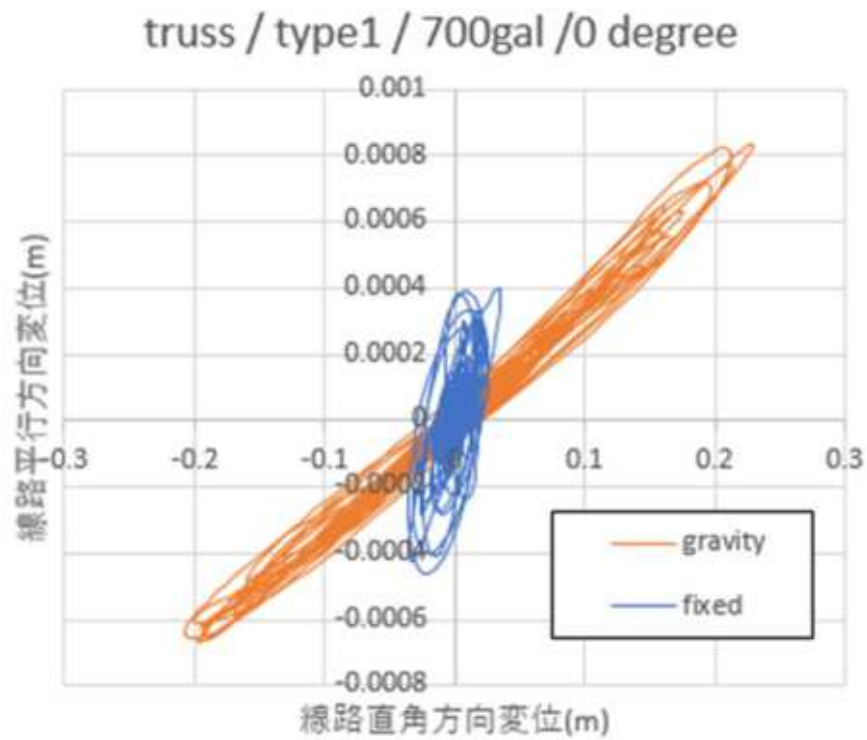


図 3.1.6 1 種 700gal/0 度

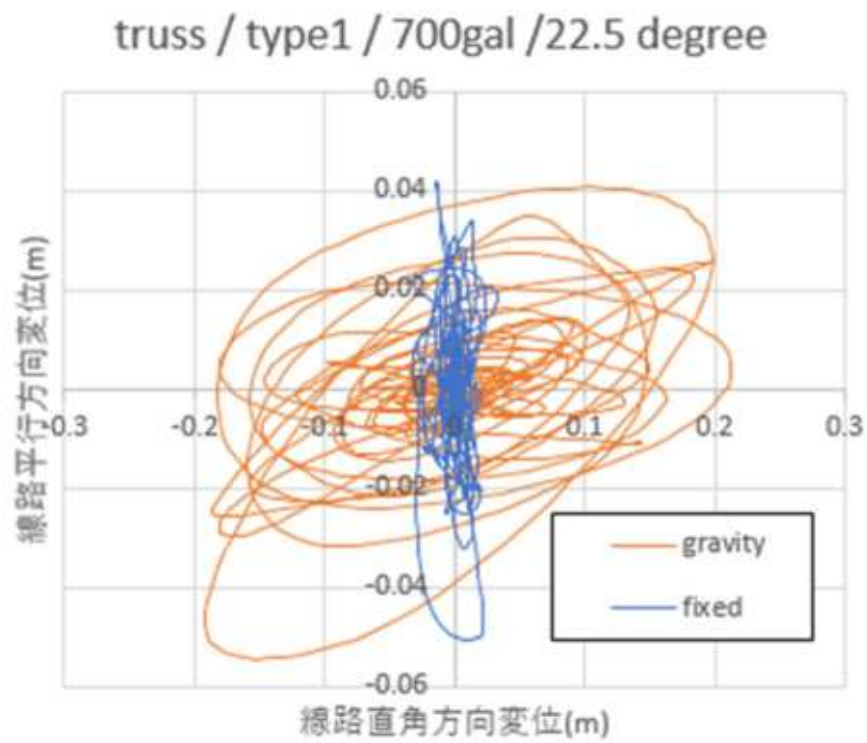


図 3.1.7 1 種 700gal/22.5 度

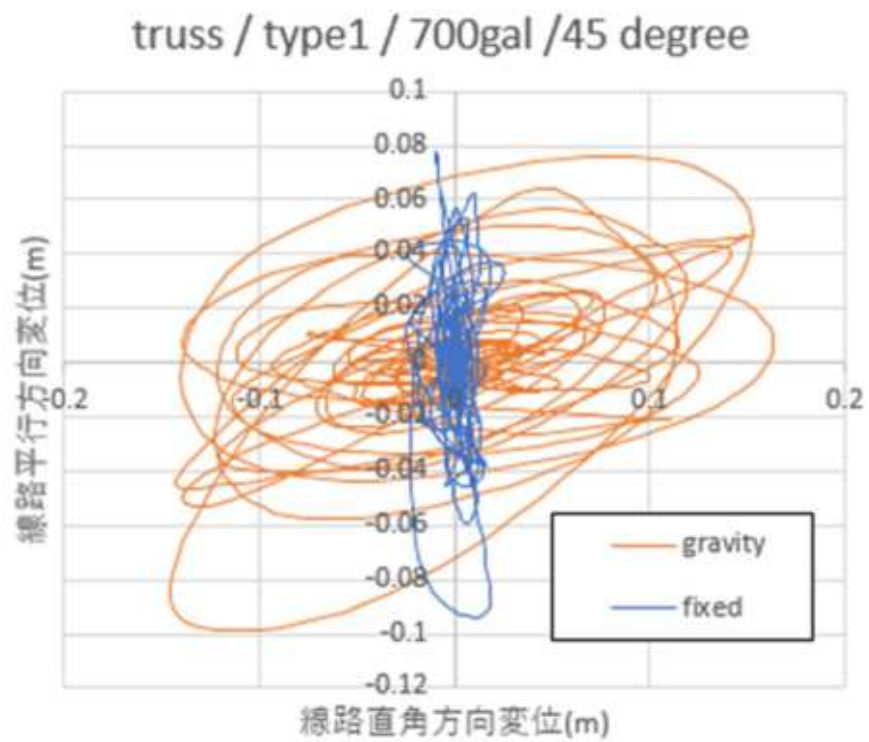


図 3.1.8 1種 700gal/45 度

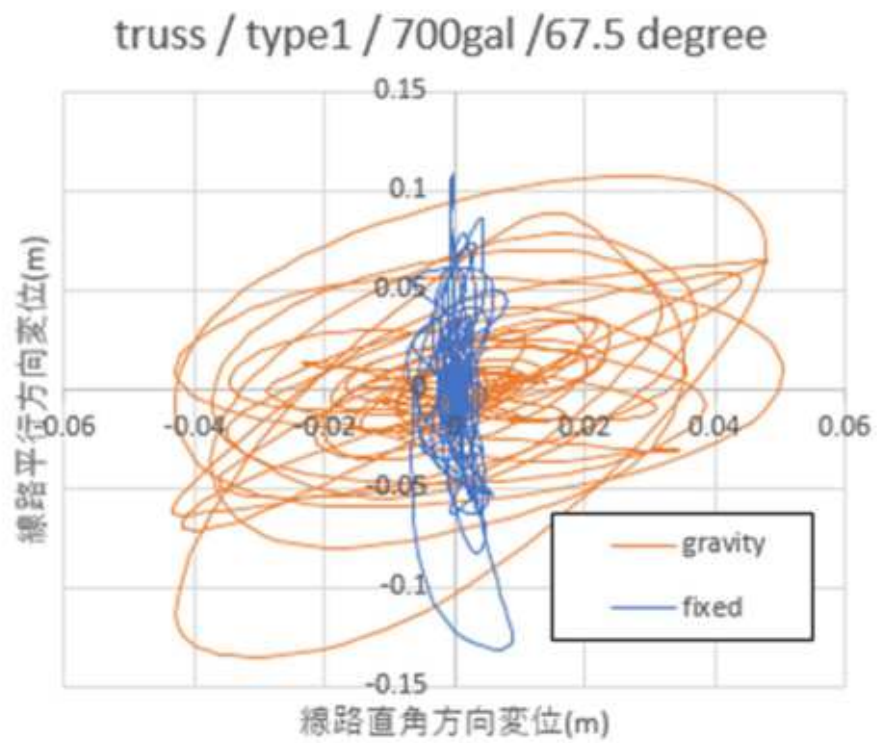


図 3.1.9 1種 700gal/67.5 度

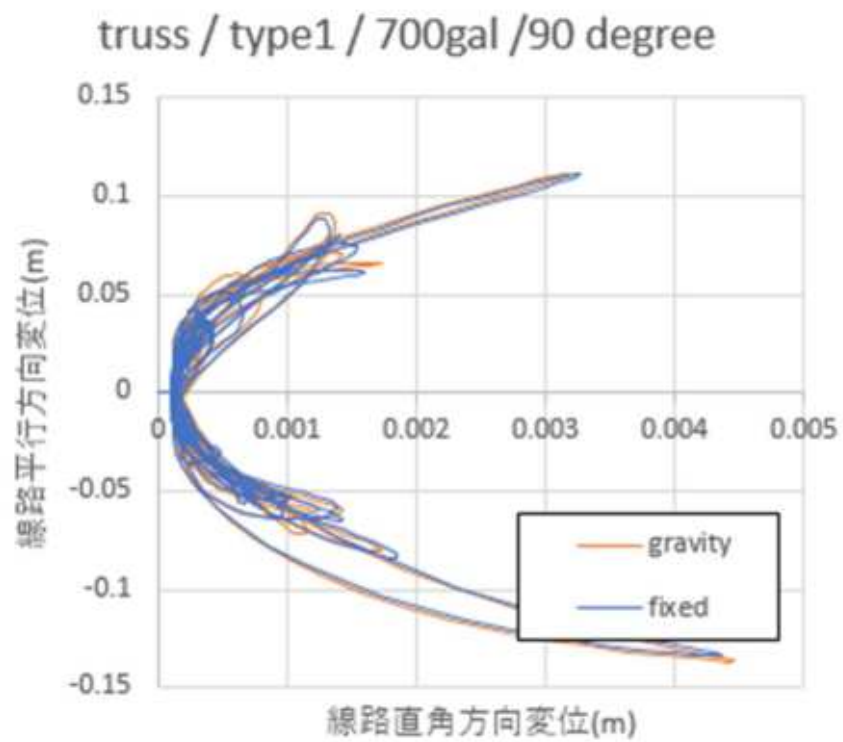


図 3.1.10 1 種 700gal/90 度

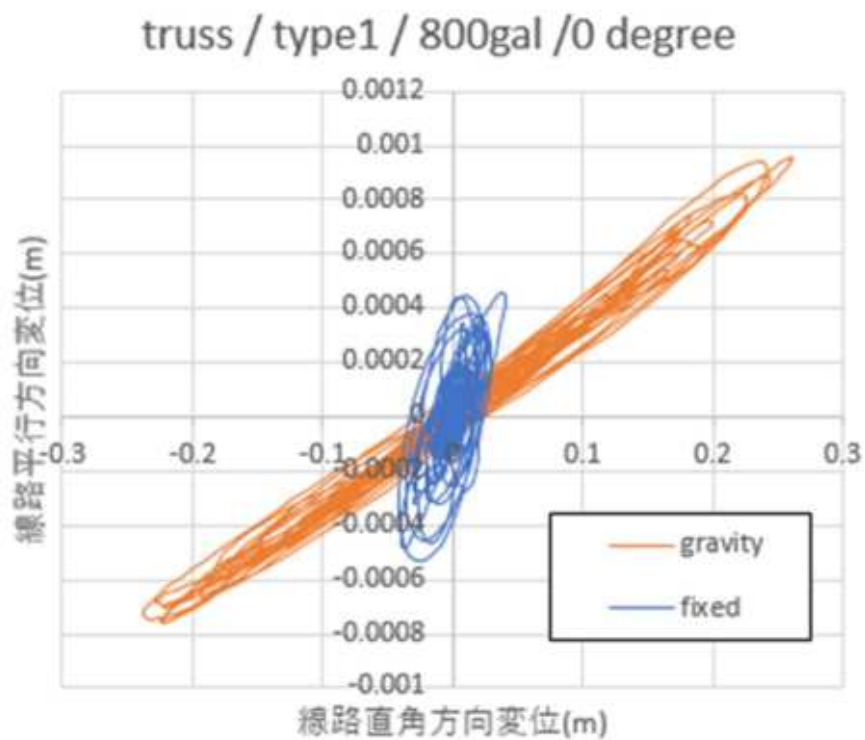


図 3.1.11 1 種 800gal/0 度

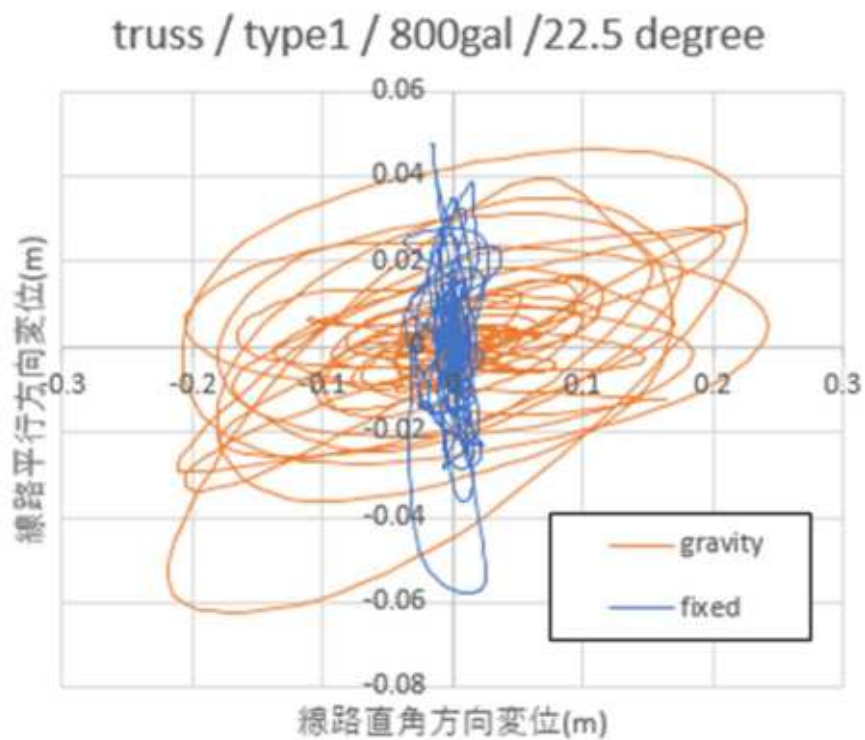


図 3.1.12 1 種 800gal/22.5 度

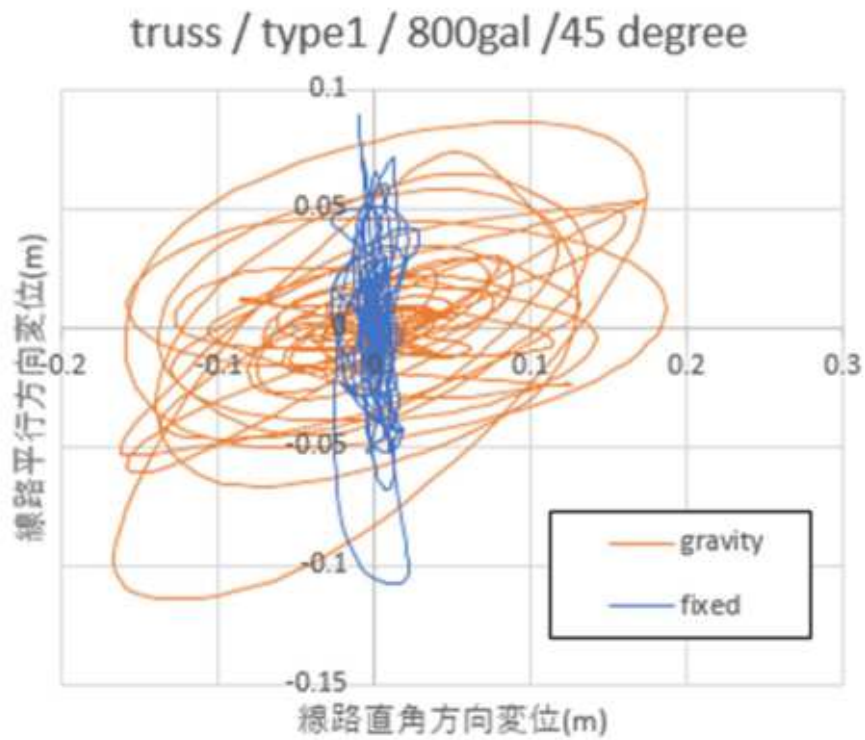


図 3.1.13 1種 800gal/45 度

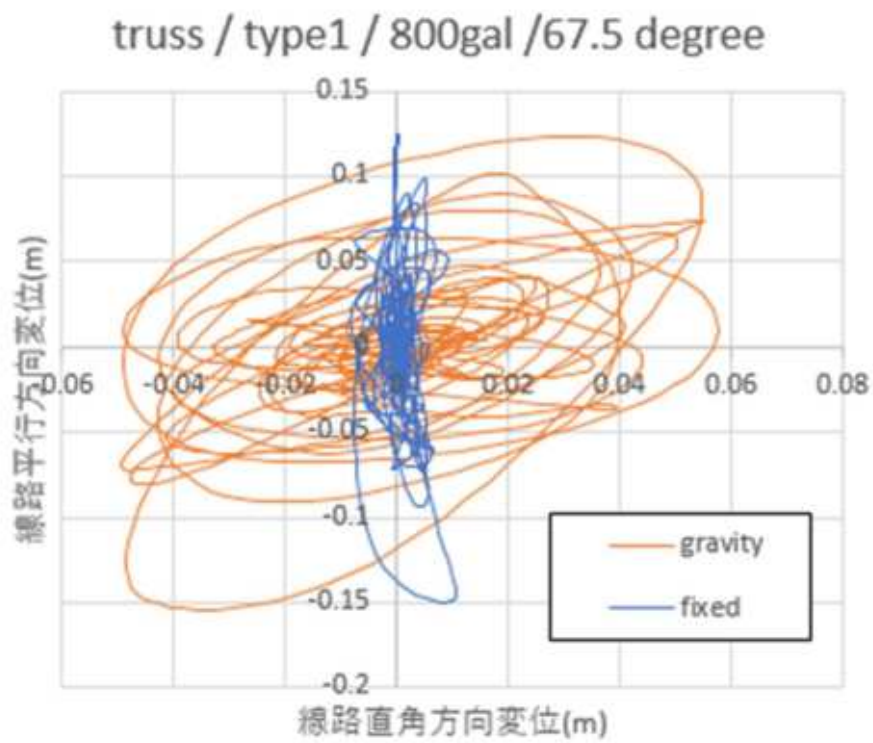


図 3.1.14 1種 800gal/67.5 度

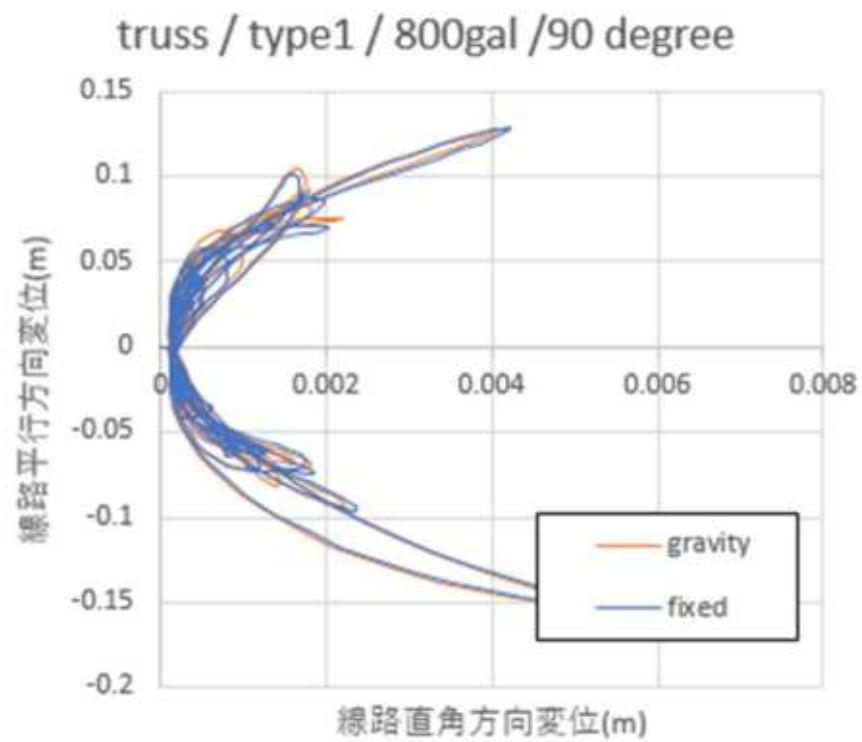


図 3.1.15 1 種 800gal/90 度

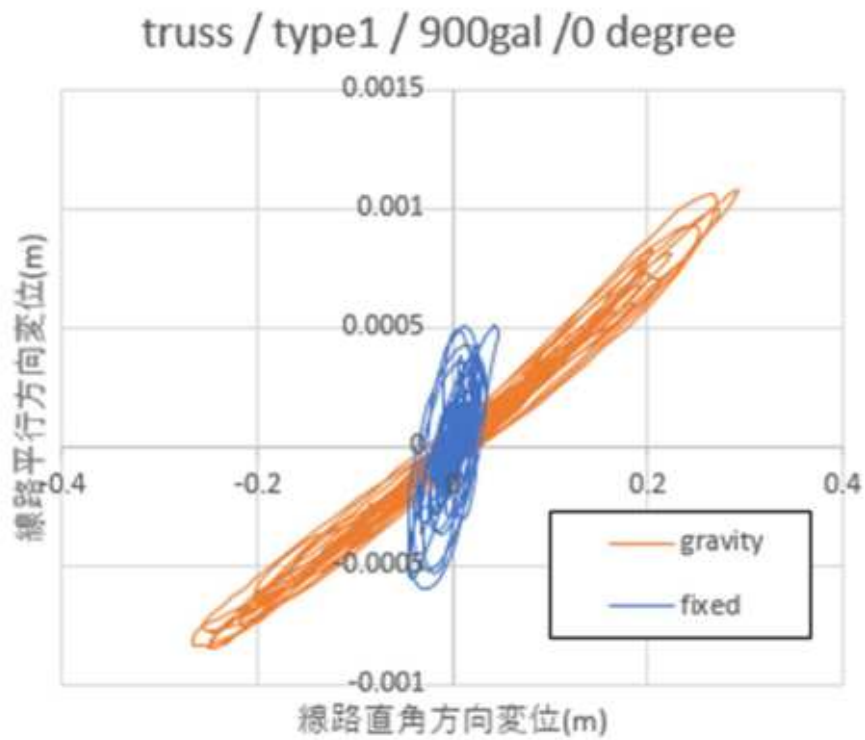


図 3.1.16 1種 900gal/0 度

