

地中連続壁を用いた 宅地地盤の耐震工法に関する研究

目黒和則¹・武田伸一²・高取博道³・清田 隆⁴・小長井一男⁵

¹株式会社リアス (〒114-0002 東京都北区王子1-12-4)

E-mail:k-meguro@re-earth0102.co.jp

²株式会社リアス (〒114-0002 東京都北区王子1-12-4)

E-mail:s-takeda@re-earth0102.co.jp

³株式会社福田組 (〒951-8668 新潟県新潟市中央区一番堀通町3-10)

⁴東京大学生産技術研究所准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:kiyota @iis.u-tokyo.ac.jp

⁵東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: konagai@iis.u-tokyo.ac.jp

地震による家屋被害の原因として、揺れに加えて地盤の不均質な変形の影響も無視できない。「比較的浅い(壁高 4m 程度)地中連続壁で住宅の基礎地盤を枠型に囲む手法」による地盤変形の伝達緩和効果を、数値解析を通して検討した結果、1)本研究で対象としている枠型基礎は比較的浅い連続壁のため、地震によって生じるせん断波振幅を軽減する効果は薄いが、地盤の不等沈下のキネマティック変位伝達率を低減する効果がある。2)地盤の不等沈下のキネマティック変位伝達率は、地盤との相対剛性で決まる枠型壁体の代表長と不等沈下の波長との比率でかなり統一的に表現できる。3)壁体効果は、壁体・地盤間のすべりや、地盤、そして壁体の非線形性の影響を大きく受ける。

Key Words : diaphragm wall, uneven soil settlement, seismic performance of houses, kinematic soil-wall interaction

1. まえがき

基本的に公的資金によって整備される社会基盤施設や、明確な支持層への基礎が要求される高層建造物などと比較して、一般の住宅地では耐震上の十分な配慮がなされていないこともありがちである。この事実を反映するように、我が国の最近の地震によって生じた構造物(道路盛土や斜面崩壊を除く)の被害は一般住宅に集中している。特に造成地では、必ずしも良好な地盤材料とは言えない現地発生土によって盛土が行われることから、地表面では地震動の増幅や揺すり込み沈下が生じやすく、大規模な崩壊に至る可能性も高い(2004年新潟県中越地震では造成地の大規模崩壊が発生している)。更に、地震時の地盤の変形挙動は造成地の形状や盛土前の微地形の影響も大きく受ける。

地盤の耐震化に関する研究は比較的成熟しているが、いずれも社会基盤施設や大規模重要構造物を対象としたものが主体である。一方、一般住宅地の耐震化に関しては、特にコスト面の課題により、未だ

発展途上であると言える。

本研究で対象としている「比較的浅い(壁高 4m 程度)連続地中壁で住宅の基礎地盤を囲む手法」(以下、枠型基礎と呼ぶ)は、地中壁が摩擦材料である地盤を拘束する構造であるため、地震時の地盤の変形を一体化させる効果が期待できるとともに、常時進行する不均一な変形も抑制する効果が期待できる。このため家屋の柱梁接合部などに累積されるひずみも抑制され、家屋の耐震性向上に寄与する効果も期待できる。また、施工機械の工夫によりコストも抑えられる。本研究は、上記の地中連続壁で囲まれた様々な自然条件を背後に有する軟弱地盤の地震時挙動を数値解析で把握し、地中連続壁による住宅地の耐震化の効果を検証するものである。

