

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号： 14101  
 研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2010 ～ 2012  
 課題番号： 22560584  
 研究課題名 (和文) 地下構造物の非定常熱負荷の線形近似予測手法と熱性能評価指標の開発  
 研究課題名 (英文) Development of the linear approximation prediction method of transient heat load of underground structures and a heat performance index

## 研究代表者

永井 久也 (NAGAI HISAYA)  
 三重大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号： 40283402

研究成果の概要 (和文) : 地下構造物の空調熱負荷を精度良く予測する実用的手法は確立されておらず、一般建築物としての地下構造物の利用は進んでいない。そこで本研究では、一般の住宅規模の地下構造物を対象に、利用可能な簡易かつ精度の高い地下構造物空調熱負荷計算手法の開発を実施した。具体的には煩雑かつ冗長な計算時間を有する非線形熱水分同時移動モデルによる予測精度をフィールド実験実測と比較しその精度を確認し、この結果を用いて線形近似的に負荷予測する手法を開発した。

研究成果の概要 (英文) : This study was conducted to establish a predictable method for a heat load of an underground structure with sufficient accuracy. In this study, the authors developed the simple load calculation technique, using a linearized approximation indicial response of the inner surface heat flux in a basement to outdoor air temperature change. In addition, the approximation indicial responses for each part of the single walled concrete drawn using this technique were arranged. The heat load calculation example of application to the basement of the optional size by this technique was shown.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：建築環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：熱環境、地下構造物、簡易空調負荷算定法、線形近似、熱水分同時移動

## 1. 研究開始当初の背景

都市の土地有効利用や地下空間の持つ有効な特性の利用といった観点から多くの利点を持つ地下室について目を向けると、平成 6 年の建築基準法改正により住宅地下室が居室空間として認められたにもかかわらず、その省エネルギー性能の基準はもとより、その評価方法すら確立されていないのが現状で

ある。これは、一般の建物と異なり、地下室はその周辺環境が空気（流体）ではなく、熱容量の極めて大きな地盤（固体）であり、一般の建築部位の熱性能（断熱性能）評価に用いられる定常概念に基づく熱貫流率をそのまま適用できないことがその理由の一つと言えよう。さらに、地盤は一般に水分を比較的多く含む多孔質体であり、その含有水分は

その物性に大きな影響を与え、降雨や地下水等の直接的な影響を受け、その物性の変化は極めて大きく、通常の建築物の冷暖房負荷計算で用いられている単純熱伝理論によるモデルを用いてその年間熱負荷予測を行うことも困難である。

## 2. 研究の目的

本研究は、上述の観点から実用的かつ精度の高い実用的予測手法の開発を目指すものである。筆者らは、これまで、戸建住宅規模程度の比較的表層に近い部分にある地下空間を対象として、フィールド実験・実測を行い、自然条件下、室内一定温度条件下での地下室およびその周辺地盤の熱・水分性状に関する解析を行って来た。そして、非線形熱水分同時移動理論に基づく地下空間の熱負荷予測は、極めて高い精度でその予測が可能であること等を明らかにしてきた。しかしながら、降雨、日射等の全ての外界条件下での本予測法は、その非線形性に起因して、極めて冗長な数値計算によらねばならず、実用性の面で大きな問題が残されている。そこで本研究では、これまでに得られている知見を基に、地下空間の実用的熱負荷算定手法の開発することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究においては、これまで実施してきた三重大学構内の実験地下室を用いた実負荷計測および非線形熱水分同時理論解析の結果を基に、主に以下の2項目について検討を行った。

### (1) 非線形熱水分同時移動モデルの線形近似化とその予測精度とその適用範囲の検討

これまでに、三重大学敷地内の実験地下室を用いたフィールド実験およびその理論数値解析により、日射、降雨等の自然条件下での暖房時地下室およびその周辺地盤の熱水分性状を明らかにし、非線形熱水分同時移動モデルにより極めて高い精度で地下室内外の熱水分場が予測可能であることを明らかにしてきた。しかしながら、本モデルは、近年の劇的な計算機能力の向上にもかかわらず、極めて冗長な計算時間が必要となり、実用的な面で大きな課題を抱えている。そこで、これまでに得られている知見を基に、非線形モデルの線形近似予測手法の検討・開発を行う。具体的には、非線形理論モデルを用いて降雨、日射等の外乱影響下での地下室室内熱流の各種外乱に対する単位応答を数値的に求め、これらの時変性の有無を確認し、この結果から、各種外乱に対する近似単位応答を決定する。そして、この単位応答を用いた一般性・汎用性の高い地下室熱負荷予測手法を確立する。