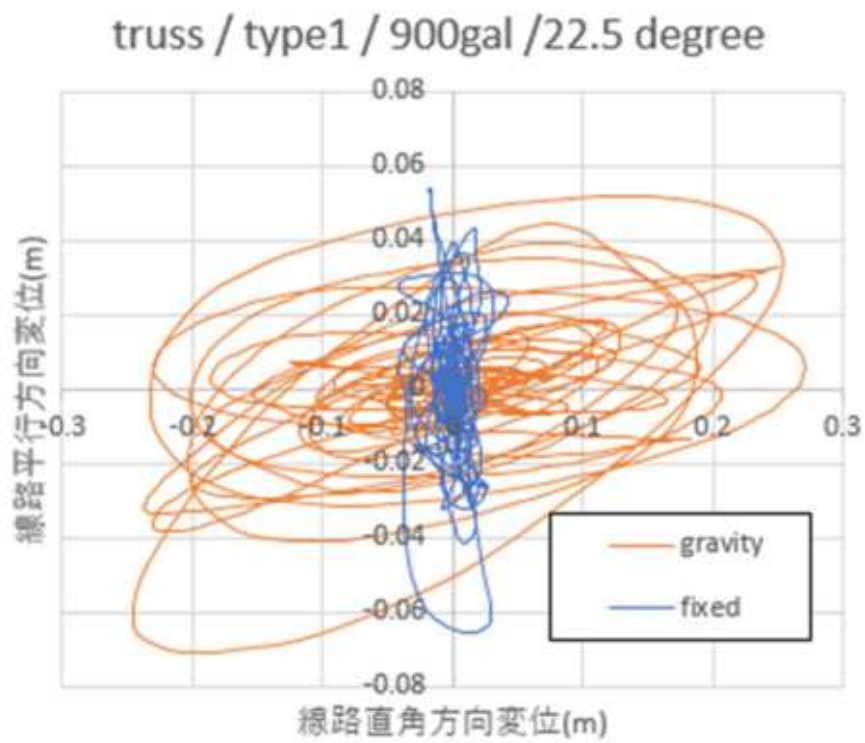


図 3.1.17 1種 900gal/22.5 度

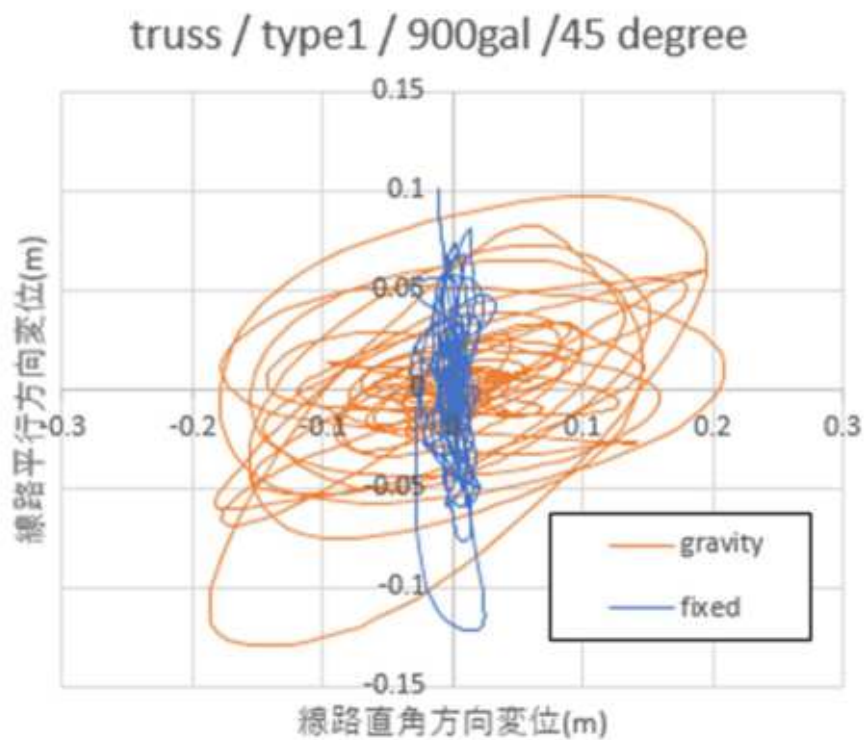


図 3.1.18 1種 900gal/45 度

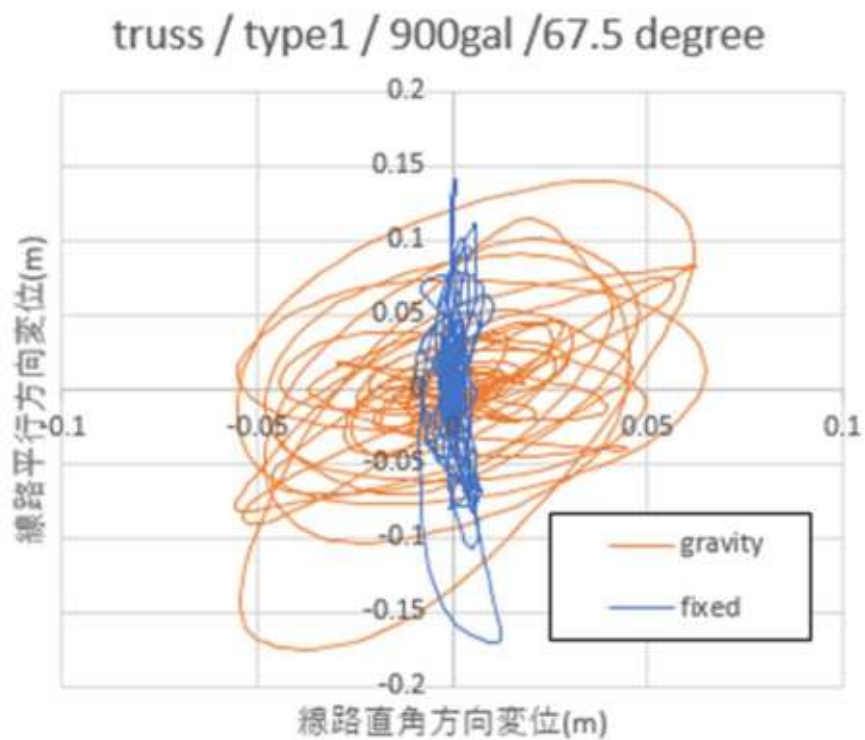


図 3.1.19 1種 900gal/67.5 度

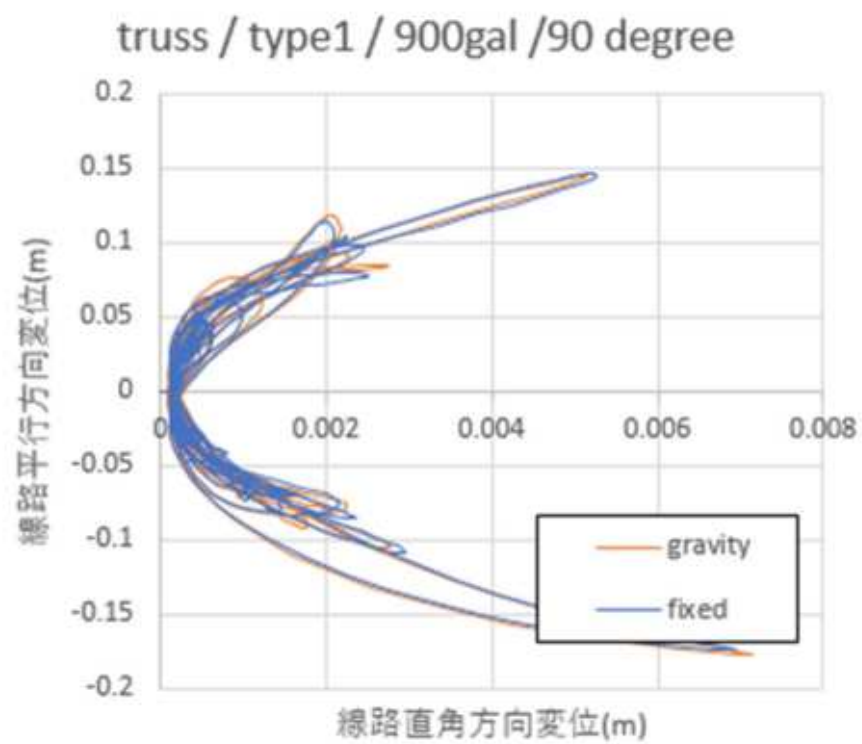


図 3.1.20 1種 900gal/90 度

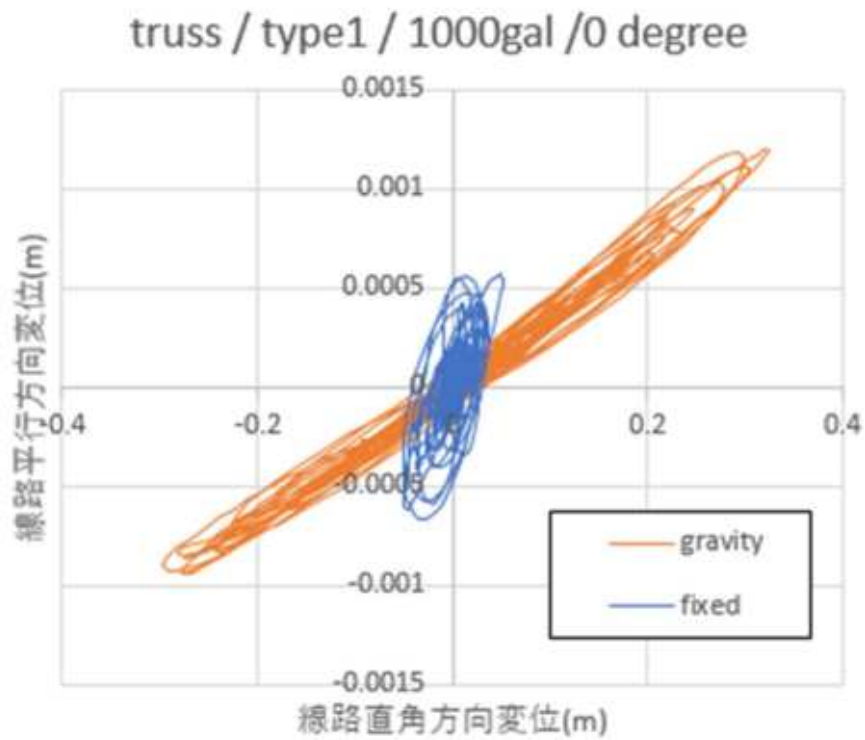


図 3.1.21 1 種 1000gal/0 度

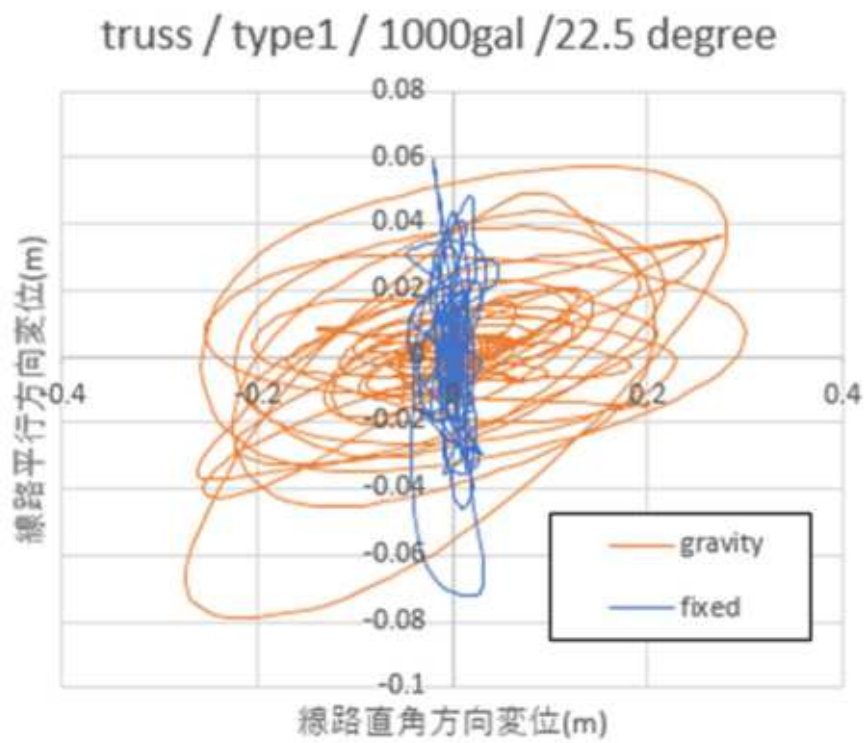


図 3.1.22 1 種 1000gal/22.5 度

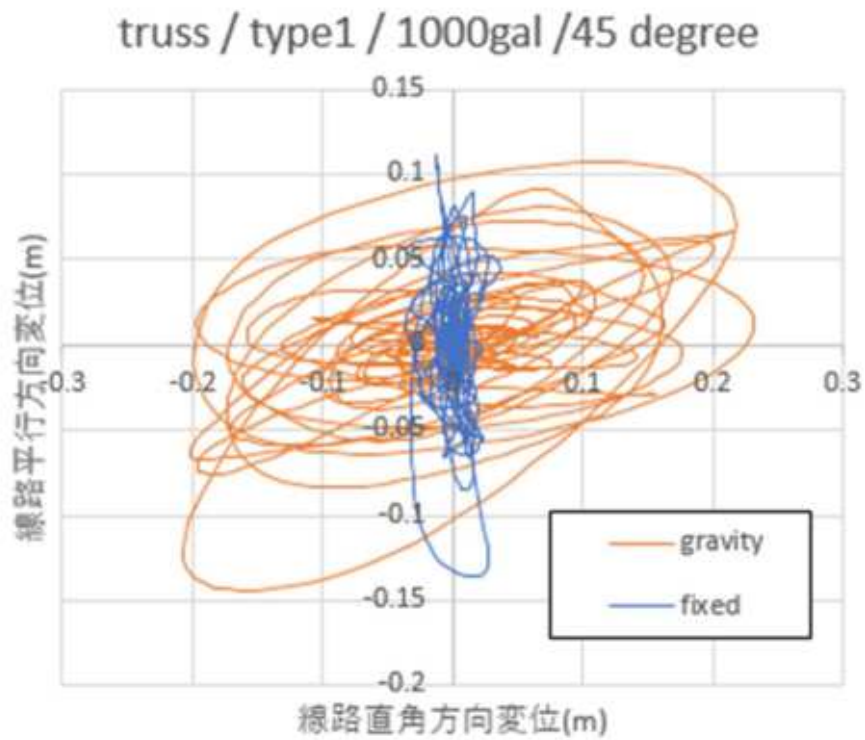


図 3.1.23 1種 900gal/45 度

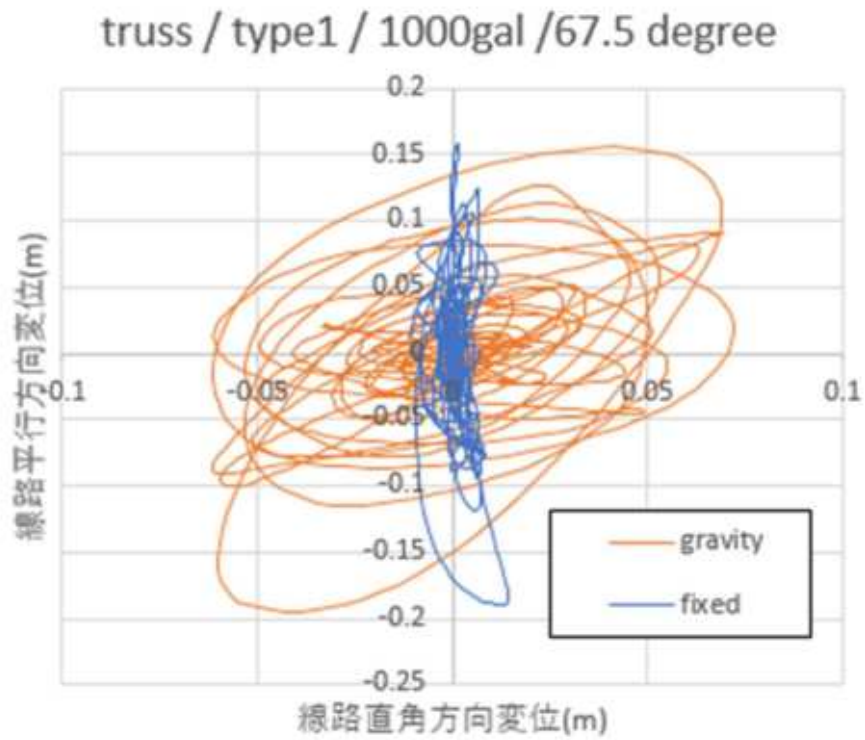


図 3.1.24 1種 1000gal/67.5 度

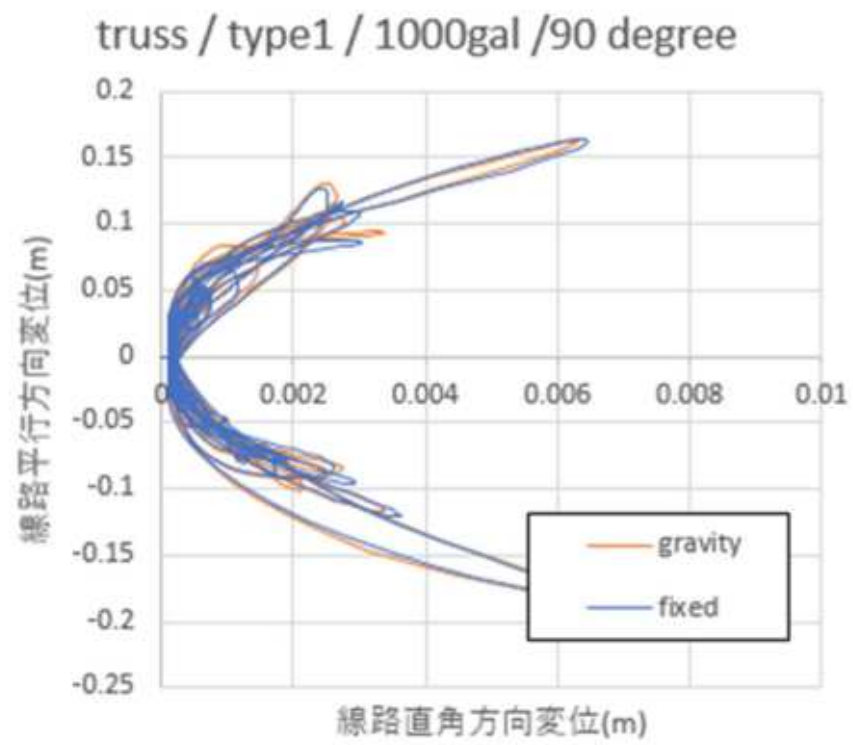


図 3.1.25 1 種 1000gal/90 度

図 3.2.1～3.2.20 にトラスタイプのモデルの格点の 3 種地盤での全変位履歴を示す。グラフの縦軸は線路平行方向、横軸は線路直角方向である。Gravity が提案の重力式、Fixed が従来の固定式の結果である。なお、いずれのケースでも部材の塑性化は生じていない。