2. 地震時の家屋被害と地盤

地震による家屋被害は必ずしも強い揺ればかり

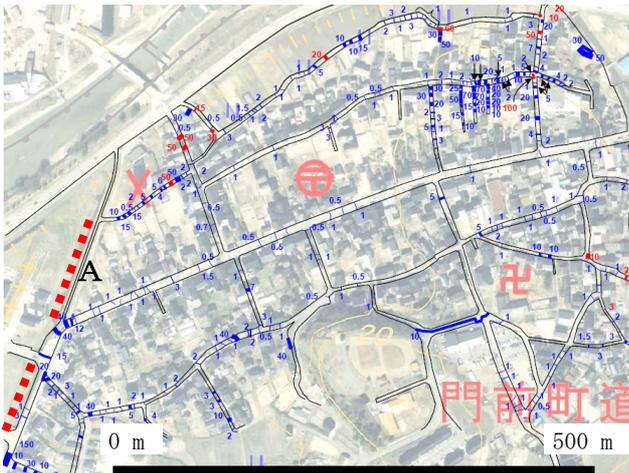


図-3 門前町道下地区の舗装面に現れた亀裂分布：単位はmm
背景の航空写真は国土地理院のウェブサイトより。

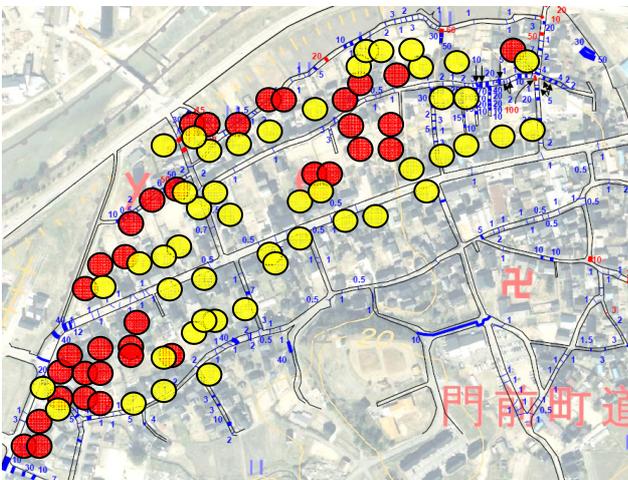


図-4 被害家屋の分布：黄丸はせん断変形した家屋，赤丸は倒壊に到った家屋。黄丸が広範囲にわたって確認できる一方で，赤丸は亀裂の多く認められた移動域に集中している。

の卓越する地域に集中する一方，大きくせん断変形した家屋（黄丸）は道下地域全体に認められる。

3. 枠型基礎の効果検証

前章で紹介したように，地震時の家屋被害の原因として，揺れに加えて地盤の不均質な変形の影響も無視できない。本研究で想定する枠型基礎は，その根入れが4m程度と浅いことから，波長の長い表層軟弱地盤の動的応答を抑え込む効果は期待したいが，周辺地盤の不均質な変形の伝達を緩和する効果は大きいと考えられる。本章では数値解析を通じて，変形の伝達緩和の効果を検討することにする。