### (2) 壁体構造別、部位別の近似単位応答の整

理とそれらの予測精度の検証

(1)の検討により、自然外界条件下での地下室室内熱負荷を線形近似的に予測する本手法の精度および適用範囲が明らかとなれば、拡張アメダス等の汎用気象データを用いて任意の地域での、地下室の非定常空調負荷を従来の地上建物と同様方法・演算時間で予測することが可能となる。しかしながら、上記(1)での検討は、あくまでもコンクリート単層壁で構成される完全埋設型の小規模実験地下室を対象としたものであり、また、線形単純熱伝導のように理論的に解を求める手法ではないため、実用的観点からは、断熱材等を含む各種壁体構造別、部位別の近似単位応答を同様の方法により整理し、これらを提示しておく必要がある。そこで、ここでは、幾つかの一般的な壁体構成を対象とした数値計算により、部位別の近似単位応答を算出すると共にその精度検証を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 地下構造物全体の貫流熱負荷予測手法

対象とする系が線形、時不変である場合の任意の励振と応答はディラメルの定理で表現され、Inpluse 関数あるいは Dirac のデルタ関数に対する系の応答である重み関数を  $h_\phi(t)$  とすれば、任意の外乱  $\Theta(t)$  に対する応答  $q(t)$  は次式で表現される。

$$q(t) = \int_0^{\infty} h_\phi(\tau)\Theta(t-\tau)d\tau = \int_0^{\infty} h_\phi(t-\tau)\Theta(\tau)d\tau \quad (a)$$

本研究で対象とする系は非線形熱水分同時移動系であるので、重み関数  $h_\phi(t)$  は時変系であり、また線形系のように論理的に求めることはできず、上式を用いて任意の外乱に対する地下室表面熱流を求めることは極めて困難となる。しかしながら、各種外乱の励振に対する重み関数（単位応答の導関数）の時変性が極めて小さく、これを近似的に時不変として取り扱うことが可能であれば、線形近似的に関数表現した単位応答を用いて上式により各種外乱に対する応答を求めることが可能となる。

そこで、本研究では、各種外界条件変化の中でその応答が最も大きい外温変化に対する地下室表面顕熱流に対する単位応答を非線形熱水分同時移動基礎方程式による数値計算により算出し、その時変性の程度について検討を行った。

図1に東京における基準外気温が3月、6月、9月、12月のそれぞれ1日0時に単位変化した場合の、地下室表面顕熱流の単位応答の平均値を示す。図に示すように、単位応答の時変性は小さく、概ね一つの曲線で近似可能と言えよう。以下に図1の各単位応答の平均値から指数項3項で近似した外気温変化に対する地下室表面平均顕熱流単位応答

の近似関数を示す。

$$\phi(t) = 1.18 - 0.75e^{-0.00022t} + 0.27e^{-0.00034t} - 0.70e^{-0.0043t} \quad (b)$$

t : hour

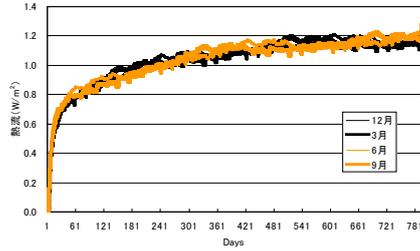


図1 外気温変化に対する地下室内表面熱流の単位応答

上式(b)の外気温変化に対する地下室内表面顕熱流の近似単位応答を用いて東京の気象条件下での地下室貫流負荷を算出した。なお、ここでは通常の負荷計算同様に離散的に得られている外乱(各種外界気象データ)に対する適用を考え、上式の近似単位応答から二等辺三角波による応答係数を算出し応答係数法により、外気温との畳み込み演算を行った。結果を非線形熱水分同時移動方程式による非線形解(以降、正確解と称す)と共に図2に示す。また、同時に比較のため単純熱伝導計算による線形解も示す。ただし、この単純熱伝導計算は既往の検討結果から正確解に最も近い解が得られる計算条件を用いた結果である。図に示すように、応答係数法による地下室表面顕熱流は、降雨量が多く土壌内部状態量の非線形性が比較的大きく、また地表面での水分蒸発量が大きくなる夏場を除けば年間を通して概ね予測できており、物性値等をチューニングした単純熱伝導解より精度が高いことが判る。