これらの図より以下のことがわかる。

(1) 剛性の落ちた線路直角方向については、固定式に対して重力式は大きく変位が増加している。一方で、線路平行方向については、ほぼ同程度である。

(2) 標準的な地震時の重力式の線路直角方向最大変位は 0.15m 強程度で、これは平行方向の発生最大変位の 1.5 倍程度である。

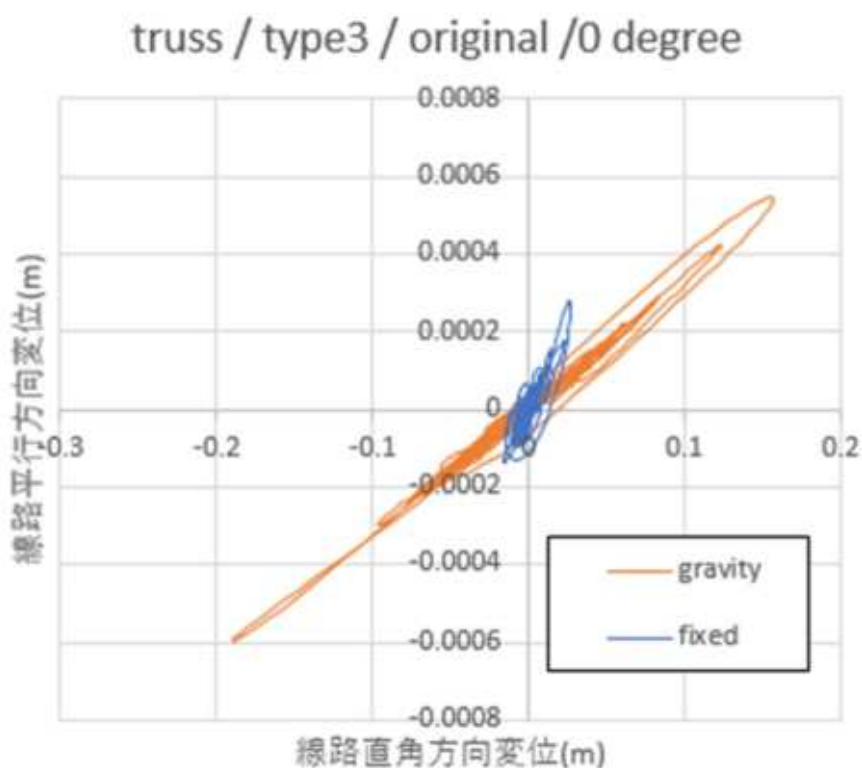


図 3.2.1 3 種 619gal/0 度

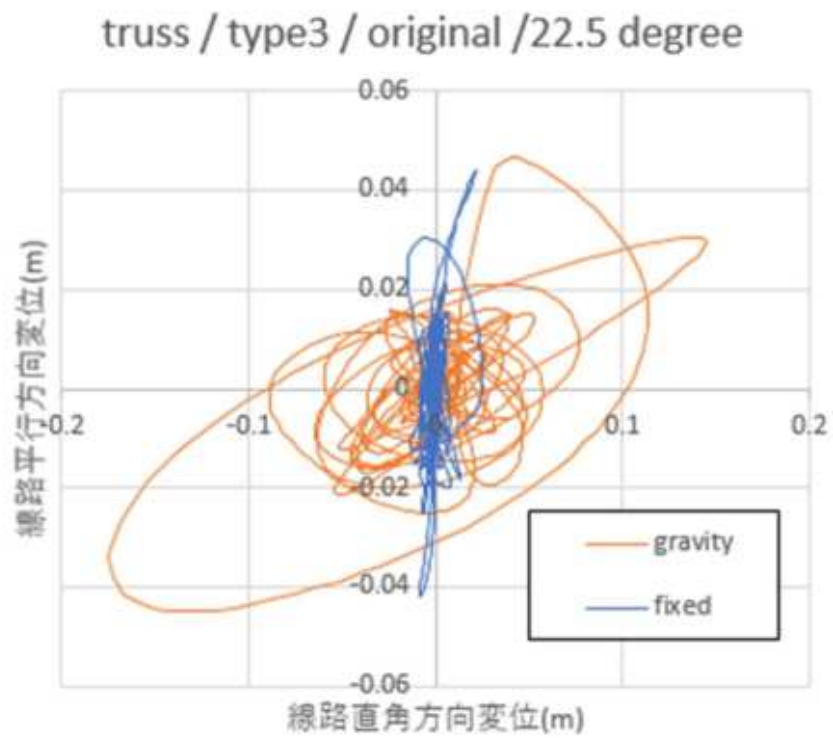


図 3.2.2 3種 619gal/22.5 度

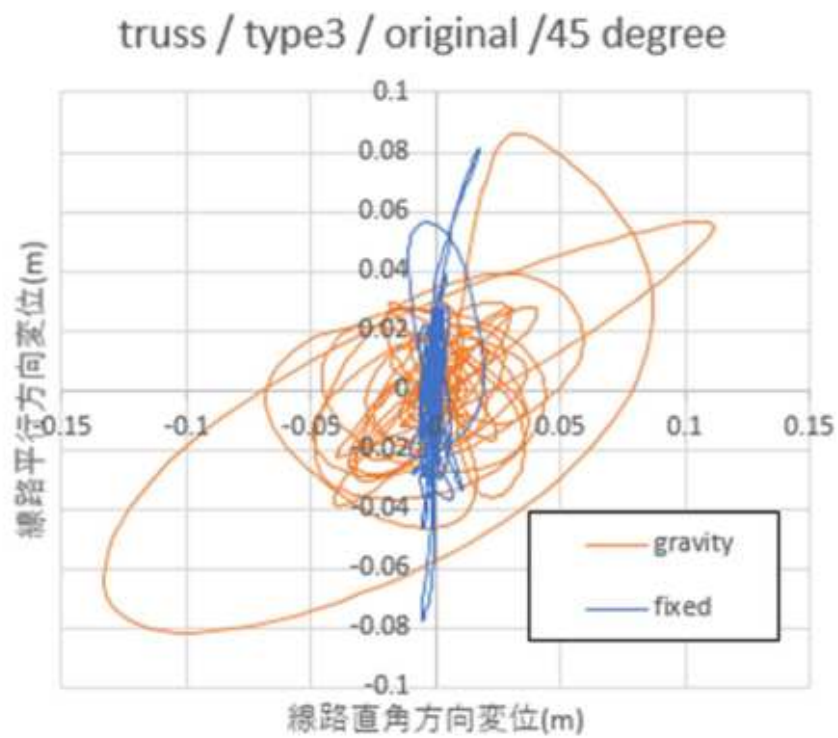


図 3.2.3 3種 619gal/45 度

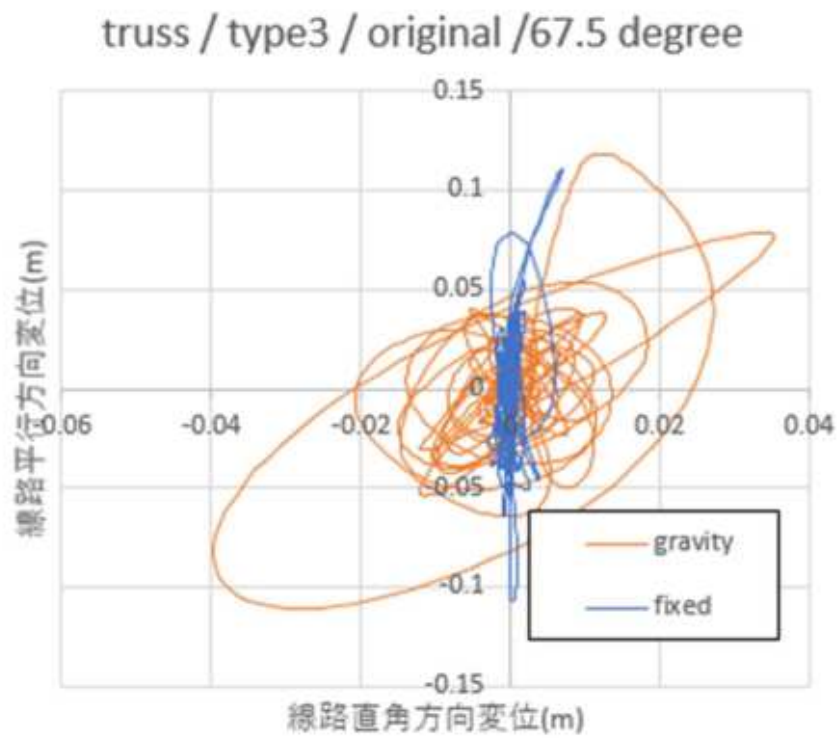


図 3.2.4 3 種 619gal/67.5 度

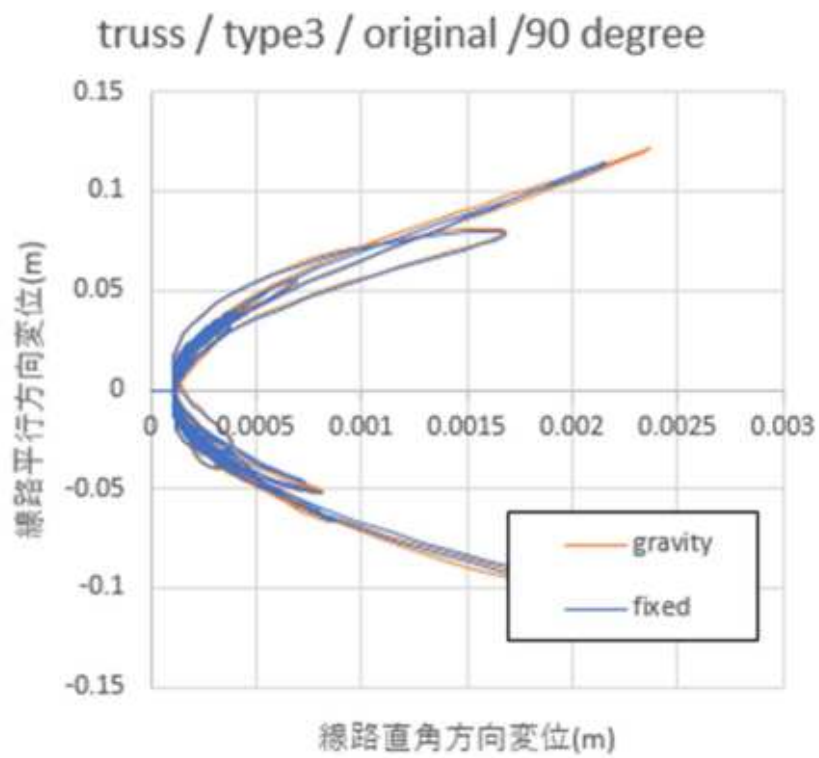


図 3.2.5 3 種 619gal/90 度

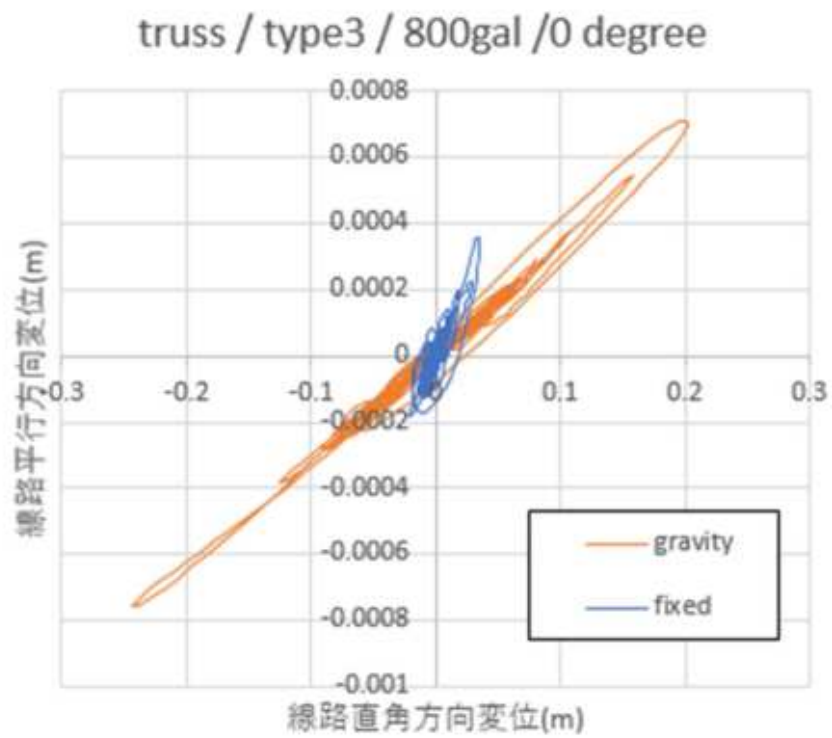


図 3.2.6 3 種 800gal/0 度

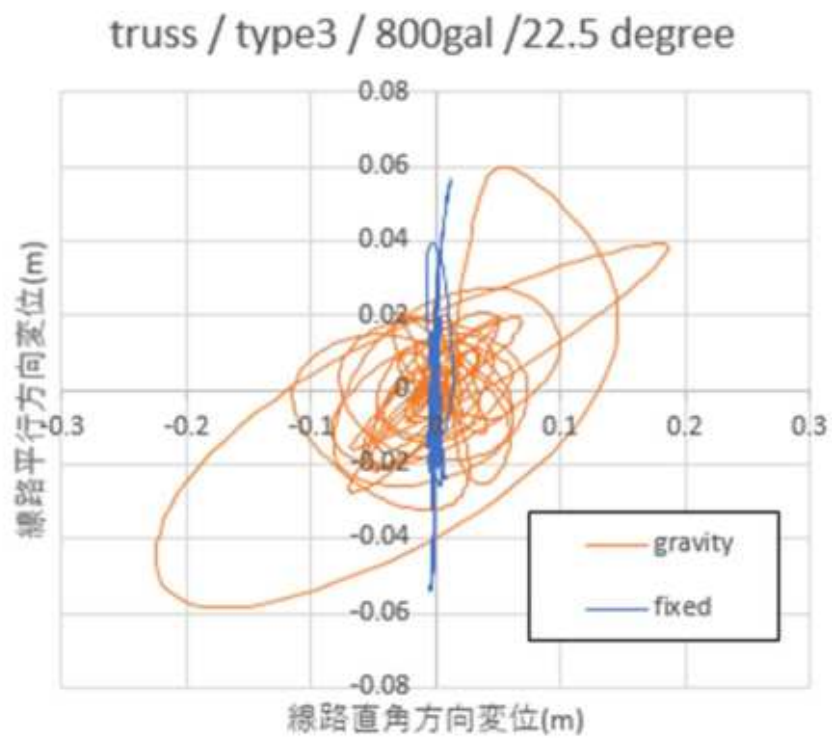


図 3.2.7 3 種 800gal/22.5 度

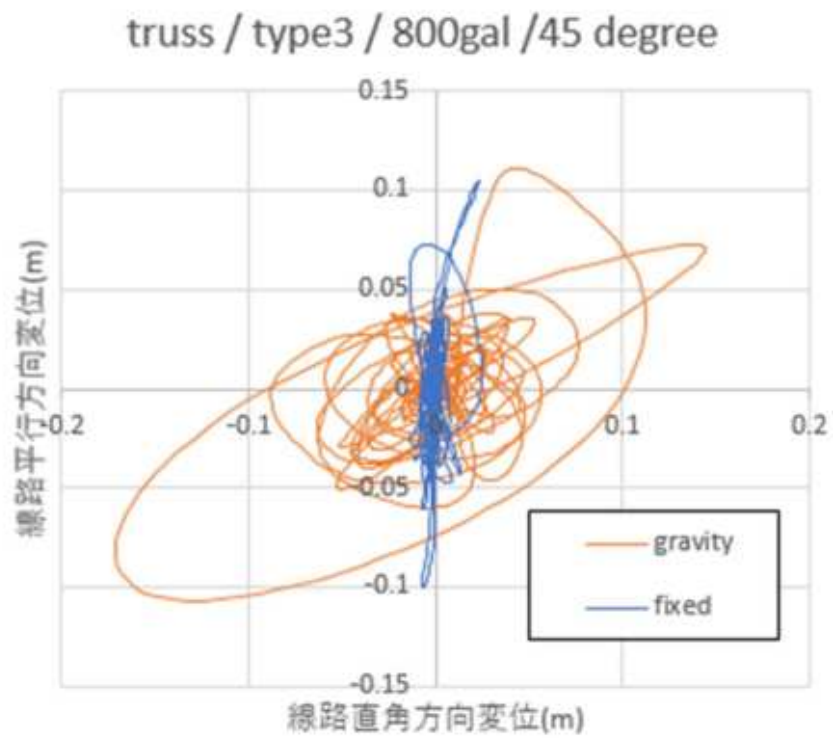


図 3.2.8 3 種 800gal/45 度

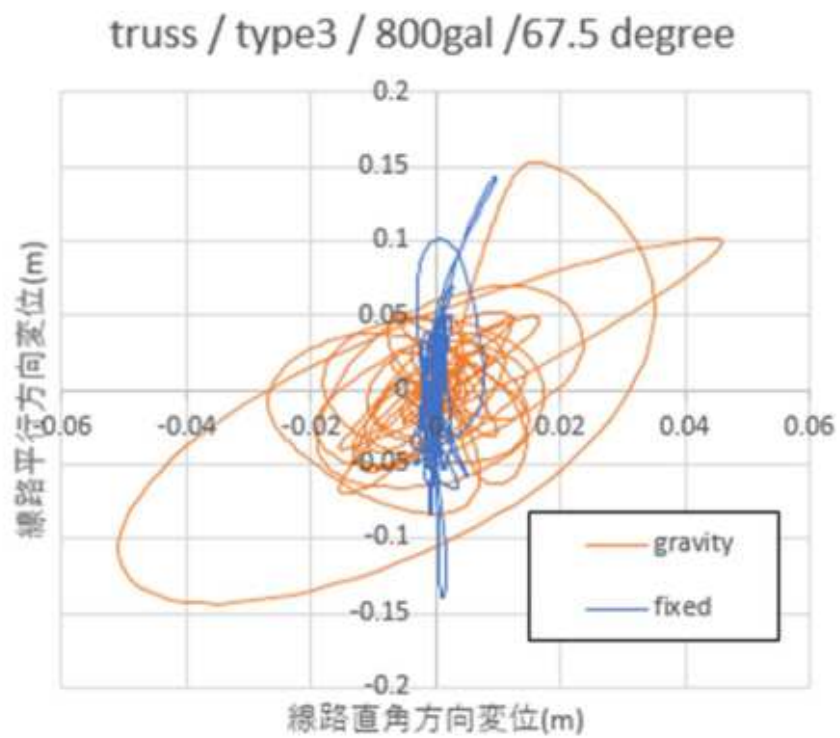


図 3.2.9 3 種 800gal/67.5 度

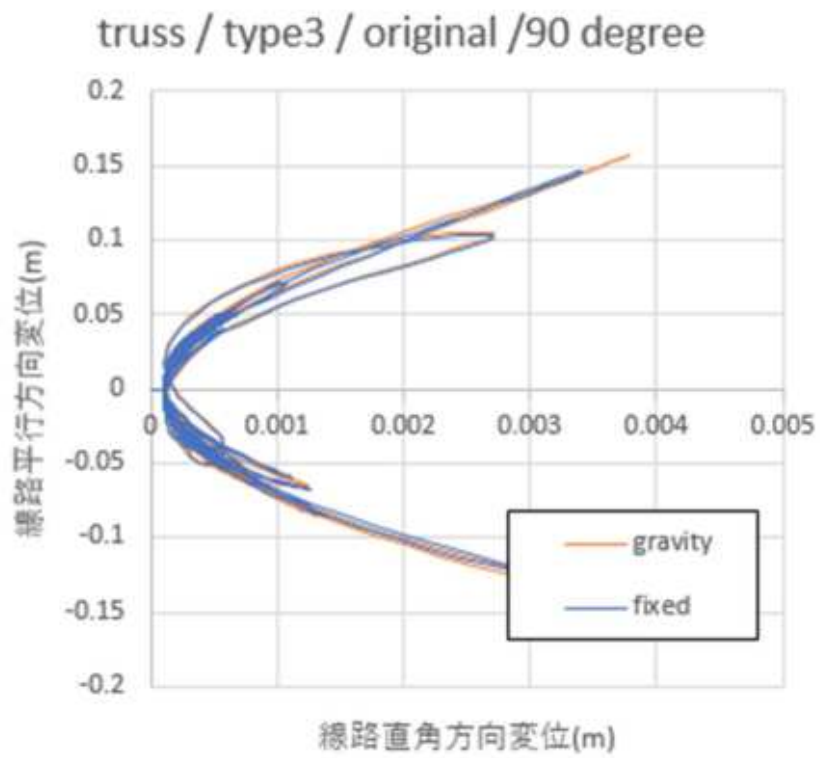


図 3.2.10 3 種 800gal/90 度