(1) 数値解析モデル

図-5 に枠型基礎と周辺地盤モデルを示す。また，図-6 に解析領域底面に加える変形（不等沈下を表現）を示す。

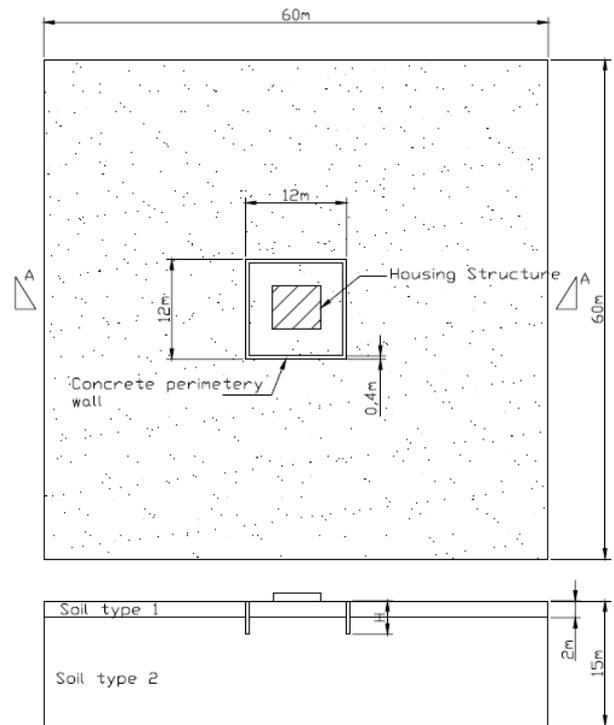


図-5 枠型基礎と周辺地盤モデル

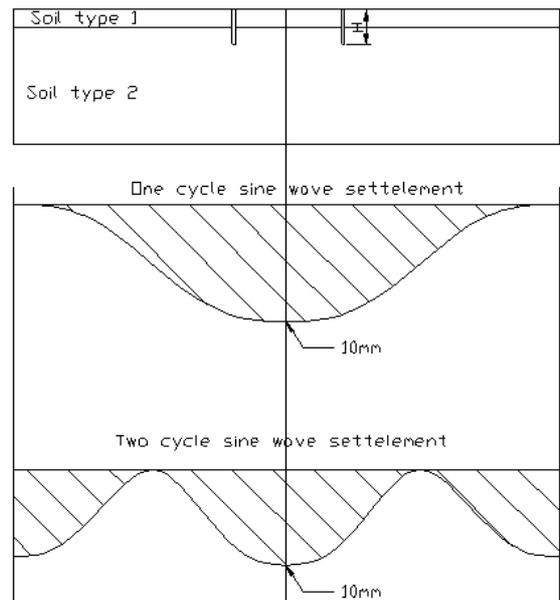


図-6 底面に加える変形（不等沈下を表現）

枠型基礎を設置する地盤は圧密層の上に10m程度の表層地盤が覆うものとする。この圧密層の変形は，上下方向変位が水平一方向にある波長をもって変化する形で現れ，その変位を表層地盤への入力として与えることにする。地盤の解析領域は60m×60mの正方形領域であり，周囲での側方方向変位は拘束とする。このことは，この波状の沈下が解析領域外にも連続する条件を近似するものである。厳密に言えば枠型基礎の存在がこの境界変位に影響を与えるが，これは12m×12mの枠型基礎外縁から境界までの距離を大きくとることで対応している。

表-1 smeared cracking パラメータ

Compressive Stress MPa	Plastic Strain
1.3	0
2.34	0.0015

表-2 引っ張り硬化パラメータ

$\frac{\sigma_v}{\sigma_c}$	$\frac{\epsilon}{\epsilon_c}$
1	0
0	0.002

表-3 地盤の物性

	せん断波速度 $V_T = 50\text{m/s}$	せん断波速度 $V_T = 100\text{m/s}$
	ヤング係数 E (MPa)	11.995
ポアソン比 ν	0.4994	0.4977
粘性項 c (kPa)	50	50
内部摩擦角 ϕ (deg)	0	0
密度 ρ (kg/m ³)	1600	1600
縦波速度 V_L (m/s)	1500	1500

表-4 Cap plasticity (Equivalent parameters for the c- ϕ soil)

粘性項 Material Cohesion, d [Pa]	300,000
$\frac{18c \cdot \cos(\phi)}{3 - \sin(\phi)}$	
内部摩擦角 Internal friction, β	1
$\frac{6 \cdot \sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)}$	
Cap Eccentricity, r	0.4
初期降伏応力 Initial Yield stress,	0
Transition Surface parameter, α	0.05
Flow Stress ratio, K	1

表-5 Cap Hardening

降伏応力 Yield stress [Pa]	塑性体積ひずみ Volumetric Plastic strain
300,000	0
400,000	0.0017
500,000	0.0034
5,000,000	0.043

有限要素法シミュレーションについて、以下の条件設定を行う。

a) 枠型基礎材料物性

ヤング係数：260 MPa, ポアソン比：0.26, 密度：17 kN/m³

また、この材料の亀裂進展に伴う非線形性を smeared cracking 法で表現し、そのためのパラメータとして表-1, また引っ張り硬化については表-2 を設定する (結果的にはクラックは発生していない)。

また、壁体と地盤の摩擦係数 μ については Youakine (2000) は $0.65 \tan \phi \sim 0.85 \tan \phi$ の値が妥当としており、本解析においては $\mu = 0.35$ とする。

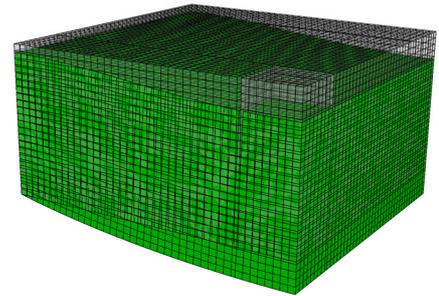


図-7 地盤モデルの変形：この図では底面に図-6 に示した変形でなく、サイン半波状の変形を底面に加えている。この場合、境界面で水平変位を拘束する妥当性が失われるが、解析結果を増やし後述の無次元パラメータでの結果の整理を容易にするためにこの入力を加えたものである。