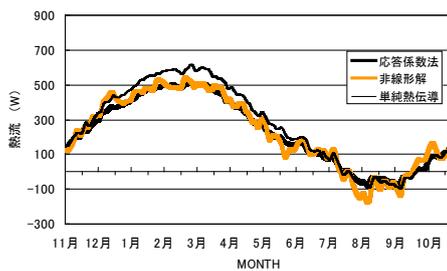


図2 基準気象条件下(東京)における地下室表面熱流の比較

## (2) 一般予測手法の開発

(1)では、実験を行った完全埋設型実験地下室での実測結果を対象にその全貫流熱負荷の年変動を簡易かつ詳細に予測手法を検討・提案し、その予測精度が非常に高いことを示した。ここでは、この手法により一般的な形状、任意の規模の地下構造の年間の貫流

熱負荷を予測する手法の検討を行った。具体的には、(1)と同様の手法で各部位ごとの線形近似単位応答を算出し、これらを用いて任意形状、規模の地下構造の負荷予測の精度を検証した。図3に対象とした上部に地上建築を有する一般的な地下室を、図4に算出した壁体部位を示す。また式(c)~(i)に各部位別に算出した外気温変化に対する地下室壁体貫流熱の線形近似単位応答を示す。

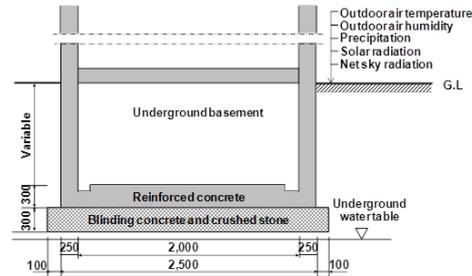


図3 対象とした一般形状の地下構造物

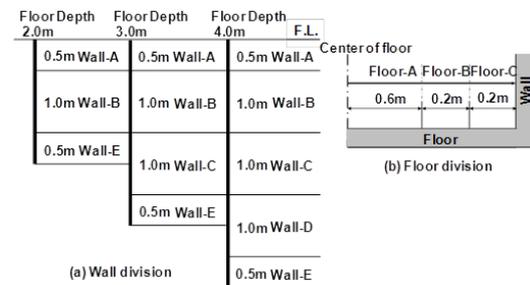


図4 算出した線形近似単位応答の部位

### WallA

$$\phi(t) = 2.12 - 1.04e^{-0.00015t} + 0.94e^{-0.00017t} - 1.58e^{-0.0129t} \quad (c)$$

### WallB

$$\phi(t) = 1.26 - 0.64e^{-0.00024t} + 0.4e^{-0.000244t} - 1.10e^{-0.0072t} \quad (d)$$

### WallC,D

$$\phi(t) = 0.90 - 0.42e^{-0.00020t} + 0.026e^{-0.00049t} - 0.58e^{-0.0031t} \quad (e)$$

### WallE

$$\phi(t) = 1.05 - 1.22e^{-0.00023t} + 0.44e^{-0.00037t} - 0.34e^{-0.0022t} \quad (f)$$

### FloorA

$$\phi(t) = 0.74 - 1.52e^{-0.00025t} + 0.79e^{-0.00040t} - 0.024e^{-0.0030t} \quad (g)$$

### FloorB

$$\phi(t) = 0.86 - 1.11e^{-0.00023t} + 0.28e^{-0.00067t} - 0.032e^{-0.0061t} \quad (h)$$

### FloorC

$$\phi(t) = 1.09 - 1.30e^{-0.00020t} + 0.25e^{-0.00028t} - 0.03e^{-0.0043t} \quad (i)$$

t : hour

上記の線形近似単位応答および外気温(東京)を用いて、埋設深さの異なる地下室の年間の壁体貫流負荷を算出し、非線形熱水分同時移動方程式による正確解と比較した。図5~7に地下室床位置がGL-2.0m、-3.0m、-4.0mである地下室の壁体貫流負荷の比較を示す。図に示すように、地下室の深さ2m~4mのいずれの場合も、線形近似単位応答を用いた簡易線形近似解は、冗長な計算時間を有する非線形正確解を十分な精度で予測できている。