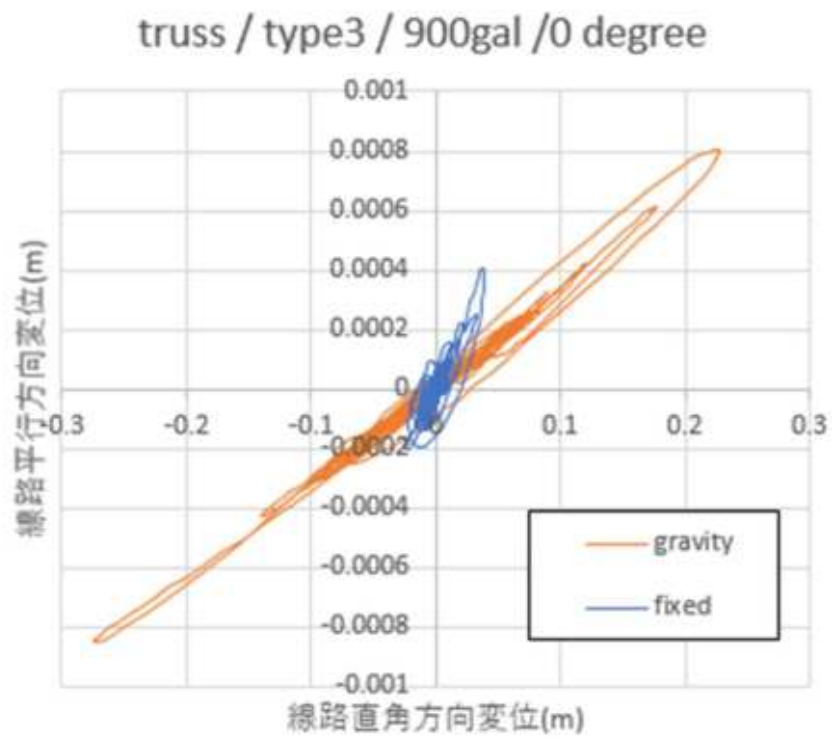


図 3.2.11 3 種 900gal/0 度

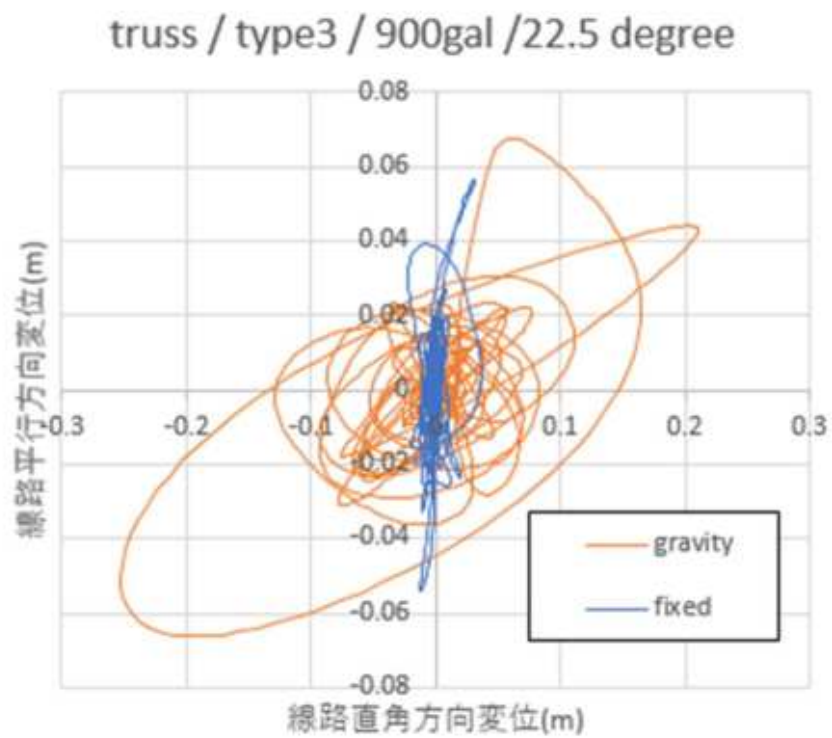


図 3.2.12 3 種 900gal/22.5 度

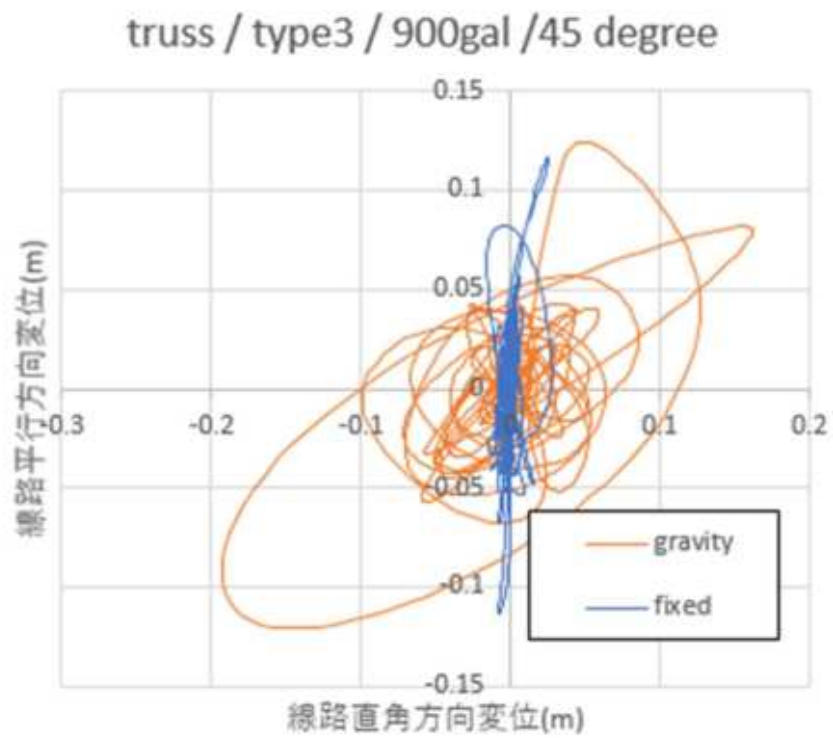


図 3.2.13 3 種 900gal/45 度

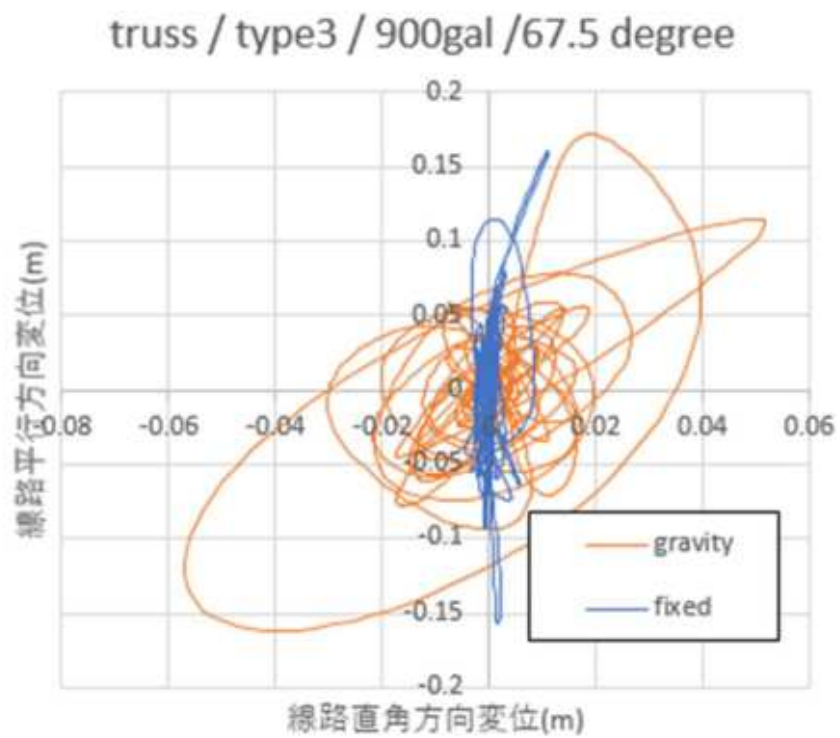


図 3.2.14 3 種 900gal/67.5 度

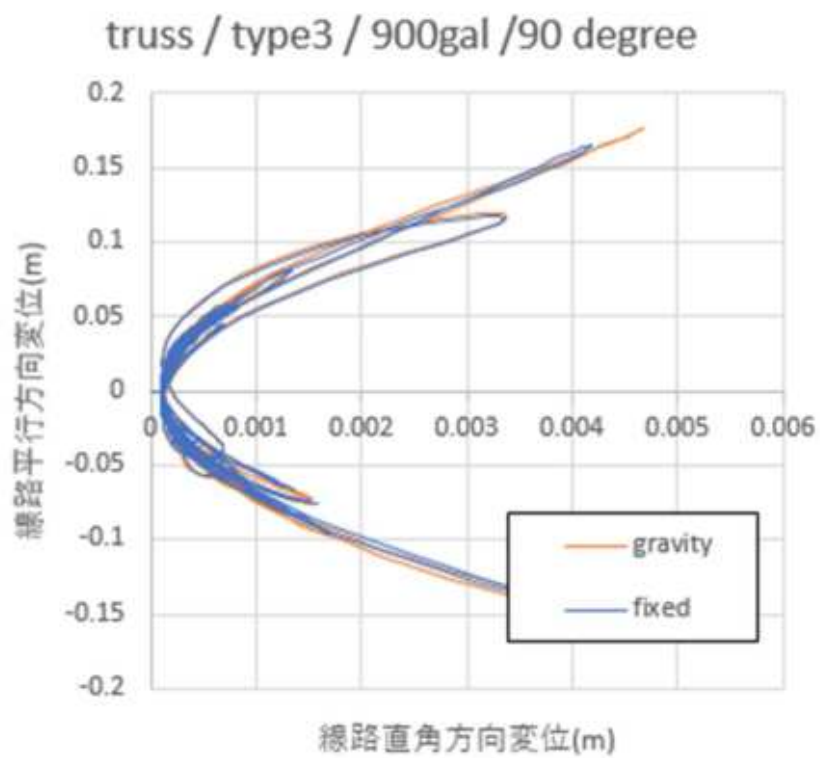


図 3.2.15 3 種 900gal/90 度

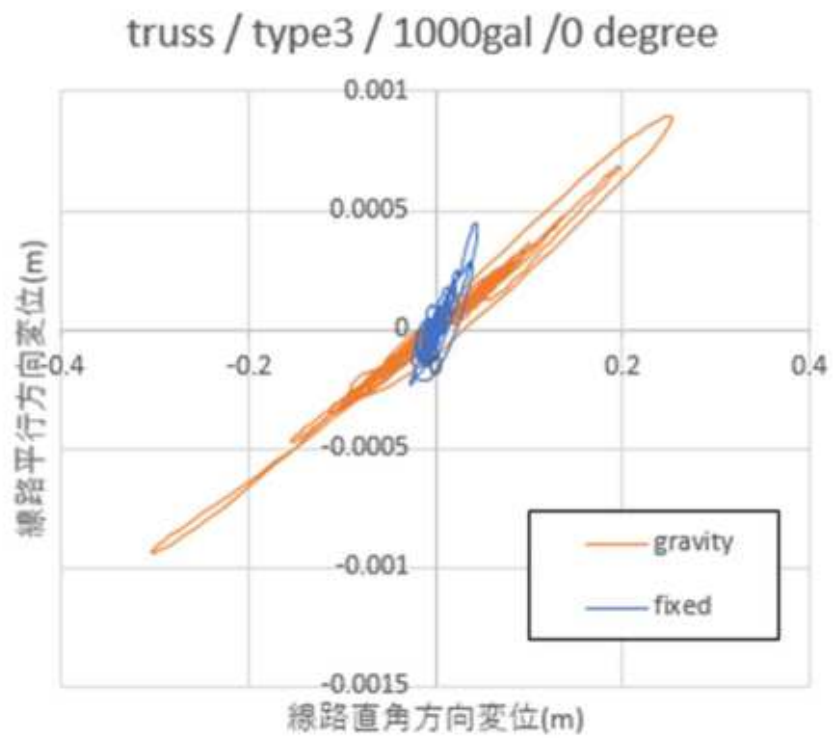


図 3.2.16 3 種 1000gal/0 度

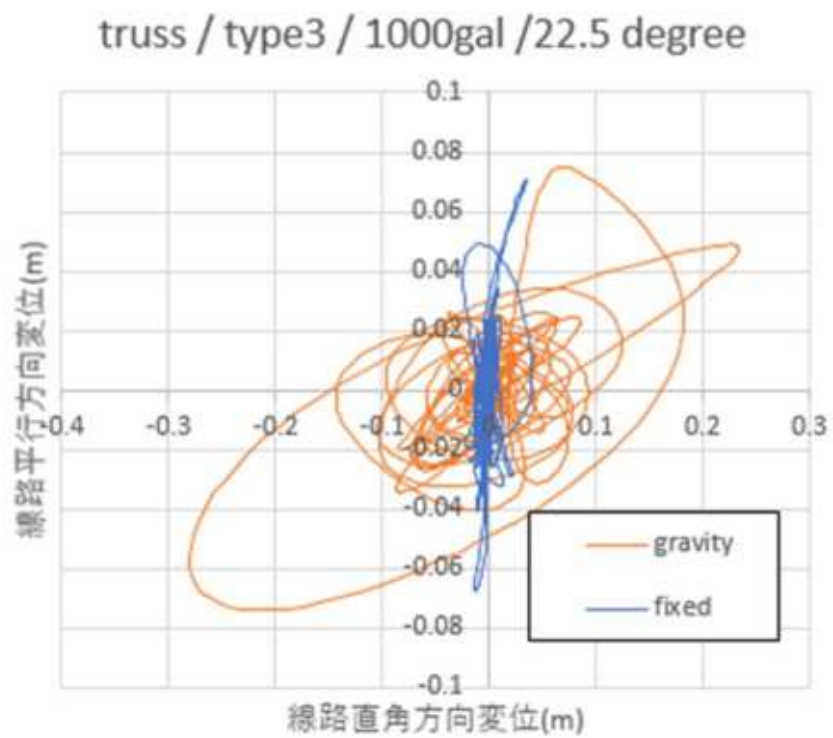


図 3.2.17 3 種 1000gal/22.5 度

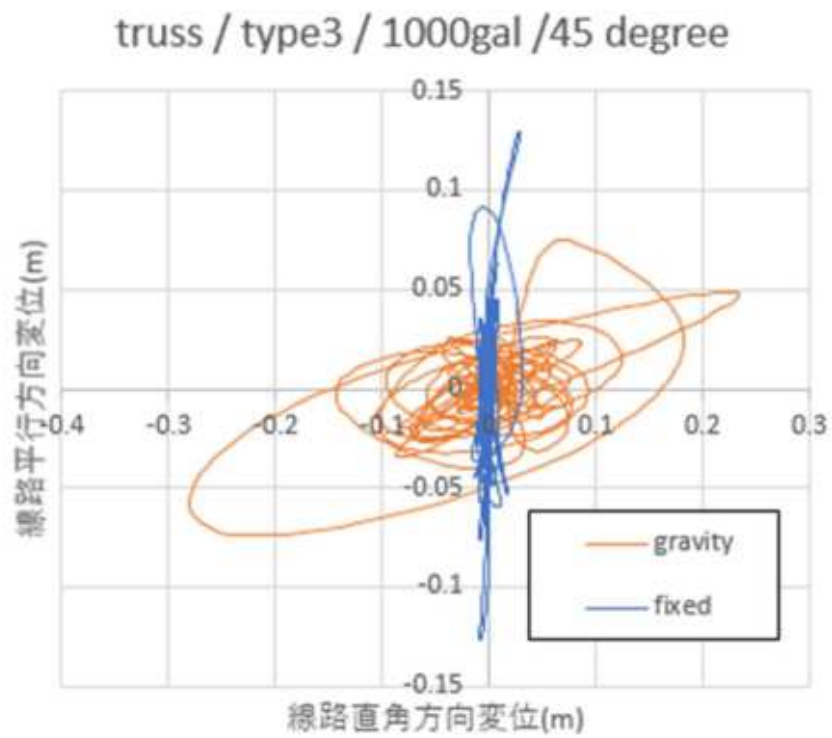


図 3.2.18 3 種 1000gal/45 度

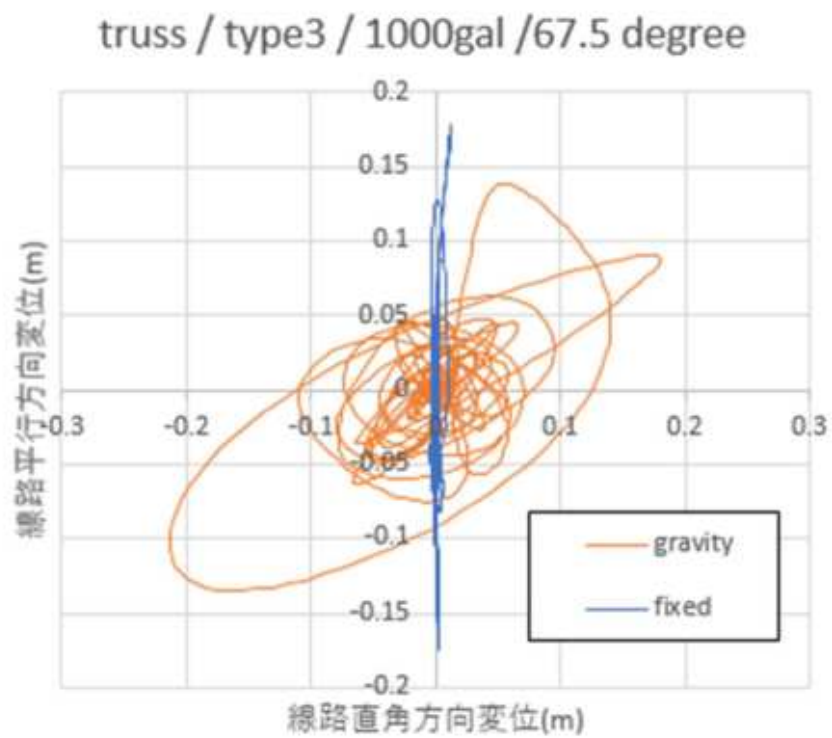


図 3.2.19 3 種 1000gal/67.5 度

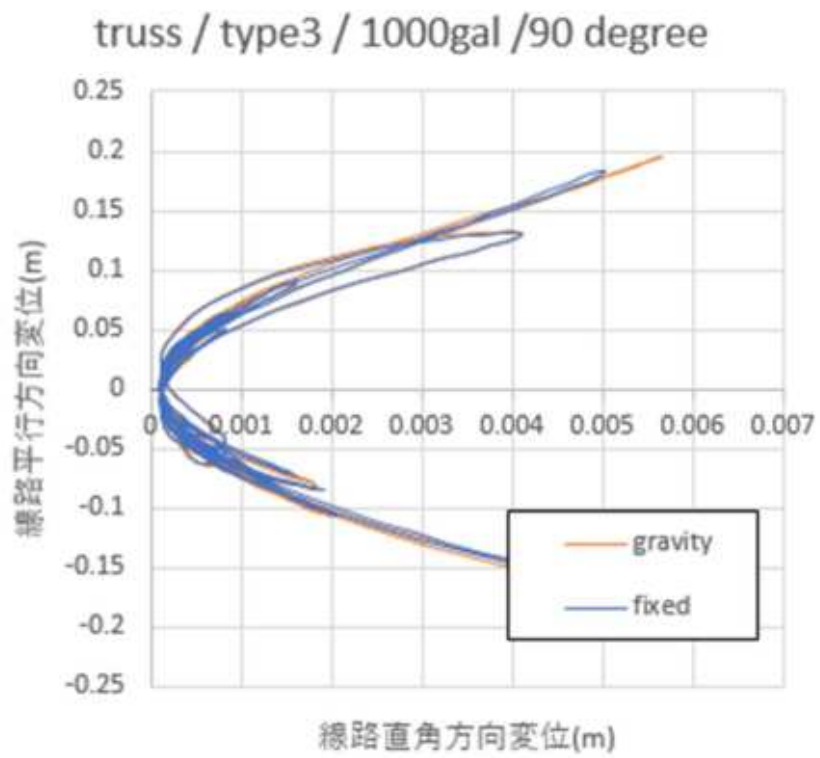


図 3.2.20 3 種 1000gal/90 度

図 3.3.1～3.3.25 にビームタイプのモデルの格点の 1 種地盤での全変位履歴を示す。グラフの縦軸は線路平行方向、横軸は線路直角方向である。 Gravity が提案の重力式、Fixed が従来の固定式の結果である。なお、いずれのケースでも部材の塑性化は生じていない。