図-7 地盤モデルの変形：この図では底面に図-6 に示した変形でなく、サイン半波状の変形を底面に加えている。この場合、境界面で水平変位を拘束する妥当性が失われるが、解析結果を増やし後述の無次元パラメータでの結果の整理を容易にするためにこの入力を加えたものである。

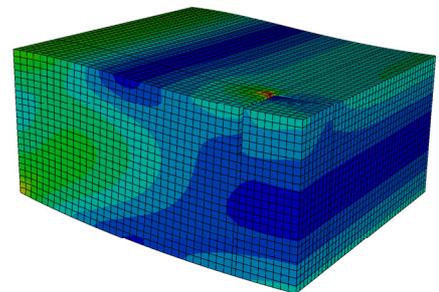
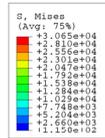


図-8 地盤モデル内の Von Mises 応力の分布：図-7 同様この図でも底面に図-6 に示した変形でなく、サイン半波状の変形を底面に加えている。

図-8 地盤モデル内の Von Mises 応力の分布：図-7 同様この図でも底面に図-6 に示した変形でなく、サイン半波状の変形を底面に加えている。

b) 地盤

地盤の物性は表-3 のように設定する。また、地盤の降伏キャップモデルは表-4 および表-5 のように設定した。

c) 解析プログラム

解析プログラムは ABACUS 6.3 を用いる。

(2) 解析結果

図-7, 図-8 に解析された 1/4 モデルの変形状態、および Von Mises ひずみの分布状態を示す。右手前に枠型基礎がある。枠型基礎による変形の低減効果は、図-9 に示すように基礎枠中央を横切る切断面が枠型基礎壁体を横切る部分での地表面の傾斜が壁体のない場合の傾斜に比べどの程度減少したかで評価することにした。図-9 では枠型基礎設置前には 19×10^{-5} rad であった傾斜角が設置後は 9.85×10^{-5} rad になっているのでこの場所でのキネマティック変位伝達率 (kinematic interaction effect) は 51 % と算定できる。

こうした低減率は様々な条件を反映して変化する。解析結果は支配的な無次元化パラメータを用

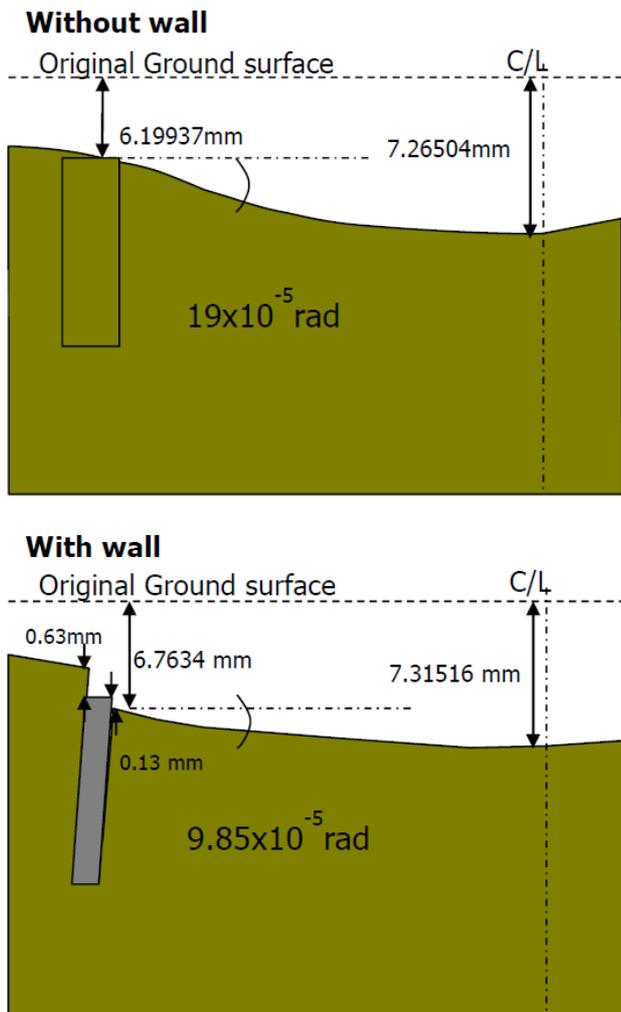


図-9 伝達率(kinematic interaction effect)の評価方法: 枠型基礎壁体に囲まれる矩形域の中央断面 (CL) が、奥行き方向の壁体を横切る部分での地表の傾斜角がどの程度低減したかで伝達率(kinematic interaction effect)を算定する。