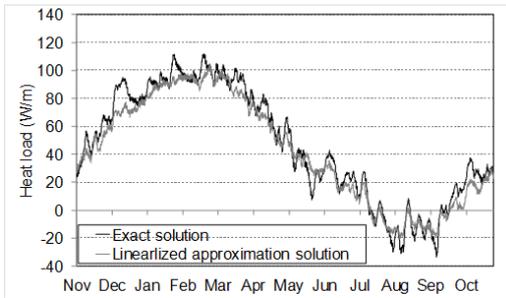


図5 地下室の貫流負荷比較 (GL-2.0m)



図6 地下室の貫流負荷比較 (GL-3.0m)

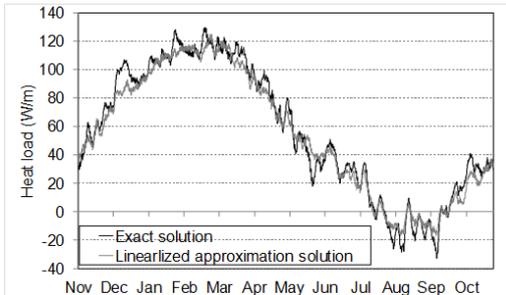


図7 地下室の貫流負荷比較 (GL-3.0m)

以上、本研究の成果により、地表面近傍の比較的浅い一般的な住宅規模程度の地下構造物であれば、非常に簡易かつ短時間で極めて精度良く地下構造物の空調熱負荷の算出が可能となった。なお、ここで対象とした地下構造物の年間負荷予測時間は、従来の冗長かつ煩雑である非線形熱水分同時移動による予測は通常のパーソナルコンピュータで数十時間のオーダーであったが、本手法により数秒程度で算出することが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Park, K.-S., Kitano, H., Nagai, H., A Study on Simple Prediction Method of Heat Load, A Using Linear Approximation Indicial Response in Basements, Journal of Civil Engineering and Architecture, 査読有り, ISSN 1934-7359, USA, 2013 (採用決定、掲載号・月等未定)

〔学会発表〕(計6件)

- ① Park, K.-S., Kitano, H., Nagai, H., A Study on Simple Calculation Method of

Heat Load a Using Linear Approximation Indicial Response in Underground Structures, International Building Physics Conference (IBPC2012), 査読有り, Proceedings, 2012, pp.1185-1190

- ② 水上裕士、永井久也、北野博亮、地下構造物の簡易熱負荷予測手法に関する研究その2. 一般形状地下室の部位別貫流単位応答、日本建築学会東海支部研究報告集、査読無し、第50号、2012、pp. 401-404
- ③ 水上裕士、永井久也、北野博亮、線形近似単位応答を用いた地下構造物の簡易熱負計算手法に関する研究 その1. コンクリート単層壁の部位別近似単位応答、日本建築学会大会、学術講演梗概集、査読無し、D-2、2011、pp. 349-350
- ④ 水上裕士、永井久也、北野博亮、線形近似単位応答を用いた地下構造物の熱負荷予測手法、空気調和衛生工学会中部支部学術研究発表会、査読無し、第12号、2011、pp. 149-153
- ⑤ 水上裕士、永井久也、北野博亮、地下構造物の簡易熱負荷予測手法に関する研究その1. 部位別の地下室貫流単位応答、日本建築学会東海支部研究報告集、査読無し、第49号、2011、pp. 321-324
- ⑥ 水上裕士、永井久也、地下構造物の壁体貫流熱負荷の線形近似予測手法に関する研究、日本建築学会大会、学術講演梗概集、査読無し、D-2、2010、pp. 291-292

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)  
○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永井 久也 (NAGAI HISAYA)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 40283402

### (2) 研究分担者

小椋 大輔 (OGURA DAISUKE)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号： 60283868

(H22→H23：研究協力者)

北野 博亮 (KITANO HIROAKI)

三重大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号： 80293801