これらの図より以下のことがわかる。

(1) 剛性の落ちた線路直角方向については、固定式に対して重力式は大きく変位が増加している。一方で、線路平行方向については、ほぼ同程度である。

(2) 標準的な地震時の重力式の線路直角方向最大変位は 0.25m 程度で、これは平行方向の発生最大変位 0.15m 程度の 1.5 倍程度である。

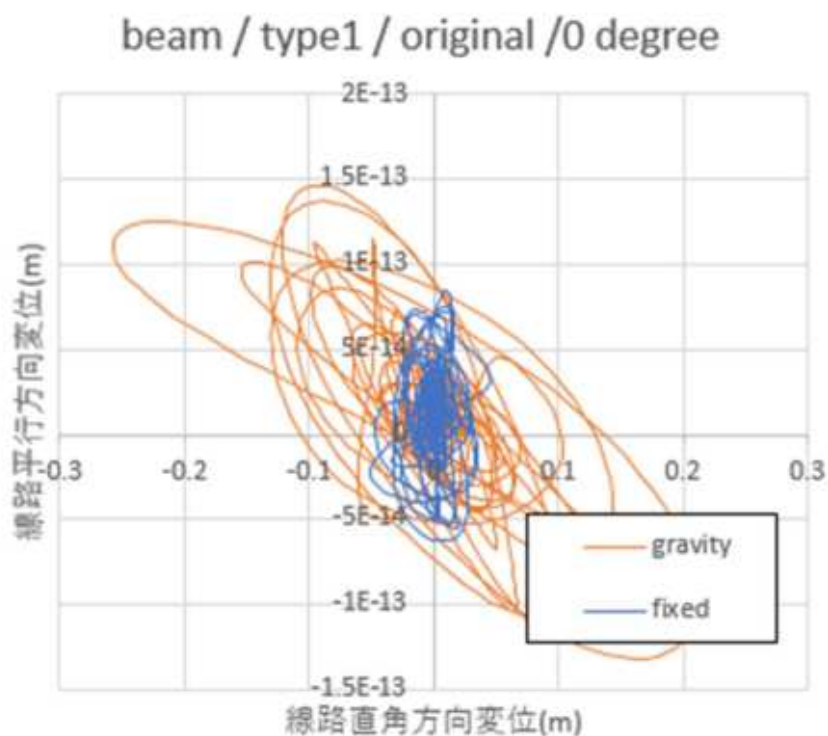


図 3.3.1 1 種 578gal/0 度

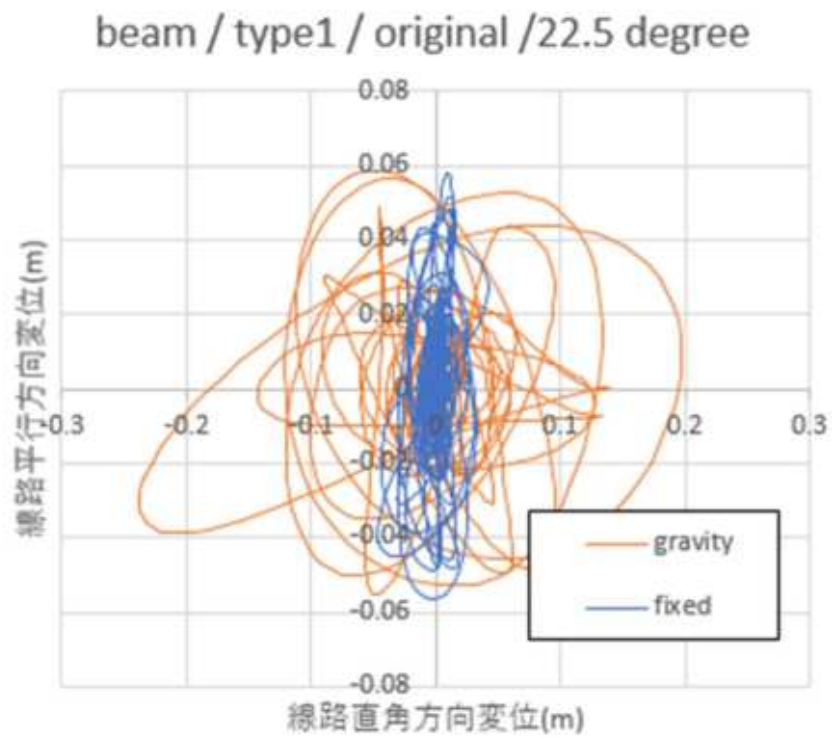


図 3.3.2 1種 568gal/22.5 度

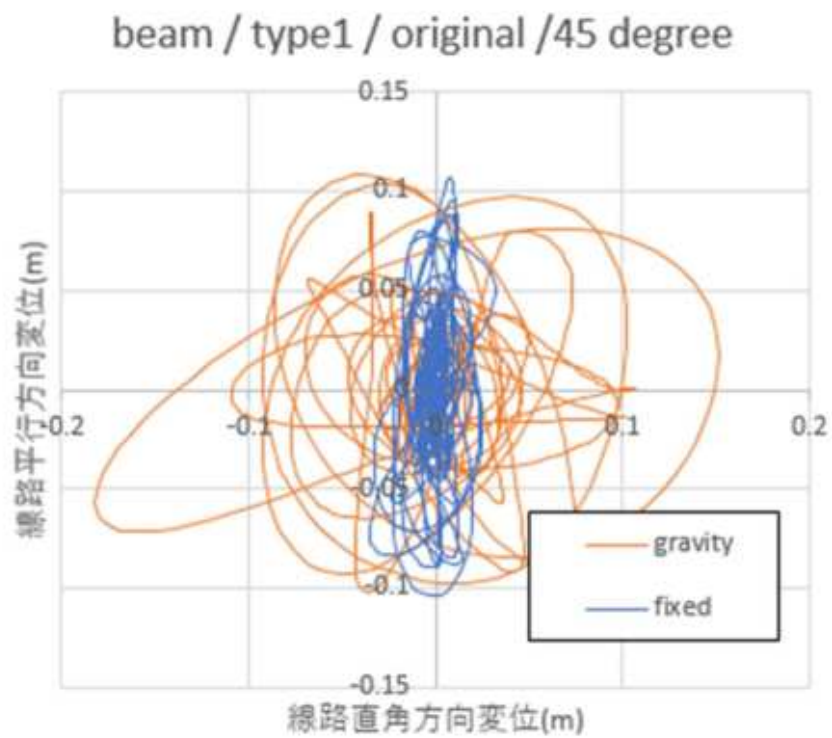


図 3.3.3 1種 568gal/45 度

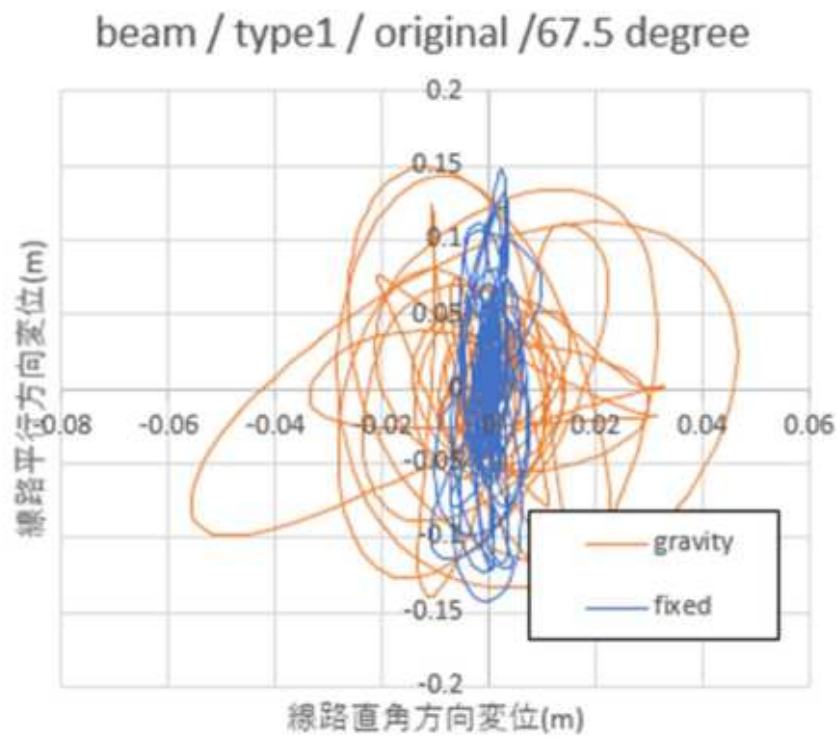


図 3.3.4 1 種 568gal/67.5 度

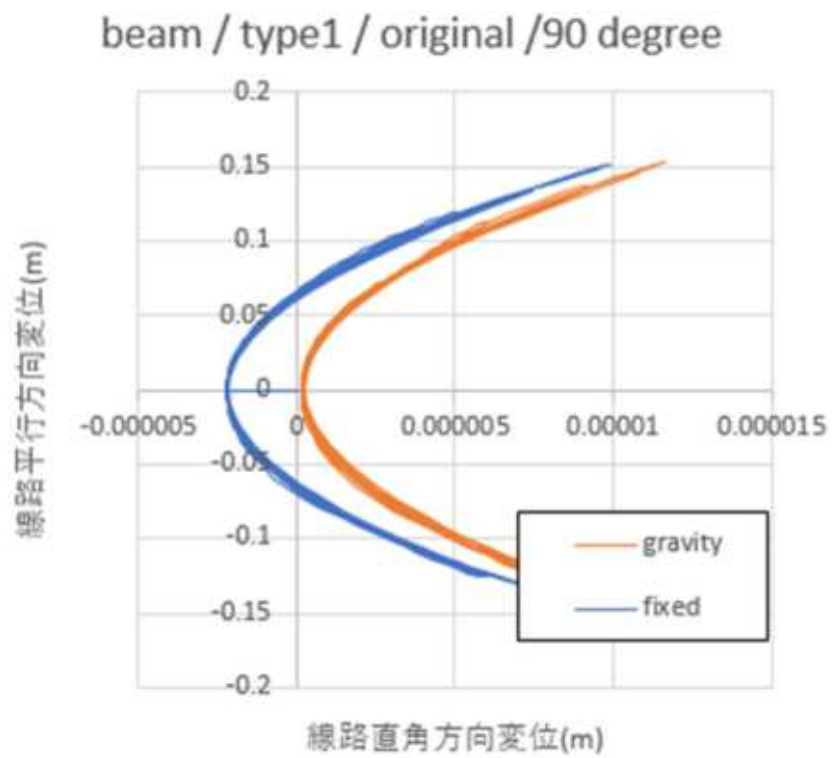


図 3.3.5 1 種 568gal/90 度

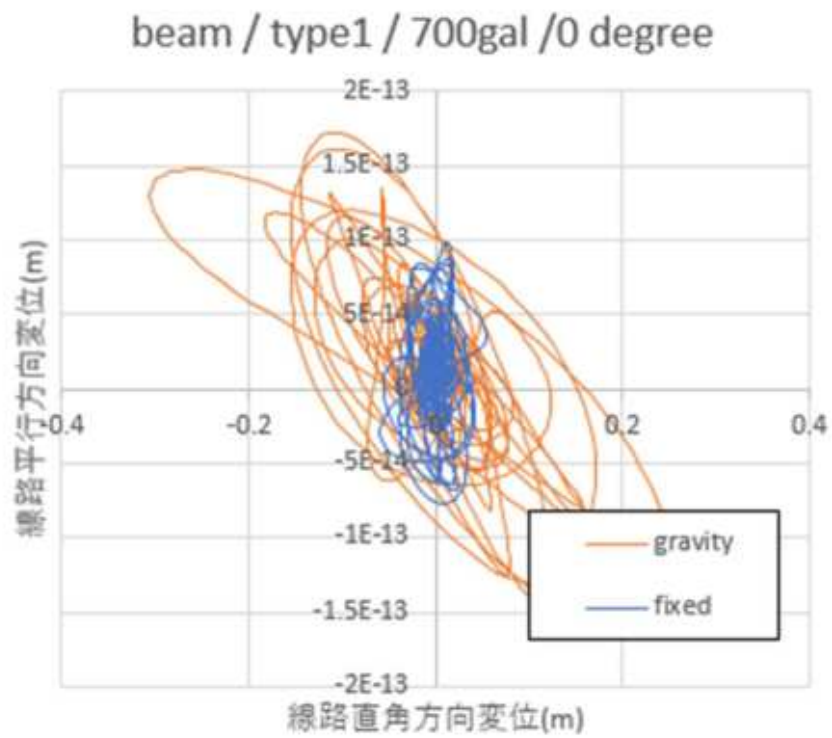


図 3.3.6 1 種 700gal/0 度

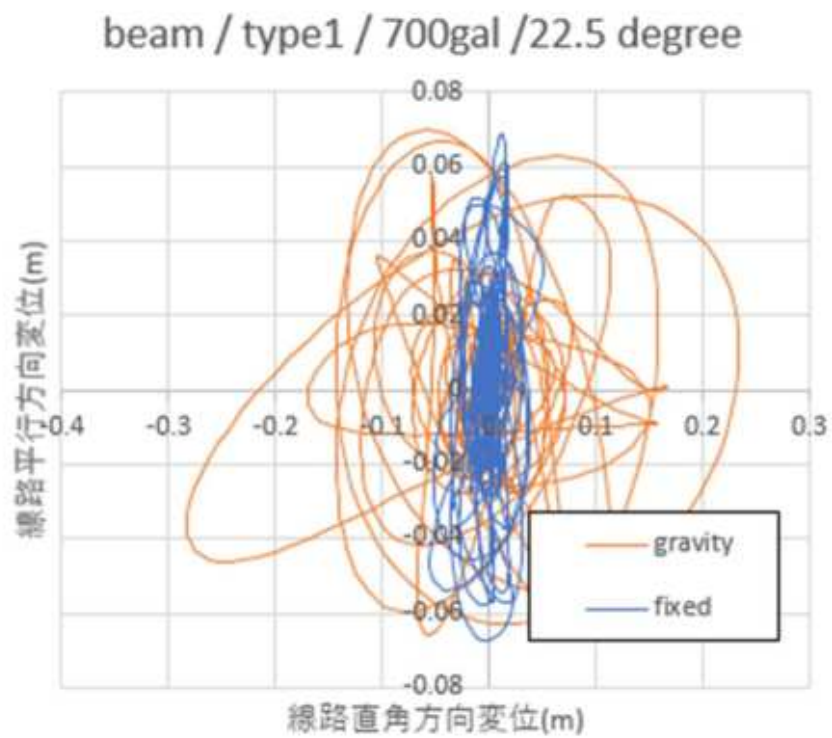


図 3.3.7 1 種 700gal/22.5 度

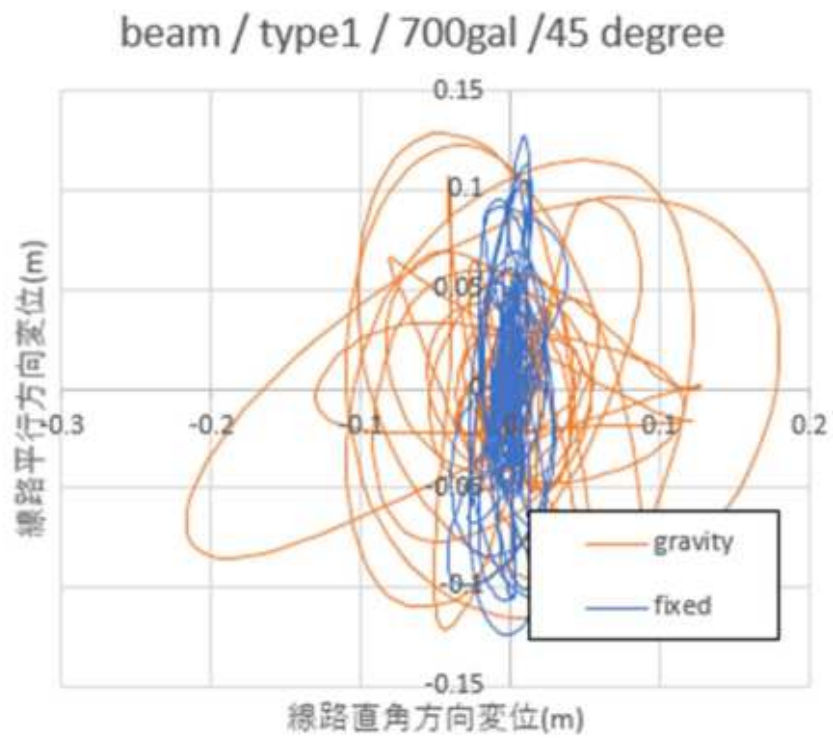


図 3.3.8 1 種 700gal/45 度

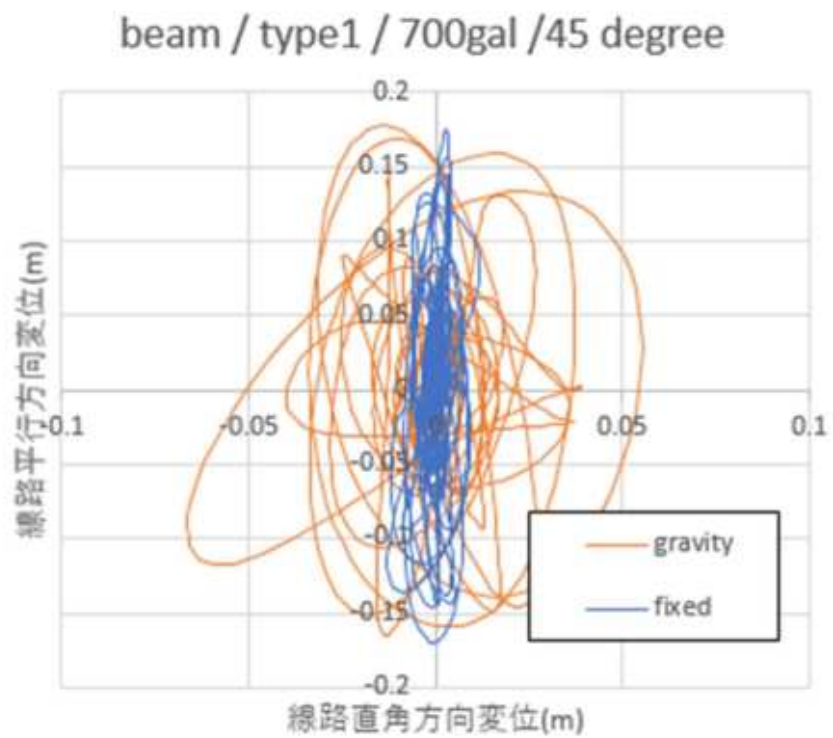


図 3.3.9 1 種 700gal/67.5 度

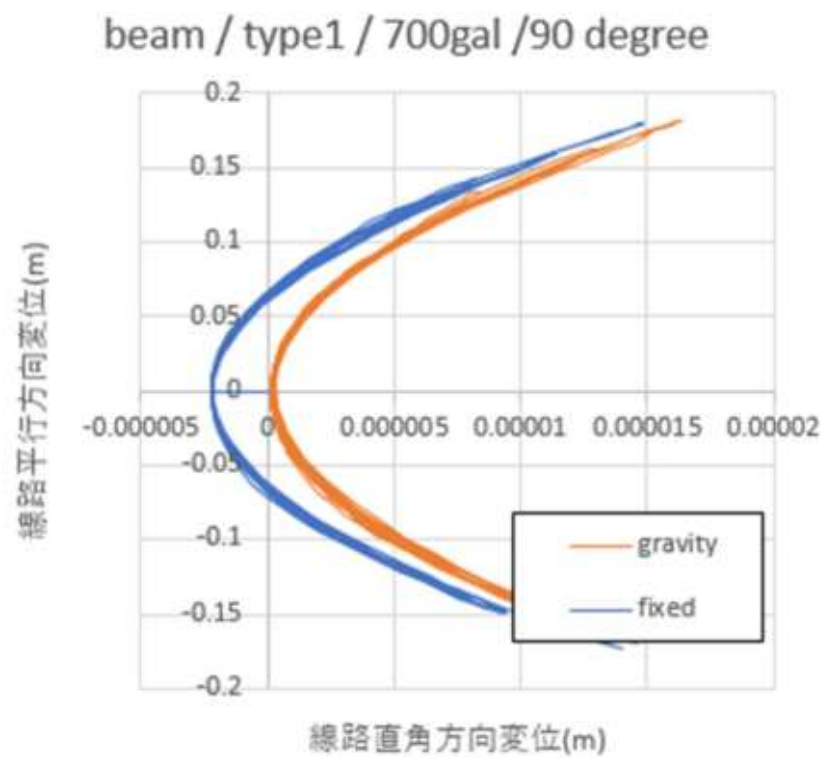


図 3.3.10 1 種 700gal/90 度

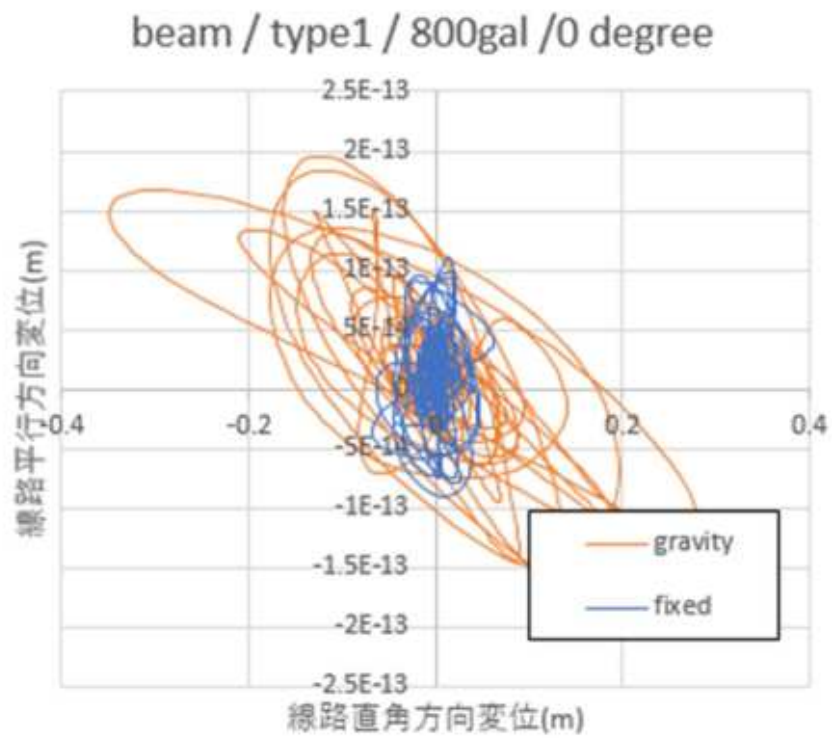


図 3.3.11 1種 800gal/0 度

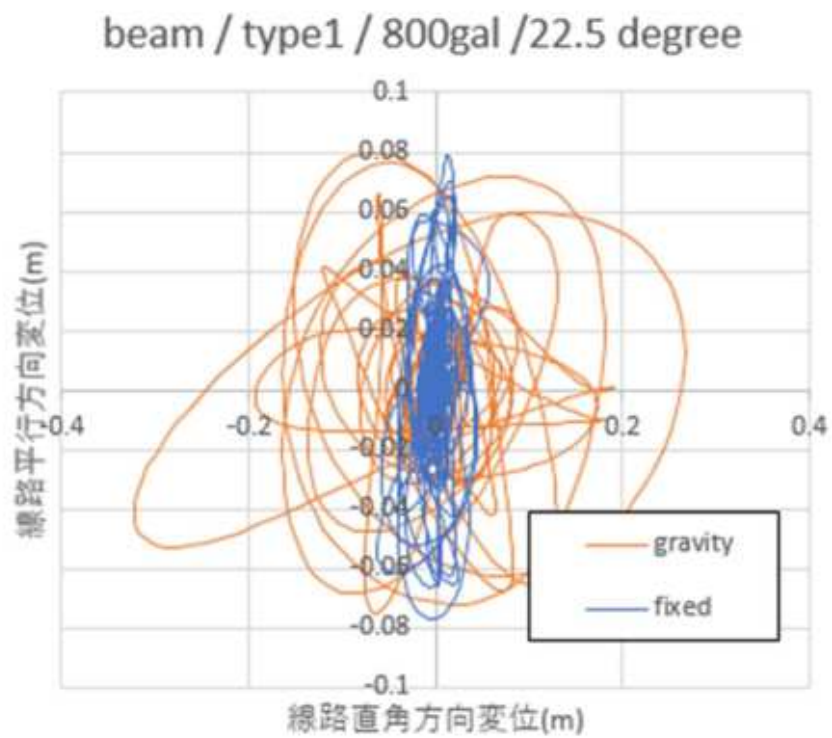


図 3.3.12 1種 800gal/22.5 度

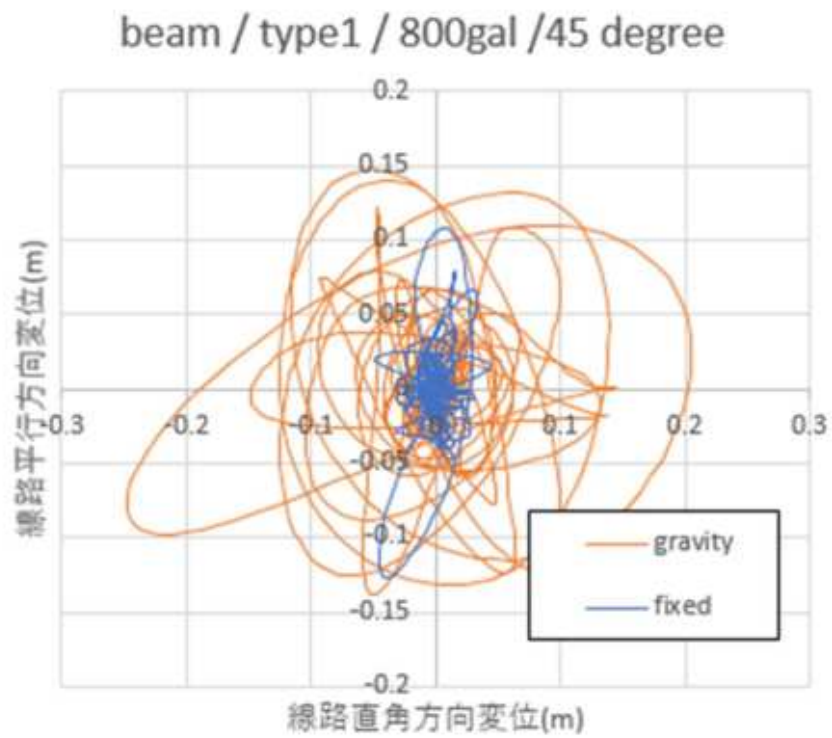