いて極力統一した記述を行うのが望ましい。枠型基礎の効果はキネマティック相互作用と同様の物理的現象を反映したものであると考えられるので、壁体が曲げを受けるという意味では杭基礎の設計で用いられる β 値の逆数に相当する「杭と地盤の剛性比で決まる有効長 L_0 」を入力波長 L_T (図-7, 図-8 の場合は $60 \times 2 = 120$ m, 図-9 の場合は 60 m) で除した値を考えればよい。

図-9 の場合、

$$L_0 = 4 \sqrt{\frac{EI_{wall}}{E_{soil}}} = 1.11 \text{ m} \quad \dots(1)$$

したがって

$$4 \sqrt{\frac{EI_{wall}}{E_{soil}}} / \text{wave length} = 0.0186 \quad \dots(2)$$

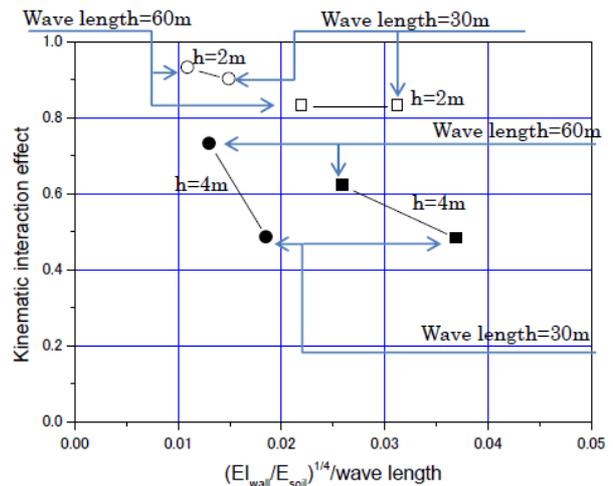


図-10 代表寸法/波長比とキネマティック変位伝達率の関係

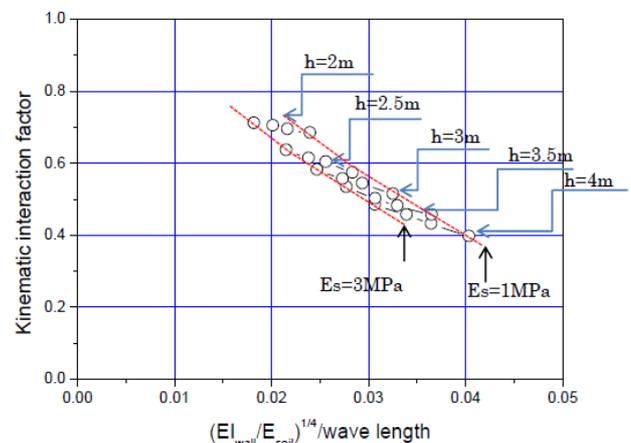


図-11 入力が 60 m 半波長の場合の代表寸法/波長比とキネマティック変位伝達率の関係

となる。

2 種類の地盤 (表-3), 2 種類の根入れ深さ (4 m, 2 m) そして 2 種類の不等沈下入力 (図-6) の全 8 ケースについて代表寸法/波長比と伝達率

(kinematic interaction effect) の関係を求めたものを図-10 に示す。

大きくばらつくものの代表寸法/波長比の増加とともに伝達率は低減し、枠型基礎の効果が大きく現れるようになる。ばらつきの原因は、解析対象とした枠型基礎壁体が表層の地盤を矩形に区切るように根入れされている、(1) 奥行き方向にも壁体が存在する効果があることが反映されていないこと、(2) 代表寸法を求めた壁体から大きく離れた CL (センターライン) 上での地表の傾斜角の低減で効果を評価していること、(3) 波長と枠型基礎壁体長の関係で変形モードが変わり得ること、などが考えられる。

図-11 は上記 (3) の影響を小さくするために不等沈下の入力を図-6 のような形ではなく、図-7, 図-8 にあるように解析領域幅の底面にサイン半波状の変形を加えた場合の解析結果を図-10 の書式に做って整理したものである。この場合には波長が壁体