図 3.3.13 1 種 800gal/45 度

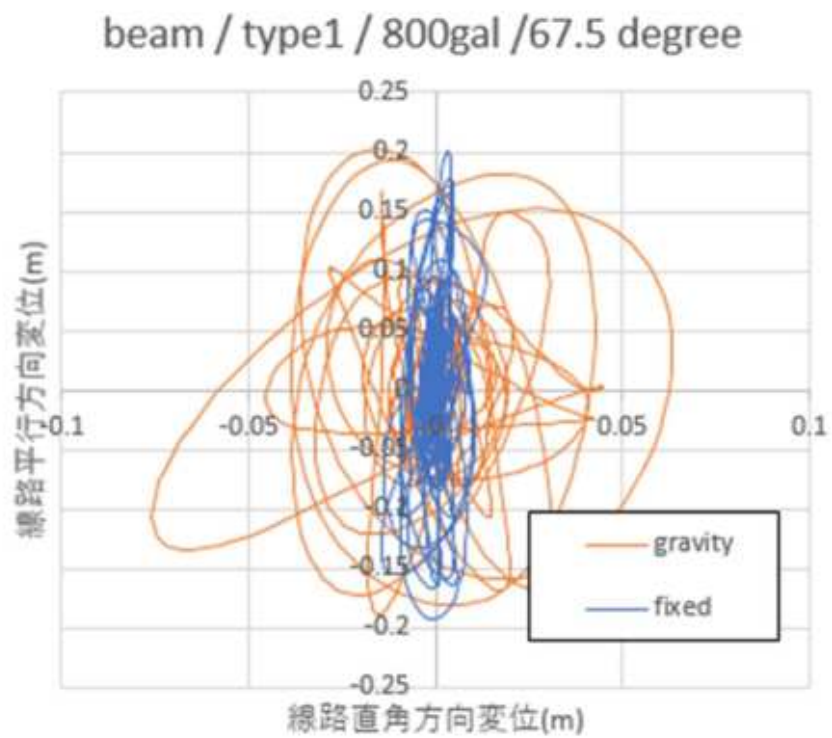


図 3.3.14 1 種 800gal/67.5 度

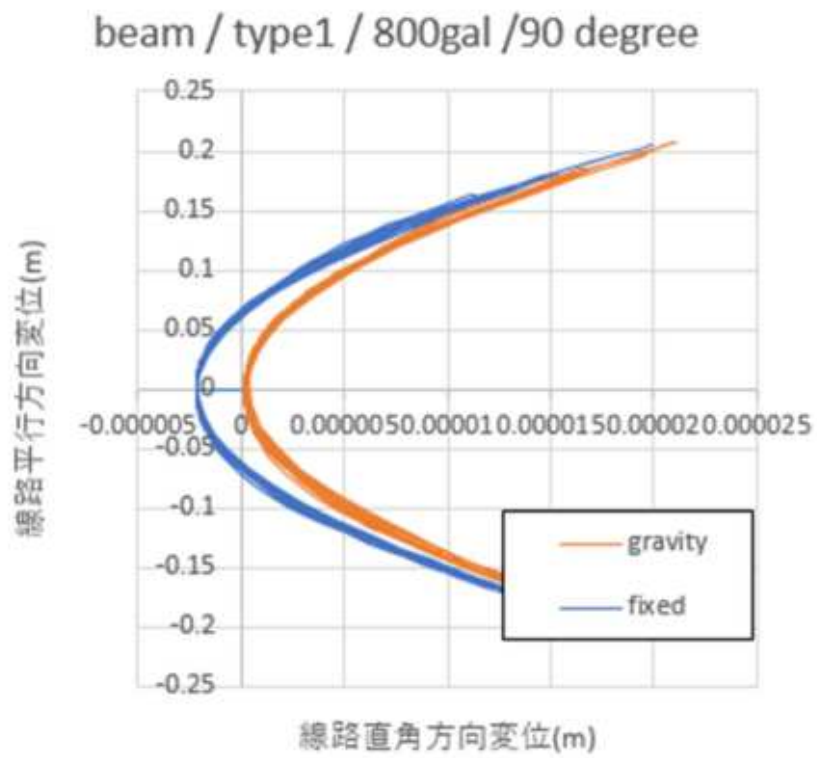


図 3.3.15 1 種 800gal/90 度

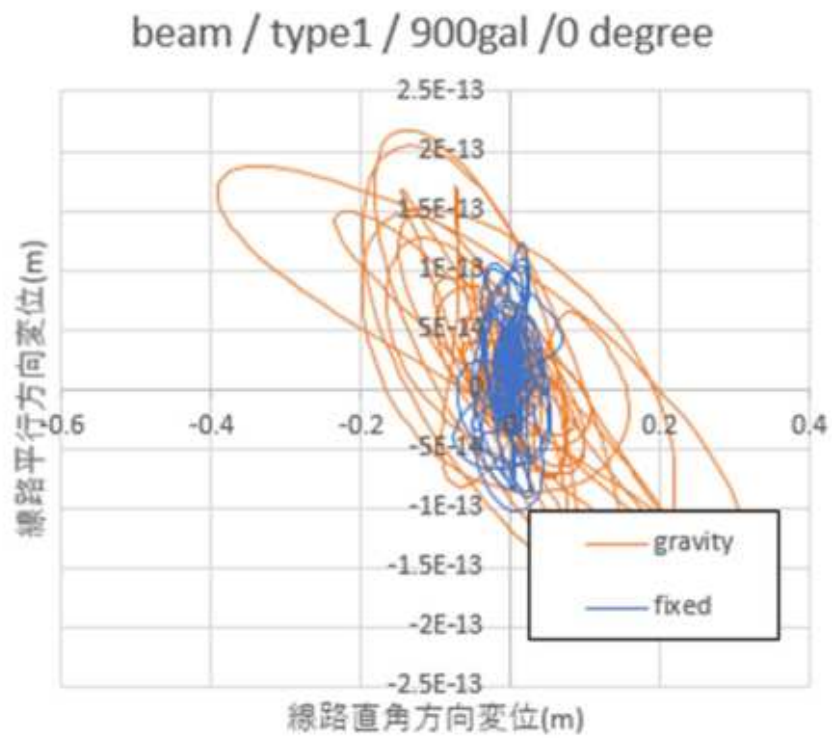


図 3.3.16 1 種 900gal/0 度

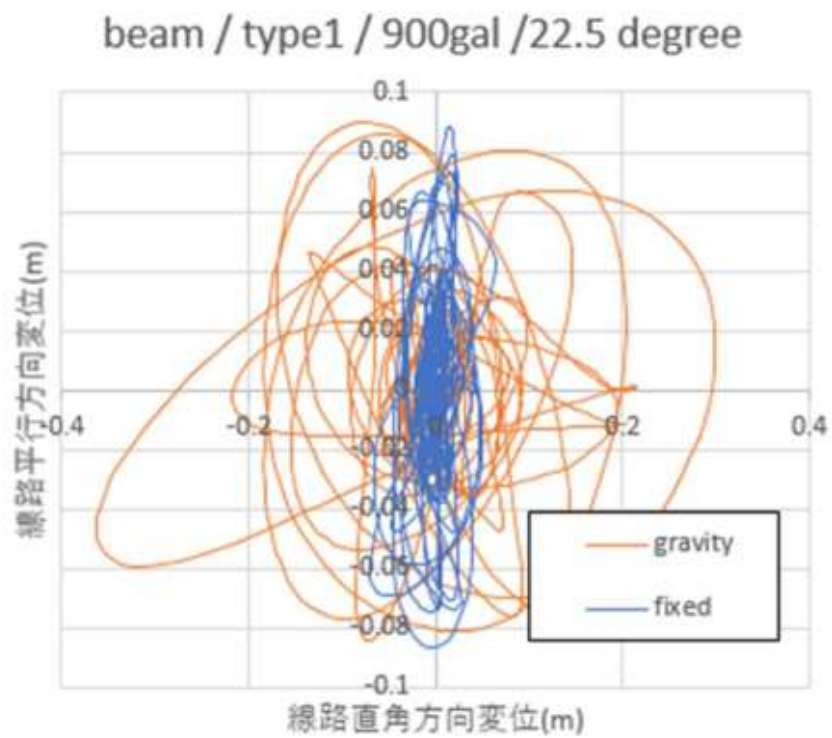


図 3.3.17 1 種 900gal/22.5 度

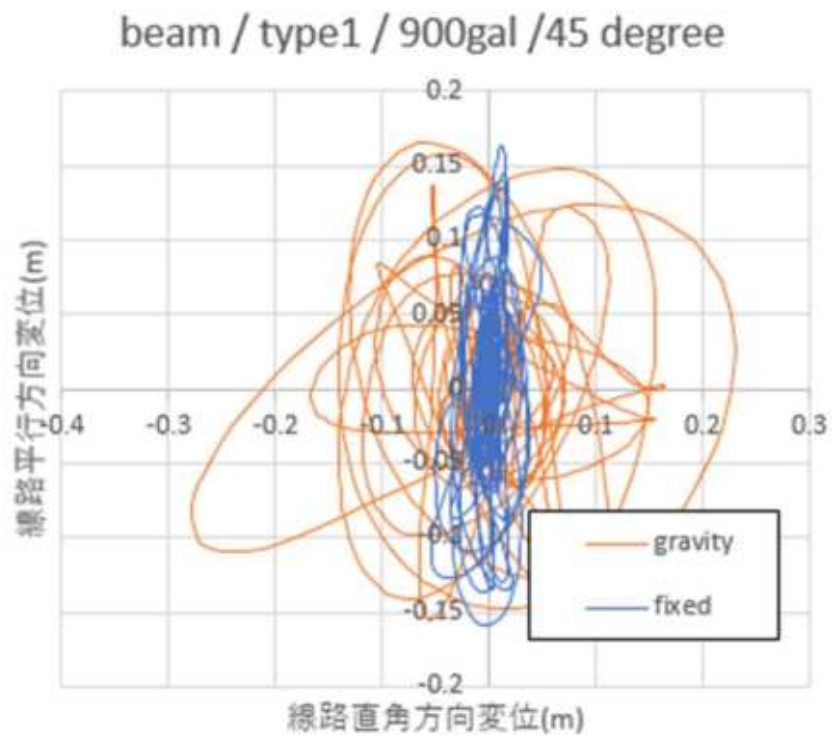


図 3.3.18 1 種 900gal/45 度

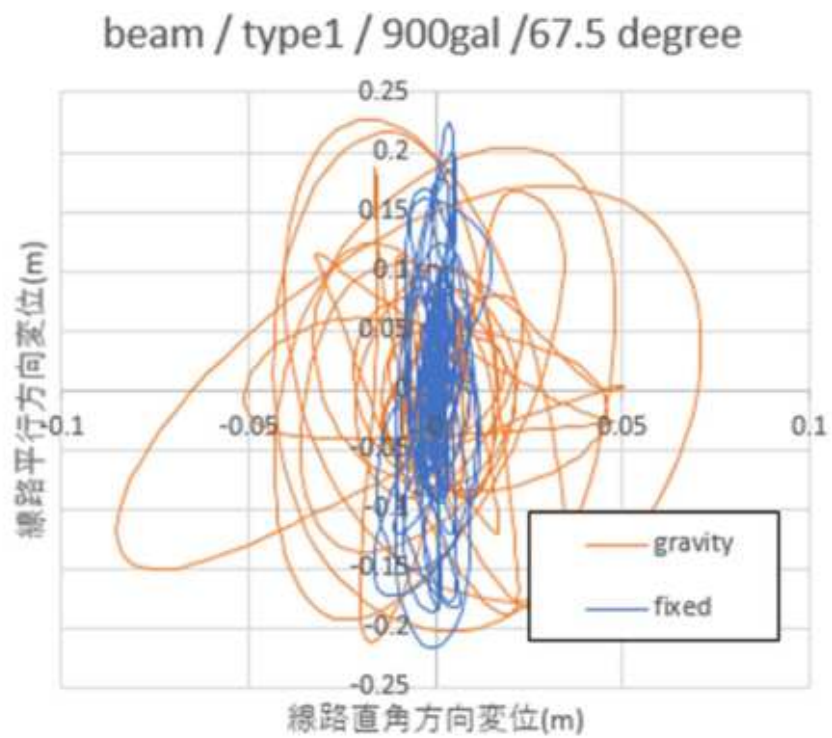


図 3.3.19 1 種 900gal/67.5 度

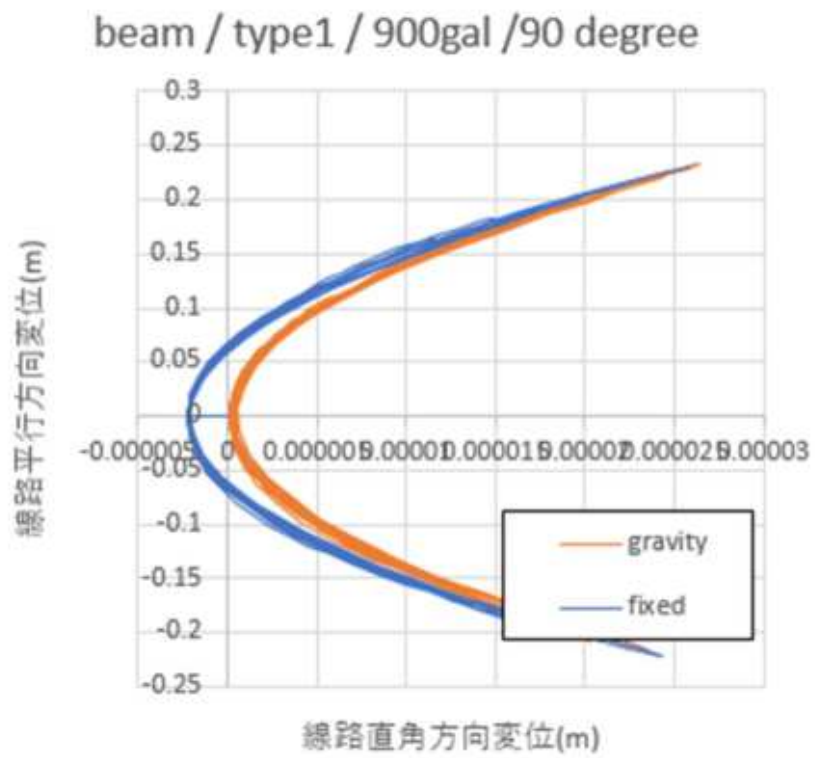


図 3.3.20 1 種 900gal/90 度

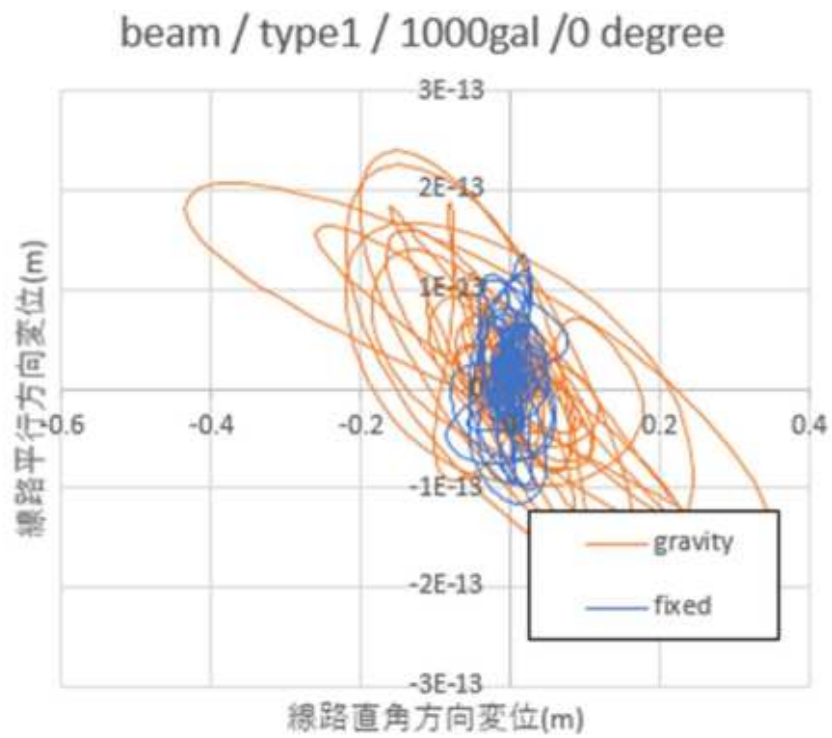


図 3.3.21 1 種 1000gal/0 度

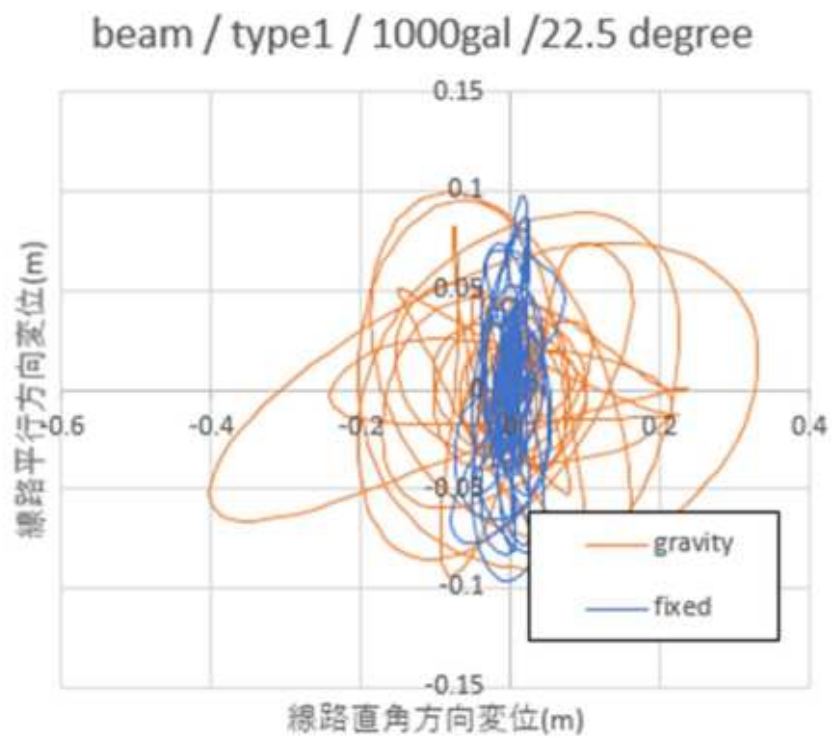


図 3.3.22 1 種 1000gal/22.5 度

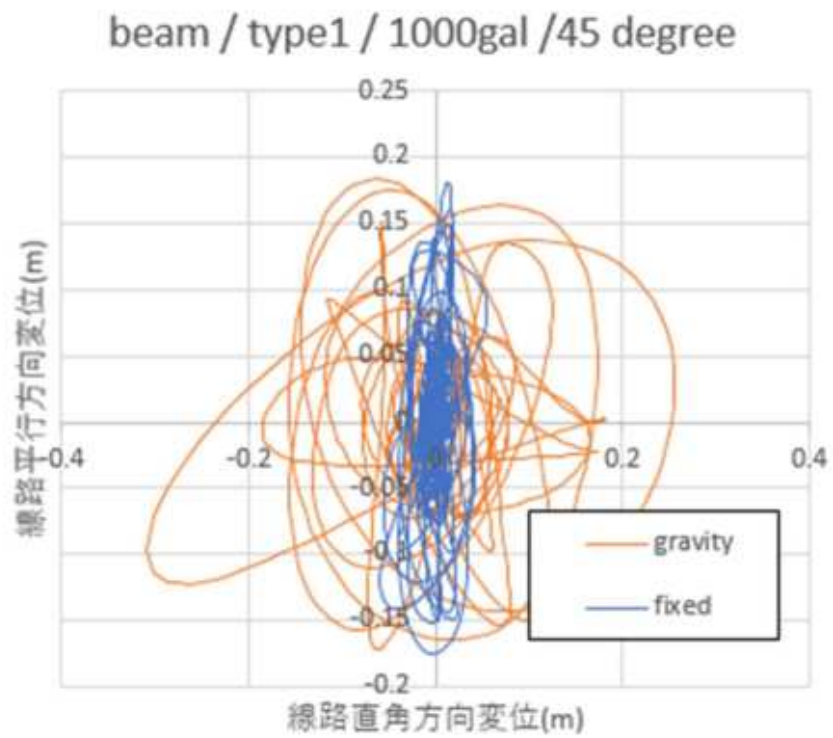


図 3.3.23 1 種 1000gal/45 度

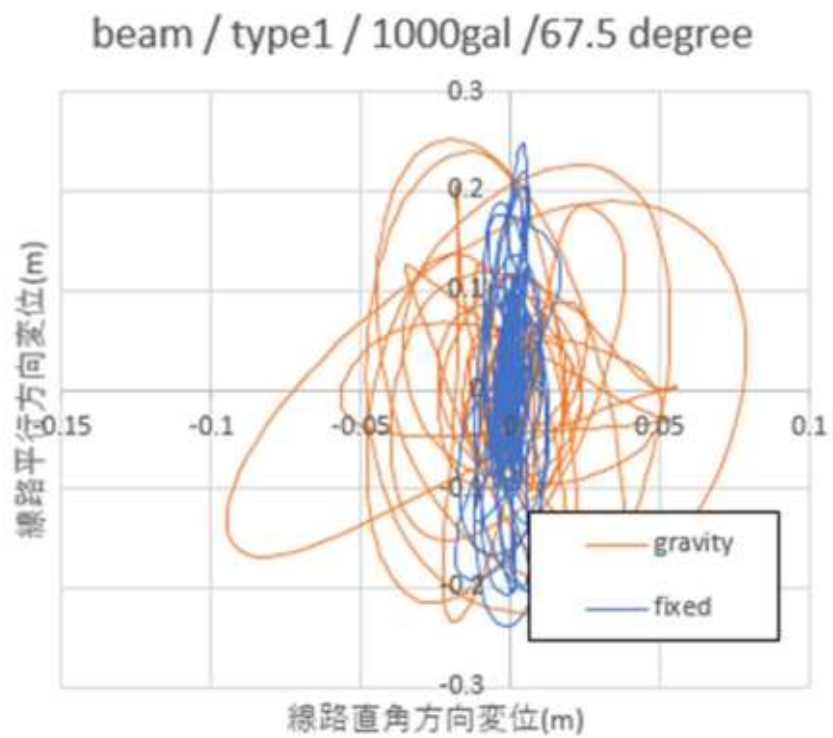


図 3.3.24 1 種 1000gal/67.5 度

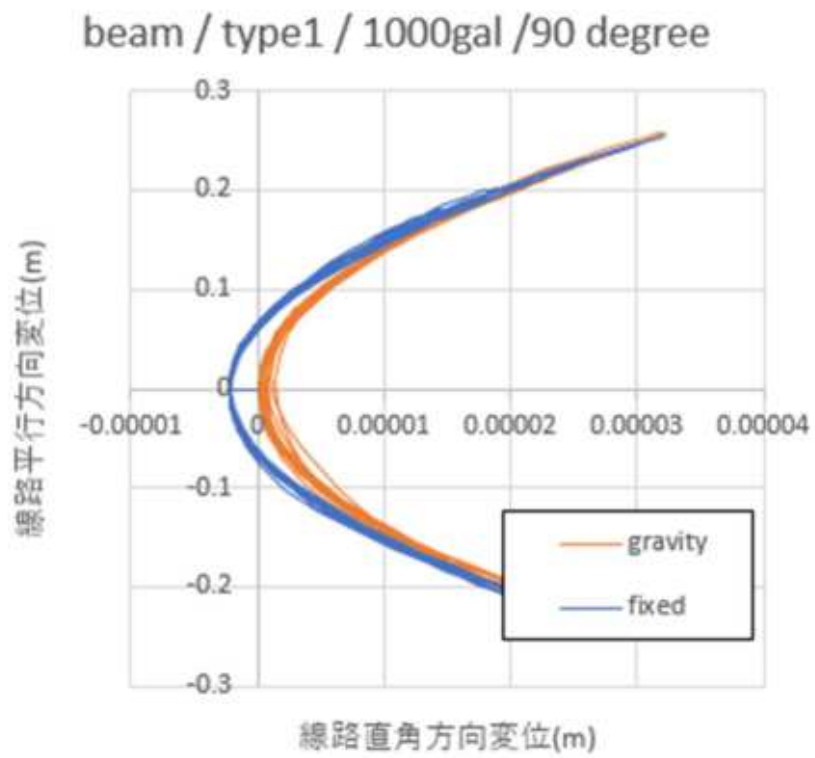


図 3.3.25 1 種 1000gal/90 度

図 3.4.1～3.4.20 にビームタイプのモデルの格点の 3 種地盤での全変位履歴を示す。グラフの縦軸は線路平行方向、横軸は線路直角方向である。Gravity が提案の重力式、Fixed が従来の固定式の結果である。なお、いずれのケースでも部材の塑性化は生じていない。

これらの図より以下のことがわかる。

(1) 剛性の落ちた線路直角方向については、固定式に対して重力式は大きく変位が増加している。一方で、線路平行方向については、ほぼ同程度である。

(2) 標準的な地震時の重力式の線路直角方向最大変位は 0.25m 程度で、これは平行方向の発生最大変位 0.15m 程度の 1.5 倍程度である。

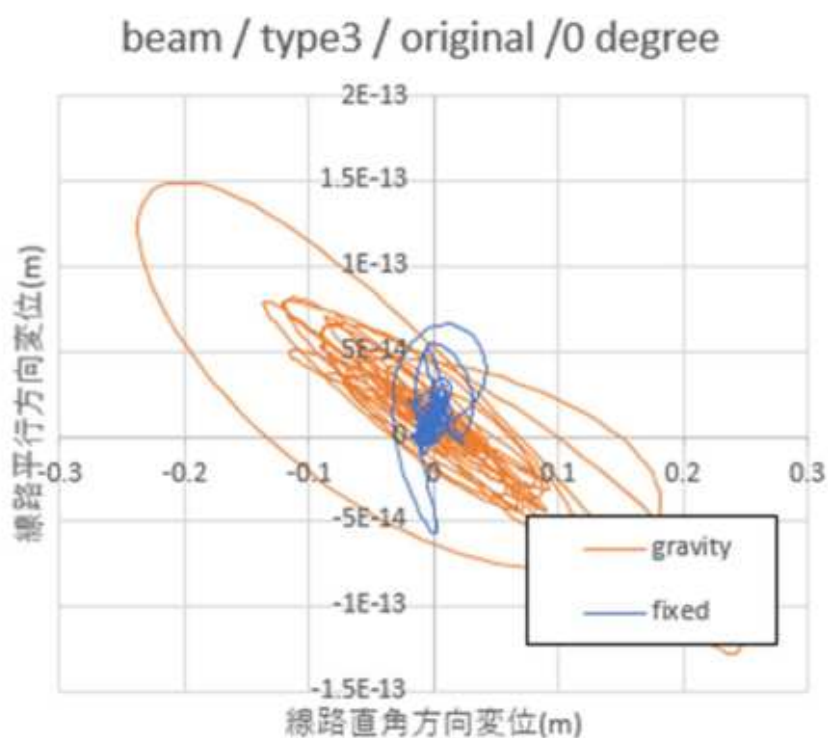


図 3.3.1 3 種 619gal/0 度

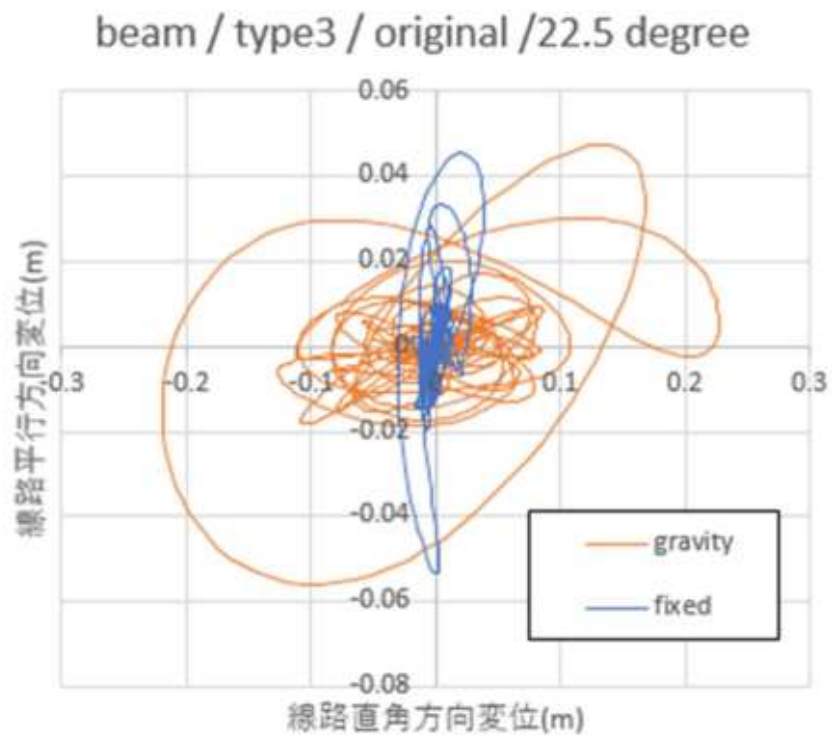


図 3.3.2 3 種 619gal/22.5 度

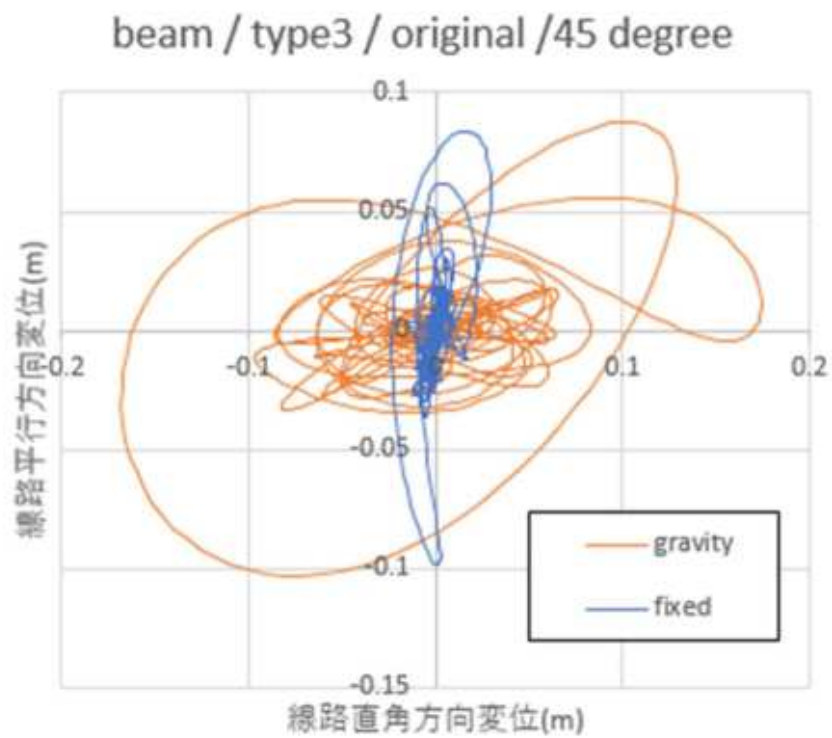


図 3.3.3 3 種 619gal/45 度

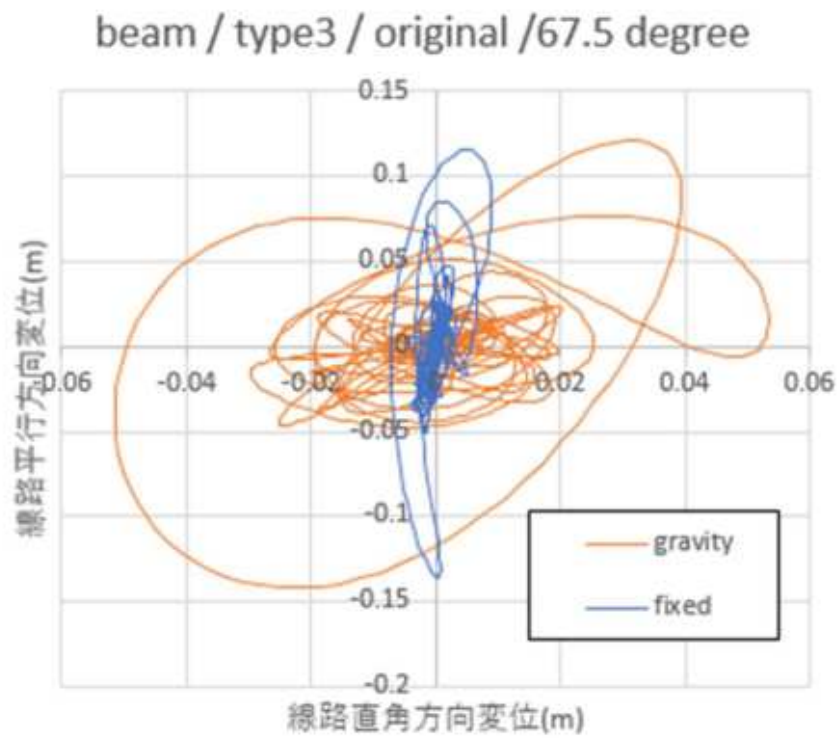


図 3.3.24 3種 619gal/67.5 度

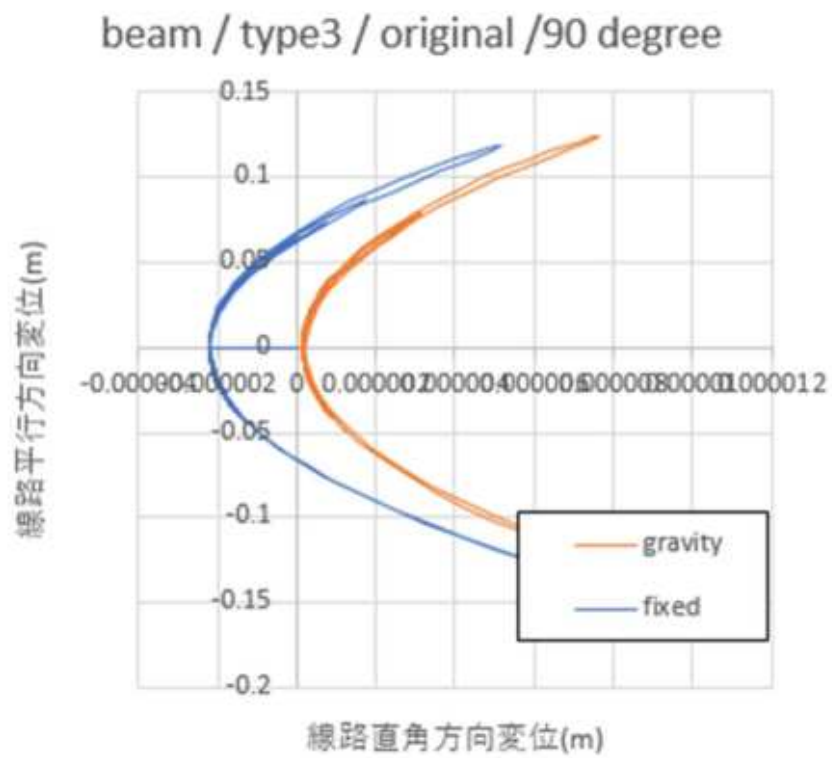


図 3.3.5 3種 619gal/90 度

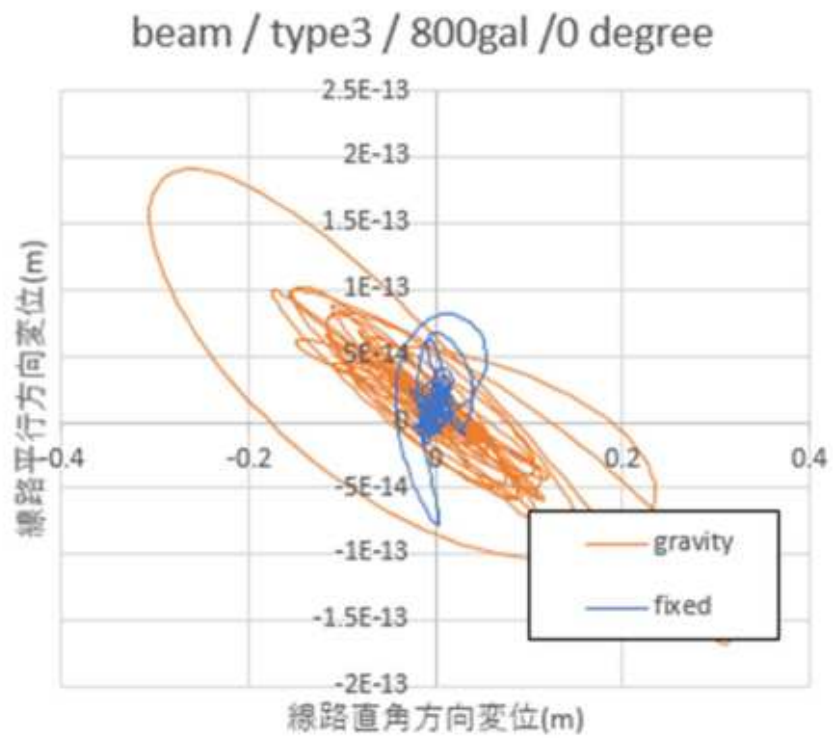


図 3.3.6 3 種 800gal/0 度

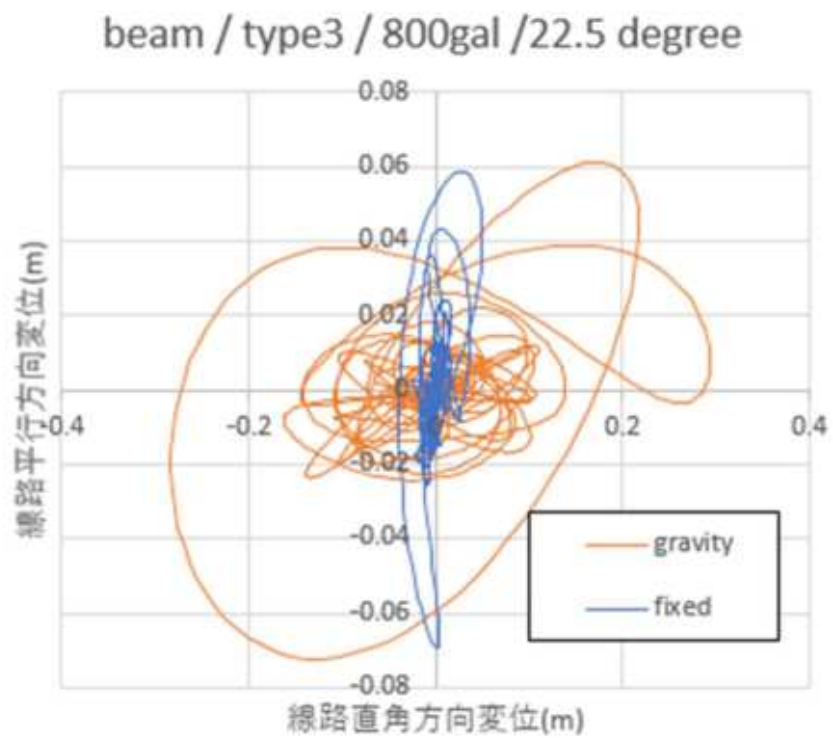


図 3.3.7 3 種 800gal/22.5 度

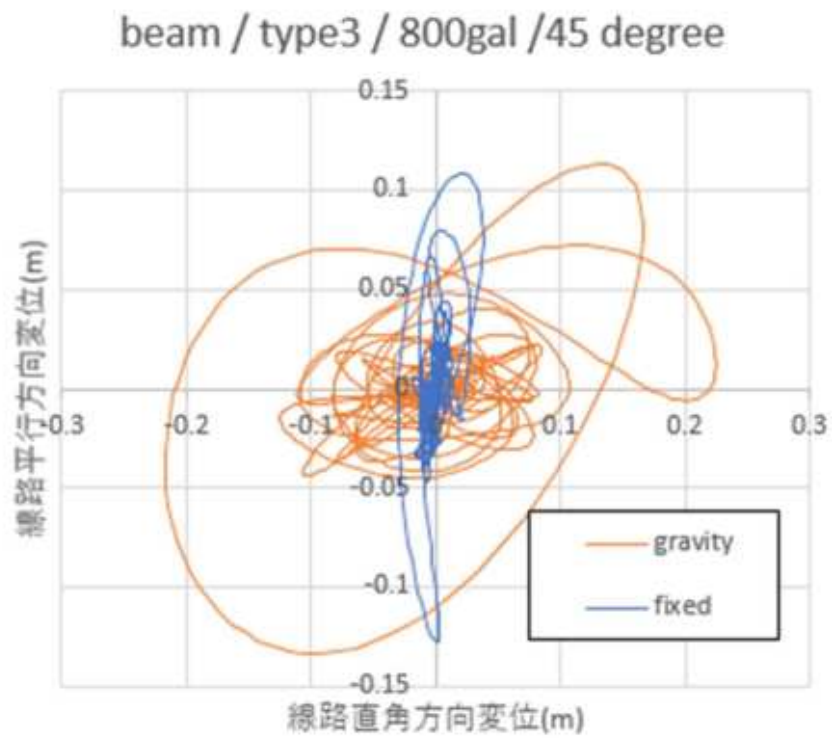


図 3.3.8 3 種 800gal/45 度

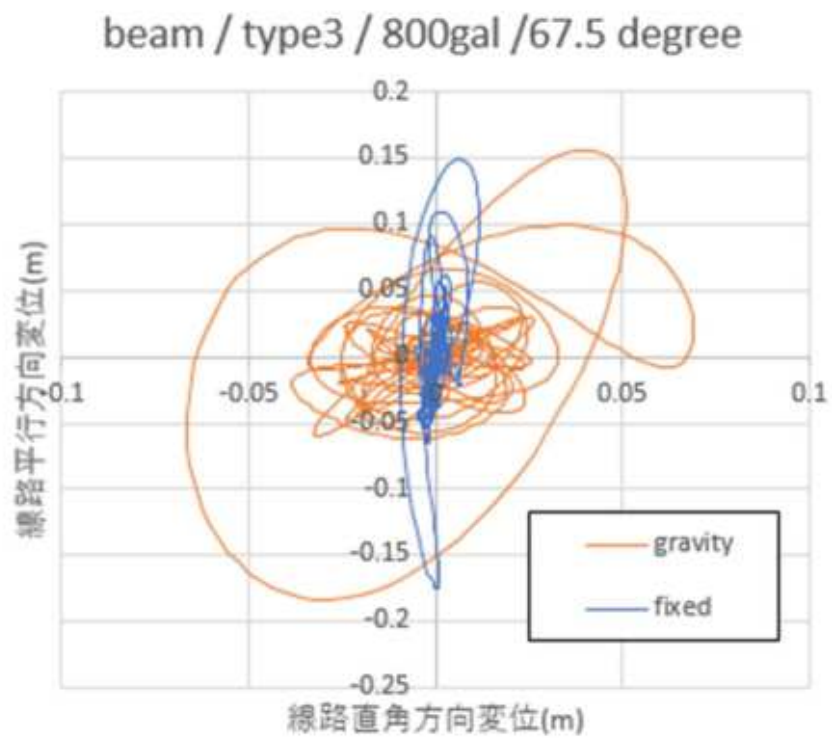


図 3.3.9 3 種 800gal/67.5 度

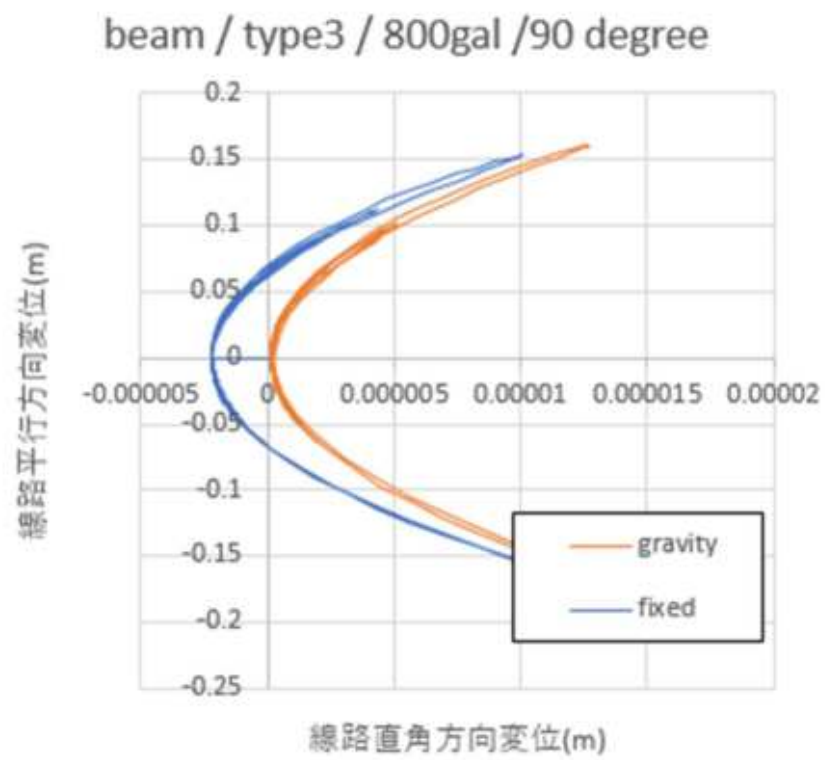


図 3.3.10 3 種 800gal/90 度

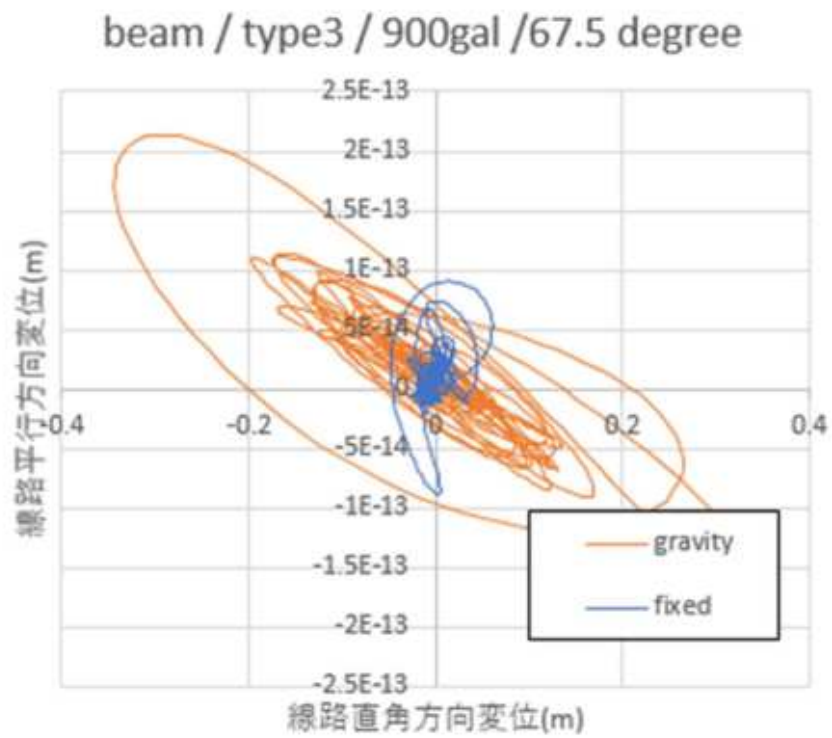


図 3.3.11 3 種 900gal/0 度

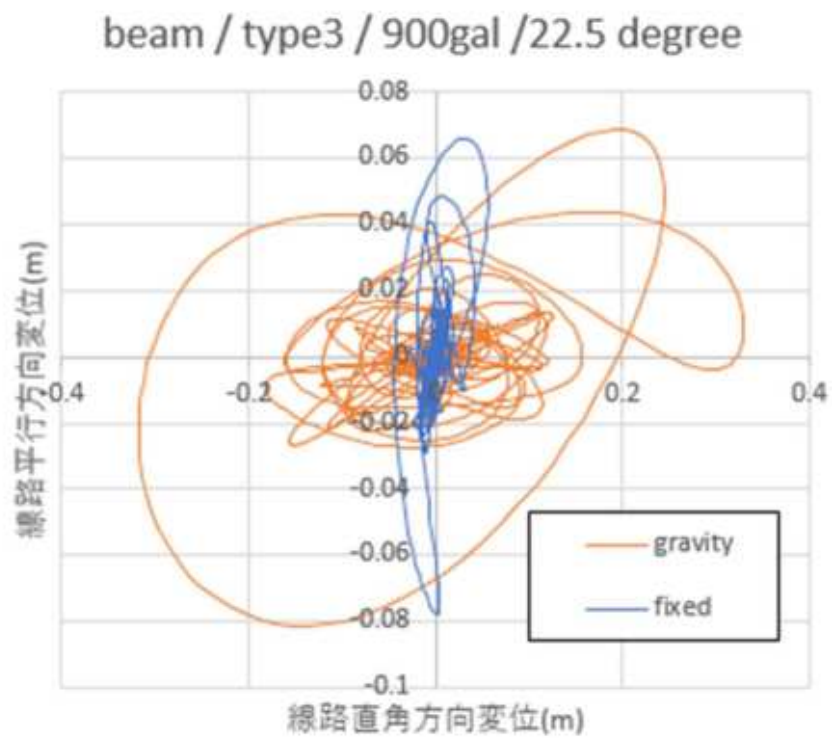


図 3.3.12 3 種 900gal/22.5 度

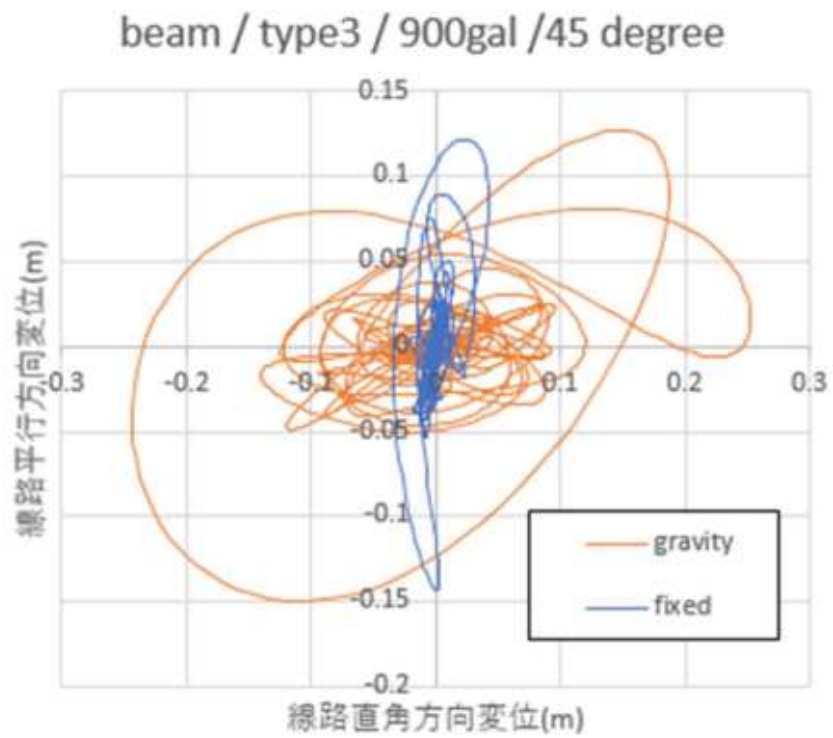


図 3.3.13 3種 900gal/45 度

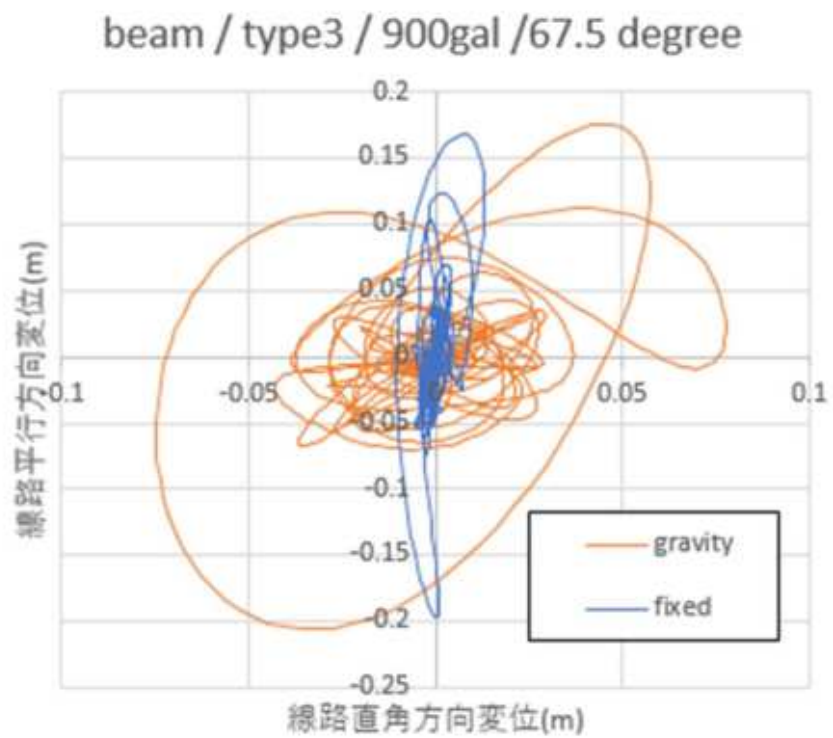


図 3.3.14 3種 900gal/67.5 度

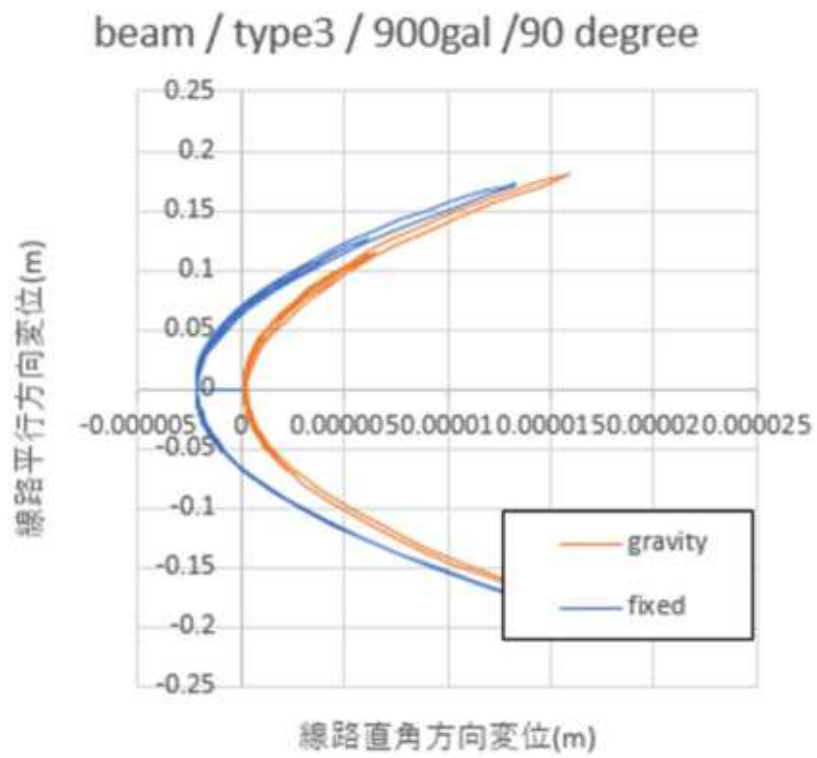


図 3.3.15 3 種 900gal/90 度

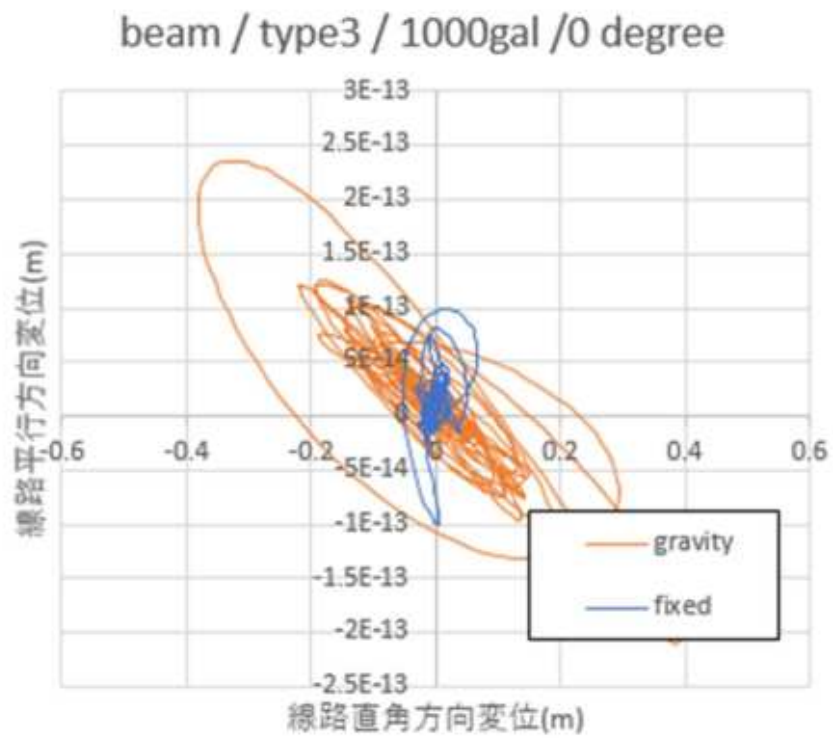


図 3.3.16 3 種 1000gal/0 度

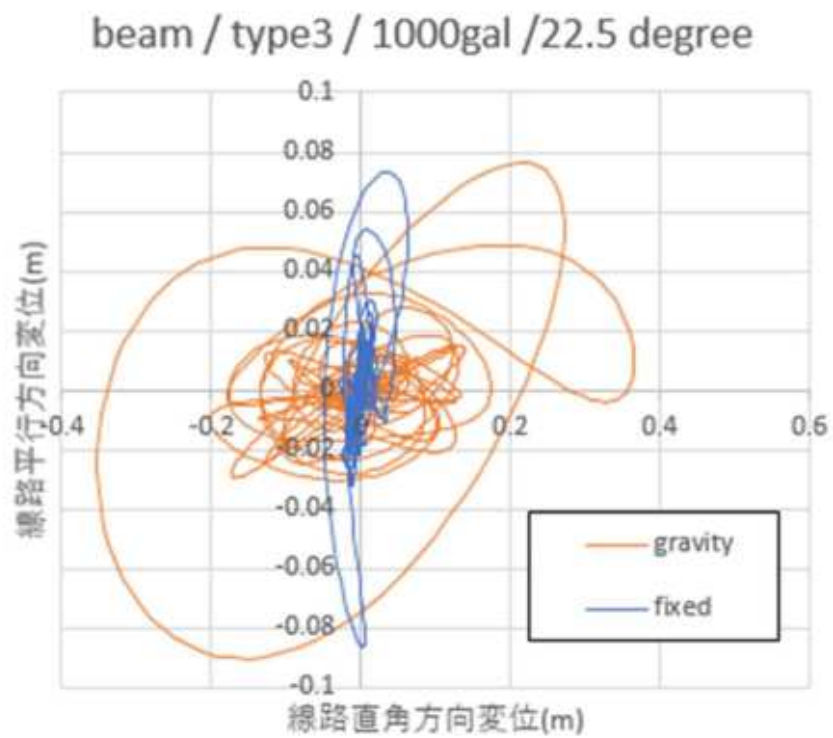


図 3.3.17 3 種 1000gal/22.5 度

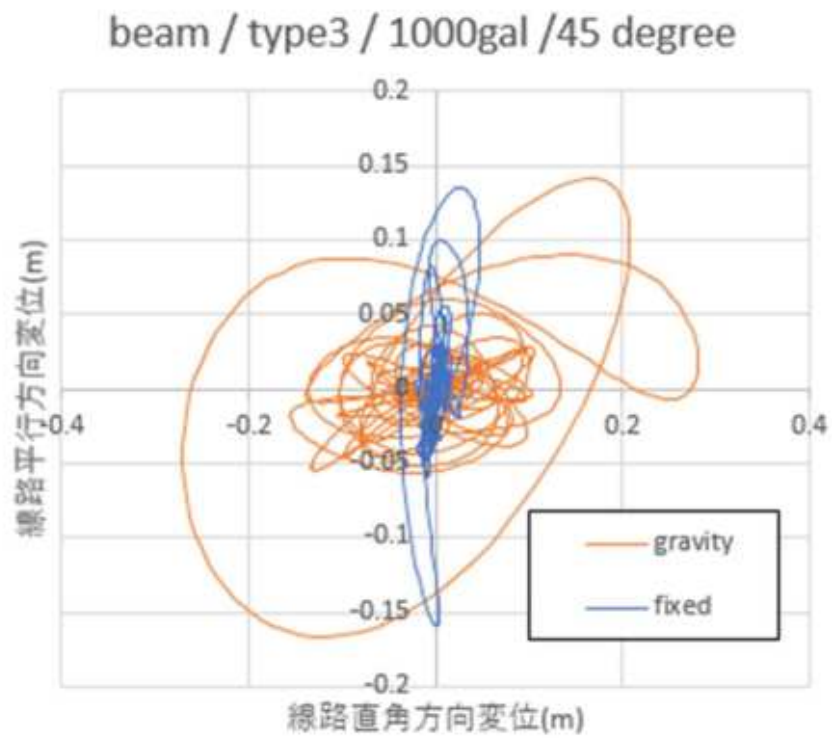


図 3.3.18 3 種 1000gal/45 度

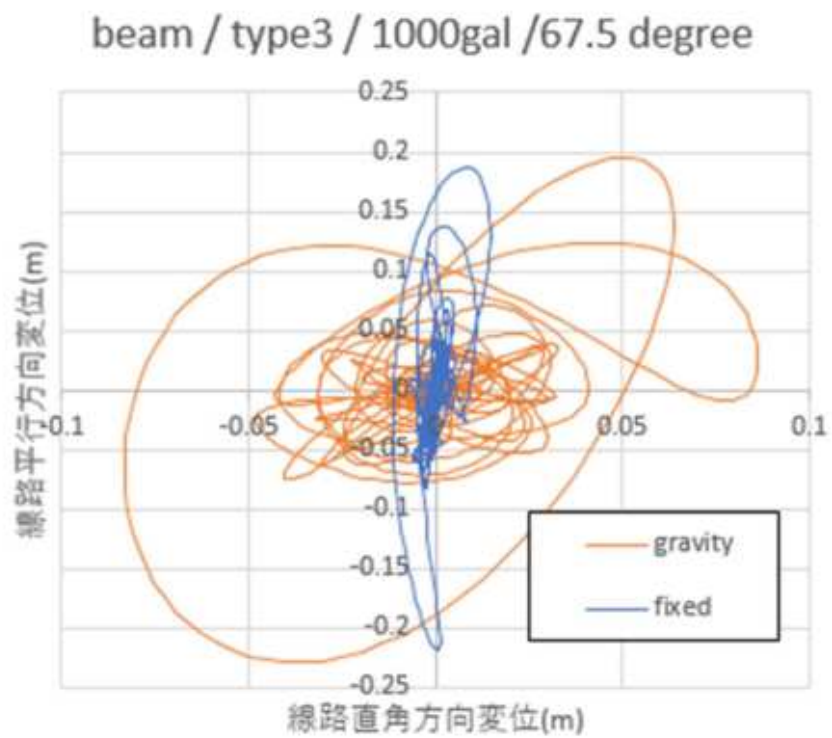


図 3.3.19 3 種 1000gal/67.5 度

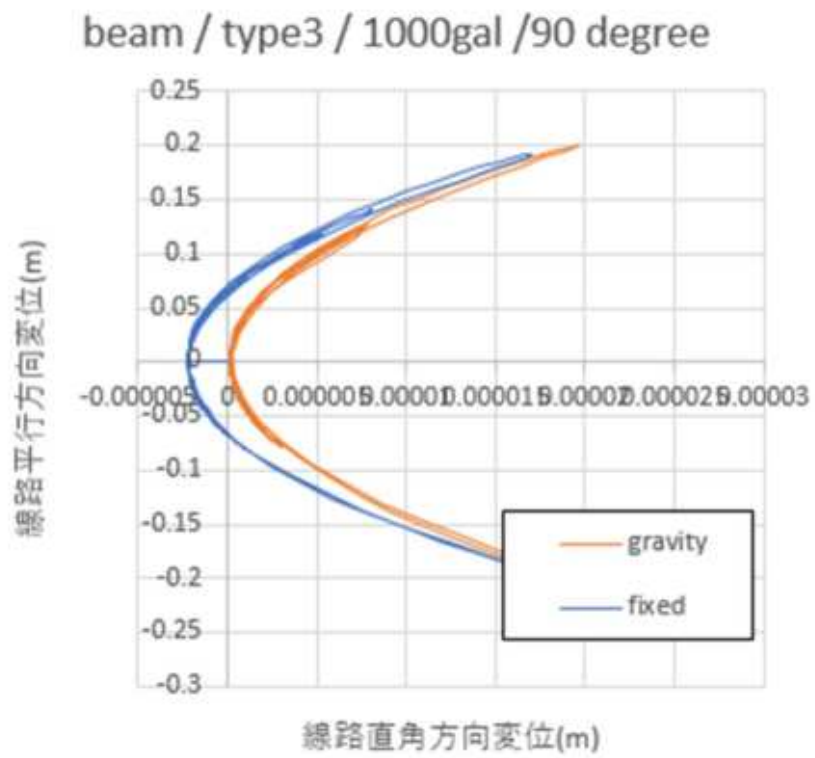


図 3.3.20 3 種 1000gal/90 度

図 3.4 に、1 種地盤、3 種地盤の振幅を割り増ししていない場合の、提案構造の最大振幅を従来の固定基部式の最大振幅で割った値を、地震の入射角について整理したものを示す。

X 印が線路直角方向、Y 印が線路平行方向である。これより、以下のことがわかる。

(1) 入射角によって発生振幅の倍率がほぼ変動しない。0 度のときと 90 度の時に変化しているように見えるが、これはもともと 0 度の時は Y 方向の変位がゼロに近いため、倍率としては 2 倍程度であるが、発生している値はほぼゼロに近い。90 度の場合も X 方向の発生値がほぼゼロである。

(2) Y 方向については、提案構造と従来構造でほぼ差がない。