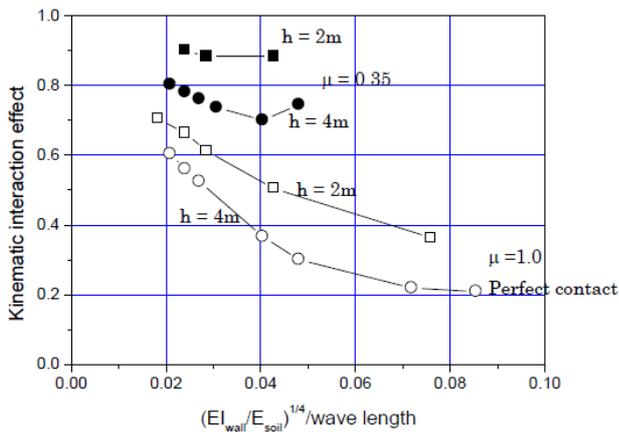


図-12 地盤の非線形性と地盤・壁体間の摩擦係数を考慮した場合の代表寸法/波長比とキネマティック変位伝達率(kinematic interaction effect)の関係

長さの 12 m に比べて相対的にかなりおおきく、上述のばらつきの理由のうち、(3)の影響を小さくする形になっている。このため変動幅が小さくなり多くの解析結果がほぼ同一の右下がりの直線上に揃う形になっている。この解析では線形の地盤を想定し、壁体と地盤との摩擦も完全固着としたものであるが、地盤の非線形性（表-3~5）および壁体と地盤との摩擦係数を変化させた解析結果を図-12 に示す。摩擦係数を小さくし、壁体・地盤間のすべりを許すと、壁体の拘束が小さくなり、結果として地盤変形の伝達が大きくなってしまいう状況が現れる。

4. 結論

枠型基礎壁体の効果について本章で検討された

結果を以下にまとめる。

- (1) 本研究で対象としている枠型基礎は比較的浅い（壁高 4 m 程度）地中連続壁のため、地震によって生じるせん断波振幅を軽減する効果は薄いですが、地盤の不等沈下のキネマティック変位伝達率を低減する効果がある。
- (2) 地震動の低減効果は期待できないが、地盤の不等沈下も地震時の家屋被害を拡大する原因となり得る（2 章参照）。この効果を検証するための数値解析の結果、地盤の不等沈下のキネマティック変位伝達率（kinematic interaction effect）は、地盤との相対剛性で決まる枠型基礎壁体の代表長 L_0 と不等沈下の波長との比率でかなり統一的に表現できる。この関係（図-11）は壁体の効果に対する簡易な評価を与えるうえで有用である。ただしもう一つの寸法、すなわち壁体そのものの長さを入力波長の比もパラメータとして取り込むことが評価式を作り上げるうえで重要である。
- (3) 上記（2）の壁体効果は、また壁体・地盤間のすべりや、地盤、そして壁体の非線形性の影響を大きく受ける（図-12）。今後さらなる解析の積み上げが必要である。

参考文献

- 1) 坂東和郎・齋藤浩之・浦山智晴：見附市街地における建物の被害と地盤の関係，新潟県連続災害の検証と復興への視点，災害復興科学センター，106-115，2004。
- 2) 小長井一男 他：能登半島地震「盛土・地盤の変形と被害」，2007 年能登半島地震災害調査速報会，土木学会，2007。

Improvement of seismic performance of houses by using diaphragm walls

Kazunori MEGURO, Shinichi TAKEDA, Hiromichi TAKATORI,
Takashi KIYOTA and Kazuo KONAGAI

In a large earthquake, not only intense shakes but also deformation, which has been built up in soils, can be equally or often more responsible for devastations of houses resting immediately upon soils as was highlighted in recent earthquakes. To minimize the effect of such uneven settlement of soils, the effect of diaphragm walls embedded 4m deep in sub-soils of houses are numerically examined. The effect of the wall, namely kinematic soil-wall interaction effect, is uniquely described as a function of the ratio between representative lengths of the diaphragm wall and spatial variation of uneven soil settlement. Effects of non-linearity of soils and separation between the wall and the surrounding soils are also examined.