(3) 1 種地盤用地震波については、トラスタイプの方がビームタイプよりも倍率が大きくなっている一方で、3 種地盤用地震については逆にビームタイプの方がトラスタイプよりも倍率が大きくなっている。

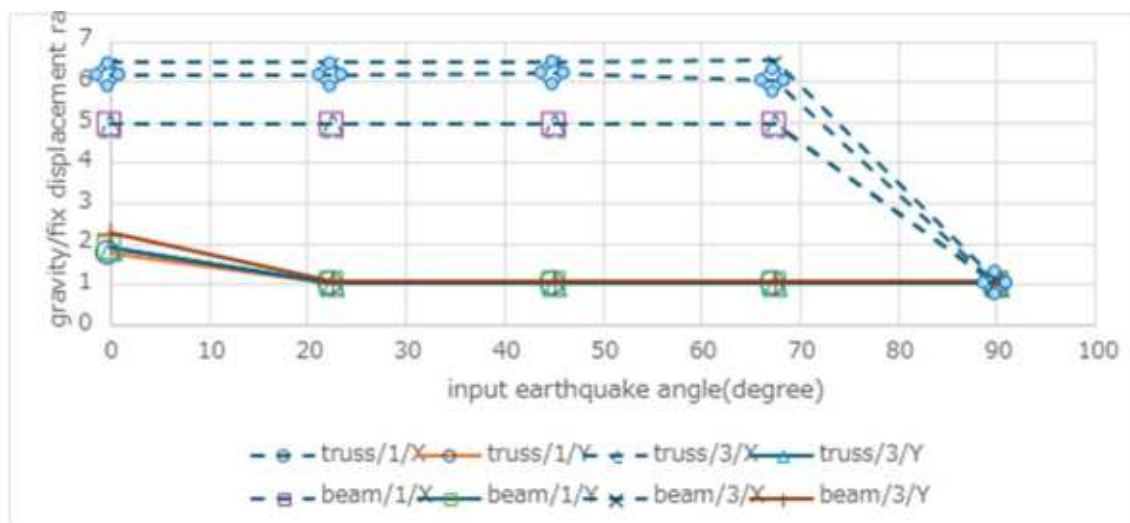


図 3.4 地震波入射角と、提案構造と従来構造の発生変位の比の関係

図 3.5.1 に、提案構造について、地震入射角 0 度の時の地震波最大加速度と、発生する線路直角方向の振幅の範囲の関係を示す。図 3.5.2 には、従来の固定式構造について、地震入射角 0 度の時の地震波最大加速度と、発生する線路直角方向の振幅の範囲の関係を示す。いずれも 1 種地震波と 3 種地震波の両方の結果を示している。これらの図より以下がわかる。

(1) 提案構造については、発生する振幅と最大加速度がほぼ比例関係にある。一方で、固定式の場合は最大加速度 1000gal のときに大きな変化が生じている。

(2) トラストタイプの方がビームタイプよりも発生変位が小さい。

(3) 提案構造のトラストタイプについては 1 種よりも 3 種のときに発生変位が小さい一方で、従来固定式の場合はトラストタイプは 3 種地盤の 1000gal のときに発生変位が大きくなっている。

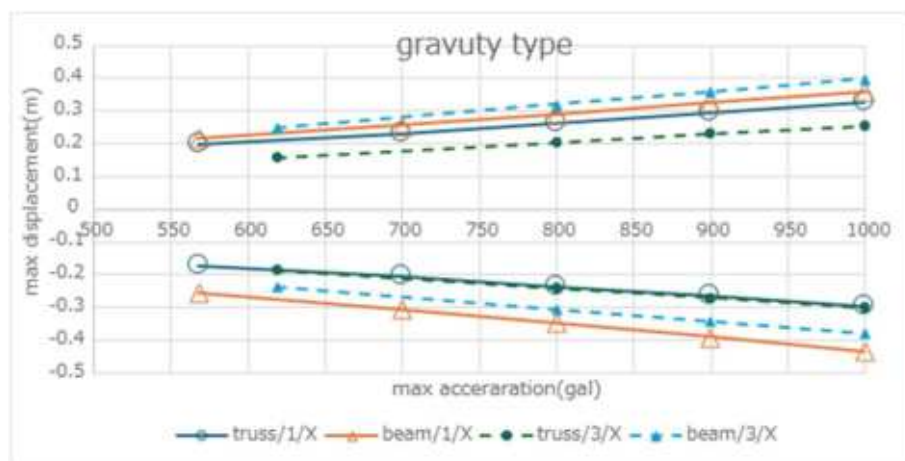


図 3.5.1 提案構造についての地震波最大加速度と線路直角方向変位範囲の関係

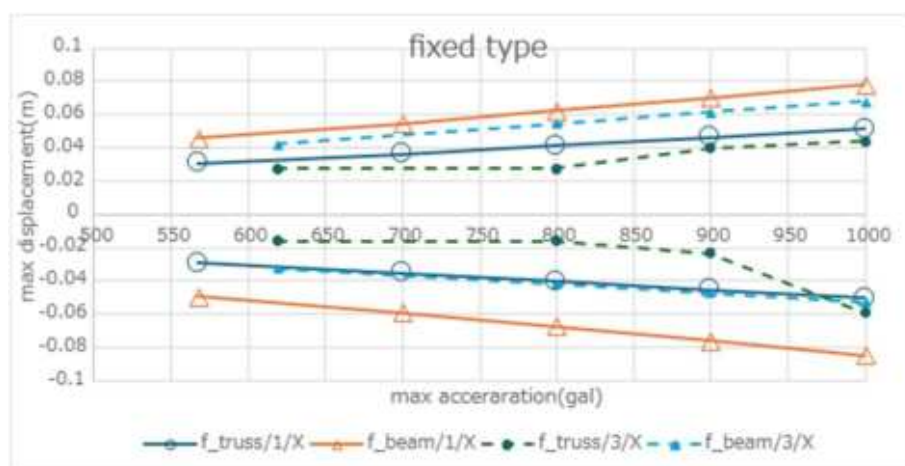


図 3.5.2 従来固定式についての地震波最大加速度と線路直角方向変位範囲の関係

3.2.4 STEP2 のまとめ

地震の種類、最大加速度、入射方向をパラメータとして、応答変位を調査した結果、以下の結論を得た。

- (1) 地震波の入射角によって、従来固定式の対する線路直角方向発生変位の倍率は変化しない。
- (2) トラスタイプの方がビームタイプよりも変位の少ない傾向にあるが、入射する地震波の影響もある。
- (3) 線路平行方向については、従来固定式と基本的に変わらない。
- (4) 入射 1000gal 程度までは 40MPa 級鋼でも構造に塑性化は生じない。
- (5) 基部の張り出しが 5m の場合 (全体で 10m) は、入射 1000gal でも基部に浮きは生じない。(STEP1 での検討と結論が変わらない)

4.結論

静的な基本構造検討および、様々な角度と規模の地震波入力に対する動的な検討の結果、以下の結論を得た。

- 1) 基部の幅が広いほど対応できる震度が大きくなる。特に、幅が 10m あると安定性が高くなる。
- 2) 鋼材強度 400MPa 級でも、応答震度 1000gal 程度までは構造的に強度的な問題はほとんど生じない。
- 3) トラストタイプの方はビームタイプよりも、発生変位が抑えられる傾向にある。これは、トラスと鋼管の接合部でのトラス高さを大きくする等の接合部剛性を大きくすることで発生変位を抑制することができる可能性を示している。
- 4) 地震時の発生水平変位の基準値は生じないが、提案構造の線路直角方向の発生変位は固定式に比較するとかなり大きくなるので、これが設計的にどの程度許容されるかで適用性は判断されると思われる。
- 5) 地震波の入射方向によって、従来固定式に対して、発生変位の比率は変化しない。すなわち、剛性の方向特性が変化することで、特段の非線形的悪影響は存在しないものと判断することができる。

以上の得られた知見から総合的に判断すると、構造の応答震度 1.0 程度までは適用可能かと思われる。その条件化で基部の幅は 10m 程度あれば十分な安定性を得ることができると考えられる。

今回は幅の狭い 1 線またぎタイプで検討を行った。幅が広がるとビーム部および架線関連の重量が増加するため、線路平行方向の構造負担がより大きくなるため、提案構造については条件が緩い方向となるため、幅狭楮で検討を行ったわけではある。しかし、いちおうは幅の広い構造でも今回と同様の検討を行って確認をすることぞ望ましい

謝辞

本研究は大畑財団の助成をいただくことで実施することができました。ここに謹んで感謝の意を表します。